

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

## Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen - Teil 2

- **Aufbau eines Versuchslabors mit Schleuse in Anlehnung an ein mikrobiologisches bzw. gentechnisches Labor der Sicherheitsstufe S3**
- **Strömungstechnische Untersuchungen**
- **Brandrauchanalyse mit FTIR**
- **Brand- und Löschversuche mit Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel**

von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

# 160

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER  
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-  
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 160

**Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen - Teil 2**

- **Aufbau eines Versuchslabors mit Schleuse in Anlehnung an ein mikrobiologisches bzw. gentechnisches Labor der Sicherheitsstufe S3**
- **Strömungstechnische Untersuchungen**
- **Brandrauchanalyse mit FTIR**
- **Brand- und Löschversuche mit Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel**

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

November 2012

## BERICHTSKENNBLATT

<b>Nummer des Berichtes:</b>  160	<b>Titel des Berichtes:</b> <b>Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen - Teil 2</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufbau eines Versuchslabors mit Schleuse in Anlehnung an ein mikrobiologisches bzw. gentechnisches Labor der Sicherheitsstufe S3</li> <li>• Strömungstechnische Untersuchungen</li> <li>• Brandrauchanalyse mit FTIR</li> <li>• Brand- und Löschversuche mit Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel</li> </ul>	<b>ISSN:</b>  0170-0060	
<b>Autor:</b>  Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann	<b>durchführende Institution:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe		
<b>Nummer des Auftrages:</b> FA. Nr. 208 (3/2008) und 212 (3/2009)	<b>auftraggebende Institution:</b> Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
<b>Abschlussdatum:</b> November 2012			
<b>Seitenzahl:</b> 221	<b>Bilder:</b> 117	<b>Tabellen:</b> 48	<b>Literaturverweise:</b> 27
<b>Kurzfassung:</b> <p>In der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkung sowie die Brandbekämpfung eines Entstehungsbrandes in einem mikrobiologischen bzw. gentechnischen Labor der höchsten Sicherheitsstufen S3 und S4 untersucht. Die Auslösung von Löschanlagen in Laboren, Tierhaltungsräumen und Produktionsbereichen mit diesen Sicherheitsstufen kann im Brandfall und im Fall der Fehlauflösung zu kritischen Zuständen mit erheblicher Rückwirkung auf die Gewährleistung der Aufrechterhaltung der für mikrobiologische und gentechnische Bereiche dieser Sicherheitsstufen erforderlichen Betriebsbedingungen führen. Insbesondere muss die Aufrechterhaltung des Unterdrucks unter allen Umständen wegen der größtenteils hochgefährlichen Krankheitserreger gewährleistet werden. Zur Untersuchung der Einflussgrößen war es erforderlich, strömungstechnische Untersuchungen sowie Brand- und Löschversuche in einer an realen Laboren orientierten Versuchsanordnung mit praxisnahen Bedingungen durchzuführen.</p> <p>In Vorversuchen wurden verschiedene Brandlasten (Tierkäfigschalen aus verschiedenen Materialien, Streu etc.) in einer kleinen Brandkammer einer Brandrauchanalyse mit FTIR-Messtechnik unterzogen. Hierbei wurden für die analysierten Substanzen neben den maximal gemessenen Konzentrationen die Arbeitsplatzgrenzwerte, die Einsatztoleranzwerte, die Dichte, die Flammpunkte, die Zündtemperatur sowie die untere und obere Explosionsgrenze ermittelt. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits bei einer kleinen Brandlast relativ große Schadstoffmengen entstehen. Diese Kennwerte können in Verbindung mit den gemessenen Konzentrationen zur Beurteilung der Toxizität des Brandrauches und der evtl. Gefährdung durch eine Rauchgasdurchzündung / Rollover bzw. Backdraft in einem relativ dichten Raum herangezogen werden.</p> <p>Im Hauptteil der Untersuchungen wurden die Eigenschaften unterschiedlicher Brandmeldetechnik und ortsfester Löschanlagen (Schwerpunkt Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebellöschanlagen) im Hinblick auf die zuverlässige Branddetektion, die Löschwirkung entsprechend der vorhandenen Brandlasten, die erforderliche Löschmittelmenge im Hinblick auf die Löschmittelrückhaltung und Inaktivierung des ggf. mit Organismen kontaminierten Löschmittels sowie die Wechselwirkungen des Brandrauches und des Löschmittels mit den Unterdruckbedingungen im Labor und den HEPA / ULPA-Filtern bewertet. Weiterhin wurden die Unterschiede des Einflusses der Ablufführung aus dem Versuchslabor über Öffnungen im Boden- oder Deckenbereich bei Kaltsprüh-, Brand- sowie Brand- und Löschversuchen aufgezeigt.</p> <p>Trotz der einfachen Bauweise des Versuchstandes konnte gezeigt werden, dass die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse auf reale Labore der Sicherheitsstufen S3 und S4 übertragbar sind.</p> <p>Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei S3- und S4- Laboren und -Bereichen eine brandschutztechnische Ausrüstung mit Niederdruck-Wassernebellöschanlagen gegenüber derzeit verfügbaren Hochdruck-Wassernebel- und Gaslöschanlagen empfehlenswert ist.</p>			
<b>Schlagwörter:</b> Genlabore, biologische Gefährdung, biologische Sicherheit, Sicherheitsstufen, Brand- und Rauchausbreitung, Branddetektion, Löschanlagen, Hochdruck- und Niederdruck-Wassernebel, Sichtverhältnisse, Brandrauchanalyse, FTIR			

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>I</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>X</b>
<b>1. VORWORT</b>	<b>1</b>
<b>2. ERMITTLUNG DES GEFÄHRDUNGSPOTENTIALS</b>	<b>4</b>
2.1. Brandlastermittlung	4
2.2. Einsatz von Löschmitteln in S3- und S4-Bereichen	5
<b>3. AUFBAU DES VERSUCHSRAUMES</b>	<b>7</b>
3.1. Allgemeines	7
3.2. Konstruktion des Versuchsraumes	7
3.3. Lüftungstechnik	24
3.4. Wasserförderung	25
3.4.1. Messstellenbeschreibung	25
3.4.2. Niederdruck-Wassernebellöschanlage	26
3.4.3. Hochdruck-Wassernebellöschanlage	27
3.5. Mess- und Videotechnik	28
3.5.1. Messgeräte und Messstellenpositionen	28
3.5.2. Messwerterfassung	42
3.5.3. Videoaufzeichnung	43
3.6. Brandmeldung	44
3.7. Zündung der Brandstoffe - Zündquellen	46
<b>4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG</b>	<b>47</b>
4.1. Vorversuche	47
4.1.1. Brandrauchanalyse mit FTIR bei der Verbrennung von Tierkäfigschalen für Mäuse in einer Brandkammer	47
4.1.2. Bestimmung des Volumenstroms der eingesetzten Löschdüsen in Abhängigkeit vom Betriebsdruck	49
4.1.3. Druck- und Strömungsverhältnissen in Laborraum und Schleuse bei verschiedenen Ventilationsbedingungen	49
4.1.4. Versuche mit Disconebel	50
4.2. Brandversuche ohne Löscheinsatz	50
4.3. Löschversuche ohne Brand	51
4.4. Brand- und Löschversuche	53

<b>5. MESSERGEBNISSE</b>	<b>54</b>
5.1. Vorversuche	54
5.1.1. Brandrauchanalyse mit FTIR bei der Erhitzung bzw. Verbrennung von Tierkäfigschalen für Mäuse	54
A Materialprobe aus Polycarbonat (PC, V16)	65
B Materialprobe aus Polysulfon (PSU, V17)	67
C Materialprobe aus Polyphenylsulfon (PPSU, V18)	68
D Käfigschale aus Polysulfon (PSU) mit Holzspänen (V10)	70
E Käfigschale aus Polyphenylsulfon (PPSU) mit Weizenstroh (V11)	72
F Käfigschale aus Polycarbonat (PC) mit Wiesenheu (V12)	74
G Käfigschale aus Polysulfon (PSU) mit Wiesenheu (V13)	76
H Verbrennung PSU – Käfigschale mit 25 g Weizenstroh (V14)	78
I Behälter aus Polypropylen (PP, V15)	80
5.1.2. Bestimmung des Volumenstroms der eingesetzten Löschdüsen in Abhängigkeit vom Betriebsdruck	82
5.1.3. Druck- und Strömungsverhältnisse in Laborraum und Schleuse bei verschiedenen Ventilationsbedingungen	82
5.1.4. Versuche mit Disconebel	85
5.2. Brandversuche ohne Löscheinsatz	91
A Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu - Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich, Zuluft im Deckenbereich (Versuch Br1)	93
B Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu - Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich (Versuch Br2)	105
5.3. Kaltsprühversuche mit Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel ohne Brandeinfluss	115
A Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich (Versuch L1)	117
B Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich (Versuch L2)	124
C Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich (Versuch L3)	130
D Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich (Versuch L4)	136
5.4. Brand- und Löschversuche	142
A Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich – Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu (Versuch BrL1)	144
B Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich – Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu (Versuch BrL2)	155
C Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich – Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu (Versuch BrL3)	166

D Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich - Holzkrippe (Versuch BrL4)	176
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>191</b>
<b>7. LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>199</b>

#### **Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen**

**Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.**

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

- Abbildung 1:* Kombination zweier fahrbarer Racks mit je 160 Tierkäfigboxen (Tecniplast [2012]. 4
- Abbildung 2:* Brandkammer zur Durchführung von Kleinbrandversuchen-Brandrauchanalyse mit Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer (FTIR). (Bemerkung: Rechts im Bild eine nicht zum Versuchsaufbau gehörende Gasstrahlerwand.). 8
- Abbildung 3:* FTIR-Gasanalysator (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer) mit EDV- Messdatenerfassung (Bild links) sowie beheiztem Probenahmesystem (Bild rechts). (Bemerkung: Im Bildhintergrund nicht zum Versuch gehörende, zwischengelagerte Baustoffe.). 8
- Abbildung 4:* Versuchslabor in Anlehnung an ein S3-Labor mit Schleuse (Prinzipiskizze) mit Abmessungen, Lüftungsleitungen (orange) und Löschwasserleitung (blau). Messstellenpositionen sowie Positionen von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern, (Koordinatensystem (grün) gemäß Messstellenliste). 9
- Abbildung 5:* Versuchslabor Schnitt A – A mit Lüftungsöffnungen. 9
- Abbildung 6:* Versuchslabor – Bauphase: Lüftungskanäle (Blechflachkanal und Kanalrundrohre (KG-Rohre)). 10
- Abbildung 7:* Versuchslabor – Bauphase: Lüftungskanäle und verklebte Dampfsperrfolie zur Abdichtung vor der Holzkonstruktion. 10
- Abbildung 8:* Versuchslabor – Bauphase: Holzverkleidung (OSB-Platten) über der Dampfsperrfolie. 11
- Abbildung 9:* Bauphase: Versiegelung der OSB-Platten gegen das Eindringen von Feuchtigkeit, statische Differenzdruckmessstellen (Bild links: 20 cm über dem Boden, halbe Raumhöhe und 20 cm unter der Decke). 11
- Abbildung 10:* Versuchsraum - Eingangstür mit Beobachtungsfenster , Lüftungsöffnungen oben rechts an der Decke und unten rechts (nach Fertigstellung des Versuchsstandes). 12
- Abbildung 11:* Versuchslabor – Niederdruck- Wassernebeldüse und Hochdruck-Wassernebelprühkopf, Indikatorsprinkler, Rauchmelder, Laser-Rauchdichtemesstrecken (jeweils links im Bild in 3 Höhen), Tisch mit Brandlast (Käfigschale mit Streu), je 2 Regenmesser auf Stativ und im Bodenbereich (Bildmitte und rechts hinten), Lüftungsöffnungen (Decke zentral: 2 Stück sowie links hinten oben, rechts hinten oben und rechts hinten unten), zusätzliche Folienauskleidung im Boden- und Wandbereich zur Löschwasserrückhaltung. 12

- Abbildung 12:* Versuchslabor – Decke zentral: Lüftungsöffnungen (2 Stück), Niederdruck- Wassernebeldüse (Bild Mitte) und Hochdruck-Wassernebelprühkopf (Bild rechts), Indikatorsprinkler (Bild links), Rauchmelder (Bild vorne Mitte). 13
- Abbildung 13:* Eingangstür in das Versuchslabor und in die Schleuse (Folie zur Löschwasserrückhaltung), im Vordergrund Regenmesser auf Stativ (=>Messung der volumetrischen Wasserbeaufschlagung), Laser-Rauchdichtemesstrecke auf Stativ, Lüftungsöffnung sowie Rauchmelder und Indikatorsprinkler in der Ecke links oben. 13
- Abbildung 14:* Kalibrierung der Laser-Rauchdichtemesstrecken gegen Maurer-Lichtmessgerät Typ ME 82. 14
- Abbildung 15:* Brandlasten: Käfigschalen für Mäuse (Bild links oben: links: Polycarbonat (PC), Mitte: Polyphenylsulfon (PPSU), rechts: Polysulfon (PSU), verschiedene Einstreumaterialien, PP-Behälter. 14
- Abbildung 16:* Brandlast: Käfigschale aus Polycarbonat (PC) mit Tierstreu, Wärmestrahler (Keramikstrahler als Zündquelle (linke Seite der Käfigschale), Bild oben), Weitere Zündquellen: Propankleinbrenner (Bild links unten) und PKW-Zigarettenanzünder (Bild rechts unten). 15
- Abbildung 17:* Versuchslabor - Brandlast: Holzkrippe, Zündquelle: mit Spiritus getränkter Holzweichfaserstreifen, wasserdichte Actionkamera zur Versuchsdokumentation. 15
- Abbildung 18:* Schleuse – Eingangstür, Zuluft über KG-Rohr (Bild links: links unten), Tür in das Versuchslabor (Bild rechts, Türspalte und Schlüsselloch mit Klebeband abgedichtet), Rauchmelder zentral an der Decke. 16
- Abbildung 19:* Schleuse, Zuluft (Bild links unten) und Abluft (Bild rechts oben sowie Detailaufnahmerechts) über KG-Rohr. 16
- Abbildung 20:* Schleuse – statische Differenzdruckmessung (Bild Mitte), Zuluftöffnung (Bild links unten). 17
- Abbildung 21:* Löschwasserzuführung zum Versuchslabor (Niederdruck-Wasserversorgung), Lüftungsleitungen (Zusammenführung von Abluft aus Labor und Schleuse in Steigrohr zur Absaugung durch die Rauchreinigungsanlage), Gehäuse (grau) einer Rückstauverschlussklappe mit unterer Rauchansaugsystem (RAS)-Messstelle und Rückführleitung (schwarze Rohre, Bild rechts: Ansaugöffnungen). 17
- Abbildung 22:* Anschluss des Lüftungssystems an die Rauchreinigungsanlage der Brandversuchshalle, mit Absperriklappe. 18

<i>Abbildung 23:</i> Messung von Temperatur, dynamischem Druck, relativer Luftfeuchtigkeit sowie RAS-Messstelle im Abluftkanal im Treppenraum oberste Etage.	18
<i>Abbildung 24:</i> Löschwasserversorgung (Niederdruck) über Kreiselpumpe (nicht im Bild) zum Versuchslabor mit magnetisch induktivem Durchflussmesser (blau) und nachgeschaltetem piezoresistiven Druckmessumformer.	19
<i>Abbildung 25:</i> Löschwasserversorgung für Hochdruck-Wassernebellöschanlage (Hochdruckpumpe).	19
<i>Abbildung 26:</i> Messtechnik und Messdatenerfassung mit EDV, Anzeigetableaus und Messumformer für Temperatur, Rauchmelder, RAS (Melderkasten), Manometer für Indicatorsprinkler, Messumformer für Temperaturen, relative Luftfeuchtigkeit, statischer und dynamischer Druck, Regenmesser.	20
<i>Abbildung 27:</i> Einführung der Messleitungen und einer Lüftungsleitung in das Versuchslabor.	20
<i>Abbildung 28:</i> Bild links: Rauchansaugsystem (RAS): Melderkasten mit zwei Rauchsensor-Kammern (rechts im Bild, Ansaugöffnungen am Melderkasten unten), Anzeigetableau für Rauchmelder (LEDs, links im Bild), Manometer für Indicatorsprinkler (links im Bild), relative Luftfeuchtigkeit (Bild Mitte), Regenmesser (Bild Mitte oben), Bild rechts: Hilfslüfter in der Rückführleitung am Luftaustritt des RAS (oben am Melderkasten).	21
<i>Abbildung 29:</i> Messung von Temperatur, dynamischem Druck und relativer Luftfeuchtigkeit im Lüftungskanal.	21
<i>Abbildung 30:</i> Messung der Kohlenstoffdioxid-, Kohlenstoffmonoxid- und Sauerstoffkonzentration im Versuchslabor mit kontinuierlich messenden Gasanalysatoren.	22
<i>Abbildung 31:</i> Fließbild der Niederdruck-Wassernebellöschanlage.	26
<i>Abbildung 32:</i> Hochdruck-Wassernebellöschanlage.	27
<i>Abbildung 33:</i> Messstellen innerhalb des Versuchslabors mit Schleuse	28
<i>Abbildung 34:</i> Messstellen der Lüftungsanlage	29
<i>Abbildung 35:</i> Schmelzender PC-Probekörper bei der Erhitzung mit Keramikstrahler (V16).	65
<i>Abbildung 36:</i> PC-Probekörper nach Versuchsende (V16).	66
<i>Abbildung 37:</i> Konzentration von CO, NO <sub>2</sub> und Benzol bei der Erhitzung von PC (V16).	66

<i>Abbildung 38:</i> Konzentration von CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> und Benzol bei der Erhitzung von PSU (V17).	67
<i>Abbildung 39:</i> PSU-Probekörper nach Versuchsende (V17).	68
<i>Abbildung 40:</i> Konzentration von CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> und Benzol bei der Erhitzung von PPSU (V18).	69
<i>Abbildung 41:</i> PPSU-Probekörper nach Versuchsende (V18).	69
<i>Abbildung 42:</i> Brandverlauf der PSU – Käfigschale mit Holzspänen (V10).	70
<i>Abbildung 43:</i> PSU-Käfigschale im Frontbereich nach Brandbeaufschlagung (V10).	70
<i>Abbildung 44:</i> Konzentration von CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V10 (Käfigschale aus PSU mit Holzspänen).	71
<i>Abbildung 45:</i> PPSU-Käfigschale im Frontbereich mit Weizenstroh bei Beaufschlagung mit Wärmestrahler (V11).	72
<i>Abbildung 46:</i> PPSU-Käfigschale im Innenbereich mit Weizenstroh nach Brandbeaufschlagung (V11).	72
<i>Abbildung 47:</i> Konzentration von CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V11 (Käfigschale aus PPSU mit Weizenstroh).	73
<i>Abbildung 48:</i> PC-Käfigschale im Frontbereich mit Wiesenheu nach Brandbeaufschlagung.	74
<i>Abbildung 49:</i> Konzentrationen von CO, NO <sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V12 (Käfigschale aus PC mit Wiesenheu).	75
<i>Abbildung 50:</i> PC-Käfigschale im Frontbereich mit Wiesenheu nach Brandbeaufschlagung (V13).	76
<i>Abbildung 51:</i> Konzentration von CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V13 (Käfigschale aus PSU mit Wiesenheu).	77
<i>Abbildung 52:</i> PSU-Käfigschale während des Brandversuchs (V14).	78
<i>Abbildung 53:</i> PSU-Käfigschale im Frontbereich mit Weizenstroh nach Brandbeaufschlagung (V14).	78
<i>Abbildung 54:</i> Konzentration von CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V14 (Käfigschale aus PSU mit Weizenstroh).	79
<i>Abbildung 55:</i> Schmelze des PP-Behälters brennt.	80
<i>Abbildung 56:</i> Lachenbrand des PP-Behälters.	80
<i>Abbildung 57:</i> Konzentrationen von CO, NO <sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V15 (Behälter aus Polypropylen).	81

---

<i>Abbildung 58:</i> Ausstoß der Nebelmaschine in Richtung Versuchslabor Mitte.	85
<i>Abbildung 59:</i> Ansprechzeiten der Rauchmelder bei Versuch DN1 mit Disconebel	88
<i>Abbildung 60:</i> Zeitlicher Verlauf der Transmission bei Versuch DN1 mit Disconebel.	89
<i>Abbildung 61:</i> Relative Luftfeuchtigkeit bei Versuch DN1 mit Disconebel.	90
<i>Abbildung 62:</i> Versuch Br1- <i>Versuchsablauf</i> mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.	96
<i>Abbildung 63:</i> Versuch Br1 - Druckverlauf im Versuchslabor mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.	97
<i>Abbildung 64:</i> Versuch Br1 -Temperaturverläufe im Versuchslabor mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.	97
<i>Abbildung 65:</i> Versuch Br1 -Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.	98
<i>Abbildung 66:</i> Versuch Br1 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen mit Absaugung im Bodenbereich.	100
<i>Abbildung 67:</i> Versuch Br1 - Transmission bei Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.	103
<i>Abbildung 68:</i> Versuch Br2 – <i>Versuchsablauf</i>	108
<i>Abbildung 69:</i> Versuch Br2 - Druckverlauf im Versuchslabor mit Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.	109
<i>Abbildung 70:</i> Versuch Br2 -Temperaturverläufe im Versuchslabor mit Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.	109
<i>Abbildung 71:</i> Versuch Br2 - Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen mit Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.	110
<i>Abbildung 72:</i> Versuch Br2 - Transmission bei Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.	112
<i>Abbildung 73:</i> Versuch Br2 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen bei Absaugung im Bodenbereich.	113
<i>Abbildung 74:</i> Versuch L1 - Druckverlauf im Versuchslabor während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	118
<i>Abbildung 75:</i> Versuch L1 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	118

<i>Abbildung 76:</i> Versuch L1 - Transmission während des Sprühens mit Hochdruck-Wassernebel-löschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	119
<i>Abbildung 77:</i> Versuch L1 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebel-Sprühkopf und Abluftöffnung im Bodenbereich.	120
<i>Abbildung 78:</i> Versuch L1 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	121
<i>Abbildung 79:</i> Versuch L2 - Druckverlauf im Raum während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	125
<i>Abbildung 80:</i> Versuch L2 - Temperaturverlauf im Raum während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	125
<i>Abbildung 81:</i> Versuch L2 - Transmission während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	126
<i>Abbildung 82:</i> Versuch L2 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebel-Sprühkopf und Abluftöffnung im Deckenbereich.	127
<i>Abbildung 83:</i> Versuch L2 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	128
<i>Abbildung 84:</i> Versuch L3 - Druckverlauf im Versuchslabor während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	131
<i>Abbildung 85:</i> Versuch L3 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	131
<i>Abbildung 86:</i> Versuch L3 - Transmission während des Sprühens mit Niederdruck- Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	132
<i>Abbildung 87:</i> Versuch L3 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	133
<i>Abbildung 88:</i> Versuch L3 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit	

Niederdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	134
<i>Abbildung 89:</i> Versuch L4 -Druckverlauf im Raum während eines Kalsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage - Abluftöffnung im Deckenbereich.	137
<i>Abbildung 90:</i> Versuch L4 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während eines Kalsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage - Abluftöffnung im Deckenbereich.	137
<i>Abbildung 91:</i> Versuch L4 - Transmission im Versuchslabor während eines Kalsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage - Abluftöffnung im Deckenbereich.	138
<i>Abbildung 92:</i> Versuch L4 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kalsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage - Abluftöffnung im Deckenbereich.	139
<i>Abbildung 93:</i> Versuch L4 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kalsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	140
<i>Abbildung 94:</i> Versuch BrL1 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	147
<i>Abbildung 95:</i> Versuch BrL1 - Druckverlauf im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	149
<i>Abbildung 96:</i> Versuch BrL1- Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	149
<i>Abbildung 97:</i> Versuch BrL1- Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	150
<i>Abbildung 98:</i> Versuch BrL1 - Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	152
<i>Abbildung 99:</i> Versuch BrL1 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	153
<i>Abbildung 100:</i> Versuch BrL2 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	158

<i>Abbildung 101:</i> Versuch BrL2 - Druckverlauf im Raum während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Deckenabluftöffnung.	160
<i>Abbildung 102:</i> Versuch BrL2 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	160
<i>Abbildung 103:</i> Versuch BrL2 - Temperaturverlauf in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	161
<i>Abbildung 104:</i> Versuch BrL2 - Verlauf der Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	163
<i>Abbildung 105:</i> Versuch BrL2 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	164
<i>Abbildung 106:</i> Versuch BrL3 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	169
<i>Abbildung 107:</i> Versuch BrL3 - Druckverlauf im Raum während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	170
<i>Abbildung 108:</i> Versuch BrL3 - Temperaturverlauf im Raum während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	171
<i>Abbildung 109:</i> Versuch BrL3 - Temperaturverlauf in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	171
<i>Abbildung 110:</i> Versuch BrL3 - Verlauf der Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	172
<i>Abbildung 111:</i> Versuch BrL3 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	174
<i>Abbildung 112:</i> Versuch BrL4 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.	181
<i>Abbildung 113:</i> Versuch BrL4 - Druckverlauf während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.	182

- 
- Abbildung 114:* Versuch BrL4 – Temperaturverläufe im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich. 185
- Abbildung 115:* Versuch BrL4 – Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich. 186
- Abbildung 116:* Versuch BrL4 - Verlauf der Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich. 188
- Abbildung 117:* Versuch BrL4 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich. 189

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Beschreibung der verwendeten Abkürzungen in den R&I-Fließbildern nach DIN 19227-1.	25
Tabelle 2: Messstellenliste - Positionsangaben der Messstellen in Versuchslabor und Schleuse	30
Tabelle 3: Messstellenliste - Positionsangaben der Messstellen außerhalb des Versuchslabors	35
Tabelle 4: Kamerapositionen.	43
Tabelle 5: Heizwerte von in den Versuchen verwendeten Materialien.	48
Tabelle 6: Maximale Konzentrationen der mit FTIR analysierten Substanzen mit Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW) und weiteren physikalischen Kennwerten für die Versuche V10 – V18 (Zündquelle: Keramikstrahler).	58
Tabelle 7: Druckverhältnisse, Lüftungssituationen und Gruppierungen (A= Abluft, Z= Zuluft).	84
Tabelle 8: Versuchsbeobachtungen mit Disconebel.	86
Tabelle 9: Versuchsparameter bei den Brandversuchen ohne Löscheinsatz.	92
Tabelle 10: Versuch Br1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)	98
Tabelle 11: Versuch Br1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)	99
Tabelle 12: Versuch Br1 – Relative Luftfeuchtigkeit im Versuchslabor	101
Tabelle 13: Versuch Br1 – Werte für minimale Transmission $\tau$ bzw. max. Extinktionskoeffizient $\sigma$ und max. optische Dichte $OD$ im Versuchslabor.	104
Tabelle 14: Versuch Br2 – Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)	110
Tabelle 15: Versuch Br2 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)	111
Tabelle 16: Versuch Br2 – Werte für minimale Transmission $\tau$ bzw. max. Extinktionskoeffizient $\sigma$ und max. optische Dichte $OD$ im Versuchslabor.	112
Tabelle 17: Versuch Br2 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen	114
Tabelle 18: Kaltsprühversuche ohne Brandeinfluss - Versuchsparameter.	116

Tabelle 19: Versuch L1 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	122
Tabelle 20: Versuch L1 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	123
Tabelle 21: Versuch L2 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	128
Tabelle 22: Versuch L2 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	129
Tabelle 23: Versuch L3 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	134
Tabelle 24: Versuch L3 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	135
Tabelle 25: Versuch L4 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	140
Tabelle 26: Versuch L4 – Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs bei Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.	141
Tabelle 27: Versuchsparameter bei den Brand- und Löschversuchen.	143
Tabelle 28: Versuch BrL1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe) und zugehörige Versuchszeit	150
Tabelle 29: Versuch BrL1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke) und zugehörige Versuchszeit.	151
Tabelle 30: Versuch BrL1 – minimale Transmission $\tau$ bzw. max. Extinktionskoeffizient $\sigma$ und max. optische Dichte $OD$ im Versuchslabor und zugehörige Versuchszeit.	152
Tabelle 31: Versuch BrL1 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen	154
Tabelle 32: Versuch BrL1 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs nach Brandereignis mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.	154
Tabelle 33: Versuch BrL2 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe) und zugehörige Versuchszeit	161

Tabelle 34: Versuch BrL2 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke) und zugehörige Versuchszeit.	162
Tabelle 35: Versuch BrL2 – minimale Transmission $\tau$ bzw. max. Extinktionskoeffizient $\sigma$ und max. optische Dichte $OD$ im Versuchslabor und zugehörige Versuchszeit.	163
Tabelle 36: Versuch BrL2 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen	165
Tabelle 37: Versuch BrL2 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs nach Brandereignis mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.	165
Tabelle 38: Versuch BrL3 – minimale Transmission $\tau$ bzw. max. Extinktionskoeffizient $\sigma$ und max. optische Dichte $OD$ im Versuchslabor.	173
Tabelle 39: Versuch BrL3 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)	173
Tabelle 40: Versuch BrL3 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)	174
Tabelle 41: Versuch BrL3 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen.	175
Tabelle 42: Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs nach Brandereignis bei Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.	175
Tabelle 43: Versuch BrL4 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)	186
Tabelle 44: Versuch BrL4 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)	187
Tabelle 45: Versuch BrL4 – minimale Transmission $\tau$ bzw. max. Extinktionskoeffizient $\sigma$ und max. optische Dichte $OD$ im Versuchslabor.	188
Tabelle 46: Versuch BrL4 - Relative Luftfeuchtigkeit im Versuchslabor	190
Tabelle 47: Versuch BrL4 - Wasserbeaufschlagung während des Brand- und Löscheversuchs mit Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.	190
Tabelle 48: Qualitativer Vergleich von Hochdruck- und Niederdruck-Wassernebel-löschanlagen bei mikrobiologischen und gentechnischen Laboren und Bereichen bezüglich Sicht, Löschwirkung, Wasserbeaufschlagung, Unterdruck im Raum und Luftfeuchtigkeit.	197

# 1. Vorwort

Derzeit bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich der Auslegung von Löschanlagen für mikrobiologische und gentechnische Bereiche wie Labore, Tierhaltungsräume und Produktionsbereiche der höheren Sicherheitsstufen, in denen mit S3- und S4 Organismen (z.B. Bakterien, Viren, Pilze, Parasiten) gearbeitet wird.

Auf die Grundlagen zur Thematik

- Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden - Allgemeine Gefährdungsdarstellung
- Biologische Gefährdung - Besonderheiten in Gebäuden mit mikrobiologischen und gentechnischen Bereichen
- Gesetze und Richtlinien
- Eigenschaften von ortsfesten Löschanlagen (Sprinkler, Wassernebel, Inertgase und andere Löschgase, Sauerstoffreduktion, Halonersatzstoffe)
- Beurteilungskriterien für den Einsatz von ortsfesten Löschanlagen in mikrobiologischen und gentechnischen Bereichen

wurde bereits in Teil 1 der Untersuchungen von Kunkelmann [2010] eingegangen.

Bei Arbeiten in den genannten mikrobiologischen und gentechnischen Bereichen sind eine Freisetzung und Kontamination der Umwelt auf jeden Fall zu verhindern. Um Personen vor den gefährlichen Agenzien zu schützen, gibt es organisatorische und bauliche Sicherheitsmaßnahmen, die durch den Betreiber von bio- und gentechnischen Anlagen zu ergreifen sind.

S3 und S4 Labore werden für den normalen Laborbetrieb mit entsprechenden Lüftungs- und Schwebstoff-Filteranlagen HEPA (High Efficiency Particulate Air)- / ULPA (Ultra Low Penetration Air)- Filter) ausgerüstet.

Die abgestuften Unterdrücke im Containment-Bereich z.B. Tierhaltungen, Labore, Desinfektionsräume, Geräteräume und Schleusen gegenüber der Umgebung müs-

sen unter allen Umständen gewährleistet werden. Die Filteranlage muss durch entsprechende Maßnahmen auch im Brand- und Brandbekämpfungsfall ordnungsgemäß funktionieren und darf hierbei weder durch hohe Temperaturen noch durch Brandrauch oder das Löschmedium in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Die Auslösung sowohl von Wasserlöschanlagen als auch von Gaslöschanlagen führt im Brandfall zu kritischen Zuständen mit erheblicher Rückwirkung auf die Aufrechterhaltung der für diese Labore im Betrieb erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen.

Untersuchungsbedarf ergibt sich aus Besonderheiten in gentechnischen Bereichen, die im Regelbetrieb und im Brandfall teilweise nur bedingt bekannt sind wie:

- aufrechtzuerhaltende spezifische Unterdrücke in Schleusen, Laboren, Tierhaltungen etc.
- unterschiedliche Brandlasten (z.B. brennbare, ggf. auch toxische Chemikalien, Messtechnik, PC, Kühlgeräte, Druckbehälter mit brennbaren und nichtbrennbaren Gasen, Futtermittel, Streu, Kunststoffkäfige etc.) und deren Auswirkung auf das Brandszenario
- Wechselwirkungen des Brandrauches und des Löschmittels mit den Schwebstoff-Filteranlagen (nachteilige Einwirkungen wie erhöhte Temperatur, Feuchte, Ruß)
- unterschiedliche Arten der Branddetektion (Rauch, Wärme, Brandgas)
- kontinuierliche Brandrauchanalytik zur Beurteilung des Brandrauches beim Verschwelen und Verbrennen ausgewählter typischer Stoffe
- Strömungs- und Ventilationsverhältnisse im Labor bei Auslösung der Brandmelde- und Löschanlage
- Wirkungen des Löschmittels und der Löschanlage auf Mensch und Tier, auch bei Fehlauflösung
- Ferner spielen Fragen nach Löschmittelrückhaltung und nach Inaktivierung des kontaminierten Löschmittels eine Rolle.

Zur Beurteilung vorgenannter Einflussparameter sowie des Lüftungstechnischen und sonstigen Systemverhaltens einer Laboranlage es erforderlich, Brand- und Löschanlagenversuche in realitätsnahen bis originalgetreuen Laboranordnungen mit der erforderli-

chen Lüftungstechnik und aus technischer Sicht in Frage kommenden ortsfesten Löschanlagen durchzuführen.

Hierzu wurde eine Versuchsanordnung in Anlehnung an ein Labor der Sicherheitsstufe S3 mit Schleuse errichtet.

Hierbei werden unterschiedliche Szenarien untersucht:

- unentdeckter Entstehungsbrand
- Fehlauslösung der Löschanlage ohne Brand
- Brandbekämpfung eines Entstehungsbrandes.

## 2. Ermittlung des Gefährdungspotentials

### 2.1. Brandlastermittlung

Das Vorhandensein verschiedener Brandlasten und insbesondere deren Menge hängt maßgeblich von der Nutzung des gentechnischen / mikrobiologischen Bereiches ab. Man kann hierbei im Wesentlichen zwischen Laborbereichen, Tierhaltungen, Gewächshäusern und Produktionsbereichen unterscheiden.

In Tierhaltungsräumen ist dabei vor allem mit Einstreu und Futtermitteln, Tierkäfigen aus Kunststoffen wie Polycarbonat (PC), Polysulfon (PSU) und Polyphenylsulfon (PPSU) sowie Flüssigkeitsbehältern z. B. aus Polypropylen zu rechnen. Tierkäfigschalen aus Kunststoffen sind dabei durch unterschiedlich hohe thermische Beständigkeit gekennzeichnet, was bei der betrieblich erforderlichen mehrfachen Autoklavierung und der hieraus resultierenden gewünschten Lebensdauer solcher Käfige eine große Rolle spielt. Je nach Größe der Räume können z. B. bei der Haltung von Kleintieren und Nagern bis zu einigen hundert Stück Tierkäfigschalen in mehreren Racks vorhanden sein, wie Abbildung 1 andeutungsweise zeigt.



Abbildung 1: Kombination zweier fahrbarer Racks mit je 160 Tierkäfigboxen (Tecniplast [2012]).

In Gewächshäusern sind beispielsweise Rankhilfen und die Pflanzen selbst, sowie organische und anorganische Düngemittel, wie Nitrate, vorhanden.

In Produktionsstätten können brennbare Lösemittel in nicht unerheblichen Mengen, große Mengen von Pflanzenresten und auch brennbaren Gasen vorhanden sein.

Da in Laboratorien meist mit Zellkulturen und nur kurzfristig mit Versuchstieren gearbeitet wird, ist davon auszugehen, dass ein Beitrag zur Brandlast durch Tierkäfige und deren Inhalt entsprechend geringer sein wird, als in reinen Tierhaltungsbereichen. Dafür kommen in Laboren Lösemittel, vor allem Aceton und Desinfektionsmittel wie Ethanol, Wasserstoffperoxid und Peressigsäure, dann Papierhandtücher, und im Weiteren elektrische Geräte, wie z. B. Kühlgeräte, Computer, Zentrifugen sowie Messtechnik u. a. vor.

In dieser Arbeit wird vorrangig auf den Laborbereich im Falle eines Entstehungsbrandes eingegangen werden, wobei in den Versuchen angenommen wurde, dass sich die Masse der verbrannten Stoffe überwiegend im Bereich von 20 bis 700 g bewegt.

## **2.2. Einsatz von Löschmitteln in S3- und S4-Bereichen**

Wie die Untersuchungen von Kunkelmann [2010] in Teil 1 bereits gezeigt haben, haben gasförmige bzw. chemische Löschmittel nur eine geringe bis keine Löschwirkung bei tief sitzenden Schwel- und Glut- bzw. Glimmbränden.

Nach Bussenius [1996] können Schwel- und Glimmbrände auch noch bei einer Sauerstoffkonzentration von 2 Vol.-% auftreten.

Gasförmige Löschmittel haben gemeinsam, dass sie im Allgemeinen rückstandsfrei löschen und somit den Betrieb und die weitere Nutzung der Geräte in den Räumen nach einem Ausströmen nur kurzfristig behindern. Allerdings ist diese Aussage bei den Halonersatzstoffen im Hinblick auf eine rückstandsfreie Löschung einzuschränken, da diese in Flammen und an heißen Oberflächen teilweise zerfallen und hierbei ätzende, giftige und korrosive Fluorverbindungen, wie z. B. Fluorwasserstoff, Carbonylfluorid oder Perfluorisobutylen entstehen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Bekämpfung von Schwel- und Glutbränden zu beachten.

In Abhängigkeit des Löschmittels und der Löschmittelkonzentration im Raum ergeben sich weiterhin unterschiedliche Anforderungen an den Personenschutz und an den Schutz von Versuchstieren.

Aufgrund dieser Eigenschaften von gasförmigen und chemischen Löschmitteln sowie den speziellen Anforderungen in S3- und S4- Laboren, wie z. B. Unterdruckhaltung, Vermeidung der Russbeaufschlagung der HEPA / ULPA-Filter sowie ggf. erforderlicher Inaktivierung des austretenden Brandrauch-/ Löschgasaerosols und erheblich eingeschränkter Löschwirkung bei glutbildenden Brandstoffen werden diese Löschmittel bei den hier vorliegenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Brand- und Löschversuchen wurde ausschließlich Wasser in Form von Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel eingesetzt.

## **3. Aufbau des Versuchsraumes**

### **3.1. Allgemeines**

Bei der Konstruktion des Versuchsraumes in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik am KIT galt es, aufgrund begrenzter zur Verfügung stehender finanzieller Mittel mit möglichst einfachen Mitteln ein Versuchslabor in Anlehnung an ein S3- Labor mit Schleuse aufzubauen, welches die Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Ventilationsbedingungen im Unterdruckbereich auf die Branddetektion, die Brand- und Brandrauchentwicklung sowie die Brandbekämpfung mit ortsfesten Löschanlagen ermöglicht.

Die Versuchseinrichtung bestehend aus Laborraum und Schleuse wurde in ein bestehendes Versuchsholzgebäude mit Holztreppenraum und angrenzendem Raum integriert.

### **3.2. Konstruktion des Versuchsraumes**

Nachfolgend wird der Versuchsaufbau beschrieben. Die folgende Zusammenstellung von Bildern (Abbildungen 2 bis 30) zeigt den kompletten Versuchsaufbau für die Vor- und Hauptversuche.

Die Abmessungen des Versuchsraumes sind Abbildung 4 und Abbildung 5 zu entnehmen.

Die Grundfläche des Laborraumes beträgt  $8,95 \text{ m}^2$  bei einem Rauminhalt von  $19,77 \text{ m}^3$ , die Grundfläche der Schleuse ergibt sich zu  $1,66 \text{ m}^2$ , der Rauminhalt zu  $3,66 \text{ m}^3$  bei einer lichten Deckenhöhe in beiden Räumen von  $2,21 \text{ m}$ .



Abbildung 2: Brandkammer zur Durchführung von Kleinbrandversuchen-Brandrauchanalyse mit Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer (FTIR). (Bemerkung: Rechts im Bild eine nicht zum Versuchsaufbau gehörende Gasstrahlerwand.).



Abbildung 3: FTIR-Gasanalysator (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer) mit EDV-Messdatenerfassung (Bild links) sowie beheiztem Probennahmesystem (Bild rechts). (Bemerkung: Im Bildhintergrund nicht zum Versuch gehörende, zwischengelagerte Baustoffe.).





Abbildung 6: Versuchslabor – Bauphase: Lüftungskanäle (Blechflachkanal und Kanalgrundrohre (KG-Rohre)).



Abbildung 7: Versuchslabor – Bauphase: Lüftungskanäle und verklebte Dampfsperrfolie zur Abdichtung vor der Holzkonstruktion.



Abbildung 8: Versuchslabor – Bauphase: Holzverkleidung (OSB-Platten) über der Dampfsperffolie.



Abbildung 9: Bauphase: Versiegelung der OSB-Platten gegen das Eindringen von Feuchtigkeit, statische Differenzdruckmessstellen (Bild links: 20 cm über dem Boden, halbe Raumhöhe und 20 cm unter der Decke).



Abbildung 10: Versuchsraum - Eingangstür mit Beobachtungsfenster , Lüftungsöffnungen oben rechts an der Decke und unten rechts (nach Fertigstellung des Versuchsstandes).



Abbildung 11: Versuchslabor – Niederdruck- Wasserebeldüse und Hochdruck- Wasserebelsprühkopf, Indikatorsprinkler, Rauchmelder, Laser-Rauchdichtemesstrecken (jeweils links im Bild in 3 Höhen), Tisch mit Brandlast (Käfigschale mit Streu), je 2 Regenmesser auf Stativ und im Bodenbereich (Bildmitte und rechts hinten), Lüftungsöffnungen (Decke zentral: 2 Stück sowie links hinten oben, rechts hinten oben und rechts hinten unten), zusätzliche Folienauskleidung im Boden- und Wandbereich zur Löschwasserrückhaltung.



Abbildung 12: Versuchslabor – Decke zentral: Lüftungsöffnungen (2 Stück), Niederdruck- Wassernebeldüse (Bild Mitte) und Hochdruck- Wassernebelsprühkopf (Bild rechts), Indicatorsprinkler (Bild links), Rauchmelder (Bild vorne Mitte).



Abbildung 13: Eingangstür in das Versuchslabor und in die Schleuse (Folie zur Löschwasserrückhaltung), im Vordergrund Regenmesser auf Stativ (=>Messung der volumetrischen Wasserbeaufschlagung), Laser-Rauchdichtemessstrecke auf Stativ, Lüftungsöffnung sowie Rauchmelder und Indicatorsprinkler in der Ecke links oben.

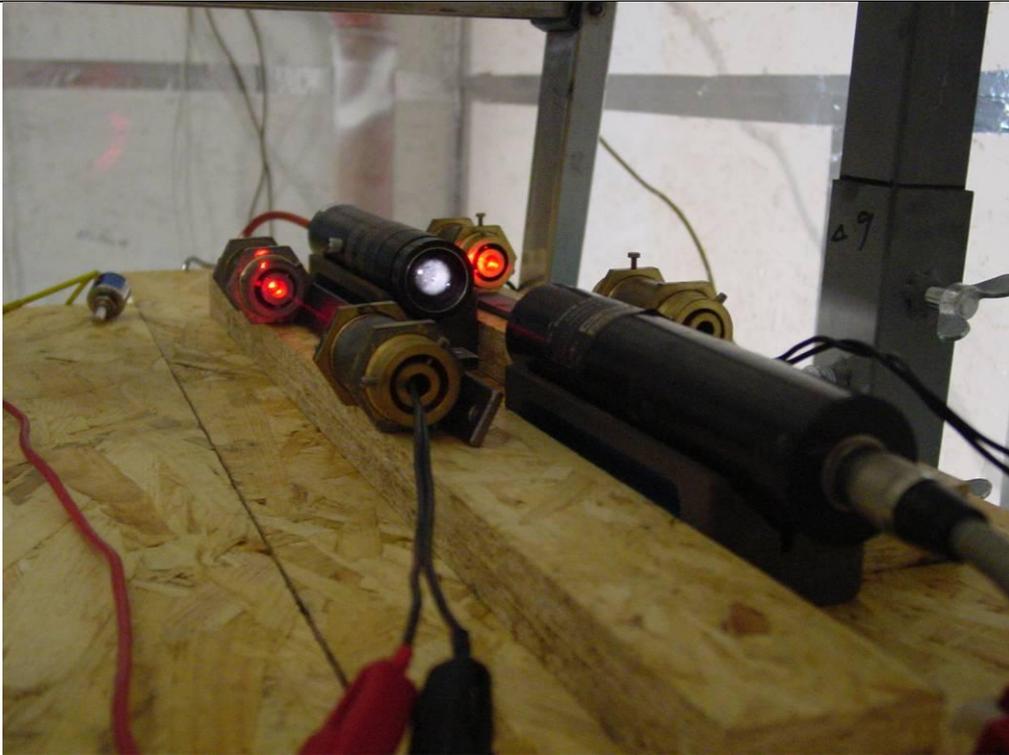


Abbildung 14: Kalibrierung der Laser-Rauchdichtemesstrecken gegen Maurer-Lichtmessgerät Typ ME 82.



Abbildung 15: Brandlasten: Käfigschalen für Mäuse (Bild links oben: links: Polycarbonat (PC), Mitte: Polyphenylsulfon (PPSU), rechts: Polysulfon (PSU), verschiedene Einstreumaterialien, PP-Behälter.



*Abbildung 16:* Brandlast: Käfigschale aus Polycarbonat (PC) mit Tierstreu, Wärmestrahler (Keramikstrahler als Zündquelle (linke Seite der Käfigschale), Bild oben), Weitere Zündquellen: Propankleinbrenner (Bild links unten) und PKW-Zigarettenanzünder (Bild rechts unten).



*Abbildung 17:* Versuchslabor - Brandlast: Holzkippe, Zündquelle: mit Spiritus getränkter Holzweichfaserstreifen, wasserdichte Actionkamera zur Versuchsdokumentation.



Abbildung 18: Schleuse – Eingangstür, Zuluft über KG-Rohr (Bild links: links unten), Tür in das Versuchslabor (Bild rechts, Türspalte und Schlüsselloch mit Klebeband abgedichtet), Rauchmelder zentral an der Decke.

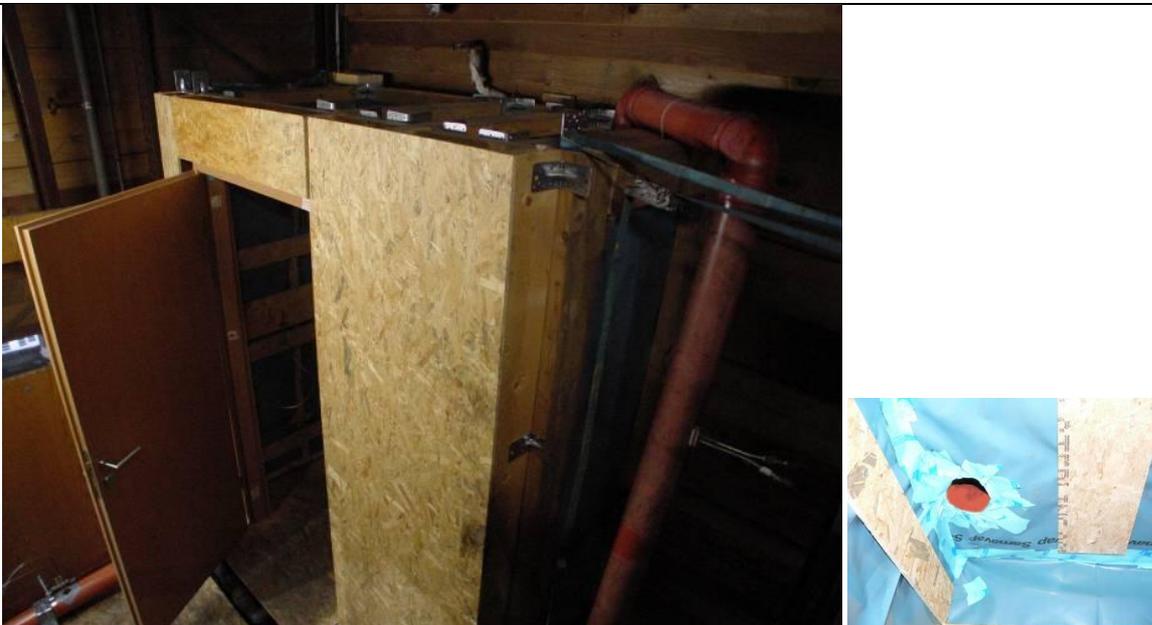


Abbildung 19: Schleuse, Zuluft (Bild links unten) und Abluft (Bild rechts oben sowie Detailaufnahme rechts) über KG-Rohr.



Abbildung 20: Schleuse – statische Differenzdruckmessung (Bild Mitte), Zuluftöffnung (Bild links unten).

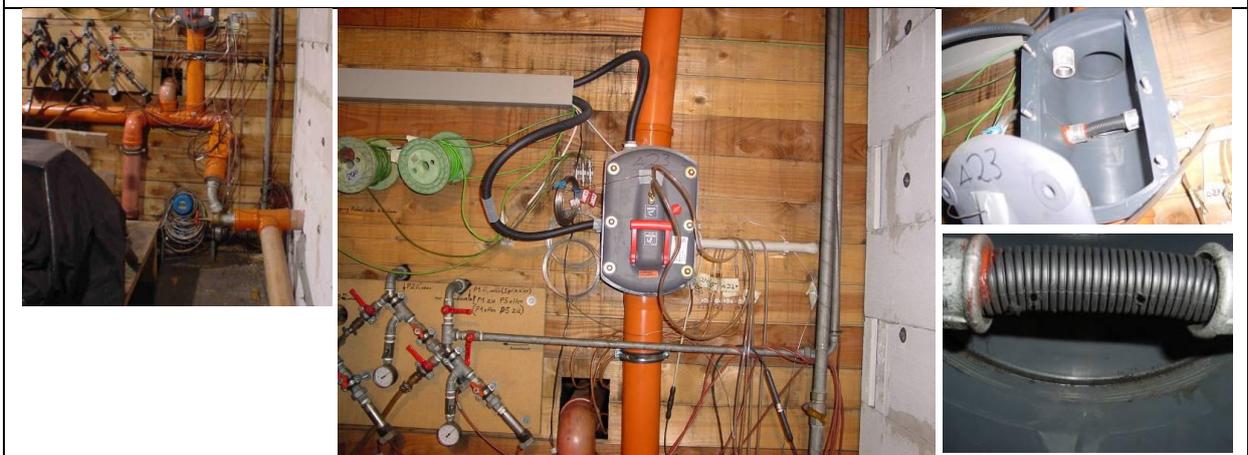


Abbildung 21: Löschwasserversorgung zum Versuchslabor (Niederdruck-Wasserversorgung), Lüftungsleitungen (Zusammenführung von Abluft aus Labor und Schleuse in Steigrohr zur Absaugung durch die Rauchreinigungsanlage), Gehäuse (grau) einer Rückstauverschlussklappe mit unterer Rauchsaugsystem (RAS)-Messstelle und Rückführleitung (schwarze Rohre, Bild rechts: Ansaugöffnungen).



Abbildung 22: Anschluss des Lüftungssystems an die Rauchreinigungsanlage der Brandversuchshalle, mit Absperrklappe.

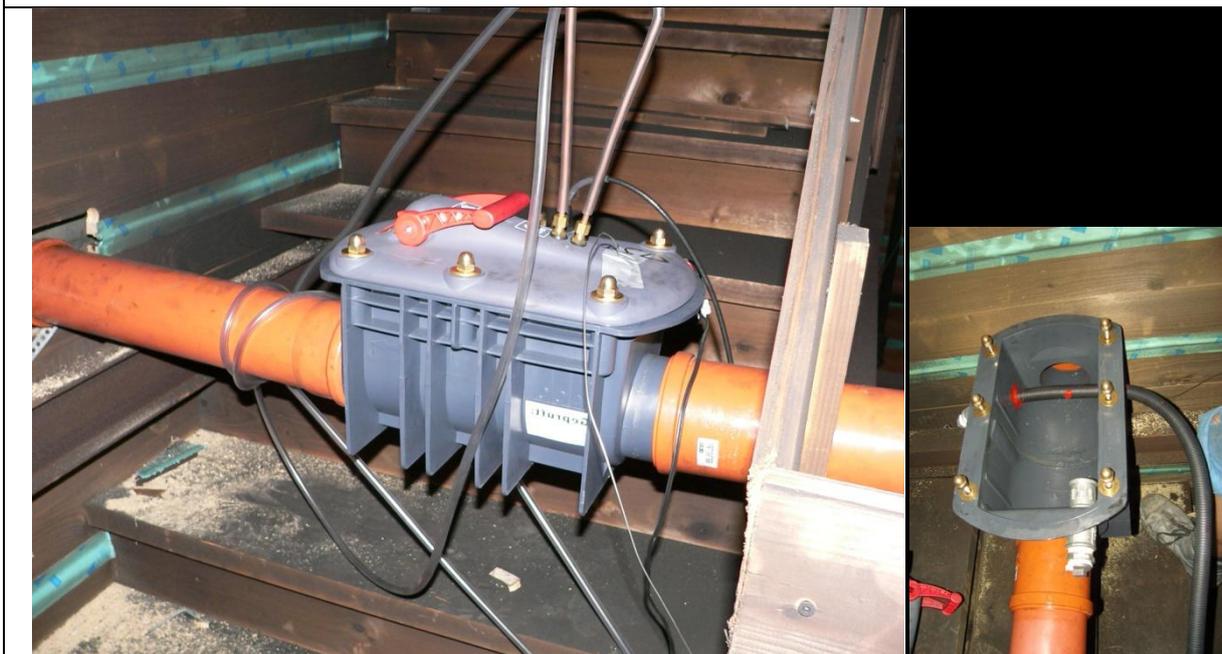


Abbildung 23: Messung von Temperatur, dynamischem Druck, relativer Luftfeuchtigkeit sowie RAS-Messstelle im Abluftkanal im Treppenraum oberste Etage.



Abbildung 24: Löschwasserversorgung (Niederdruck) über Kreiselpumpe (nicht im Bild) zum Versuchslabor mit magnetisch induktivem Durchflussmesser (blau) und nachgeschaltetem piezoresistiven Druckmessumformer.



Abbildung 25: Löschwasserversorgung für Hochdruck-Wasserebellöschanlage (Hochdruckpumpe).



Abbildung 26: Messtechnik und Messdatenerfassung mit EDV, Anzeigetableaus und Messumformer für Temperatur, Rauchmelder, RAS (Melderkasten), Manometer für Indikatorsprinkler, Messumformer für Temperaturen, relative Luftfeuchtigkeit, statischer und dynamischer Druck, Regenmesser.

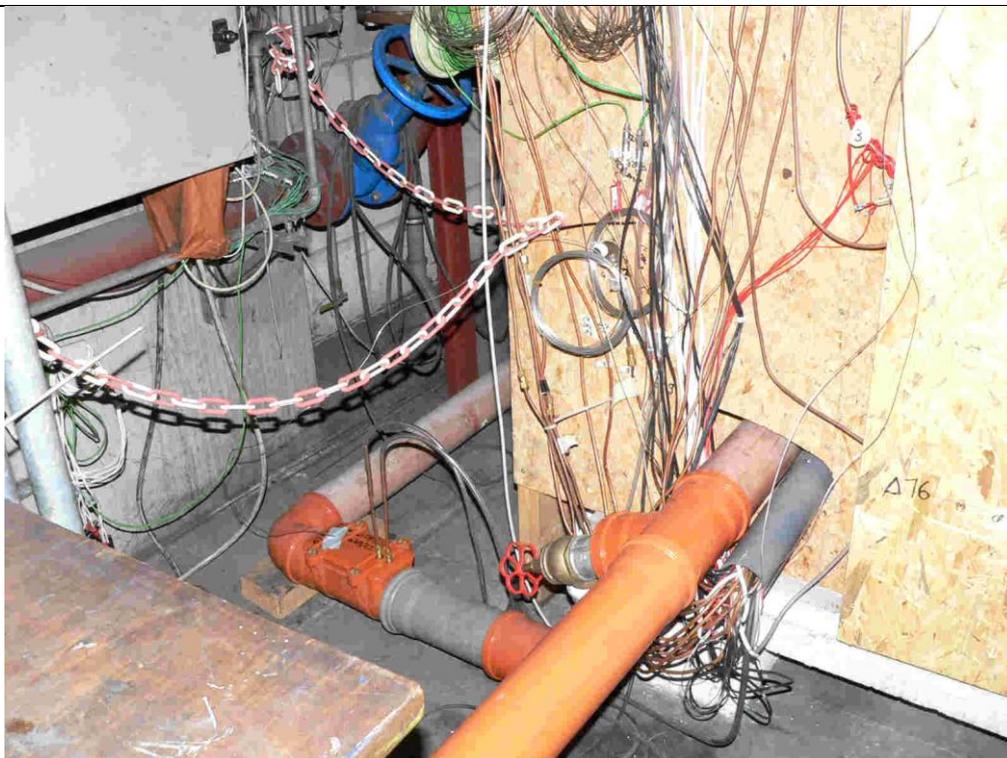


Abbildung 27: Einführung der Messleitungen und einer Lüftungsleitung in das Versuchslabor.

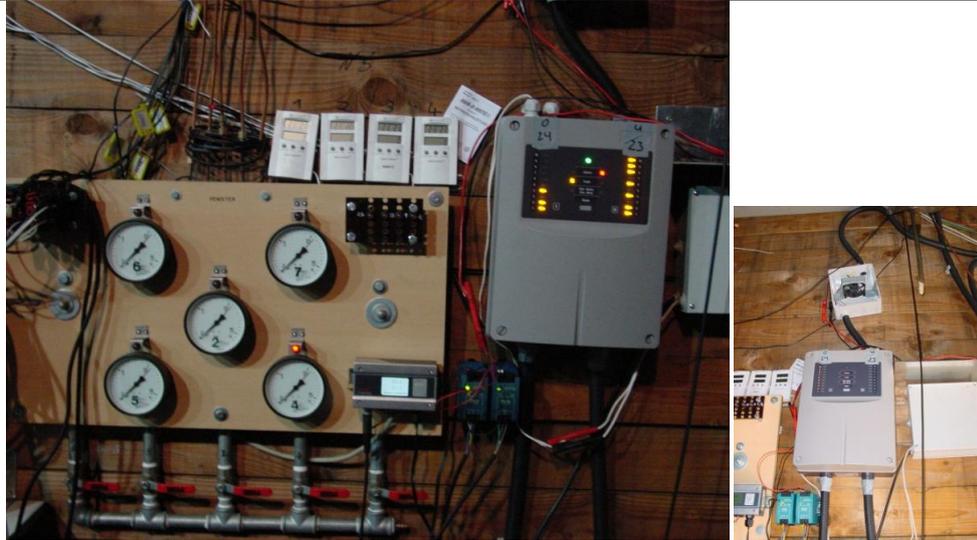


Abbildung 28: Bild links: Rauchansaugsystem (RAS): Melderkasten mit zwei Rauchsensor-Kammern (rechts im Bild, Ansaugöffnungen am Melderkasten unten), Anzeigetableau für Rauchmelder (LEDs, links im Bild), Manometer für Indicatorsprinkler (links im Bild), relative Luftfeuchtigkeit (Bild Mitte), Regenmesser (Bild Mitte oben), Bild rechts: Hilfslüfter in der Rückführleitung am Luftaustritt des RAS (oben am Melderkasten).



Abbildung 29: Messung von Temperatur, dynamischem Druck und relativer Luftfeuchtigkeit im Lüftungskanal.



*Abbildung 30:* Messung der Kohlenstoffdioxid-, Kohlenstoffmonoxid- und Sauerstoffkonzentration im Versuchslabor mit kontinuierlich messenden Gasanalysatoren.

Der Rohbau des Versuchslabors und der Schleuse wurde in Holzrahmenbauweise ausgeführt.

Die Kanäle und Rohre für die Lüftungstechnik wurden im Versuchslabor integriert. Hierbei wurden die Lüftungsleitungen an der Decke aus gefalztem Flachkanal auf den Querstreben der Deckenunterkonstruktion aufgelegt (siehe Abbildung 6).

Um einen Unterdruckbetrieb zu ermöglichen, wurde zur Abdichtung eine Kunststoff-Dampfspernbahn aus Polyethylen (blau eingefärbt) Typ A nach DIN EN 13984, die üblicher Weise bei Isolierungen im Dachbereich eingesetzt wird, an die Innenseite der Rahmenkonstruktion sowie dem Fußboden angebracht und mit einem handelsüblichen Abdichtungsklebeband an Stößen, Durchführungen und Schadstellen verklebt.

Um möglichst viele unterschiedliche Möglichkeiten der Lüftungsführung, wie Abluft im Decken- oder Bodenbereich bzw. Zuluft im Decken- oder Bodenbereich untersuchen zu können, wurden mehrere Durchführungen der Lüftungsrohre durch die Dampfsperffolie, die hier das eigentliche Containment bildet, erforderlich. Zur weiteren Abdichtung wurden zusätzlich Bitumenbahnstreifen mit doppelseitigem Klebeband auf die Folie in den Bereichen der Balken aufgebracht, um Leckagen aufgrund der Durchdringung von Verschraubungen der zur Innenbeplankung dienenden OSB-Platten zu minimieren.

Die Zugänge in die Schleuse und ins Labor wurden mit nach außen öffnenden hartfaserbeschichteten Wabenfüllungstüren ausgeführt. Im Betrieb werden diese durch den Unterdruck an die Zargen gepresst. In die Außentür des Labors wurde darüber hinaus eine Glasscheibe eingesetzt, um die Versuche beobachten und mit Videoaufnahmen dokumentieren zu können.

Die OSB-Platten zur Innenbeplankung des Versuchslabors (Schutz der Folie vor Brandeinwirkung und mechanischer Beschädigung) wurden abschließend mit einer wasserbeständigen Grundierung und weißem Acryllack gespritzt, um das Eindringen von Löschwasser während der Versuche in die Konstruktion zu verhindern und Brandspuren besser erkennbar zu machen. Die Stöße der Platten wurden mit Aluminiumklebeband verschlossen.

Um das anfallende Löschwasser aufzufangen, wurde eine weitere Dampfsperffolie auf dem Fußboden ausgelegt und wannenförmig an den Wänden nach oben geführt.

Als Verschleißschicht wurden an den Wänden der angenommen Brandausbruchsstelle in der hinteren linken Ecke, welche durch einen Tisch gekennzeichnet ist, Zementgebundene Silikat-Brandschutzbauplatten angebracht.

### 3.3. Lüftungstechnik

Das Luftkanalnetz wurde aus handelsüblichen PVC-Kanalgrundrohr (KG) – Rohren DN 110 sowie den bereits in Abschnitt 3.2 erwähnten Flachkanälen (180 mm \* 50 mm) gefertigt und an die Rauchreinigungsanlage der Brandversuchshalle angeschlossen (siehe Abbildung 22).

Während der Versuche sollte im Labor ein Unterdruck gegenüber der Atmosphäre von mindestens

- 60 Pa

und in der Schleuse von mindestens

-30 Pa

erzielt werden.

Diese Größenordnung des Unterdruckbereiches wird üblicherweise bei S3-Laboren mit Schleuse angewandt.

Zur Untersuchung unterschiedlicher Ventilationsbedingungen im Versuchslabor wurden zwei diagonal gegenüberliegende getrennte Lüftungskanaldurchführungen im Labor vorgesehen, die jeweils aus einer Bodenabsaugstelle, einer Deckenabsaugstelle je Ecke sowie einer Deckenabsaugstelle in der Mitte des Raumes bestanden (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11). Die orangefarbenen Doppellinien entsprechen dabei der Lüftungsleitung, die blaue Doppellinie der Wasserzuführung für die Löschanlage (Hochdruck- bzw. Niederdruckleitung).

Um eine zusätzliche Unterdruckregelung und eine zweite Variante der Absaugposition im Labor zu ermöglichen, wurden jeweils an den Lüftungseintritten ins Labor Eckniederschraubventile (2 Zoll) eingebaut (siehe Abbildung 27)

Die Leitungen für die Zuluft ins Labor wurden mit Kugelhähnen (1 Zoll) und in die Schleuse mit einem Niederschraubventil (1 Zoll) zur Regulierung des Zuluftvolumenstromes versehen. Auf die im Lüftungskanal eingebauten Messsensoren wird in Kapitel 3.5.1 näher eingegangen.

### 3.4. Wasserförderung

#### 3.4.1. Messstellenbeschreibung

Um die Lage der einzelnen Messstellen zu verdeutlichen, wurden R&I-Fließbilder erstellt. Die Zahl in der unteren Hälfte des Kreises gibt die jeweilige Messstelle an. Die Abkürzungen der Mess- und Regelstellen können der folgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Beschreibung der verwendeten Abkürzungen in den R&I-Fließbildern nach DIN 19227-1.

Kürzel	Aufgabe und Funktion der Messstelle
PR	Druckaufzeichnung
PDR	Differenzdruckaufzeichnung
PDIR	Differenzdruckanzeige mit Aufzeichnung
TR	Temperaturaufzeichnung
MR	Luftfeuchtigkeitsaufzeichnung
MIR	Luftfeuchtigkeitsanzeige mit Aufzeichnung
FIR	Durchflussanzeige mit Aufzeichnung
AR	Rauchgasanalyse
QI	Niederschlagsmessung
XAR	Rauchmelder mit Aufzeichnung
OR	Optische Rauchdichtemessung mit Aufzeichnung

### 3.4.2. Niederdruck-Wasserebellöschanlage

Die folgende Abbildung 31 zeigt das Rohrleitungs- und Instrumenten (R&I) -Fließbild der Niederdruck-Wasserebellöschanlage.

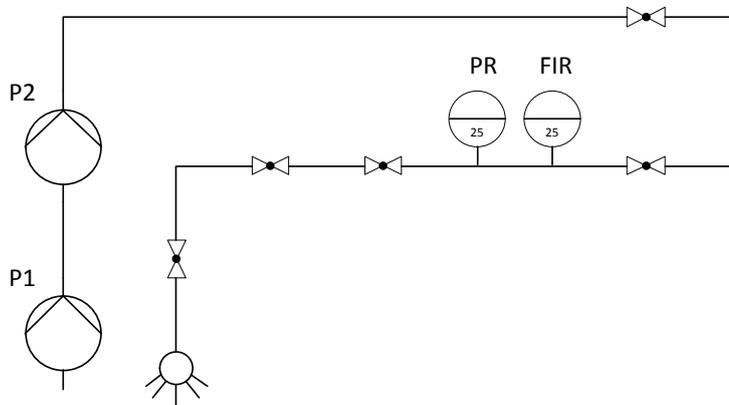


Abbildung 31: Fließbild der Niederdruck-Wasserebellöschanlage.

#### Pumpe für die Löschwasserversorgung

Zur Wasserförderung wurde eine Kreiselpumpe mit einem Vorrats-Zwischenbehälter verwendet. Die Pumpe P1 weist eine maximale Förderhöhe von 81 m (P1) und einen maximalen Volumenstrom von 125 m<sup>3</sup>/h auf (Leistungsaufnahme von 34,5 kW bei einer Drehzahl von 2940 U/min).

In Vorversuchen wurde zur Bestimmung der Volumenströme in Abhängigkeit vom Druck darüber hinaus eine Kreiselpumpe P2 mit einem höheren Förderdruck (maximal 28 bar) und einem maximalen Volumenstrom von 32 m<sup>3</sup>/h bei einer Pumpendrehzahl von 2900 U/min eingesetzt.

#### Rohrleitungssystem

Von den Pumpen bis zum ersten Kugelhahn bestand die Wasserleitung aus einem verzinkten Stahlrohr DN 100. Das Wasser wurde anschließend über einen C-Druckschlauch zur Messung des Wasserdrucks und des Durchflusses (Messstelle 25, siehe Abbildung 31) weitergeleitet und von hier aus über einen D-Druckschlauch und verzinkte Stahlrohre der Düse zugeführt.

## Verwendete Düsen

In den Brand- und Löschversuchen wurde eine Niederdruck-Wasserebeldüse (Zwilling-Dralldüse K6  $\frac{3}{4}$ " der Firma Ingenieur-Büro Herzog, Oschersleben) mit einem zulässigen Bereich des Betriebsdruckes von 4 bis 16 bar verwendet. Bei dieser Zwilling-Dralldüse handelt es sich um eine Löschwasserdüse, die einen inneren und einen äußeren Sprühkegel erzeugt. Diese Düse liefert bei einem Betriebsdruck von 4,5 bar einen Volumenstrom von 13 l/min.

### 3.4.3. Hochdruck-Wasserebellöschanlage

Die Abbildung 32 zeigt das Rohrleitungs- und Instrumenten (R&I)-Fließbild der Hochdruck-Wasserebellöschanlage.

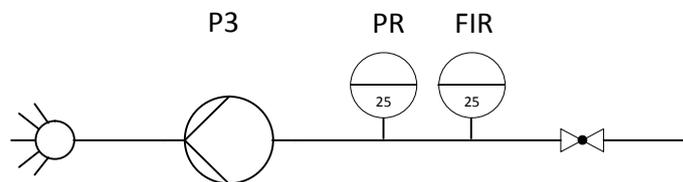


Abbildung 32: Hochdruck-Wasserebellöschanlage.

## Hochdruckpumpe

Als Pumpe für die Hochdruckwasserversorgung diente ein handelsüblicher Hochdruckreiniger mit einem Arbeitsdruck von 30 – 180 bar (P3) und einem maximalen Förderstrom von 19 l/min (Leistungsaufnahme: 7,5 kW bei 1400 U/min).

## Rohrleitungssystem

Zur Speisung der Hochdruckpumpe wurde das öffentliche Leitungsnetz verwendet und der Durchfluss mit magnetisch induktivem Durchflussmesser vor dem Eintritt in die Pumpe gemessen. Die Wasserförderung von der Hochdruckpumpe bis zum Hochdruck-Wasserebelsprühkopf erfolgte über einen formstabilen Hochdruckschlauch mit angeschlossenem Edelstahlrohr bis zum Sprühkopf.

## Verwendete Düsen

Für das Hochdruck-Wasserebellöschanlage wurde ein Sprühkopf mit vier Hochdruckdüsen (Dralldüsen; Düsen-Schlick GmbH, Untersiemau / Coburg) verwendet. Jede Düse wies einen Bohrungsdurchmesser von 1,2 mm sowie einen Streukegel von 120° auf. Die Düsen waren am Sprühkopf so angeordnet, dass sie einen Sprühwinkel von 110° erzeugten. Dieser Sprühkopf liefert bei einem Betriebsdruck von 120

bar einen Durchfluss von 12,4 l/min. Der Sprühkopf wurde bereits in den Untersuchungen von Kunkelmann [2006, 2010] verwendet.

### 3.5. Mess- und Videotechnik

#### 3.5.1. Messgeräte und Messstellenpositionen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Messstellen des Versuchslabors mit Schleuse sowie der Lüftungsanlage.

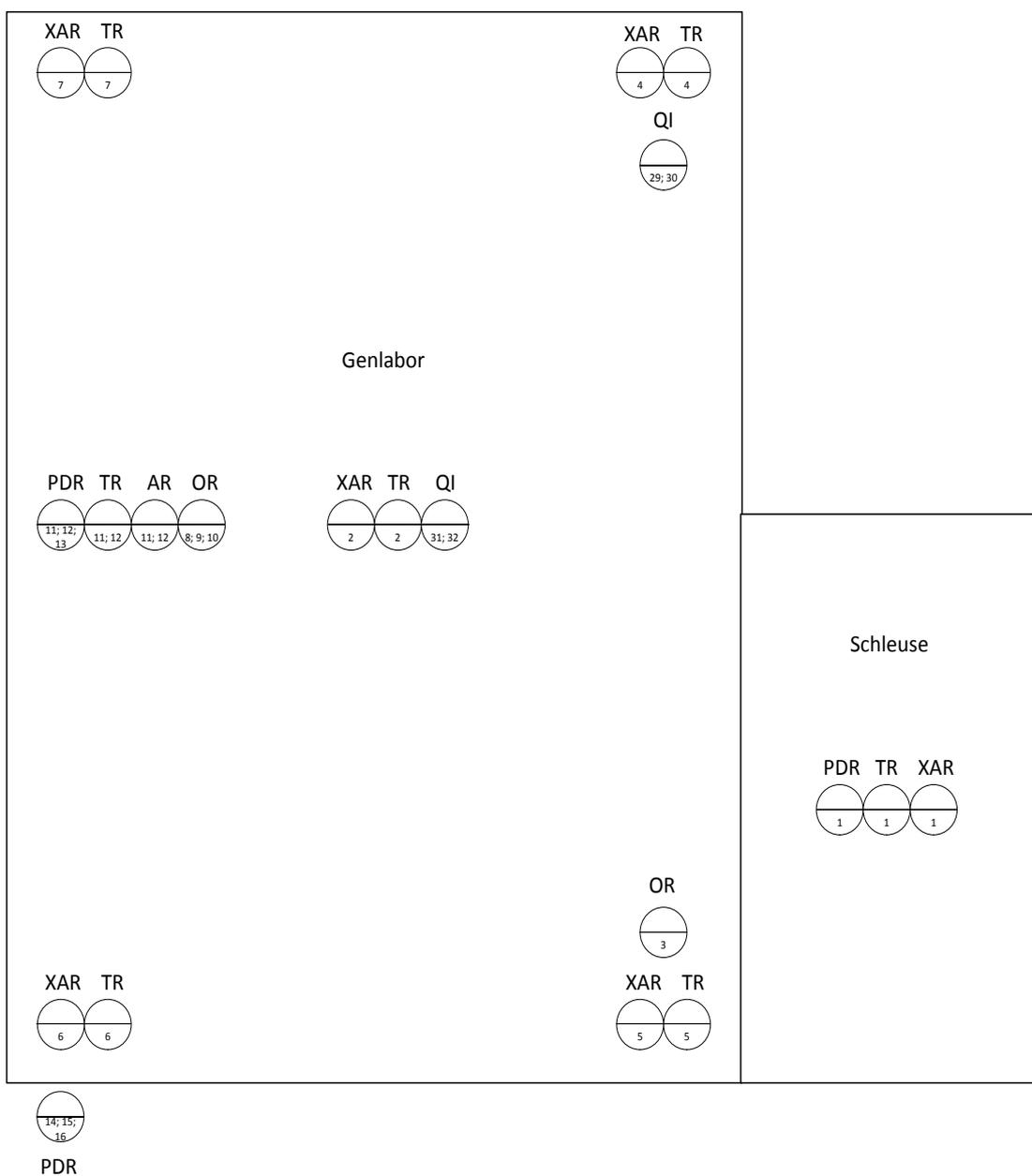


Abbildung 33: Messstellen innerhalb des Versuchslabors mit Schleuse

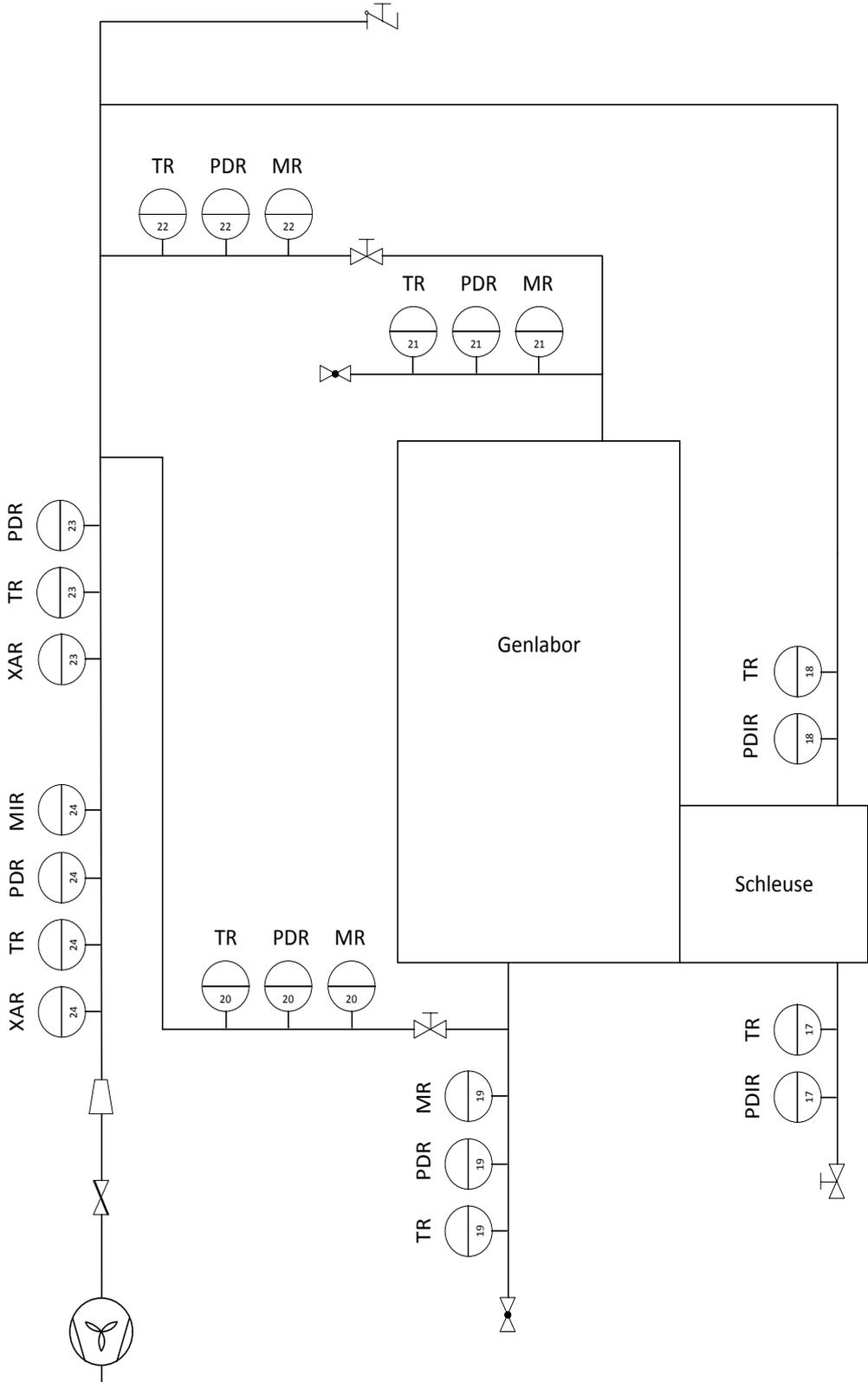


Abbildung 34: Messstellen der Lüftungsanlage

## Messstellenlisten

Der Ausgangspunkt (Nullpunkt) für die Positionsangaben in der Messstellenliste gemäß Tabelle 2 und Tabelle 3 ist die linke untere Ecke im Innenraum des Versuchslabors (siehe Abbildung 4, grünes Koordinatensystem).

Die x - Richtung bezeichnet die Breite, die y - Richtung die Tiefe und die z - Richtung die Höhe.

Die Zahlen in der Zeichnung geben die Bezeichnung und Position der Messstellen wieder.

Als Position "vorne" wird hierbei die Seite der Zugangstür direkt in das Versuchslabor festgelegt.

Hierbei bedeuten die Abkürzungen:

vl: vorne links im Raum

vr: vorne rechts im Raum

hl: hinten links im Raum

hr: hinten rechts im Raum

Tabelle 2: Messstellenliste - Positionsangaben der Messstellen in Versuchslabor und Schleuse

Messstelle	Position [cm]	Messwert	Bezeichnung
1	x: 305 y: 36 z: 110	P1	statische Differenzdruckmessung zwischen Schleuse und Umgebung in halber Höhe des Raumes
	x: 305	T1	Temperaturmessung in der Schleuse im Deckenbereich zentral
	y: 137 z: 216	RM1	Fotoelektronischer Rauchmelder in der Schleuse im Deckenbereich zentral

Messstelle	Position [cm]	Messwert	Bezeichnung
2	x: 116 y: 192 z: 216	T2	Temperaturmessung im Versuchslabor im Deckenbereich zentral
		RM2	fotoelektronischer Rauchmelder im Laborraum im Deckenbereich zentral
		IS2	Indikatorsprinkler im Deckenbereich zentral
3	x: 183 y: 50 z: 150	RD3	Messung der Transmission zwischen den Türen Schleuse / Labor (vr)
4	x: 183 y: 334 z: 216	T4	Temperaturmessung im Versuchslabor im Deckenbereich hintere rechte Ecke (hr)
		RM4	fotoelektronischer Rauchmelder im Laborraum im Deckenbereich hintere rechte Ecke (hr)
		IS4	Indikatorsprinkler im Deckenbereich hintere rechte Ecke (hr)
5	x: 183 y: 50 z: 216	T5	Temperaturmessung im Versuchslabor im Deckenbereich vordere rechte Ecke (vr)
		RM5	fotoelektronischer Rauchmelder im Laborraum im Deckenbereich vordere rechte Ecke (vr)
		IS5	Indikatorsprinkler im Deckenbereich vordere rechte Ecke (vr)

6	x: 50 y: 50 z: 216	T6	Temperaturmessung im Versuchslabor im Deckenbereich vordere linke Ecke (vl)
		RM6	fotoelektronischer Rauchmelder im Laborraum im Deckenbereich vordere linke Ecke (vl)
		IS6	Indikatorsprinkler im Deckenbereich vordere linke Ecke (vl)
7	x: 50 y: 334 z: 216	T7	Temperaturmessung im Versuchslabor im Deckenbereich hintere linke Ecke (hl)
		RM7	Fotoelektronischer Rauchmelder im Laborraum im Deckenbereich hintere linke Ecke (hl)
		IS7	Indikatorsprinkler im Deckenbereich hintere linke Ecke (hl)
8	x: 50 y: 192 z: 201	RD8	Messung der Transmission an der linken Wand Mitte des Raumes 20 cm unterhalb der Decke
9	x: 50 y: 192 z: 110	RD9	Messung der Transmission an der linken Wand Mitte des Raumes auf halber Höhe des Raumes

10	x: 50 y: 202 z: 20	RD10	Messung der Transmission an der linken Wand Mitte des Raumes 20 cm über dem Boden
11	x: 20 y: 192 z: 201	P11	statische Differenzdruckmessung zwischen Laborraum und Umgebung - negative Druckseite; an der linken Wand in der Mitte des Versuchslabors 20 cm unterhalb der Decke
		T11	Temperaturmessung an der linken Wand in der Mitte des Versuchslabors 20 cm unterhalb der Decke
	x: 20 y: 202 z: 201	Emission 11	Messung der Konzentration von Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid; an der linken Wand in der Mitte des Versuchslabors 20 cm unterhalb der Decke
12	x: 20 y: 192 z: 110	P12	statische Differenzdruckmessung zwischen Laborraum und Umgebung - negative Druckseite; an der linken Wand in der Mitte des Versuchslabors auf halber Höhe des Raumes
		T12	Temperaturmessung im Versuchslabor; an der linken Wand in der Mitte des Versuchslabors auf halber Höhe des Raumes
	x: 20 y: 202 z: 110	Emission 12	Messung der Konzentration von Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid; an der linken Wand in der Mitte des Versuchslabors auf halber Höhe des Raumes

13	x: 20 y: 192 z: 20	P13	statische Differenzdruckmessung zwischen Laborraum und Umgebung - negative Druckseite; an der linken Wand in der Mitte des Versuchslabors, 20 cm über dem Boden
14	x: 20 y: 192 z: 201	P14	statische Differenzdruckmessung zwischen Laborraum und Umgebung - positive Druckseite; außerhalb des Raums, 20 cm unterhalb der Decke
15	x: 20 y: 192 z: 110	P15	statische Differenzdruckmessung zwischen Laborraum und Umgebung - positive Druckseite; außerhalb des Raums auf halber Höhe des Raums
16	x: 20 y: 192 z: 20	P16	statische Differenzdruckmessung zwischen Laborraum und Umgebung - positive Druckseite; außerhalb des Raums, 20 cm über dem Boden
29	x: 183 y: 334 z: 110	NS29	Wasser-Niederschlagsmessung im Versuchslabor in der rechten hinteren Ecke auf halber Höhe des Raums (hr)
30	x: 183 y: 334 z: 10	NS30	Wasser-Niederschlagsmessung in der rechten hinteren Ecke auf dem Boden (hr)
31	x: 116 y: 192 z: 110	NS31	Wasser-Niederschlagsmessung in Raummitte auf halber Höhe des Raums
32	x: 116 y: 192 z: 10	NS32	Wasser-Niederschlagsmessung in Raummitte auf dem Boden

Tabelle 3: Messstellenliste - Positionsangaben der Messstellen außerhalb des Versuchslabors

<b>Messstelle</b>	<b>Messwert</b>	<b>Bezeichnung</b>
17	T17	Temperaturmessung im Zuluftkanal zur Schleuse
	v17	dynamische Differenzdruckmessung im Zuluftkanal zur Schleuse
18	T18	Temperaturmessung im Abluftkanal von der Schleuse
	Pv18	dynamische Differenzdruckmessung im Abluftkanal von der Schleuse
19	T19	Temperaturmessung im Zuluftkanal vom Labor links der Zugangstür zum Labor
	Pv19	dynamische Differenzdruckmessung im Zuluftkanal zum Labor links der Zugangstür zum Labor
	rF19	Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Zuluftkanal vom Labor links der Zugangstür zum Labor
20	T20	Temperaturmessung im Abluftkanal vom Labor links der Zugangstür zum Labor
	Pv20	dynamische Differenzdruckmessung im Abluftkanal vom Labor links der Zugangstür zum Labor
	rF20	Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Abluftkanal vom Labor links der Zugangstür zum Labor
21	T21	Temperaturmessung im Zuluftkanal vom Labor hinter dem Versuchstreppenraum
	Pv21	dynamische Differenzdruckmessung im Zuluftkanal zum Labor hinter dem Versuchstreppenraum
	rF21	Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Zuluftkanal vom Labor hinter dem Versuchstreppenraum

22	T22	Temperaturmessung im Abluftkanal vom Labor hinter dem Versuchstreppenraum
	Pv22	dynamische Differenzdruckmessung im Abluftkanal vom Labor hinter dem Versuchstreppenraum
	rF22	Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Abluftkanal vom Labor hinter dem Versuchstreppenraum
23	T23	Temperaturmessung im Abluftkanal von Labor und Schleuse hinter dem Versuchstreppenraum nach der Einbindung des Abluftkanals aus der Schleuse
	Pv23	dynamische Differenzdruckmessung im Abluftkanal vom Labor und Schleuse hinter dem Versuchstreppenraum nach der Einbindung des Abluftkanals aus der Schleuse
	RAS23	RAS-Messstelle im Abluftkanal von Labor und Schleuse hinter dem Versuchstreppenraum nach der Einbindung des Abluftkanals aus der Schleuse
24	T24	Temperaturmessung im Abluftkanal von Labor und Schleuse im Versuchstreppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m)
	Pv24	dynamische Differenzdruckmessung im Abluftkanal von Labor und Schleuse im Versuchstreppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m)
	rF24	Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Abluftkanal vom Labor und Schleuse im Versuchstreppenraum oberste Etage, (Höhe ca. 9 m)
	RAS24	RAS-Messstelle im Abluftkanal von Labor und Schleuse im Versuchstreppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m)

25	P25	Messung des Löschwasserdrucks
	DF25	Messung des Löschwasserdurchflusses

### **Löschwasser - Druckmessung**

Der Leitungsdruck der Löschwasserversorgung wurde mit einem Piezoresistiven-Druckmessumformer (Abbildung 24) an der Messstelle 25 ermittelt. Der Druckbereich des verwendeten Messumformers liegt zwischen 0 und 20 bar bei einer (nach Herstellerangabe) maximalen Abweichung von -0,05% des Messwertes.

### **Löschwasser - Durchflussmessung**

Die Messung des Löschwasservolumenstroms am Messpunkt 25 erfolgte mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser DN 25 (Abbildung 24) mit einer (nach Herstellerangabe) maximalen Abweichung von +0,1% im Messbereich zwischen 0 l/min bis 200 l/min .

### **Temperaturmessung**

Die Temperaturmessung im Versuchslabor und im Lüftungskanal erfolgte mittels Nickel / Chrom– Nickel–Thermoelementen (Typ K nach IEC 584-1). Dabei kamen sieben Messfühler im Versuchslabor (Messstelle 2, 4 – 7, 11, 12), einer in der Schleuse (Messstelle 1) und weitere acht im Lüftungssystem (Messstelle 17 – 24) zum Einsatz. Die verwendeten Thermoelemente haben im Messbereich -40 bis +1250°C eine Abweichung von  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  oder  $0,0075 \times T$  des gemessenen Temperaturwertes.

### **Messung des dynamischen Drucks**

In den Lüftungskanälen wurden an den Messpunkten 18 bis 24 zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit aus dem dynamischen Druck bidirektionale Druckmesssonden nach McCaffrey, Heskestad [1976] aus Edelstahl installiert (siehe Abbildung 29), welche über Druckleitungen mit elektrischen Druckmessdosen und der Messwerterfassung verbunden waren. Bidirektionale Sonden eignen sich zur Messung von Strömungen in beiden Strömungsrichtungen. Diese Messstellen mussten zur Messung in einer ausgebildeten Strömung jeweils den fünffachen Abstand des Leitungsquerschnitts zur vorherigen und nachfolgenden Querschnittsreduzierung und / oder Richtungsänderung aufweisen. An Messstelle 17 kam zu diesem Zweck ein analoges Mikromanometer, ebenfalls mit einer bidirektionalen Sonde zum Ein-

satz. Die Abweichungen des Mikromanometers sind gemäß Datenblatt mit 0,04% / K im Temperaturbereich von +10°C bis 50°C bzw.  $\leq 0,04\% / 10 \text{ K}$  zu veranschlagen.

Durch die Beziehung

$$v = \alpha^{-1} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

kann die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  aus dem gemessenen Differenzdruck  $\Delta p$  und der Dichte  $\rho$  der Luft berechnet werden. Für die eingesetzten bidirektionalen Sonden, welche im Bereich  $40 < Re < 3800$  eine Abweichung von 5% haben, betrug der einzusetzende Korrekturfaktor  $\alpha^{-1} = 0,9$ . Der systematische Fehler durch schräges Anströmen der Sonden konnte vernachlässigt werden, da bei diesen Messgeräten eine Schräganströmung bis zu  $\pm 50^\circ$  tolerierbar ist.

Die bidirektionalen Sonden wurden mittig im Strömungsquerschnitt installiert (siehe Abbildung 29). Dies bedeutet, dass hier die maximale Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\max}$  ermittelt wird.

Nach Reinmuth [1996] herrscht in den meisten Komponenten von Raumluftechnischen (RLT) Anlagen turbulente Strömung vor. In den im Versuchstand vorhandenen Lüftungskanälen liegt nach überschlagsmässiger Berechnung der Reynoldszahl ebenfalls turbulente Strömung vor. Das Geschwindigkeitsprofil ist bei turbulenter Strömung gleichmäßiger als bei laminarer Strömung, die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$ , messbar im Abstand von etwa  $d/8$  von außen beträgt

$$v_m = 0,8 \text{ bis } 0,85 v_{\max}$$

### **Messung der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen**

Die in der Praxis eingesetzten handelsüblichen Hochleistungsschwebstoff – Filter (HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Airfilter), ULPA-Filter (Ultra Low Penetration Air), wie sie bei realen S3- und S4- Laboren zum Einsatz kommen, haben eine maximale Betriebstemperatur von 70°C bis kurzfristig 90°C und eine maximal zulässige relative Luftfeuchtigkeit von 100 %.

Aus Kostengründen musste auf den Einsatz dieser Filter bei den Brand- und Löschversuchen verzichtet werden.

Daher wurde neben den Temperaturmessstellen jeweils ein Feuchtefühler (siehe Abbildung 29) zur kontinuierlichen Messung der relativen Luftfeuchte am Messpunkt 24 (Abluft aus Labor und Schleuse) bei einem in einer realen Laboranlage anzunehmenden voraussichtlichen Position einer Schwebstoff- Filteranlage und jeweils ein Feuchtemessfühler unmittelbar bei Eintritt des Luftstroms ins Labor (Messstelle 19 bzw. 21) und am Austritt des Labors (Messstelle 20 bzw. 22) installiert. Die Genauigkeit betrug bei den eingesetzten Feuchtemessfühlern  $\pm 0,8\%$  r. F und  $\pm 0,1$  K bei 23°C (nach Herstellerangaben).

### **Statische Druckmessung**

Die Messung des statischen Drucks an den Messpunkten 1 sowie 11 - 16 erfolgte mit den gleichen Druckmessdosen wie die Differenzdruckmessung in den Lüftungskanälen. Dabei lagen die Messstellen 1, 11, 12, 13 innerhalb der Schleuse und des Laborraumes und die dazugehörigen Referenzmessstellen 1 und 14 - 16 für den Umgebungsdruck außerhalb des Versuchslaborbereiches in gleicher Höhe.

### **Niederschlagsmessung**

Zur Beurteilung der volumetrischen Wasserbeaufschlagung mit Wasserdampf im Laborraum wurden an den Messstellen 29 - 32 Niederschlagsmessgeräte (Regenmesser) mit Signalübertragung über Kabel (Pronamic Rain-O-Matic® 3-in-1, Pronamic International Trading Engineering Co., Ltd, Dänemark), mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 2\%$  (nach Herstellerangaben) eingesetzt.

Diese Niederschlagsmessgeräte sind so aufgebaut, dass die trichterförmige Fläche, mit der das Wasser aufgefangen wird, gerade so groß ist, dass 5 ml auf diese Fläche 1 mm/m<sup>2</sup> entspricht. Das Wasser wird auf einen Löffel geführt, der wie eine Wippe

drehbar gelagert ist. Hat der Löffel die erforderliche Masse erreicht, kippt er nach unten und entleert sich. Durch einen Federmechanismus wird der Löffel hernach wieder in die Ausgangsposition gebracht, um erneut befüllt zu werden.

Dieser Federmechanismus ließ sich für die Kalibrierung mit einer Schraube einstellen, sodass die erforderliche Masse zum Kippen des Löffels verändert werden konnte. Mit einer Spritze wurde beim Kalibriervorgang Wasser auf die Sammelfläche gegeben, bis der Löffel einmal gekippt war. Anschließend wurde die abfließende Masse des Wassers aus dem Löffel bestimmt. Es wurde die Näherung verwendet, dass Wasser bei  $T = 20^\circ\text{C}$  eine Dichte von  $\rho \approx 1 \text{ kg/m}^3$  hat. Wicht die erforderliche Masse von 5 g ab, so wurde an der Schraube entsprechend gedreht. Stimmt ein aufgetragenes Volumen und abgegebene Masse mit  $V = 5 \text{ ml}$  und  $m = 5 \text{ g}$  überein, war die Kalibrierung abgeschlossen.

Zusätzlich wurden zwei Messbecher mit einem Fassungsvermögen von 5 Liter an den Messpunkten 30 und 32 mit einer Öffnungsfläche  $A$  von

$$A = \frac{\Pi}{4} \cdot d^2 = 0,0327\text{m}^2 \quad (2)$$

aufgestellt. Somit entsprachen 100 ml im Messbecher rund  $3,06 \text{ mm/m}^2$ . Dabei waren die Messpunkte 29 und 31 in 1,1 m Höhe angebracht, die Messstellen 30 und 32 befanden sich auf dem Boden. Eine lineare Wasserbeaufschlagung über die Zeit vorausgesetzt, erfolgte eine Ablesung jeweils nach Versuchsende, wobei die gemessenen Werte anschließend durch die Zeit der Aktivität der Löschanlage dividiert wurden.

### Optische Rauchdichtemessung

Die Ermittlung der optischen Dichte des Brandrauches an den Standorten 3 und 8 bis 10 erfolgte mittels Rauchdichtemesstrecken mit Laser und Photodiode in einem Abstand  $L$  von 0,14 m auf einer optischen Bank. Zur Kalibrierung wurde ein Messgerätes Maurer Type ME 82 als Referenzgerät eingesetzt.

Mit dieser Laser-Messeinrichtung (im Folgenden Lasermesstrecke genannt) wurde die Transmission  $\tau_{\text{Zeit}=t}$  des Lichtes in Prozent als Funktion der Zeit gemessen. Zum Zeitpunkt Null beträgt die Transmission  $\tau_{\text{Zeit}=0} = 100 \%$ .

An dieser Stelle soll der Extinktionskoeffizient  $\sigma$  erwähnt werden. Dieser kann unter Berücksichtigung der Weglänge  $L$  (Abstand zwischen Lichtquelle und Empfänger) über die Beziehung

$$\sigma = \frac{1}{L} \cdot \ln \frac{\tau_{Zeit=0}}{\tau_{Zeit=t}} = \frac{2,3}{L} \cdot \log \frac{\tau_{Zeit=0}}{\tau_{Zeit=t}} \quad (3)$$

ermittelt werden. Ein kritischer Extinktionskoeffizient für nicht an Brandrauch gewöhnte Personen wird nach den Untersuchungen von Jin [1981] bei  $\sigma = 0,15 \text{ m}^{-1}$  erreicht.

Neben dem Extinktionskoeffizient  $\sigma$  findet man in der Literatur die Größe „Optische Dichte OD“. Diese ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$OD = \frac{\sigma}{\ln 10} \approx \frac{\sigma}{2,3} \approx 0,434 \times \sigma \quad (4)$$

Es wird hier darauf hingewiesen werden, dass die zur Beschreibung der Rauchdichte verwendeten Größen Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und optische Dichte OD zwar die gleiche Einheit  $\text{m}^{-1}$  aufweisen, betragsmäßig aber völlig unterschiedlich sind.

Die Sichtweite  $s$  ergibt sich nach Jin [1977] zu

$$s = \frac{C}{\sigma} = \frac{C}{OD \cdot \ln 10} \quad (5)$$

Dabei ist  $C$  eine Konstante, die von der Beleuchtungsstärke und der Konzentration der Reizgase im Raum abhängt.

### Gasanalyse

In Vorversuchen wurden in einer ca.  $1 \text{ m}^3$  großen Brandkammer (siehe Abbildung 2) Brandrauchbestandteile mit FTIR - Messtechnik qualitativ und quantitativ ermittelt.

In den Hauptversuchen wurden nur noch Konzentrationen der Brandrauch-Hauptbestandteile  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  in der Raumluft mit kontinuierlich messenden Gasanalysatoren ermittelt.

Die Gasabsaugungen befanden sich in Raummitte 20 cm und 110 cm ( $\equiv$  halbe Raumhöhe) unterhalb der Decke an Messpunkt 11 und 12.

Dabei sind laut den Herstellerangaben für die eingesetzten Gasanalysatoren folgende Messfehlergrenzen zu beachten:

- CO- Messung: Nachweisgrenze von  $\leq 0,5\%$  des Messbereichs bei einem Messbereich von 0 bis 200ppm
- CO<sub>2</sub>- Messung: Nachweisgrenze von  $\leq 2\%$  des Messbereichs, Temperatureinfluss zwischen 5°C und 45°C  $\leq 1\% / 10\text{ K}$ , sowie Luftdruckeinfluss  $\leq 0,1\% / \text{mbar}$
- O<sub>2</sub>- Messung: bei Temperaturschwankungen zwischen 5°C und 50°C Nullpunktverschiebung  $\leq 0,2\%$ , sowie Nachweisgrenze bei 1% des Messbereichs

### **Brandlastmassenbestimmung**

Um die einzelnen Brandlasten vor und nach den Versuchen zu wiegen, wurde eine handelsübliche Waage mit einem Anzeigebereich von 0 bis 5 kg und einer Anzeigegenauigkeit von  $\pm 1\text{ g}$  eingesetzt. Eine zusätzliche Kalibrierung der Waage erfolgte nicht.

#### **3.5.2. Messwerterfassung**

Die Messwerterfassung erfolgte mittels eines computergestützten Messsystems, bei dem die einzelnen Module programmiert und skaliert werden konnten. Die analogen Signale wurden mittels Digital/Analog Messumformern digitalisiert. (siehe Abbildung 26)

Diese Messwerte wurden anschließend mit MS Excel<sup>®</sup> weiterverarbeitet und ausgewertet.

### 3.5.3. Videoaufzeichnung

Zur Versuchsdokumentation und -auswertung wurden an verschiedenen Positionen Videokameras entsprechend Tabelle 4 positioniert.

Tabelle 4: Kamerapositionen.

<b>Kamera</b>	<b>Position</b>
Action-Videokamera	– im Versuchslabor, auf die Brandlast gerichtet
Videokamera 1	– an der Tür zum Versuchslabor am Beobachtungsfenster des Versuchslabors
Videokamera 2	– Meldetableau für Indikatorsprinkler, Niederschlagsmessgeräte und fotoelektronische Rauchmelder im vorderen Bereich des Versuchsstandes
Fotokamera	– ergänzende Bilder

### 3.6. Brandmeldung

Aus Kostengründen musste, wie bereits erwähnt, auf den Einsatz einer Schwebstoff-Filteranlage, wie sie bei realen S3- und S4- Laboren zum Einsatz kommt, verzichtet werden.

Um jedoch eine evtl. Gefährdung dieser Filter in der Praxis durch eine Beaufschlagung mit Ruß im Brandrauch beurteilen zu können, wurde ein Rauchansaugsystem - RAS - (Ansaugrauchmelder ASD 535 mit 2 Rauchsensorkammern der Firma Hekatron Vertriebs GmbH, Sulzburg) im Lüftungskanal mit Ansaugöffnungen an den Messstellen 23 und 24 (siehe Abbildung 21, Abbildung 23, und Abbildung 28) installiert.

Die Messstelle 23 befand sich in der Abluftleitung in ca. 1,7 m Höhe des Versuchsaufbaus und der Messpunkt 24 ebenfalls in der Abluftleitung unter der Decke des Versuchstreppenraumes in ca. 9 m Höhe. Die beiden Alarmsignale konnten messtechnisch als „Aus / Ein“ - Anzeige im Messprogramm erfasst bzw. visualisiert werden.

Wenn der Melderkasten eines RAS nicht im zu überwachenden Raum untergebracht wird, muss gewährleistet sein, dass sich der Melderkasten in einem Raum befindet, der den gleichen Luftdruck oder bei - klimatisierten Räumen - die gleiche Klima- und Druckzone aufweist. In der hier vorliegenden Anwendung, wo Ansaugleitung und Melderkasten in unterschiedlichen Klimazonen montiert sind, musste daher eine Rückführung der Ansaugleitung in den Überwachungsbereich installiert werden.

Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Lüftungskanälen bedingt durch den geringen Rohrquerschnitt von DN 110 wurde in der Abluftleitung zur Rauchreinigungsanlage zur Verstärkung des Lüfters im Rauchansaugsystem ein Hilfs- (PC)- Lüfter in der Rückführleitung eingesetzt.

Weiterhin wurden handelsübliche fotoelektronische Rauchmelder (Rauchwarnmelder) nach dem Streulichtprinzip gemäß ISO 12239 und VdS – geprüft im Versuchslabor und in der Schleuse eingesetzt. Diese wurden an den Messstellen 1 und 2 sowie 4 bis 7 angebracht und mit einer 9 Volt Blockbatterie betrieben. Zur Erprobung der Funktionsfähigkeit dieser einfachen Rauchmelder in Lüftungskanälen wurden darü-

ber hinaus an den Messpunkten 23 und 24 Vorrichtungen zur Aufnahme dieser Rauchmelder vorgesehen.

In der Praxis wird zur Vermeidung von Fehlalarmen oftmals eine sogenannte Zweimelderabhängigkeit zur Auslösung eines Brandalarms und der Auslösung der Löschanlage verwendet. Dabei müssen unabhängig voneinander zwei Brandmelder gleichzeitig ansprechen, damit z.B. der Löschvorgang einer automatischen Löschanlage eingeleitet wird. Diese Variante der Branddetektion wurde in der überwiegenden Anzahl der Versuche dieser Arbeit als Auslösekriterium für das manuelle Auslösen der Löschanlage verwendet.

Zur messtechnischen Erfassung der Rauchmeldersignale wurde deren binäres Auslösesignal am Rauchmelder abgegriffen (die akustische Alarmfunktion wurde deaktiviert) und mittels des Messprogramms in einer „Aus / Ein“ - Schaltung registriert und am Messtableau mittels LED visualisiert. Die Rauchmeldersignale (Leuchtdiodenanzeige) auf dem Anzeigetableau wurden ebenfalls mit Video aufgezeichnet und mit den messtechnisch ermittelten Zeiten verglichen.

Zur Branddetektion im Laborraum wurden neben den fotoelektronischen Rauchmeldern Indikatorsprinkler an den Messstellen 2, 4, 5, 6 und 7 installiert.

Indikatorsprinkler haben keine Löschwirkung, sondern dienen ausschließlich zur Erkennung des Erreichens der Auslösetemperatur. Diese werden seit vielen Jahren als eine Methode der Branddetektion an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik eingesetzt.

In den Untersuchungen waren die Indikatorsprinkler mit einem 3 mm Glasfassauslöseelement der Farbe Rot versehen. Somit ergab sich für diese Sprinkler eine Nennauslösetemperatur von 68°C. Bei diesen Indikatorsprinklern handelte es sich um Normalsprinkler mit ½ Zoll Außengewinde und einem RTI – Wert (Response Time Index) von  $36 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2}$ , was der Klasse Fast (Schnell) entspricht.

Die Indikatorsprinkler wurden über Kupferrohre (ein DN 6) mit 5 bar Druckluft beaufschlagt. Bei der hydraulischen Sprengung des Glasfasses aufgrund der Wärmeeinwirkung ergibt sich ein schlagartiger Druckabfall am jeweiligen Manometer des Manometertableaus außerhalb des Versuchslabors. Dieser Druckabfall wurde u. a. als

ein weiteres Kriterium für die manuelle Auslösung der Löschanlage bei einem Versuch im Versuchslabor verwendet.

Das Auslöseverhalten dieser Indikatorsprinkler ähnelt dem von Trockenanlagen, die nach der VdS Richtlinie für Sprinkleranlagen CEA 4001 hinter dem Trockenalarmventil mit Luft oder Inertgas unter Druck gefüllt sind. Vor dem Trockenalarmventil steht bei diesen Anlagen allerdings Wasser unter Druck an.

### **3.7. Zündung der Brandstoffe - Zündquellen**

In den Vorversuchen in der Brandkammer (Abbildung 2) wurden zur Zündung der Brandlasten alternativ ein Propankleinbrenner mit einer Flammenlänge von 2 cm, ähnlich dem des Kleinbrennertests nach DIN 54332, ein PKW-Zigarettenanzünder und ein elektrisch beheizter Keramikstrahler (6 x 6 cm, Abbildung 16) eingesetzt.

Der Keramikstrahler fand auch bei den Brand- und Löschversuchen im Realmaßstab Verwendung und wurde jeweils mit maximaler Leistung betrieben. Der Keramikstrahler hatte bei 230 V eine Leistungsaufnahme von 250 W und erzeugte hierbei eine maximale Temperatur von 900°C an der Keramikoberfläche.

Darüber hinaus wurde ein mit 25 ml Spiritus getränkter Weichholzfaserstreifen als Zündquelle bei einem Brand- und Löschversuch mit einer Holzkrippe verwendet.

## 4. Versuchsdurchführung

### 4.1. Vorversuche

#### 4.1.1. Brandrauchanalyse mit FTIR bei der Verbrennung von Tierkäfigschalen für Mäuse in einer Brandkammer

Um eine Aussage über die Bestandteile des Brandrauches beim Verschwelen und Verbrennen von Brandlasten in einem Labor mit Tierhaltung zu erhalten, wurde in Vorversuchen eine Brandrauchanalyse u.a. mit Tierkäfigschalen aus Kunststoff für Mäuse sowie gängigen Einstreumaterialien durchgeführt.

Tierkäfigschalen können aufgrund der thermischen Belastungen beim Autoklavierungsprozess, bei dem Temperaturen bis 134°C möglich sind, in verschiedenen Kunststoffen ausgeführt sein. Hierbei ist zu beachten, dass Polycarbonat von den hier exemplarisch aufgeführten Kunststoffen zur Herstellung von Käfigschalen die geringste thermische Beständigkeit aufweist. Gefolgt wird das Polycarbonat (PC) von Polysulfon (PSU) sowie Polyphenylsulfon mit der höchsten Temperaturbeständigkeit der drei Kunststoffe.

Dazu wurden die zu untersuchenden Stoffe in einer Brandkammer (Abbildung 2, Abbildung 3) mit einem Rauminhalt von 1,6 m<sup>3</sup> verschwelt bzw. verbrannt. Die Brandkammer hatte hierbei folgende Abmessungen:

- Höhe: 1 m
- Breite: 1 m
- Tiefe: 1 m

im Brandraum, zuzüglich eines Volumens von 0,6 m<sup>3</sup> für den Anschluss an das Absaugrohr der Rauchreinigungsanlage.

Es wurden hierbei Materialien gemäß Tabelle 5 verwendet.

Tabelle 5: Heizwerte von in den Versuchen verwendeten Materialien.

Stoff	Heizwert in MJ/kg	
Polycarbonat (PC, Makrolon®)	31	(Bayer [2011])
Polysulfon (PSU)	29,54	(Walters [2011])
Polyphenylsulfon (PPSU)	nichtbrennbar	(Westlakes [2011])
Polypropylen (PP)	ca. 44	(UM.BWL [2011])
Heu	16,56	(Beilicke[2010])
Weizenstroh	17,28	(Beilicke[2010])
Holzspäne	15,5	(Beilicke[2010])

Die qualitative und quantitative Brandrauchanalyse erfolgte mit einem mobilen Multi-komponenten FTIR (Fourier – Transform – Infrarot – Spektrometer) Gas Analysator (GASMET DX4000) welcher leihweise von Firma ANSYCO Analytische Systeme und Komponenten GmbH in Karlsruhe zur Verfügung gestellt wurde. Die Messungen wurden ebenfalls von Firma ANSYCO durchgeführt.

Der GASMET Analysator wird über die CALCMET-Software bedient. Die Messung von Mess- und Nullspektren wird von hier gestartet, ebenso wie die kontinuierliche Messung. Auf dem PC werden die Spektren ausgewertet und die Konzentrationen angezeigt. Bei der Spektrenauswertung wird von der Software unter Verwendung der hinterlegten Referenzspektren für die einzelnen Substanzen ein Spektrum errechnet. Das iterativ berechnete Spektrum ist diejenige gewichtete, lineare Kombination aus hinterlegten Referenzspektren, die rechnerisch den kleinsten Unterschied zum gemessenen Spektrum aufweist. Aus der Gewichtung der Referenzspektren und der Konzentrationsangabe, die mit jedem Referenzspektrum abgespeichert wird, errechnet die CALCMET-Software die Kombination der zugehörigen Substanzen.

Die Messsonde wurde im Bereich oberhalb der Brandlast positioniert. Die Messzelle des Analysators sowie die Probennahme sind zur Vermeidung von Kondensation des Messgases bis 180 °C beheizbar (Abbildung 3). Es daher möglich, Spurenkonzentrationen, auch in feuchten und korrosiven Gasproben zu messen

Die Tierkäfigschalen zur Haltung von Mäusen hatten ein Leergewicht von 600 g für Polycarbonat, 654 g für Polysulfon und 659 g für Polyphenylsulfon.

Diese Untersuchungen dienten darüber hinaus der Erprobung verschiedener Zündquellen, der Ermittlung der Abbrandrate der Einzelstoffe und in Kombination sowie der Gewinnung einer qualitativen Aussage über die Rauchgastemperaturen. Hierzu wurde neben der Messsonde des FTIR ein Thermoelement installiert sowie das Brandgut auf einer Waage positioniert.

#### **4.1.2. Bestimmung des Volumenstroms der eingesetzten Löschdüsen in Abhängigkeit vom Betriebsdruck**

Für die Brand- und Löschversuche war es u. a. erforderlich, den Volumenstrom der eingesetzten Löschdüsen in Abhängigkeit vom Betriebsdruck zu kennen.

Für den Löscheinsatz im Versuchslaborraum kamen die in Abschnitt 3.4.3 beschriebene Löschwasserdüsen zum Einsatz.

Da der Löschwasserdruck per Handventil eingestellt werden musste, wurden die Messreihen so durchgeführt, dass ein Einstellwert für den Druck jeweils zwei Minuten beibehalten wurde und anschließend der Druck um 1 bar erhöht wurde. Für den Einstellvorgang wurde eine halbe Minute (Vorlaufzeit = 0,5 min) angesetzt.

Es wurde ferner untersucht, welchen Einfluss der in den Laborraum eingebrachte Sprühnebel auf den Volumenstrom der Lüftungsanlage und den Unterdruck im Labor hat und wie dieses ggf. durch Regelung kompensiert werden muss.

#### **4.1.3. Druck- und Strömungsverhältnissen in Laborraum und Schleuse bei verschiedenen Ventilationsbedingungen**

Systembedingt wurden als Mindestunterdruck im Labor -60 Pa und in der Schleuse -30 Pa angenommen.

Um zuverlässige Aussagen über den Einfluss unterschiedlichster Strömungsführungen auf die Ventilationsbedingungen und den Unterdruck im Versuchslabor zu erhalten, wurden zunächst Kaltversuche durchgeführt.

Wie aus Abbildung 4 hervorgeht, wurden im Versuchslabor acht Ventilationsöffnungen vorgesehen, die entweder als Zu- oder Abluftöffnung betrieben werden konnten.

Zur Begrenzung der Anzahl der durchzuführenden Brand- und Löschversuche wurden anschließend Lüftungsbedingungen ausgewählt, die voraussichtlich besondere Anforderungen an die Branddetektion und die Brandbekämpfung durch die Löschanlage im Versuchslabor stellen.

#### **4.1.4. Versuche mit Disconebel**

Zur Visualisierung der Strömung wurden weiterhin Versuche mit Disconebel im Versuchslabor durchgeführt. Es wurde eine handelsübliche Nebelmaschine verwendet. Beim Nebelfluid handelte es sich um ein Gemisch aus Glycerin, Propandiol (1,2-Propylenglycol), Wasser und Gerüststoffen. (Eine genauere Zusammensetzung des Nebelfluids ist nicht bekannt). Das Nebelfluid hat eine Dichte von  $1,078 \text{ g/cm}^3$ , ein Flammpunkt  $> 115^\circ\text{C}$  und eine Zündtemperatur von  $420^\circ\text{C}$ . Der Standort der Nebelmaschine befand sich auf dem Tisch des Versuchslabors (hintere linke Ecke im Raum siehe Abbildung 11).

Zur Versuchsdokumentation wurde eine Videokamera an Position 1 (Beobachtungsfenster des Versuchslabors) eingesetzt. Des Weiteren wurde das Ansprechverhalten der fotoelektronischen Rauchmelder und des Rauchansaugsystems bei den verschiedenen Ventilationsbedingungen untersucht.

## **4.2. Brandversuche ohne Löscheinsatz**

Bei den Brandversuchen ohne Löscheinsatz wurde als Brandlast jeweils eine Polycarbonat - Tierkäfigschale mit Wiesenheu als Einstreu verwendet (Masse der Brandlast, die bei den einzelnen Versuchen eingesetzt wurde, ist den Versuchen zu entnehmen) und mit einem Keramikstrahler bis zur Entzündung aufgeheizt.

Es wurde hier davon ausgegangen, dass eine Brandbekämpfung bzw. ein Auslösen der automatischen Löschanlage nicht erfolgt.

Die hieraus bedingten Veränderungen des Druckniveaus in den Räumen (Labor und Schleuse) und der Temperaturverlauf wurden gemessen. Weiterhin wurde die Rauchausbreitung, das Ansprechverhalten der im Raum installierten Rauchmelder und des Rauchansaugsystems untersucht.

Des Weiteren wurden die Luftfeuchtigkeit, die Transmission sowie die Konzentration von Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff in der Raumatmosfera des Versuchslabors aufgezeichnet. Anschließend wurden die Brandschäden dokumentiert und die Brandlast erneut gewogen, um die Masse des tatsächlich verbrannten Materials zu ermitteln.

Die Videoaufzeichnungen erfolgten gemäß den Kamerapositionen nach Tabelle 4.

### **4.3. Löschversuche ohne Brand**

Automatische Feuerlöschanlagen sind im Allgemeinen sehr zuverlässige Systeme. Trotzdem kann es zu Fehlauflösungen kommen, die aufgrund des entstehenden Wasserschadens bei Wasserlöschanlagen und des Stillstandes der Anlage unter Umständen erhebliche Kosten nach sich ziehen können.

In Sicherheitsbereichen der Schutzstufen S3 und S4 kommen hier die Risiken des Austrages von pathogenen Stoffen sowie die Notwendigkeit, eingesetztes Löschwasser zurückzuhalten und zu inaktivieren, hinzu. Von besonderem Interesse ist auch, wie sich der Unterdruck, die relative Luftfeuchtigkeit sowie die Sicht aufgrund von Aerosolbildung im Labor beim jeweiligen Löschanlagentyp verändert.

Da Wassernebellöschanlagen gegenüber Sprinkleranlagen aufgrund der üblicherweise geringeren zurückzuhaltenden Löschwassermengen von den Betreibern von gentechnischen Anlagen favorisiert werden, wurden zu Löschzwecken in diesen Untersuchungen nur Hoch- und Niederdruck-Wassernebel in den Versuchsreihen untersucht.

Der Löschwasservolumenstrom von

ca. 13 l/min

wurde dabei konstant für beide Systeme entsprechend den Untersuchungen früherer Brand- und Löschversuche mit Wassernebel an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (Kunkelmann [2006, 2010] gewählt, um eine direkte Vergleichbarkeit der Löscheffektivität und der Wasserverteilung im Raum zu ermöglichen.

Aufgrund des Raumvolumens des Versuchslabors von 19,77 m<sup>3</sup> ergibt sich hieraus eine volumetrische Wasserbeaufschlagung von

$$13 \text{ l/min} / 19,77 \text{ m}^3 =$$

$$0,66 \text{ l} / (\text{m}^3 * \text{min})$$

sowohl für den eingesetzten Hochdruck- als auch Niederdruck-Wassernebel.

Neben der Transmission, die zur Beurteilung der Brandrauchdichte dient, und der Temperatur im Versuchslabor sowie im Lüftungssystem wurde die relative Luftfeuchtigkeit an verschiedenen Positionen im Lüftungskanalnetz gemessen.

Mit automatischen Niederschlagsmessern und Messbechern wurde des Weiteren die Wasserbeaufschlagung im Raum ermittelt.

#### **4.4. Brand- und Löschversuche**

In den Brand- und Löschversuchen wurde davon ausgegangen, dass bei einem Brandereignis die Löschanlage auslöst. Als Auslösekriterium wurde bei den Versuchen mit Tierkäfigschalen die Zweimelderabhängigkeit gewählt. Der Brandmeldezustand wird in der Praxis erst nach Ansprechen zweier Melder einer Meldegruppe erreicht.

Im vorliegenden Fall wurde die Wassernebellöschanlage manuell nach dem Ansprechen von zwei Rauchmeldern im Versuchslabor ausgelöst.

Dies dient der Vermeidung von Fehlalarmen und Fehlauslösungen von Löschanlagen mit den entsprechenden Löschwasserschäden und ist bei der Auslösung von Löschanlagen durch fotoelektrische Rauchmelder als Branddetektion gängige Praxis. Des Weiteren entspricht es schaltungstechnisch einer UND - Verknüpfung.

Beim letzten Versuch aus Abschnitt 5.4 mit einer größeren Brandlast in Form einer Holzkrippe wurde das Auslösen eines Indikatorsprinklers als Meldekriterium gewählt, um die Verzögerung im Auslöseverhalten zwischen Rauchmeldern und thermischen Glasfassauslöseelementen zu untersuchen. Die Messtechnik entsprach dabei den Versuchen aus Kapitel 4.2 und 4.3.

## 5. Messergebnisse

### 5.1. Vorversuche

#### 5.1.1. Brandrauchanalyse mit FTIR bei der Erhitzung bzw. Verbrennung von Tierkäfigschalen für Mäuse

In Vorversuchen wurden verschiedene Brandlasten (Tierkäfigschalen aus verschiedenen Materialien, Streu etc.) in einer Brandkammer (Abbildung 2) einer Brandrauchanalyse mit FTIR unterzogen.

Die folgende Tabelle 6 zeigt

- die analysierten Substanzen
- die maximal gemessene Konzentration
- die Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) in ppm bzw. mg/m<sup>3</sup> (1)
- die Einsatztoleranzwerte (ETW) (2)
- die Dichte  $\rho$  in kg/m<sup>3</sup> unter Normbedingungen (0°C, 1013 hPa) (3)
- den Flammpunkt FP (bzw. kritische Temperatur) in °C (4)
- die Zündtemperatur ZT in °C (5)
- die untere Explosionsgrenze UEG in Vol.-% (6)
- die obere Explosionsgrenze OEG in Vol.-% (7)

Diese Kennwerte wurden verschiedenen Literaturstellen und Datenbanken entnommen (Hommel [1996], BAuA [2011], Nabert [2004], GESTIS [2012], GSBL [2012], vfdb [2008], US Environmental Protection Agency [2012], UBA [2012]).

Nach der vfdb-Richtlinie 10/01 [2008] werden für Einsatzmaßnahmen der Feuerwehr bei der Freisetzung gefährlicher Stoffe bzw. Entwicklung von Schadstoffwolken (z.B. Leckagen, Bränden) stoffspezifische Einsatztoleranzwerte (ETW) festgelegt, soweit die Gase oder Dämpfe

- einsatztaktisch relevant sind,
- mit einfachen Mitteln sofort nachweisbar sind und
- toxikologische und/oder sicherheitstechnische Bewertungen vorliegen.

Bei Konzentrationen oberhalb des ETW sind Einsatzmaßnahmen der Feuerwehr grundsätzlich unter Atemschutz durchzuführen.

Unterhalb des ETW kann ohne Atemschutz gearbeitet werden, soweit nicht aus anderen Gründen Schutzmaßnahmen angezeigt sind (z.B. vermutete oder nicht messbare Schadstoffe). Im Zweifel ist immer umgebungsluftunabhängiger Atemschutz zu tragen.

Nach der vfdb-Richtlinie 10/01 entsprechen die AEGL-2-Werte (Acute Exposure Guideline Levels) für 4 Stunden definitionsgemäß den ETW. Die endgültigen AEGL-2 Werte werden als ETW in die Richtlinie übernommen, sobald sie verfügbar sind und allen ETW-Kriterien entsprechen. Derzeit enthält diese Richtlinie 44 gefährliche Stoffe. Unterhalb der ETW ist im Allgemeinen keine Gesundheitsgefährdung zu befürchten (Ausnahme: extrem empfindliche Personen).

Bemerkung: Die AEGL-Werte sind nach UBA [2012] toxikologisch begründete Spitzenkonzentrationswerte

- für verschiedene relevante Expositionszeiträume (10 Minuten, 30 Minuten, 1 Stunde, 4 Stunden, 8 Stunden),
- für 3 verschiedene Effekt-Schweregrade, die - je nach planerisch zugrundegelegtem Aktionsmaßstab - benötigt werden:
  - AEGL-1: Schwelle zum spürbaren Unwohlsein;
  - AEGL-2: Schwelle zu schwerwiegenden, lang andauernden oder fluchtbehindernden Wirkungen;
  - AEGL-3: Schwelle zur tödlichen Wirkung.

Seit dem Inkrafttreten der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) hat der AGW-Wert (Arbeitsplatzgrenzwert) den MAK-Wert ersetzt. Der AGW ist die höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft am Arbeitsplatz (in der Regel: täglich 8-stündige Exposition bei einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40 Stunden), bei der im Allgemeinen die Gesundheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt wird. Nach TRGS 900 sind die Arbeitsplatzgrenzwerte als zeitlich gewichtete Durchschnittskonzentration eines am Arbeitsplatz in der Luft

befindlichen Stoffes definiert, der bei der täglichen Arbeit von acht Stunden an fünf Tagen die Woche ein Leben lang keine Gefahr für den Betroffenen darstellt.

Die Kennwerte können in Verbindung mit den gemessenen Konzentrationen zur Beurteilung der Toxizität des Brandrauches und der Gefährdung durch eine Rauchgasdurchzündung / Rollover bzw. Backdraft in einem relativ dichten Raum herangezogen werden.

In den Versuchen wurde jeweils eine relativ kleine Brandlast in Form z.B. einer Käfigschale mit Einstreu verwendet. In einer Tierhaltung können je nach Größe der Räumlichkeiten z. B. bei der Haltung von Kleintieren und Nagern bis zu einigen hundert / tausend Stück in mehreren Racks vorhanden sein, die bei einem nicht bekämpften Brand schnell zu kritischen Konzentrationen von toxischen und zündfähigen Brandrauchbestandteilen führen können.

Bei den ersten neun Versuchen (V1 – V9) zur Auswahl einer geeigneten Zündquelle wurden der PKW – Zigarettenanzünder und die Kleinbrennerflamme für nicht zweckmäßig befunden. Deshalb werden diese Versuche auch nicht weiter dokumentiert.

Mit dem Keramikstrahler hingegen sind zufriedenstellende Ergebnisse erzielt worden.

Bei den weiteren Versuchen (V10 – V 18) wurde daher der Keramikstrahler als Zündquelle eingesetzt.

Zu diesen Versuchen sind die Ergebnisse der verschiedenen Messungen in Tabelle 6 zusammengefasst. (Vergleiche hierzu auch die Angaben zu Beginn dieses Abschnittes 5.5.1).

Diese Messergebnisse für die kurzzeitig ermittelten Maximalkonzentrationen in Tabelle 6 geben einen Anhaltspunkt für die entstehenden möglichen Schadstoffe beim Verschwelen und Verbrennen der untersuchten Materialien wieder.

Aufgrund des Gesamtvolumens der Brandkammer von ca. 1,6 m<sup>3</sup> ergab sich bei einem Absaugvolumenstrom im Abgasrohr der Brandkammer von ca. 250 m<sup>3</sup>/h eine Luftwechselzahl von

$$250 \text{ m}^3/\text{h} / 1,6 \text{ m}^3 = 156 \text{ [1/h]},$$

welches ungefähr nach Wagner [1997] einer Labor- (Digestorien-) absaugung (100 bis 150 [1/h]) entspricht.

Im Versuchslabor mit einem Rauminhalt von 19,77 m<sup>3</sup> wurden Luftwechselzahlen im Bereich zwischen 8 und 12 [1/h] eingeregelt. Dieses entspricht Absaugvolumenströmen zwischen 158 m<sup>3</sup>/h und 237 m<sup>3</sup>/h.

Aufgrund der gegenüber der Brandkammer geringeren Absaugvolumenströme im Versuchslabor kommt es hier zu einer Anreicherung der Schadstoffe.

Es darf hier aber nicht übersehen werden, dass die Angabe von Schadstoffen und deren Gefährdungspotential nicht alleine steht, sondern im Kontext zur sonstigen (Grund-)Gefährdung durch das ursprüngliche Brandereignis zu sehen ist.



Stoff	V10 Käfig- schale aus PSU, Holz- späne	V11 Käfig- schale aus PPSU, Weizen- stroh	V12 Käfig- schale aus PC, Wiesen- heu	V13 Käfig- schale aus PSU, Wiesen- heu	V14 Käfig- schale aus PSU, Weizen- stroh	V15 Behälter aus PP	V16 Material- probe aus PC	V17 Material- probe aus PSU	V18 Material- probe aus PPSU
<p>(1) AGW in ppm bzw. mg/m<sup>3</sup></p> <p>(2) ETW in ppm</p> <p>(3): ρ (4): FP (5): ZT (6): UEG (7): OEG</p>	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]
Distickstoffmonoxid N <sub>2</sub> O (1): 100ppm, 180 mg/m <sup>3</sup>	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2
Ammoniak NH <sub>3</sub> (1): 50 ppm, Empfehlung: 20 ppm 35 mg/m <sup>3</sup> , Empfehlung: 14 mg/m <sup>3</sup> (2): 110 ppm	0,4	3	1,8	3,3	2,8	0,4	0,3	0,3	0,4
Chlorwasserstoff HCl (1): 2 ppm, 3 mg/m <sup>3</sup> (2): 11 ppm	1,6	0,7	0,5	0,5	1,3	0,9	0,7	0,6	0,7
Schwefeldioxid SO <sub>2</sub> (1): 0,5 ppm, 1,3 mg/m <sup>3</sup> (2): 1 ppm	186,5	142,3	1,7	252,3	258,2	1,9	1,2	4,2	4,9
	ETW überschritten								
Cyanwasserstoff HCN (1): 1,9 ppm, 2,1 mg/m <sup>3</sup> (2): 3,5 ppm	1,2	0,7	2,2	3,2	4,6	0,6	0,8	0,8	0,7
Methan CH <sub>4</sub> (1): AGW nicht festgelegt	12,2	25,4	9,4	10,5	30,6	4,4	13,8	3,8	2,3

Stoff		V10 Käfig- schale aus PSU, Holz- späne	V11 Käfig- schale aus PPSU, Weizen- stroh	V12 Käfig- schale aus PC, Wiesen- heu	V13 Käfig- schale aus PSU, Wiesen- heu	V14 Käfig- schale aus PSU, Weizen- stroh	V15 Behälter aus PP	V16 Material- probe aus PC	V17 Material- probe aus PSU	V18 Material- probe aus PPSU
(1) AGW in ppm bzw. mg/m <sup>3</sup>	(3): ρ (4): FP (5): ZT (6): UEG (7): OEG	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]
Ethan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (1): AGW nicht festge- legt	(3): 1,36 (4): -135 (5): 515 (6): 2,4 (7): 14,3	0	0,3	0,6	0,4	1,8	0,8	2,2	0,2	0,6
Propan C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (1): 1000 ppm, 1800 mg/m <sup>3</sup>	(3): 2,01 (4): -104 (5): 470 (6): 1,7 (7): 10,8	1,1	0,7	0,5	1,3	2,4	1,1	3,8	0,9	0,5
n-Hexan C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (1): 50 ppm, 180 mg/m <sup>3</sup> (2): 200 ppm	(3): 0,66 (4): -20 (5): 230 (6): 1,0 (7): 8,9	0,8	0,4	0,3	0,3	0,9	0,2	2,3	0,2	0,3
Hexadecan (Cetan) C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> (1): AGW nicht festge- legt	(3): 0,77 (4): 135 (5): 215 (6): 0,4 (7): 6,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,2	0,2
Ethen C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (1): AGW nicht festge- legt, da möglich- weise erb- gutverän- dernd	(3): 1,26 (4): 10 (5): 440 (6): 2,4 (7): 32,6	3,5	8,1	3,6	4,7	11,3	2,8	0,9	0,5	0,3
Propen C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (1): AGW nicht festge- legt	(3): 1,91 (4): -108 (5): 485 (6): 1,8 (7): 11,2	1,6	0,9	0,8	0,9	0,7	0,9	0,7	0,9	1,1
Ethin (Acetylen) C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (1): AGW nicht festge- legt	(3): 1,1 (4): 36 (5): 305 (6): 2,3 (7): 100	3,4	3,7	4,8	8,7	7,8	1,1	0,3	0,3	0,5

Stoff	V10 Käfig- schale aus PSU, Holz- späne	V11 Käfig- schale aus PPSU, Weizen- stroh	V12 Käfig- schale aus PC, Wiesen- heu	V13 Käfig- schale aus PSU, Wiesen- heu	V14 Käfig- schale aus PSU, Weizen- stroh	V15 Behälter aus PP	V16 Material- probe aus PC	V17 Material- probe aus PSU	V18 Material- probe aus PPSU	
<p>(1) AGW in ppm bzw. mg/m<sup>3</sup></p> <p>(2) ETW in ppm</p>	(3): ρ (4): FP (5): ZT (6): UEG (7): OEG	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	
<p>Benzol C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (1): AGW nicht festgelegt, da krebserregend (2): 20 ppm</p>	(3): 0,88 (4): -11 (5): 555 (6): 1,2 (7): 8,6	7,7	11,3	5,4	8,8	15,7	3,2	3,1	2,7	2,3
<p>Toluol C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> (1): 50 ppm, 190 mg/m<sup>3</sup> (2): 94 ppm</p>	(3): 0,87 (4): 6 (5): 535 (6): 1,1 (7): 7,8	4,8	4,6	3,3	3,8	3,4	4,8	2,3	3,8	3,7
<p>o-Xylol C<sub>8</sub>H<sub>10</sub> (1): 100ppm, 440 mg/m<sup>3</sup></p>	(3): 0,88 (4): 30 (5): 465 (6): 0,97 (7): 7,6	4,7	6,5	6,5	12,9	12,2	2,3	0,1	0,6	0,5
<p>m-Xylol C<sub>8</sub>H<sub>10</sub> (1): 100ppm, 440 mg/m<sup>3</sup></p>	(3): 0,86 (4): 25 (5): 540 (6): 1,1 (7): 7,0	0,8	0,8	1,4	0,4	0,4	2,1	0,7	0,8	0,7
<p>p-Xylol C<sub>8</sub>H<sub>10</sub> (1): 100ppm, 440 mg/m<sup>3</sup></p>	(3): 0,86 (4): 25 (5): 540 (6): 1,1 (7): 7,0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,8	0	0
<p>Ethylbenzol (C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>) (1): 100ppm, 440 mg/m<sup>3</sup></p>	(3): 0,87 (4): 23 (5): 430 (6): 1,0 (7): 7,8	2,1	1,9	2,9	2,4	3,1	0,8	10,3	1,5	0,9
<p>Styrol C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> (1): 20 ppm, 86 mg/m<sup>3</sup> (2): 40 ppm</p>	(3): 0,91 (4): 32 (5): 490 (6): 1,0 (7): 7,7	2,5	2,8	3,1	2,2	2,3	0,7	0	0	0

Stoff		V10 Käfig- schale aus PSU, Holz- späne	V11 Käfig- schale aus PPSU, Weizen- stroh	V12 Käfig- schale aus PC, Wiesen- heu	V13 Käfig- schale aus PSU, Wiesen- heu	V14 Käfig- schale aus PSU, Weizen- stroh	V15 Behälter aus PP	V16 Material- probe aus PC	V17 Material- probe aus PSU	V18 Material- probe aus PPSU
(1) AGW in ppm bzw. mg/m <sup>3</sup>  (2) ETW in ppm	(3): ρ (4): FP (5): ZT (6): UEG (7): OEG	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]
Methanol CH <sub>3</sub> OH (1): 200ppm, 270 mg/m <sup>3</sup>  (2): 720 ppm	(3): 0,79 (4): 9 (5): 440 (6): 6 (7): 50	5,9	5,5	0,4	0,5	6,7	0,3	0,5	0,4	0,4
Ethanol CH <sub>5</sub> OH (1): 500ppm, 960 mg/m <sup>3</sup>	(3): 0,79 (4): 12 (5): 400 (6): 3,1 (7): 27,7	12,3	7,2	1,8	6,3	8,3	0,2	0,9	0,2	0,6
Methanal (Form- aldehyd) HCHO (1): 0,3 ppm, 0,37 mg/m <sup>3</sup>  (2): 1 ppm	(3): 0,82 (4): 32...61 (5): 430 (6): 7 (7): 73	15,7	13,7	6,1	6,3	18,6	1,2	0,5	0,4	0,7
ETW überschritten										
Ethanal (Acetalde- hyd) H <sub>3</sub> CHO (1): 50 ppm, 91 mg/m <sup>3</sup>	(3): 0,78 (4): -20 (5): 155 (6): 4 (7): 57	7,8	12,7	3,3	4,4	14,7	0,7	0,9	0,7	0,7
Propanon (Aceton) C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O (1): 500ppm, 1200 mg/m <sup>3</sup> (2): 500ppm	(3): 0,79 (4): -20 (5): 535 (6): 2,5 (7): 14,3	1,3	2,3	2,1	1,6	2,2	1,2	15,8	1,4	1,2
Methansäu- re (Ameisen- säure) HCOOH (1): 5 ppm, 9,5 mg/m <sup>3</sup>	(3): 1,22 (4): 45 (5): 520 (6): 10 (7): 45,5	5,5	2,1	0,7	1,2	2,2	0	0	0,1	0,1

Stoff	V10 Käfig- schale aus PSU, Holz- späne	V11 Käfig- schale aus PPSU, Weizen- stroh	V12 Käfig- schale aus PC, Wiesen- heu	V13 Käfig- schale aus PSU, Wiesen- heu	V14 Käfig- schale aus PSU, Weizen- stroh	V15 Behälter aus PP	V16 Material- probe aus PC	V17 Material- probe aus PSU	V18 Material- probe aus PPSU	
<p>(1) AGW in ppm bzw. mg/m<sup>3</sup></p> <p>(2) ETW in ppm</p>	(3): ρ (4): FP (5): ZT (6): UEG (7): OEG	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	Konz. [ppm]	
Ethansäure (Essigsäure) CH <sub>3</sub> COOH (1): 10 ppm, 25 mg/m <sup>3</sup>  (2): 20 ppm	(3): 1,05 (4): 38,5 (5): 485 (6): 6 (7): 17	10,4	5,5	2,3	4,9	3,8	0,4	1,9	0,7	0,3
n-Butan C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1): 1000 ppm, 2400 mg/m <sup>3</sup>	(3): 2,71 (4): -60 (5): 365 (6): 1,4 (7): 9,4	1,7	0,9	1,2	1,6	1,4	2,3	4,1	0,8	0,9
c-Hexan (Cyclohexan) C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> (1): 200ppm, 700 mg/m <sup>3</sup>	(3): 0,78 (4): -18 (5): 260 (6): 1,0 (7): 9,3	0,8	0,5	0,6	0,5	0,7	0,3	0,4	0,2	0,5
p-Kresol C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O (1): AGW nicht festgelegt, da krebserregend	(3): 1,03 (4): 86 (5): 555 (6): 1,0 (7): keine Angabe	0,5	0,8	2,7	1,1	0,8	0,1	14,1	0,5	0,1
o-Kresol C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O (1): AGW nicht festgelegt, da krebserregend	(3): 1,03 (4): 81 (5): 555 (6): 1,0 (7): keine Angabe	4,1	2,4	0,2	1,1	3,7	0,3	0,1	0,8	0,4
m-Kresol C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O (1): AGW nicht festgelegt, da krebserregend	(3): 1,03 (4): 86 (5): 555 (6): 1,0 (7): keine Angabe	1,1	1,7	0,6	0,7	2,8	0	0	0	0
Phenol C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH (1): 2 ppm, 8 mg/m <sup>3</sup>	(3): 1,07 (4): 82 (5): 595 (6): 1,3 (7): 9,5	42,8	29,8	20,9	38,2	44,4	1,6	62,6	15,2	2,6

Bemerkungen zu den Messwerten:

- Die roten Markierungen bei den jeweiligen Versuchen zeigen, dass hier der AGW-Wert überschritten wurde.
- Tabelle 6 zeigt ebenfalls die Versuche, bei denen der ETW überschritten wurde (Markierung in der Farbe Rosa).
- Die Messung von geringen Mengen an Chlorwasserstoff (HCl) in den Versuchen könnte evtl. auf die Bildung von Chlormethan ( $\text{CHCl}_3$ ) in den Pflanzen (hier Streu) z.B. durch die Zersetzung durch Pilze zurückzuführen sein. Weiterhin wird Polysulfon u. a. mittels des Stoffes 4,4'-Dichlordiphenylsulfon hergestellt; Polycarbonat mittels der Chlorverbindung Phosgen.
- Die geringe Menge an HCl bei Versuch 15 (Behälter aus Polypropylen) ist gegenwärtig nicht erklärbar.
- Die  $\text{SO}_2$ -Messung in V12 (PC-Käfigschale mit Wiesenheu) könnte evtl. auf die Einwirkung von saurem Regen auf das Streu zurückzuführen sein.
- Die  $\text{SO}_2$ -Messung in V15 (PP) und V16 (PC) ist gegenwärtig nicht erklärbar.

An dieser Stelle sei auf Unterschiede zwischen den Acute Exposure Guideline Levels (AEGs) der US Environmental Protection Agency [2012] und der vfdb Richtlinie 10/01 [2012] hingewiesen. Beispielsweise hat Benzol nach der vfdb Richtlinie 10/01 einen ETW von 20 ppm und nach der US Environmental Protection Agency einen AEG-2-Wert von 400 ppm bei 4 Std.

Bemerkenswert ist auch die Tatsache, dass Benzol und Stickstoffdioxid wegen der krebserregenden Wirkung sowohl nach der GESTIS-Stoffdatenbank [2012] als auch der GSBL-Datenbank [2012] kein AGW-Wert, wohl aber nach vfdb 10/01 ein ETW zugeordnet wird.

Nachfolgend werden die einzelnen Versuche aus Tabelle 6 näher beschrieben.

In den Diagrammen werden beispielhaft die zeitlichen Verläufe von Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ), Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ), Benzol ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) und Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) dargestellt.

## A Materialprobe aus Polycarbonat (PC, V16)

In einer Stahlblechwanne mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm wurde eine Materialprobe von 25 g Polycarbonat durch den darunter positionierten Keramikstrahler erhitzt.



Abbildung 35: Schmelzender PC-Probekörper bei der Erhitzung mit Keramikstrahler (V16).

Dabei war zu erkennen, dass die Plastikstücke schmolzen und eine Lache bildeten. Anschließend bewirkte die weitere Erwärmung, dass sich große Gasblasen unter der Flüssigkeitslache entwickelten (siehe Abbildung 35), die sporadisch platzten und erhöhte Mengen an Schwelgasen freisetzten. Dieser Umstand erklärt auch den unregelmäßigen Verlauf der Messwerte. Nach dem Versuch war das verkohlte blasenbildende Areal in der Mitte gut zu erkennen (siehe Abbildung 36).

Die Maximalwerte der gemessenen Brandrauchkomponenten können Tabelle 6 entnommen werden.

Die Messung der geringen  $\text{SO}_2$ -Konzentration bei Polycarbonat ist gegenwärtig nicht erklärbar.

Abbildung 37 zeigt die maximalen Konzentrationen von  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  und Benzol bei Polycarbonat.

Es konnte festgestellt werden, dass bereits bei der Erhitzung dieser geringen Materialmenge der AGW-Wert von Phenol überschritten wurde und verhältnismäßig große Mengen der krebserregenden Substanzen Stickstoffdioxid, Benzol und Kresol entstanden.



Abbildung 36: PC-Probekörper nach Versuchsende (V16).

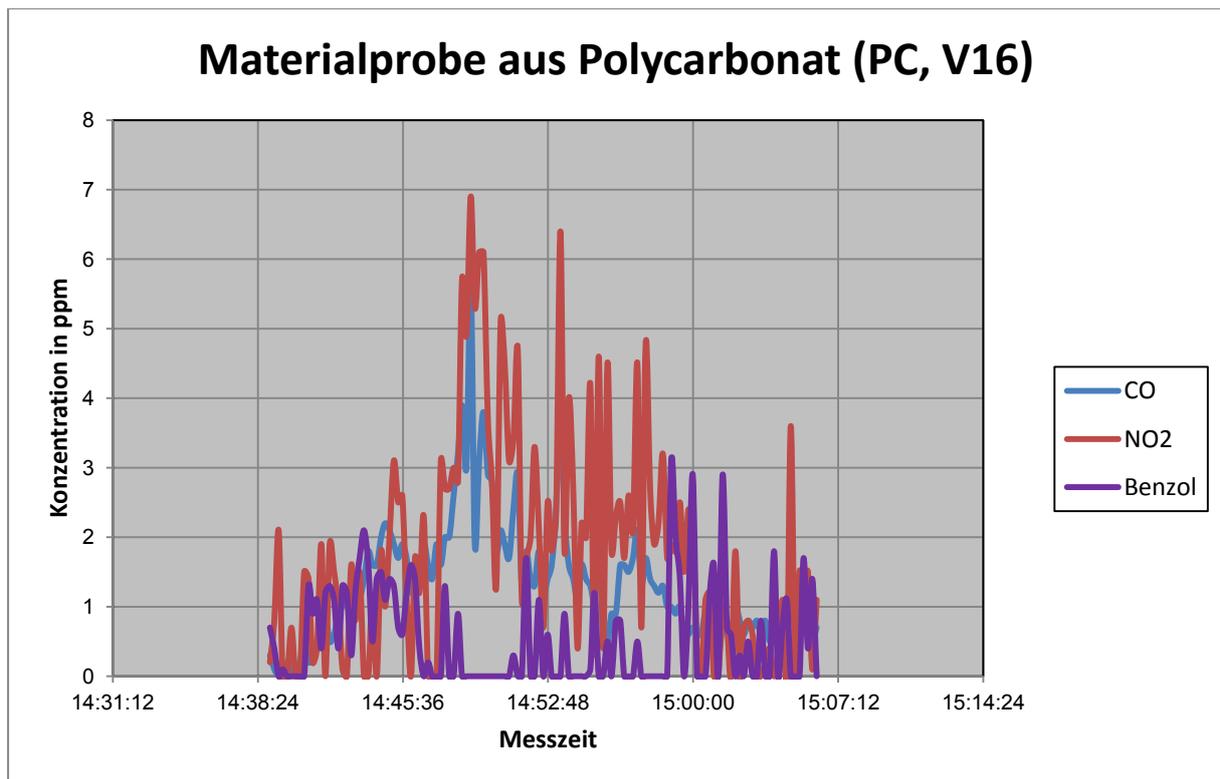


Abbildung 37: Konzentration von CO, NO<sub>2</sub> und Benzol bei der Erhitzung von PC (V16).

## B Materialprobe aus Polysulfon (PSU, V17)

Analog zu Versuch V16 wurden 25 g des Kunststoffes Polysulfon in der Stahlblechwanne mit darunter positioniertem Wärmestrahler erhitzt. Auch hier zeigte sich ein Schmelzen der einzelnen Bruchstücke zu einer Lache, die unter Blasenbildung Brandgase freisetzen (Abbildung 39). Allerdings verlief dieser Vorgang wesentlich langsamer und die Blasen hatten ein geringeres Volumen als bei Versuch V16 mit PC.

Die Maximalwerte der gemessenen Brandrauchkomponenten können Tabelle 6 entnommen werden.

Abbildung 38 zeigt die Konzentration von CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und Benzol bei Polysulfon.

Charakteristisch für diesen Kunststoff ist der erhöhte Anteil von Schwefeldioxid aufgrund der schwefelhaltigen Verbindung. Im Vergleich zu Versuch V16 mit Polycarbonat wurde bei Polysulfon eine etwas geringere Konzentration von Stickstoffdioxid, Benzol und p-Kresol gemessen.

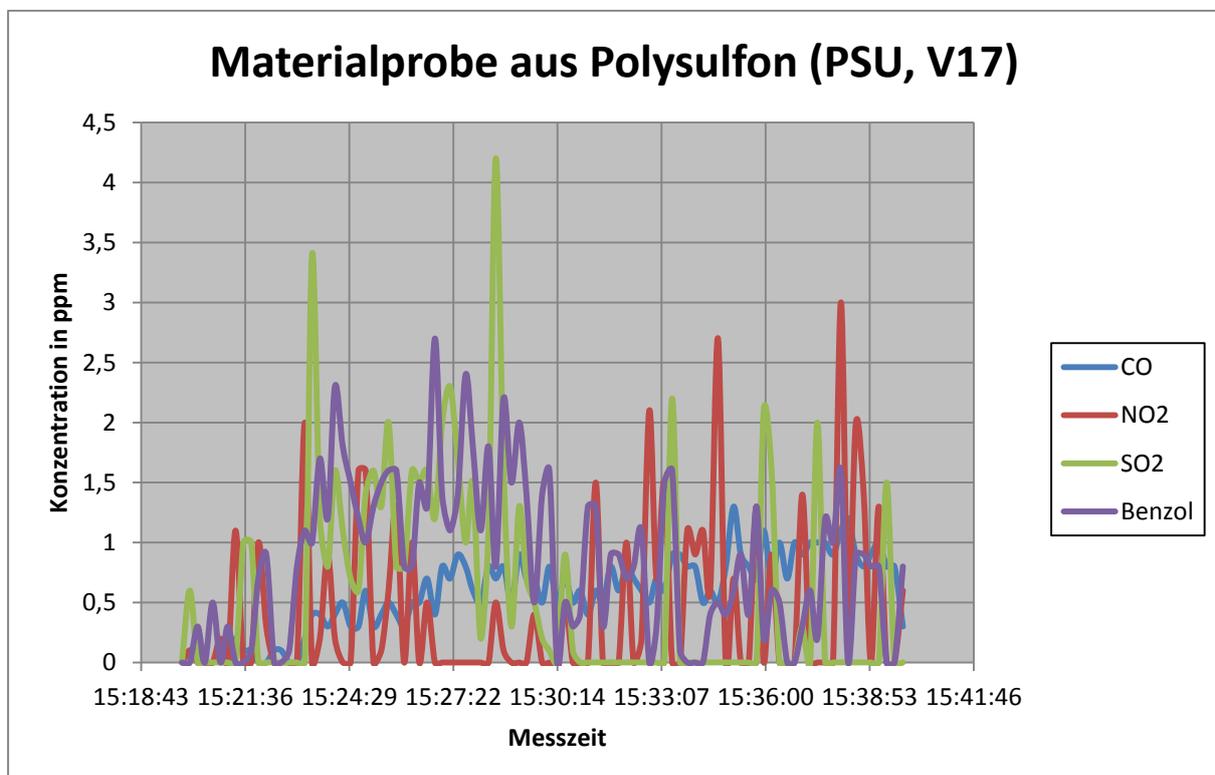


Abbildung 38: Konzentration von CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und Benzol bei der Erhitzung von PSU (V17).



Abbildung 39: PSU-Probekörper nach Versuchsende (V17).

### C Materialprobe aus Polyphenylsulfon (PPSU, V18)

In diesem Versuch wurde eine Materialprobe aus 25 g Polyphenylsulfon in gleicher Weise thermisch beaufschlagt.

Der Trend, geringere Mengen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Phenol zu bilden und weniger stark zu schmelzen als Polycarbonat, der sich bereits bei dem Kunststoff PSU andeutete, zeigte sich auch bei diesem Versuch. Eine signifikante Erhöhung der anderen Brandgasbestandteile gegenüber den anderen Kunststoffen konnte nicht festgestellt werden. Allerdings nahm die Bildung von Schwefeldioxid zu.

Die Maximalwerte der gemessenen Brandrauchkomponenten können Tabelle 6 entnommen werden.

Abbildung 40 zeigt den zeitlichen Verlauf der Stoff  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  und Benzol.

Die Bruchstücke verfärbten sich zwar braun, es trat allerdings keine Lachenbildung ein (siehe Abbildung 41). Es wird vermutet, dass die Zersetzungstemperatur von Polyphenylsulfon in diesem Versuch nicht erreicht wurde.

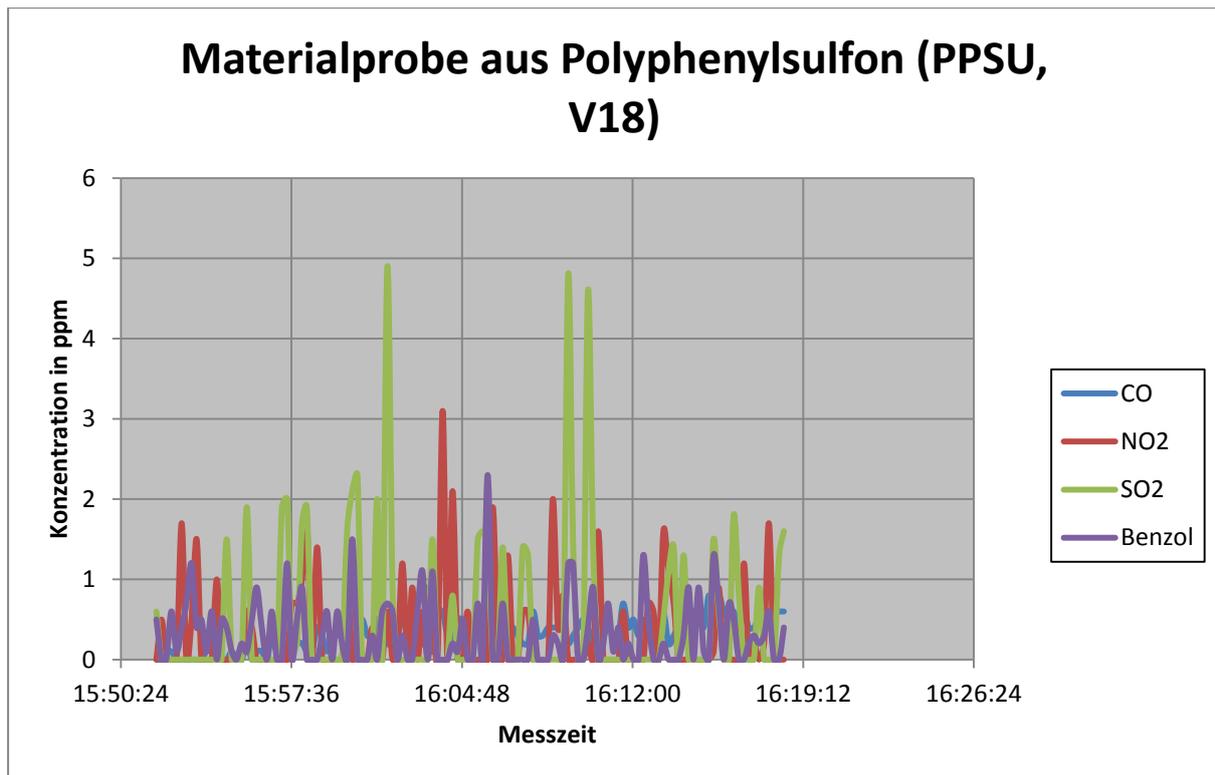


Abbildung 40: Konzentration von CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und Benzol bei der Erhitzung von PPSU (V18).



Abbildung 41: PPSU-Probekörper nach Versuchsende (V18).

## D Käfigschale aus Polysulfon (PSU) mit Holzspänen (V10)

Bei diesem Versuch wurde eine Käfigschale aus PSU mit 110 g Holzspänen gefüllt. Diese Menge an Holzspänen entspricht der Einstreuhöhe von ca. 2 bis 3 cm, die in Tierhaltungsbereichen üblicherweise je Käfig eingesetzt wird.

Durch den Wärmestrahler wurde zunächst ein Loch in die Käfigschale geschmolzen. Dabei lösten sich die grünen Verschlüsse der Schale, die bei den weiteren Versuchen im Vorfeld entfernt wurden, da sie sich auf den Strahler legten und so den Wärmeeintrag in die Käfigschale behinderten. Anschließend entzündete sich die Schale an der Front im Bereich des Wärmestrahlers (Abbildung 42). Des Weiteren war eine Brandausbreitung innerhalb der Schale zu beobachten, wobei hier nur die oberste Schicht der Holzspäne verbrannte (Abbildung 43).



Abbildung 42: Brandverlauf der PSU – Käfigschale mit Holzspänen (V10).



Abbildung 43: PSU-Käfigschale im Frontbereich nach Brandbeaufschlagung (V10).

Die Maximalwerte der gemessenen Brandrauchkomponenten können Tabelle 6 entnommen werden.

Die bei der Verbrennung entstandenen Brandgaskonzentrationen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Benzol zeigen das nachfolgenden Diagramm (Abbildung 44).

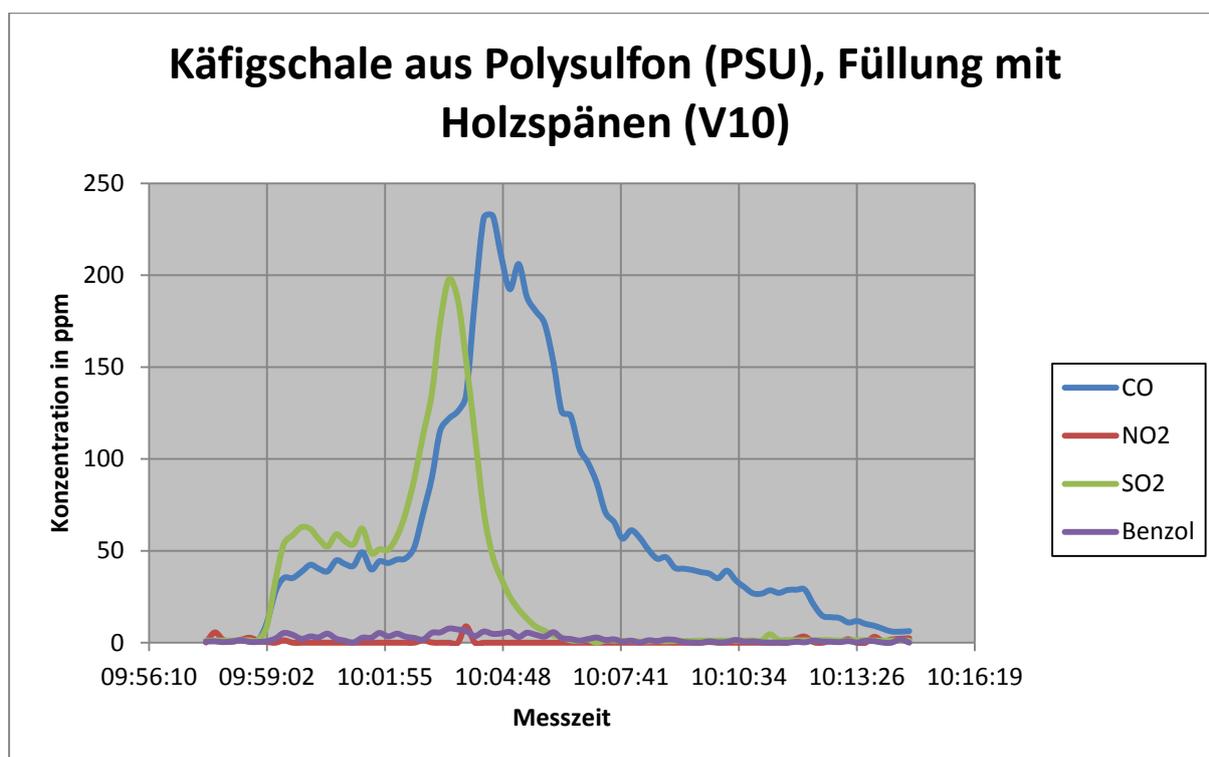


Abbildung 44: Konzentration von CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V10 (Käfigschale aus PSU mit Holzspänen).

In Abbildung 44 kann der Brandverlauf gut verfolgt werden. Direkt nach der Entzündung des Behälters wurde bei den meisten Stoffen ein großer Konzentrationsanstieg registriert (ab 09:59:02 Uhr). Die Maxima wurden beim Vollbrand der Käfigschale zwischen 10:02:13 Uhr und 10:06:40 Uhr erreicht.

Wie Tabelle 6 zeigt, werden bereits bei dieser kleinen Brandlast kritische Konzentrationen für Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid, Ethen, Benzol und einige weitere Stoffe erreicht.

## E Käfigschale aus Polyphenylsulfon (PPSU) mit Weizenstroh (V11)

Bei diesem Versuch wurde die Käfigschale aus PPSU mit 25 g Weizenstroh befüllt. Das Stroh entzündete sich auch hier erst, nachdem ein Loch in die Käfigschale geschmolzen war.

Der Kunststoffbehälter nahm nur wenig am Verbrennungsvorgang teil (Abbildung 45 und Abbildung 46), sodass sich die ermittelten Werte für die Brandgaskonzentrationen gemäß Tabelle 6 und Abbildung 47 hauptsächlich aus den Strohbrand ergeben.



Abbildung 45: PPSU-Käfigschale im Frontbereich mit Weizenstroh bei Beaufschlagung mit Wärmestrahler (V11).



Abbildung 46: PPSU-Käfigschale im Innenbereich mit Weizenstroh nach Brandbeaufschlagung (V11).

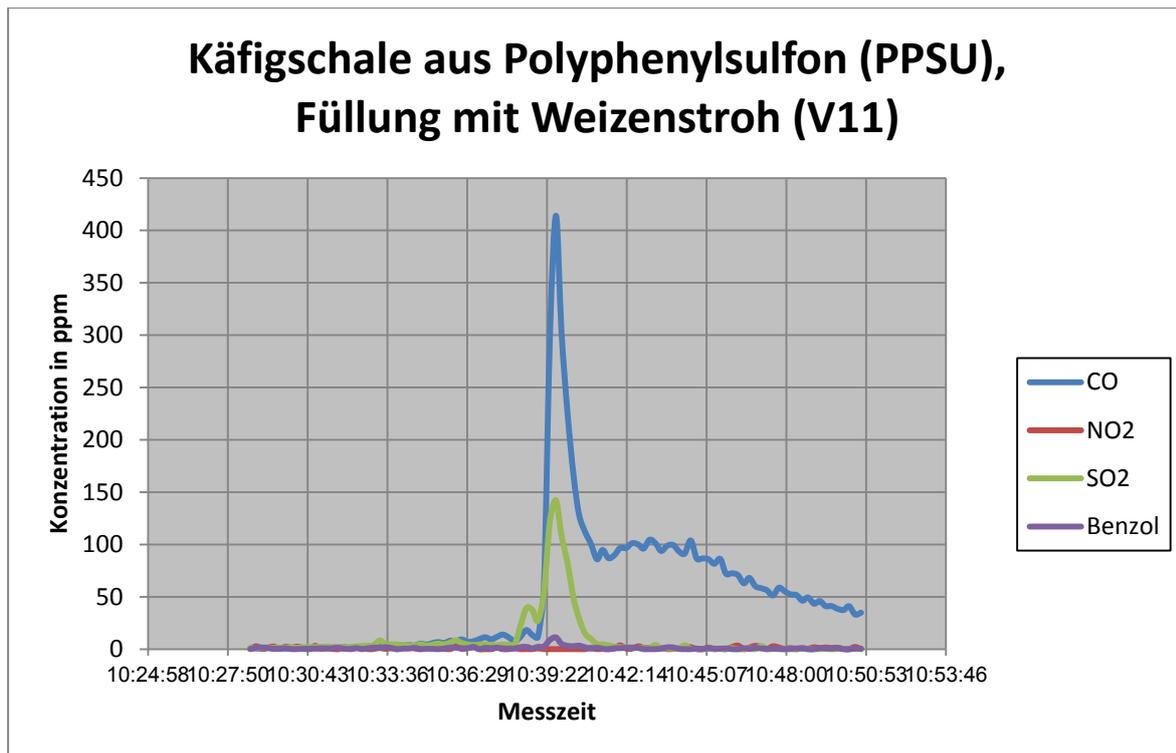


Abbildung 47: Konzentration von CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V11 (Käfigschale aus PPSU mit Weizenstroh).

#### F Käfigschale aus Polycarbonat (PC) mit Wiesenheu (V12)

Bei der Erhitzung mit anschließendem Brand einer PC – Tierkäfigschale, welche mit 20 g Wiesenheu gefüllt war, kam es zum brennenden Abtropfen des Kunststoffes. Des Weiteren wurde der Behälter stark beschädigt, da die Front im Bereich des Wärmestrahlers nahezu vollständig mit dem Heu verbrannte (Abbildung 48). Selbst das gegenüberliegende Ende der Käfigschale wurde durch den Heubrand entzündet und geschmolzen.



Abbildung 48: PC-Käfigschale im Frontbereich mit Wiesenheu nach Brandbeaufschlagung.

Tabelle 6 zeigt die Maximalwerte der Konzentrationen der gemessenen Brandrauchkomponenten.

Abbildung 49 zeigt die zeitlichen Verläufe der Brandgaskonzentrationen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Benzol.

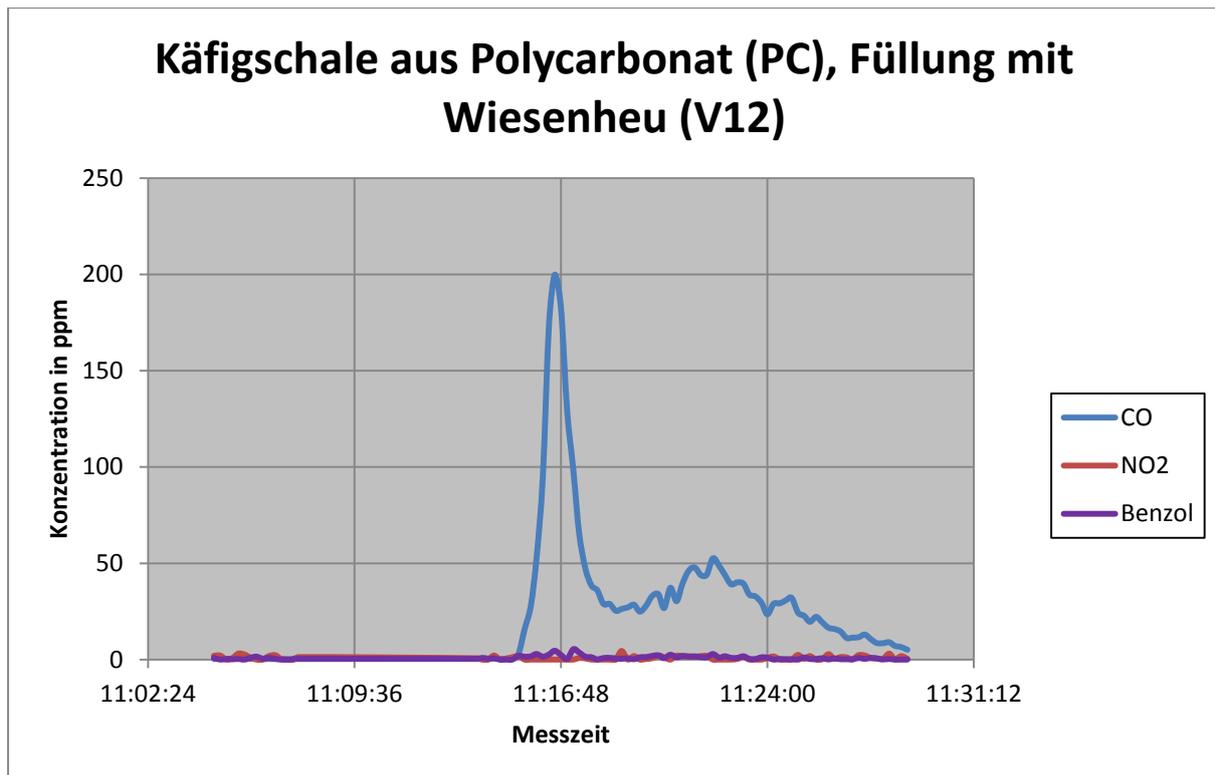


Abbildung 49: Konzentrationen von CO, NO<sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V12 (Käfigschale aus PC mit Wiesenheu).

Weiterhin ergab sich bei diesem Versuch eine relativ hohe Konzentration an Cyanwasserstoff (HCN) von 2,2 ppm.

Die Bedeutung der Blausäureexposition bei schweren Brandrauchvergiftungen wird im Hinblick auf die Überarbeitung der O.R.B.I.T. Studie (System zur optimierten Rettung und Brandbekämpfung mit integrierter technischer Hilfeleistung) gegenwärtig diskutiert (siehe Kaiser [2012]). Bisher wurde angenommen, dass Kohlenstoffmonoxid (CO) ursächlich für den tödlichen Ausgang einer Rauchgasvergiftung verantwortlich ist.

## G Käfigschale aus Polysulfon (PSU) mit Wiesenheu (V13)

Bei diesem Versuch wurde die Käfigschale aus PSU mit 20 g Wiesenheu gefüllt. Die Brandauswirkungen auf die Käfigschale waren sehr ähnlich denen des Versuchs V10 mit 110 g Holzspänen als Einstreu. Das gesamte im Behälter enthaltene Heu wurde dabei verbrannt (Abbildung 50).



Abbildung 50: PC-Käfigschale im Frontbereich mit Wiesenheu nach Brandbeaufschlagung (V13).

Die Maximalwerte der gemessenen Brandrauchkomponenten können Tabelle 6 entnommen werden.

Abbildung 51 zeigt die zeitlichen Verläufe der Brandgaskonzentrationen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Benzol.

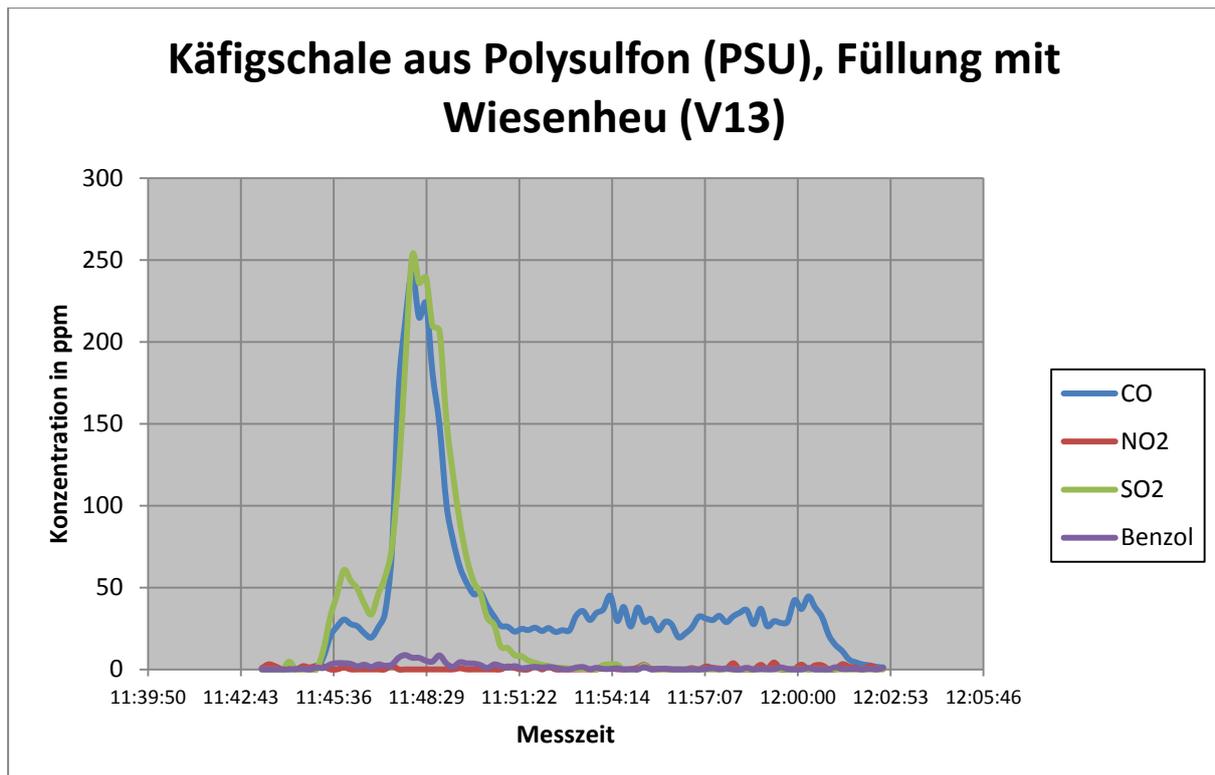


Abbildung 51: Konzentration von CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V13 (Käfigschale aus PSU mit Wiesenheu).

Weiterhin ergab sich bei diesem Versuch ebenfalls eine relativ hohe Konzentration an Cyanwasserstoff (HCN) von 3,2 ppm.

## H Verbrennung PSU – Käfigschale mit 25 g Weizenstroh (V14)

Um den Einfluss des Inhaltes der Käfigschale auf das Brandverhalten und die dabei entstehenden Schadgase zu beleuchten, wurde eine PSU – Käfigschale mit Weizenstroh gefüllt und der Versuch wie in den Versuchen D (V10, PSU, Holzspäne) und G (V13, PSU, Wiesenheu) wiederholt.



Abbildung 52: PSU-Käfigschale während des Brandversuchs (V14).



Abbildung 53: PSU-Käfigschale im Frontbereich mit Weizenstroh nach Brandbeaufschlagung (V14).

Dabei war das Zerstörungsbild an der mit Wärmestrahlung beaufschlagten Behälterwand ähnlich der in den vorangegangenen Versuchen (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53).

Die Maximalwerte der gemessenen Brandrauchkomponenten können Tabelle 6 entnommen werden.

Abbildung 54 zeigt die gemessenen CO-, NO<sub>2</sub>-, SO<sub>2</sub>- und Benzol-Konzentrationen.

Im Vergleich mit Holzspänen und Wiesenheu zeigt Weizenstroh die höchsten Konzentrationen bei Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmonoxid, Ammoniak, Schwefeldioxid, Cyanwasserstoff, Methan, Propan, n-Hexan, Ethen, Benzol, o-Xylol, Methanol, Formaldehyd und Acetaldehyd.

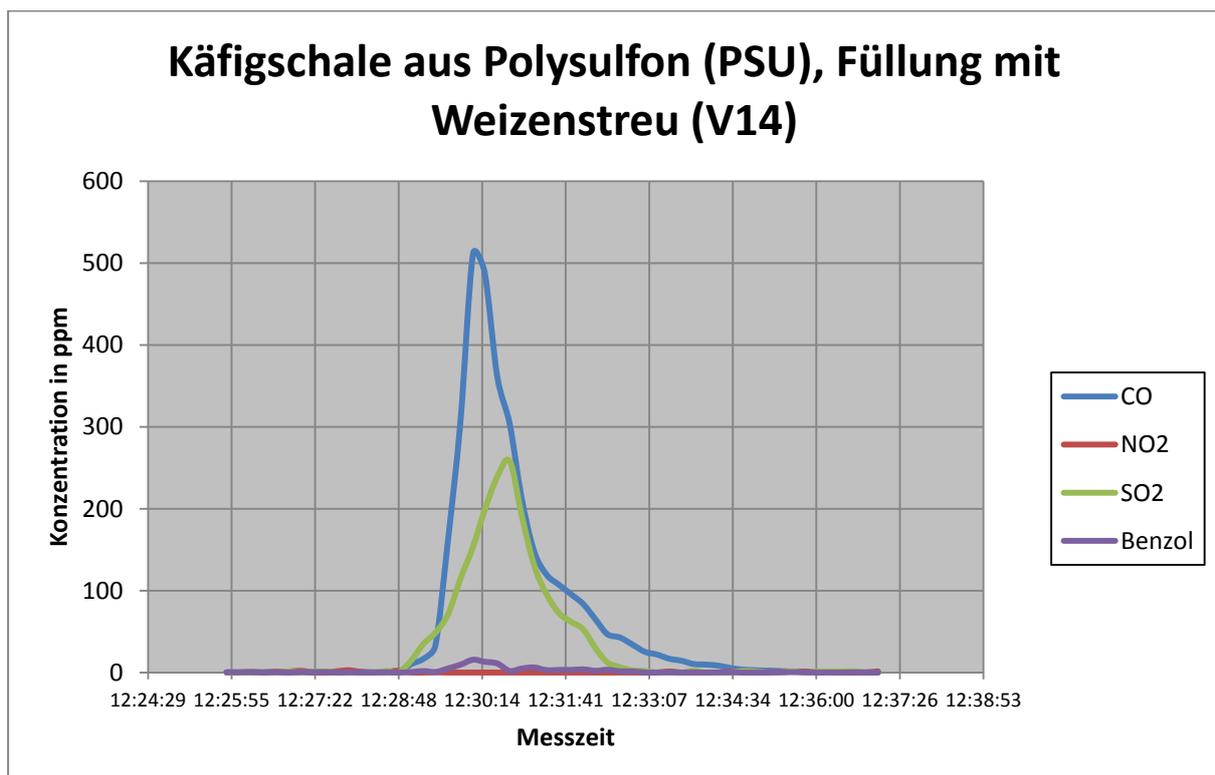


Abbildung 54: Konzentration von CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V14 (Käfigschale aus PSU mit Weizenstroh).

Weiterhin ergab sich bei diesem Versuch ebenfalls eine relativ hohe Konzentration an Cyanwasserstoff (HCN) von 4,6 ppm.

## I Behälter aus Polypropylen (PP, V15)

Zur Aufbewahrung von flüssigen Stoffen werden oftmals Behälter aus Polypropylen im Labor verwendet.

Im vorliegenden Fall wurde eine Laborflasche aus Polypropylen (66 g) mit dem Wärmestrahler erhitzt, um die entstehenden Rauchgase und das Brandverhalten zu untersuchen.

Der Behälter schmolz hierbei sehr rasch unter Lachenbildung und entzündete sich anschließend, bis schließlich nur noch die Lache brannte (Abbildung 55 und Abbildung 56).



Abbildung 55: Schmelze des PP-Behälters brennt.



Abbildung 56: Lachenbrand des PP-Behälters.

Die Ergebnisse der SO<sub>2</sub>-Messung sind gegenwärtig nicht erklärbar (siehe Tabelle 6).

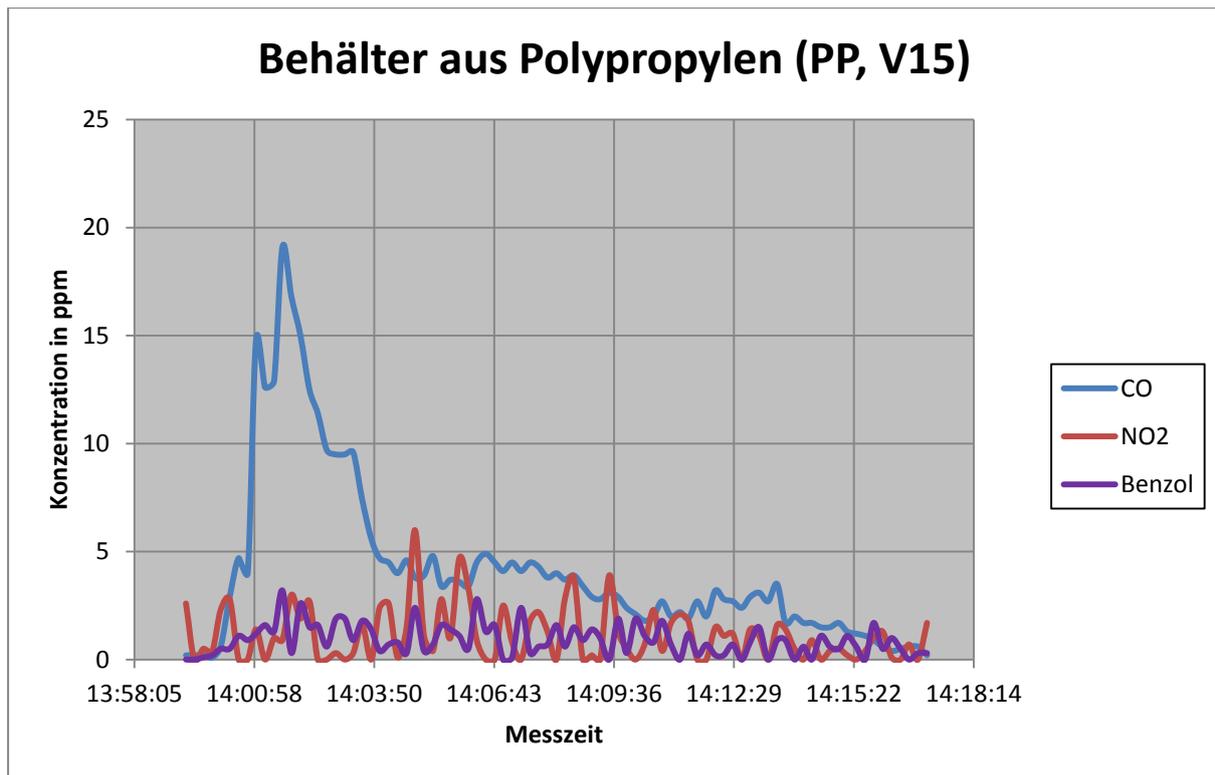


Abbildung 57: Konzentrationen von CO, NO<sub>2</sub> und Benzol bei Versuch V15 (Behälter aus Polypropylen).

Weiterhin ergab sich bei diesem Versuch ebenfalls eine relativ hohe Konzentration an Cyanwasserstoff (HCN) von 3,2 ppm.

### **5.1.2. Bestimmung des Volumenstroms der eingesetzten Löschdüsen in Abhängigkeit vom Betriebsdruck**

Da sich in den Kaltsprühversuchen im Versuchslabor herausstellte, dass der Sprühkegeldurchmesser einer zunächst eingesetzten Einfach- Dralldüse mit nur einem Sprühkegel aufgrund der geringen Raumhöhe für die Wasserbeaufschlagung des Versuchslabors unzureichend war, wurde eine Niederdruck- Zwillings- Dralldüse vom gleichen Hersteller mit zwei Sprühkegeln in den Brand- und Löschversuchen eingesetzt. Diese zeigte betragsmäßig einen ähnlichen Volumenstrom-/ Druckverlauf wie die Einfach- Dralldüse und ermöglichte eine gleichmäßige Wasserbeaufschlagung des Versuchslabors.

Für den Vergleich der Brand- und Löschversuche beim Einsatz von Nieder- und Hochdruck-Wassernebel wurde entsprechend den bisherigen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Untersuchungen (Kunkelmann [2006, 2010]) ein konstanter Durchfluss von

13 l/min

sowohl für den

Hoch- als auch den Niederdruck (135 bar bzw. 4,5 bar)

eingestellt.

### **5.1.3. Druck- und Strömungsverhältnisse in Laborraum und Schleuse bei verschiedenen Ventilationsbedingungen**

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Lüftung auf den Unterdruck im Laborraum und in der Schleuse wurden 22 unterschiedlichen Lüftungsvarianten im Laborraum untersucht.

Im Laborraum wurden hierbei 8 Lüftungsöffnungen (siehe Abbildung 4) eingebaut:

- Lüftungsöffnung Ö1: Eckbereich vorne links (vl) unten im Bodenbereich (links neben der Eingangstür in das Labor)
- Lüftungsöffnung Ö2: Eckbereich vorne links (vl) oben im Deckenbereich (links neben der Eingangstür in das Labor)

- Lüftungsöffnung Ö3: Decke zentral links
- Lüftungsöffnung Ö4: Eckbereich hinten links (hl) oben im Deckenbereich
- Lüftungsöffnung Ö5: Eckbereich hinten rechts (hr) oben im Deckenbereich
- Lüftungsöffnung Ö6: Eckbereich hinten rechts (hl) unten im Bodenbereich
- Lüftungsöffnung Ö7: Decke zentral rechts
- Lüftungsöffnung Ö8: Eckbereich vorne rechts (vr) oben im Deckenbereich (zwischen der Eingangstür in das Labor und der Tür in die Schleuse)

Die Lüftungsöffnungen ÖS1 und ÖS2 befinden sich in der Schleuse und werden hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, da sie für die folgenden Kalt- bzw. Brand- und Löschversuche im Versuchslabor nur eine untergeordnete Rolle spielten.

Weiterhin wurden die Strömungsgeschwindigkeiten in den Zu- und Abluftkanälen ermittelt. Die 22 Versuche wurden in sechs Gruppen zusammengefasst, die bei ähnlichen Ventilationsbedingungen vergleichbare Druckwerte ergaben. Die Zuordnung der Lüftungssituation zu den Lüftungsöffnungen sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

In den Lüftungskanälen betrug die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den hier durchgeführten Untersuchungen bei 5 bis 8 m/s, wodurch sich mittlere Luftwechselzahlen im Bereich zwischen 8 und 12 [1/h] ergaben.

Die Luftwechselzahl gibt an, wie oft pro Stunde das gesamte Raumvolumen durch Frischluft ersetzt wird. Nach Wagner [1997] ergeben sich für Infektionsabteilungen in Krankenhäusern Luftwechselzahlen im Bereich 5...8...10 [1/h].

Tabelle 7: Druckverhältnisse, Lüftungssituationen und Gruppierungen (A= Abluft, Z= Zuluft).

Versuchs-Nr.	Gruppierung	Lüftungssituation (Öffnungen)								Druck Labor in Pa	Druck Schleuse in Pa
		Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8		
1	1	A					Z			-66	-34
2	6	Z					A			-76	-34
3	1	A			Z					-66	-35
4	1	A				Z				-65	-34
5	1	A						Z		-66	-35
6	1	A				Z		Z		-65	-34
7	1	A			Z		Z			-65	-34
8	2		A		Z					-58	-34
9	2		A				Z			-58	-34
10	2		A	A			Z			-61	-35
11	3						Z		A	-63	-35
12	3				Z				A	-63	-34
13	4	Z				A				-66	-34
14	5	Z				A		A		-70	-34
15	4	Z						A		-64	-34
16	5		Z			A		A		-70	-34
17	6		Z			A				-65	-34
18	4		Z					A		-66	-34
19	6		Z	Z			A			-76	-35
20	6		Z				A			-76	-35
21	4		Z	Z		A				-67	-35
22	6	Z	Z	Z	A	A	A	A	Z	-77	-35

#### 5.1.4. Versuche mit Disconebel

Für sechs ausgewählte Ventilationsvarianten aus Abschnitt 5.1.3 wurden mit Disconebel die Strömungsverhältnisse im Raum sichtbar gemacht. Die Nebelmaschine stand hierbei auf dem Labortisch mit Ausstoßrichtung des Nebels in Richtung Raummitte (siehe Abbildung 58).



Abbildung 58: Ausstoß der Nebelmaschine in Richtung Versuchslabor Mitte.

Die Versuchsbeobachtungen sind der folgenden Tabelle 8 zu entnehmen.

Bei den Beobachtungen sind die erreichten Anzeigewerte der Balkenanzeige des Rauchansaugsystems (RAS) angegeben. Diese Anzeige reicht von 0 bis 10 Balken.

Bei diesen Versuchen zur Sichtbarmachung von Strömungen in Abhängigkeit der Zu- und Abluftschaltung zeigte sich, dass im Raum kaum Vorzugsrichtungen des Nebels erkennbar waren.

Tabelle 8: Versuchsbeobachtungen mit Disconebel.

Versuchs- Nr.	Lüftungssituation								Druck Labor in Pa	Druck Schleuse in Pa	Beobachtungen
	1	2	3	4	5	6	7	8			
DN1	A					Z			-64	-32	keine gerichtete Driftbewegung erkennbar
DN2		A				Z			-57	-33	keine gerichtete Driftbewegung erkennbar RAS 24 Bedienfeld zeigt nach 4 min 2 Balken
DN3						Z		A	-63	-33	keine gerichtete Driftbewegung erkennbar RAS 24 Bedienfeld zeigt nach 6 min 1 Balken

Versuchs- Nr.	Lüftungssituation								Druck Labor in Pa	Druck Schleuse in Pa	Beobachtungen	
	1	2	3	4	5	6	7	8				
DN4a		Z						A		-64	-33	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Driftbewegung nach Öffnung 7 erkennbar</li> <li>– RAS 24 Bedienfeld zeigt nach 2 min 3 Balken</li> <li>– RAS 24 zeigt nach 10 min 6 Balken</li> </ul>
DN4b		Z			A					-66	-34	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Driftbewegung nach Öffnung 5 erkennbar</li> <li>– RAS 24 Bedienfeld zeigt nach 10 min 5 Balken</li> </ul>
DN5		Z			A			A		-70	-33	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Driftbewegung nach Öffnung 7 &amp; 5 erkennbar</li> <li>– RAS 24 Bedienfeld zeigt nach 10 min 7 Balken</li> </ul>
DN6		Z						A		-75	-34	<ul style="list-style-type: none"> <li>– keine gerichtete Driftbewegung erkennbar</li> <li>– RAS 24 Bedienfeld zeigt nach 7 min 5 Balken</li> </ul>

Abbildung 59 zeigt die Ansprechzeiten der fotoelektronischen Rauchmelder und des Rauchansaugsystems an den verschiedenen Messpunkten exemplarisch für Versuch DN1.

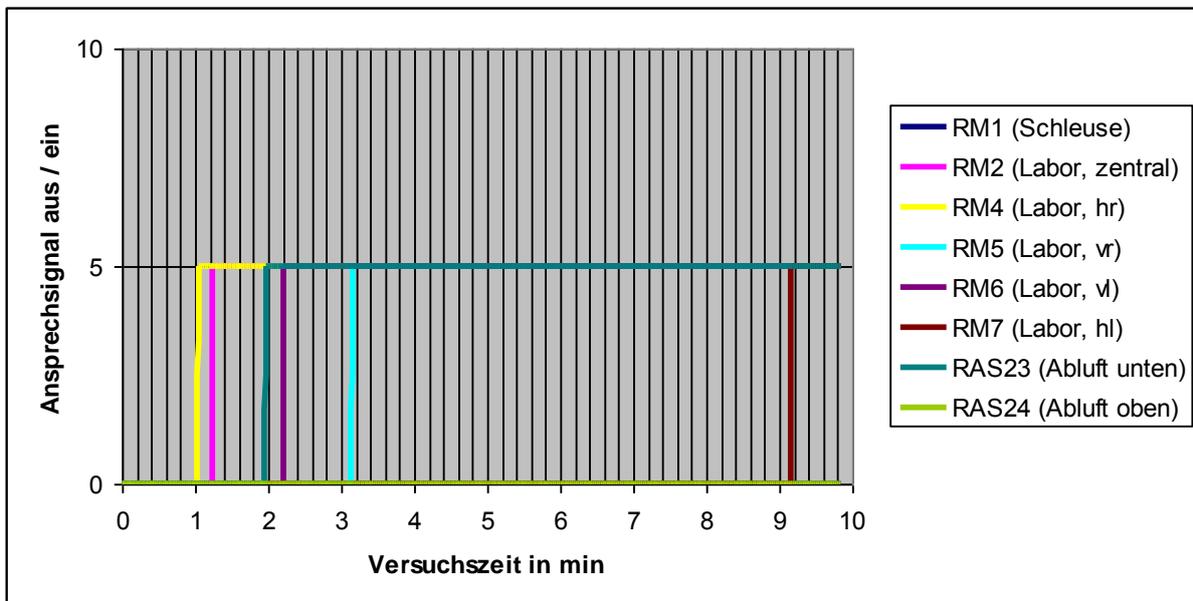


Abbildung 59: Ansprechzeiten der Rauchmelder bei Versuch DN1 mit Disconebel

Im Versuch DN1 löste der erste Melder (RM4) nach 63 s aus, der darauf folgende Melder (RM2) nach 75 s (jeweils auf den Versuchsbeginn bezogen).

Bei allen Versuchen war zu erkennen, dass der Rauchmelder RM7 über der Nebelmaschine als letzter erst nach über 9 Minuten auslöste. Dies ist auf die Ausströmrichtung des Nebels in Richtung Mitte Versuchslabor zurückzuführen. Dieser Rauchmelder löste erst bei vollständiger Ausbreitung des Nebels im Versuchslabor aus. Dies entspricht allerdings nicht dem Ausbreitungsverhalten von realem Brandrauch.

Das Rauchansaugsystem am Messpunkt 23 (untere Messstelle des RAS im Lüftungssystem nach der Einbindung des Abluftkanals aus der Schleuse, siehe Abbildung 21) löste nach 1 min:58 s Alarm aus. Dieser relativ hohe Wert für die Ansprechzeit des RAS ist aber gegenwärtig nur bedingt aussagekräftig. Eine Erklärung für die Verzögerung der Auslösung des Rauchansaugsystems könnte die große Weglänge von der Abluftöffnung bis zur Meldeeinheit sein. Ein weiteres Problem ergab sich durch die Detektion im Lüftungskanal bei hohen Strömungsgeschwindig-

keiten aufgrund der geringen Kanalquerschnitte. Die Absaugleistung des Lüfters im RAS stellte sich unter diesen Einsatzbedingungen als zu gering heraus. Ein zusätzlich installierter Hilfslüfter (Abbildung 28) ergab eine geringfügige Verkürzung der Detektionszeit.

Die folgende Abbildung 60 zeigt den zeitlichen Verlauf der Transmission an den Messstellen

- RD3: vordere rechte Ecke des Versuchslabors in 1,5 m Höhe
- RD8: linke Wand Mitte 20 cm unter der Decke (Höhe: 2,01 m)
- RD9: linke Wand Mitte, halbe Raumhöhe (Höhe: 1,11 m)
- RD10: linke Wand Mitte, 20 cm über dem Boden (Höhe: 0,2 m)

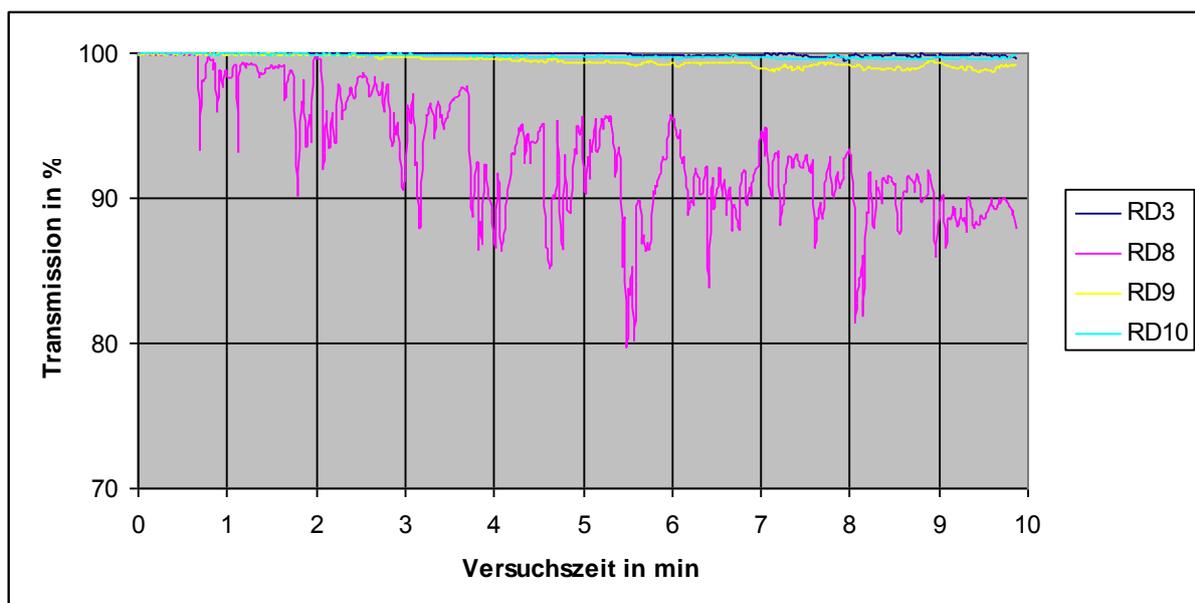


Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der Transmission bei Versuch DN1 mit Disconebel.

Da nur geringe Mengen an Nebel in den Raum eingeleitet wurden, sank der Transmissionswert nur bei der 20 cm unter der Decke angebrachten Lasermessstrecke RD8 signifikant über die Messdauer, da sich dort über der Zeit der Nebel anreicherte.

Abbildung 61 zeigt die relative Luftfeuchtigkeit bei Versuch DN1 an den Messstellen

- rF19/20: Abluftkanal (Labor) links neben Eingangstür Laborraum
- rF21/22: Zuluftkanal (Labor) hinter dem Versuchstreppenraum
- rF24: Abluftkanal (Labor und Schleuse) , Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m)

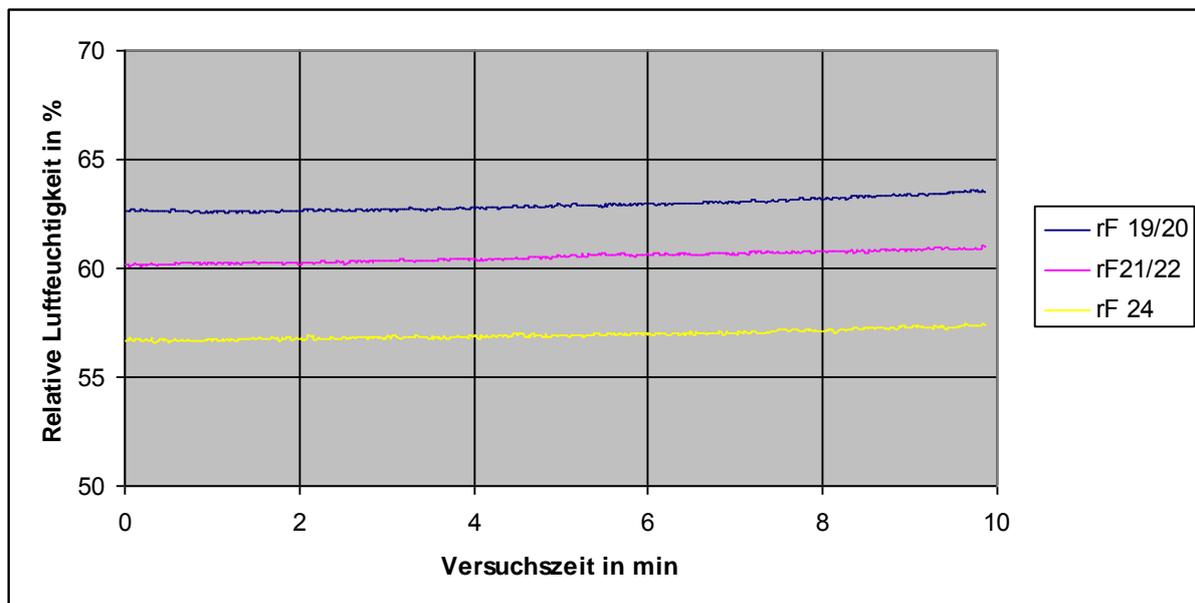


Abbildung 61: Relative Luftfeuchtigkeit bei Versuch DN1 mit Disconebel.

Da es sich bei dem Nebelfluid um ein Gemisch aus den wesentlichen Bestandteilen Glycerin, Propandiol (1,2-Propylenglycol) und Wasser sowie weitere Gerüststoffe handelt, stiegen auch die Werte für die relative Luftfeuchte gleichermaßen um durchschnittlich 1% bei allen drei Messstellen an.

Resultierend aus der geringen Abweichung bei der Ausbreitung von Disconebel im Laborraum wurde eine weitere Reduktion auf zwei Ventilationsvarianten vorgenommen (entsprechend den Versuchen DN2 und DN6), welche hauptsächlich eine Querlüftung zwischen den Öffnungen:

- Öffnung Ö2: Eckbereich vorne links (vl) oben im Deckenbereich (links neben der Eingangstür in das Labor)
- Öffnung Ö6: Eckbereich hinten rechts (hl) unten im Bodenbereich

erzeugen.

## 5.2. Brandversuche ohne Löscheinsatz

Zunächst wurden Brandversuche ohne Löscheinsatz durchgeführt, um die Auswirkungen der Ventilationsverhältnisse auf den Brand, die Branddetektion und die möglichen Auswirkungen (thermisch, Feuchtigkeit) auf handelsübliche HEPA (High Efficiency Particulate Air)- und ULPA (Ultra Low Penetration Air)-Filter sowie die Rückwirkung eines nichtbekämpften Brandes auf den Unterdruck im Raum zu untersuchen.

Die Lüftungsbedingungen wurden analog zu den Versuchen DN2 und DN6 mit Discobebel eingestellt, um hauptsächlich eine Querströmung im Raum zu erzeugen.

- Öffnung 2: Eckbereich vorne links (vl) oben im Deckenbereich (links neben der Eingangstür in das Labor)
- Öffnung 6: Eckbereich hinten rechts (hl) unten im Bodenbereich.

Die folgende Tabelle 9 zeigt eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

Tabelle 9: Versuchsparameter bei den Brandversuchen ohne Löscheinsatz.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	verwendete Brandlast
Br1 (≙ Lüftungsbedingung Vers. DN6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluft im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluft im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -74 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 75 g Wiesenheu</li> <li>– verbrannte Masse: 106 g</li> </ul>
Br2 (≙ Lüftungsbedingung Vers. DN 2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluft im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluft im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -64 Pa</li> <li>– Schleuse: -33 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 75 g Wiesenheu</li> <li>– davon 109 g verbrannt</li> </ul>

A Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu - Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich, Zuluft im Deckenbereich (Versuch Br1)

Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt Versuchsbedingungen für Versuch Br1 sowie die eingesetzte Brandlast bei diesem Versuch.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	verwendete Brandlast
Br1  ( $\triangleq$ Lüftungsbedingung Vers. DN6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluft im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluft im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -74 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 75 g Wiesenheu</li> <li>– Verbrannte Masse: 106 g</li> </ul>

Die Bilderserie (Abbildung 62) zeigt anhand von Videoprints den zeitlichen Versuchsablauf, das Auslösen der Rauchmelder, die Verrauchung im Raum sowie die Brandlast vor und nach dem Versuch.

Zeit	Ereignis	Videoprints
	Brandlast vor dem Versuch: Käfigschale aus PC mit Wiesenheu (hinten links im Raum)	
0 Versuchsbeginn	Wärmestrahler ein	 <p>28 6 2011 13:54:51</p>
2 min 54 s	Entzündung der Brandlast	 <p>28 6 2011 13:57:45</p>
3 min 21 s	RM7 (hinten links im Raum über der Brandlast) Decktemperatur bei Ansprechen: T7 = 35°C	 <p>28 6 2011 13:58:12</p>

3 min 32 s	RM4 (hinten rechts im Raum)	
3 min 34 s	RM2 (Decke Mitte, neben der Zuluftöffnung)	
3 min 42 s	RM6 (vorne links im Raum, über der Abluftöffnung im Bodenbereich)	
3 min 45 s	RM5 (vorne rechts im Raum)	

6 min 21 s	Raum vollständig ver- raucht	
19 min 4 s	Versuchsende	
	Brandlast nach dem Versuch: Zerstörte Tierkäfigschale	

Abbildung 62: Versuch Br1- Versuchsablauf mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.

Bei diesem Brandversuch erfolgte nach Entzündung des Brandgutes eine rasche Ausbildung einer Rauchschiicht unter der Decke. Dabei verbrannten 106 g der Brandlast von 675 g, wobei der Kunststoffbehälter tropfend abbrannte, das Wiesenheu komplett verbrannte sowie der Behälter am Boden größtenteils schmolz.

Während der Brandentwicklungsphase stieg aufgrund der Erwärmung (=> Expansion) der Druck im Versuchslabor um ca. 20 Pa und erreichte nach ca. 8 min wieder den Ausgangsdruck von -75 Pa. Unmittelbar beim Verlöschen des Brandes, gekenn-

zeichnet durch die fallende Temperatur an der Versuchslabordecke, sank der Druck zwischenzeitlich auf -80 Pa.

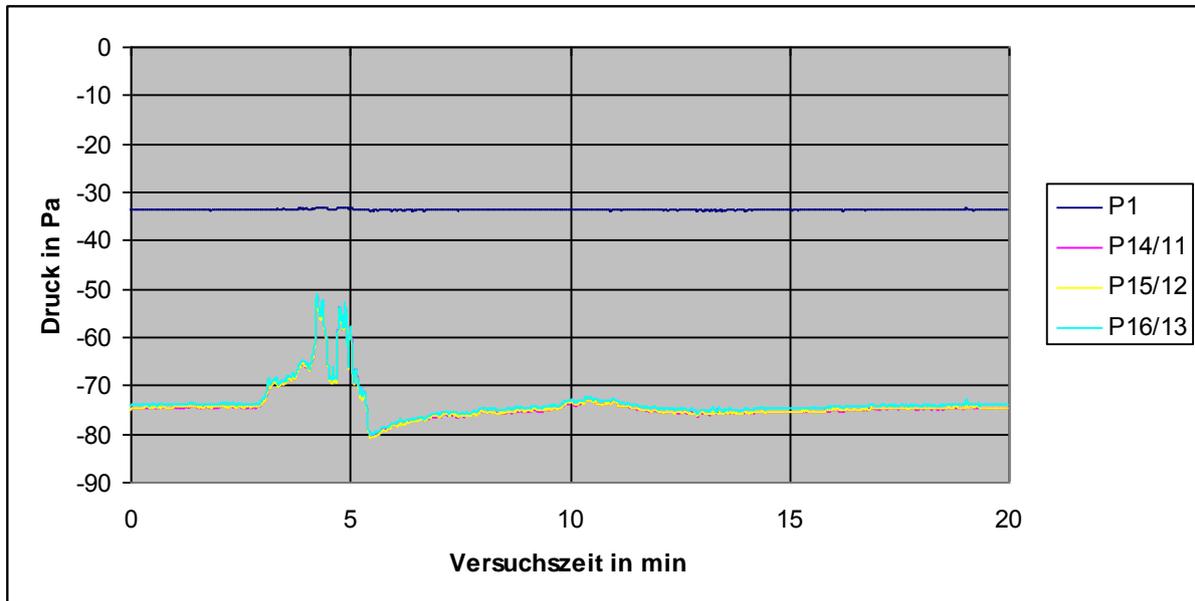


Abbildung 63: Versuch Br1 - Druckverlauf im Versuchslabor mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.

Die folgenden Diagramme zeigen die Temperaturen im Versuchslabor und in den Lüftungskanälen.

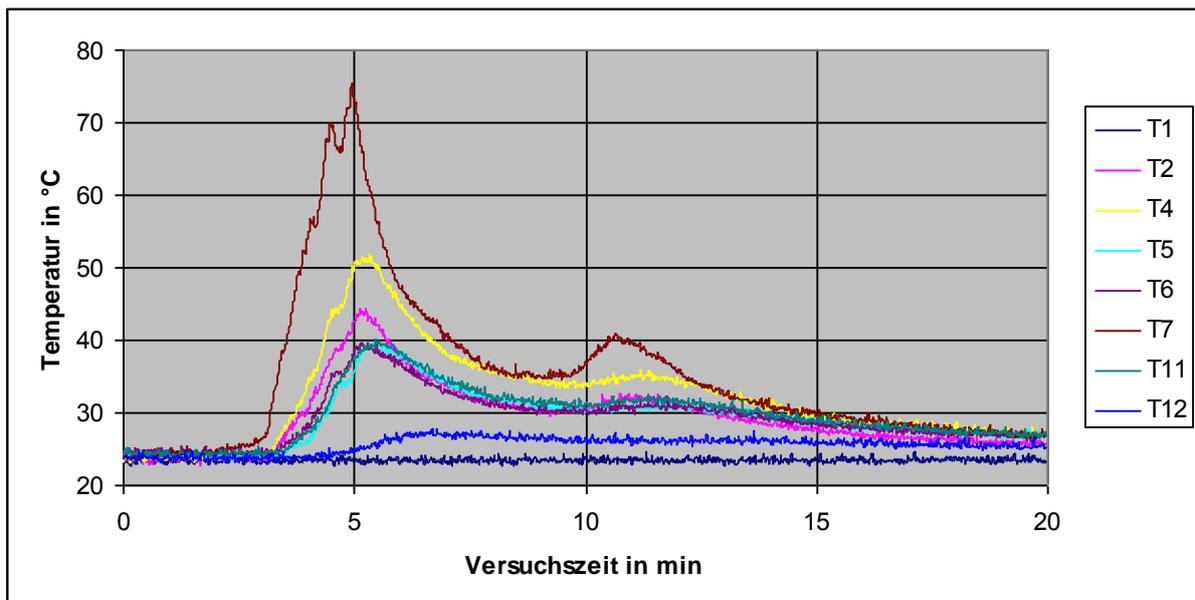


Abbildung 64: Versuch Br1 -Temperaturverläufe im Versuchslabor mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.

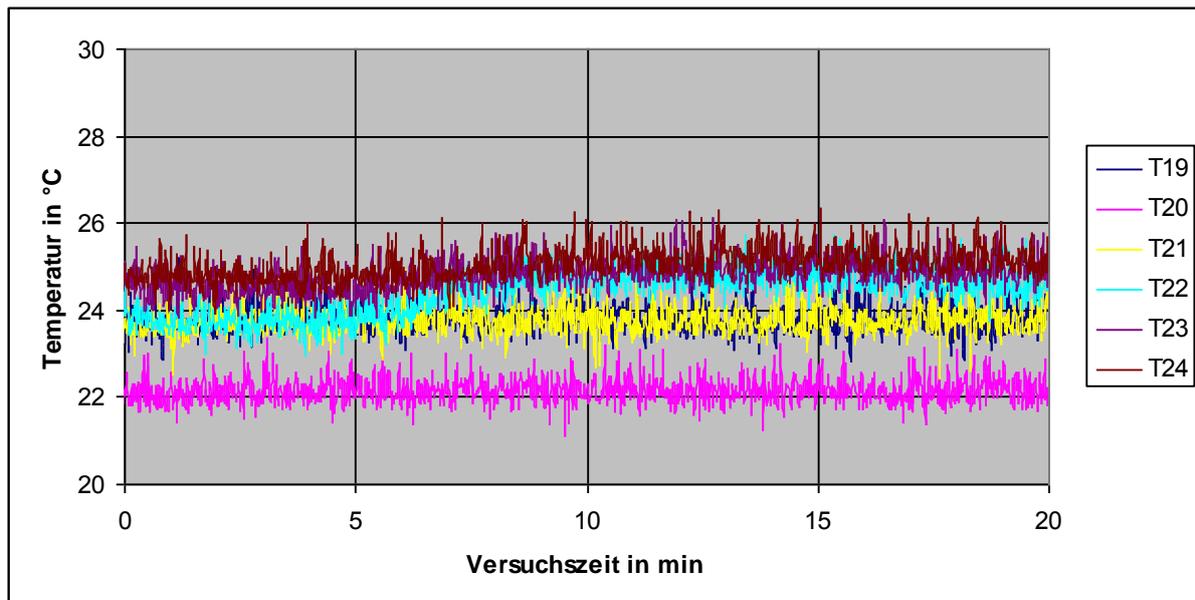


Abbildung 65: Versuch Br1 -Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen mit Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.

Während des Versuchs wurden folgende maximale Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid bzw. minimale Konzentration von Sauerstoff in halber Versuchslaborhöhe (Messstelle 12) lt. Tabelle 10 gemessen:

Tabelle 10: Versuch Br1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)

Sauerstoff (Min.)	20,21 Vol.-%	7 min 33 s
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	300 ppm	7 min 11 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	3700 ppm	7 min 45 s

Im Bereich an der linken Wand Mitte, 20 cm unter der Decke wurden an Messstelle 11 folgende Konzentrationen lt. Tabelle 11 gemessen:

Tabelle 11: Versuch Br1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)

Sauerstoff (Min.)	20,23 Vol.-%	11 min 40 s
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	600 ppm	10 min 53 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	4700 ppm	6 min 12 s

Man erkennt die höheren Konzentrationen an CO und CO<sub>2</sub> im Deckenbereich gegenüber den Messwerten auf halber Höhe.

Die Kohlenstoffmonoxid-Konzentration lag somit bereits bei dieser kleiner Brandlast über dem ETW-Wert von 33 ppm.

Man erkennt, dass zum Zeitpunkt des Ansprechens des ersten Rauchmelders RM7 nach 3 min 21 s und des zweiten Rauchmelders RM4 nach 3 min 32 s die Sicht im Versuchslabor noch nicht beeinträchtigt war (siehe Abbildung 62).

Die für einen Raum dieser geringen Größe ermittelten langen Auslösezeiten der Rauchmelder zeigen den Einfluss der kleinen Brandlast mit langsamer Brand- und Rauchentwicklung aufgrund der relativ langsamen Einwirkung der Zündquelle (Wärmestrahler), der geringen Thermik des relativ kalten Brandrauches sowie der Querströmung durch die Absaugung im Bodenbereich und die Zuluft im Deckenbereich.

Wie die Temperaturverläufe in Abbildung 64 zeigen, trat die maximale Temperatur von ca. 76°C nach 4 min 56 s an Messstelle T7 direkt über der Brandlast auf.

Bei einem Labor der Sicherheitsstufe 3 muss die Abluft und einem Labor der Sicherheitsstufe 4 die Zu- und Abluft durch HEPA / ULPA-Filter geführt werden.

Handelsübliche HEPA (High Efficiency Particulate Air)- und ULPA (Ultra Low Penetration Air)-Filter haben eine maximale Betriebstemperatur von 70°C bis kurzfristig 90°C und eine maximal zulässige relative Luftfeuchtigkeit von 100%.

Dies bedeutet, dass man mit der maximalen bei diesem Versuch gemessenen Temperatur von 76°C im unkritischen Bereich der Filter bleibt.

Im Zeitraum 4 min 46 s bis 5 min 7 s lag die Temperatur an Messstelle T7 über 68°C. Diese relativ geringe Temperaturerhöhung wäre, wie bisherige Untersuchungen an der FFB gezeigt haben, mit großer Wahrscheinlichkeit nicht in der Lage, ein thermisches Glasfassausslöseelement mit einer Nennöffnungstemperatur von 68°C (Farbe Rot) einer Löschdüse in ausreichend kurzer Zeit auszulösen. Hier wird die Notwendigkeit einer schnellen Branddetektion z.B. über Rauchmelder oder RAS unmittelbar erkennbar.

Das nachfolgende Abbildung 66 und die Tabelle 12 zeigen die zeitlichen Verläufe und die maximalen relativen Luftfeuchten in den jeweiligen Lüftungskanälen. Die Schwankungen der Veränderungen der Luftfeuchtigkeit im Luftkanalnetz lagen somit im Bereich von 2%.

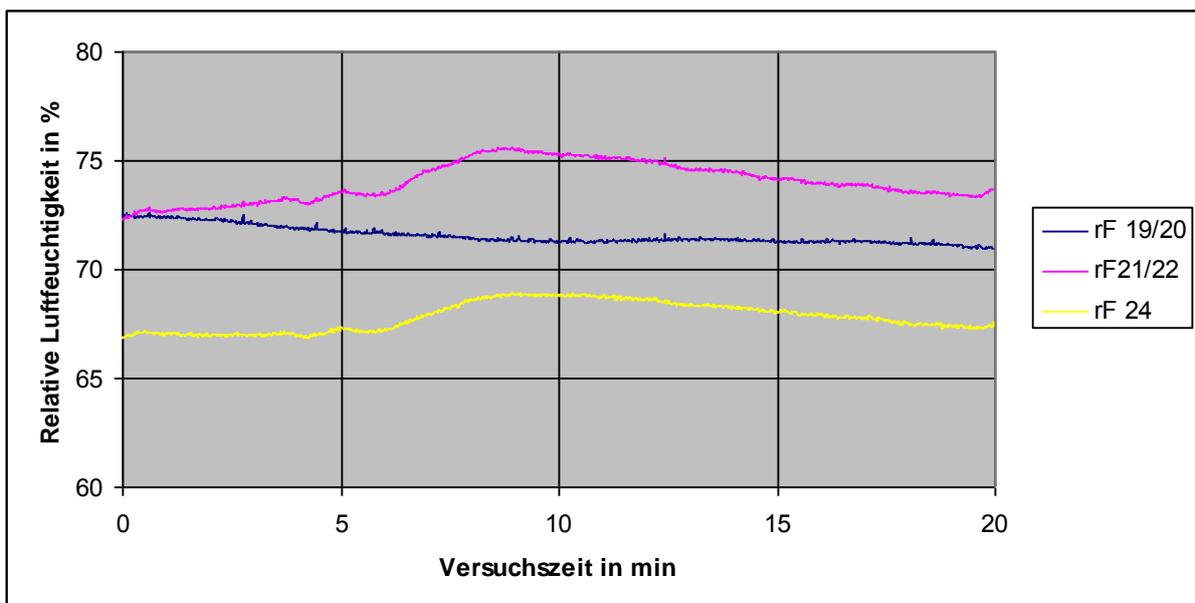


Abbildung 66: Versuch Br1 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen mit Absaugung im Bodenbereich.

Tabelle 12: Versuch Br1 – Relative Luftfeuchtigkeit im Versuchslabor

Versuch Br1		
Zuluft	Zuluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	73 % r. F.
Abluft (unten)	Abluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	76 % r. F.
Abluft (oben)	Abluftkanal (Labor und Schleuse), Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	69 % r. F.

Beim Verbrennungsvorgang entsteht Wasser, welches die Luftfeuchtigkeit erhöht. Gleichzeitig heizt sich der Raum auf. Mit steigender Temperatur nimmt die Wasserdampfmenge, die zur Sättigung von Luft benötigt wird, zu. Dadurch nimmt die relative Luftfeuchtigkeit des Raumvolumens bei Erwärmung ab. Durch die Zumischung von trockener Umgebungsluft aus der Schleuse ergibt sich hierdurch an der gemeinsamen Messstelle rF24 Labor + Schleuse ein niedrigerer Wert.

Wie bereits erwähnt, haben die in der Praxis eingesetzten handelsüblichen Hochleistungsschwebstoff – Filter (HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Airfilter), ULPA-Filter (Ultra Low Penetration Air) wie sie bei realen S3- und S4- Laboren zum Einsatz kommen, eine maximal zulässige relative Luftfeuchtigkeit von 100 % r. F.

Tabelle 12 zeigt, dass bei diesem Brandszenario auch die relative Luftfeuchtigkeit im unkritischen Bereich für HEPA- / ULPA-Filter blieb.

Da es jedoch auch zu einzelnen lokalen Kondensationen im Filter kommen könnte, wenn entsprechende Temperaturunterschiede auftreten und der Taupunkt unterschritten wird, wäre darüber nachzudenken z.B. einen Wert von 90 % r. F. als obere Grenze einzuführen, um auf der sicheren Seite für die Belastung der Filter durch Feuchtigkeit zu liegen.

Weiterhin wäre hier der Montageort der HEPA / ULPA-Filter von Bedeutung. Die Filteranlage würde direkt in der Abluft des Labors stärker durch Feuchtigkeit belastet als im Treppenraum in der letzten Etage nach Zumischung von trockenerer Abluft aus der Schleuse. In der Praxis werden auch Schwebstofffilter direkt in Tierkäfigracks insbesondere bei S4-Anlagen eingebaut (Abbildung 1). Diese Filter sind dann unmittelbar von der Feuchtigkeit im Laborraum betroffen.

Problematisch für die Funktionsfähigkeit von HEPA / ULPA-Filtern kann allerdings die Russbildung bei einem Brand werden, falls keine entsprechenden Vorfilter vor den Schwebstofffiltern eingesetzt werden. Diese Russbildung wurde allerdings bei sämtlichen hier durchgeführten Versuchen quantitativ nicht erfasst.

Eine Lösungsmöglichkeit wäre, vor den Filtern eine Wasserabscheideanlage (Tropfenabscheider) und ein Grobschmutzfilter anzuordnen, um die Lüftungsanlage während z.B. eines Brandes bzw. eines Löschvorganges weiter betreiben zu können.

Das nachfolgende Bild zeigt den zeitlichen Verlauf der Transmission während des Versuchs als Maß für die Sichtverhältnisse.

Hinweis: Der Abstand zwischen der Lichtquelle (Laserdiode) und Empfänger (Photodiode) betrug 14 cm. Die Messstrecke war jeweils gleichmäßig in den Rauch eingetaucht. Wären nur einzelne Rauchstrahlen durch die Messstrecke geströmt, ohne diese auszufüllen, könnte man nur bedingt aus den Transmissionswerten eine optische Rauchdichte ableiten. Somit gilt die Gleichung (3) bzw. (4) für die Berechnung des Extinktionskoeffizienten bzw. der optischen Dichte aus der Transmissionsmessung. nach Kapitel 3.5.1.

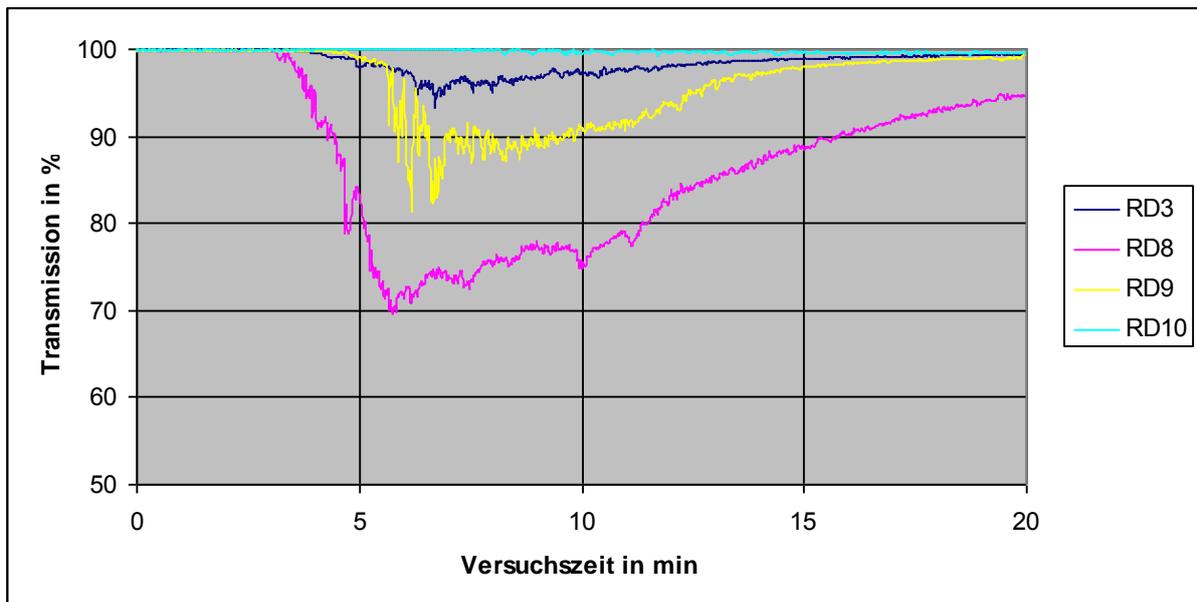


Abbildung 67: Versuch Br1 - Transmission bei Absaugung im Bodenbereich ohne Löscheinsatz.

Im Versuchslabor wurden hierbei folgende minimalen Werte für die Transmission  $\tau$ , bzw. maximalen Werte für den Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die optische Dichte  $OD$  lt. Tabelle 13 ermittelt.

Tabelle 13: Versuch Br1 – Werte für minimale Transmission  $\tau$  bzw. max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und max. optische Dichte  $OD$  im Versuchslabor.

RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 93 \%$ $\sigma = 0,52 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,22 \text{ m}^{-1}$	6 min 43 s
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 70 \%$ $\sigma = 2,55 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,11 \text{ m}^{-1}$	5 min 46 s
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 82 \%$ $\sigma = 1,42 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,62 \text{ m}^{-1}$	6 min 11 s
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	konstant über der Versuchszeit

Die Rauchsicht sank im Verlauf des Versuchs bis zur Absaugöffnung im Bodenbereich, sodass aufgrund dieser Verschlechterung der Sicht eine Orientierung im Raum nicht mehr möglich war.

**B Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu - Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich (Versuch Br2)**

Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt Versuchsbedingungen für Versuch Br2 sowie die eingesetzte Brandlast bei diesem Versuch.

Im Unterschied zu Versuch A-Br1 wurde die Abluft über die Deckenöffnung abgeführt. Die übrigen Versuchsbedingungen waren identisch.

<b>Versuch</b>	<b>Lüftungssituation</b>	<b>Unterdrücke</b>	<b>verwendete Brandlast</b>
Br2  ( $\triangleq$ Lüftungsbedingung Vers. DN 2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluft im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluft im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -64 Pa</li> <li>– Schleuse: -33 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 75 g Wiesenheu</li> <li>– davon 109 g verbrannt</li> </ul>

Die folgende Bilderserie (Abbildung 68) zeigt anhand von Videoprints den zeitlichen Versuchsablauf, das Auslösen der Rauchmelder, die Verrauchung im Raum sowie die Brandlast vor und nach dem Versuch.

Zeit	Ereignis	Videoprints
	Brandlast vor dem Versuch: Käfigschale aus PC mit Wiesenheu (hinten links im Raum)	
0	Wärmestrahler ein	
2 min 53 s	Entzündung der Brandlast	
3 min 28 s	RM7 (hinten links im Raum über der Brandlast) Deckentemperatur bei Ansprechen: T7 = 34°C	

3 min 34 s	RM4 (hinten rechts im Raum)	
3 min 43 s	RM2 (Decke Mitte, neben der Abluftöffnung)	
3 min 48 s	RM6 (vorne links im Raum über der Zuluftöffnung im Bodenbereich)	
4 min 4 s	RM5 (vorne rechts im Raum)	

9 min 12 s	Visuell maximale Ver- rauchung	
19 min 45 s	Versuchsende	
	Brandlast nach dem Versuch	

Abbildung 68: Versuch Br2 – Versuchsablauf

Der Brandverlauf und die Auswirkungen des Brandes auf den Kunststoffbehälter waren dem aus Versuch Br1 ähnlich. Es verbrannten 109 g der ursprünglichen Brandlast von 675 g.

Auch hier stieg der Druck während der Brandentwicklung um ca. 18 Pa im Versuchslabor, um anschließend in der Abklingphase wieder den Ausgangswert zu erreichen.

Allerdings sank hier der Unterdruck weniger stark und erreichte ein Minimum bei -66 Pa beim Verlöschen des Feuers (siehe Bild Abbildung 69).

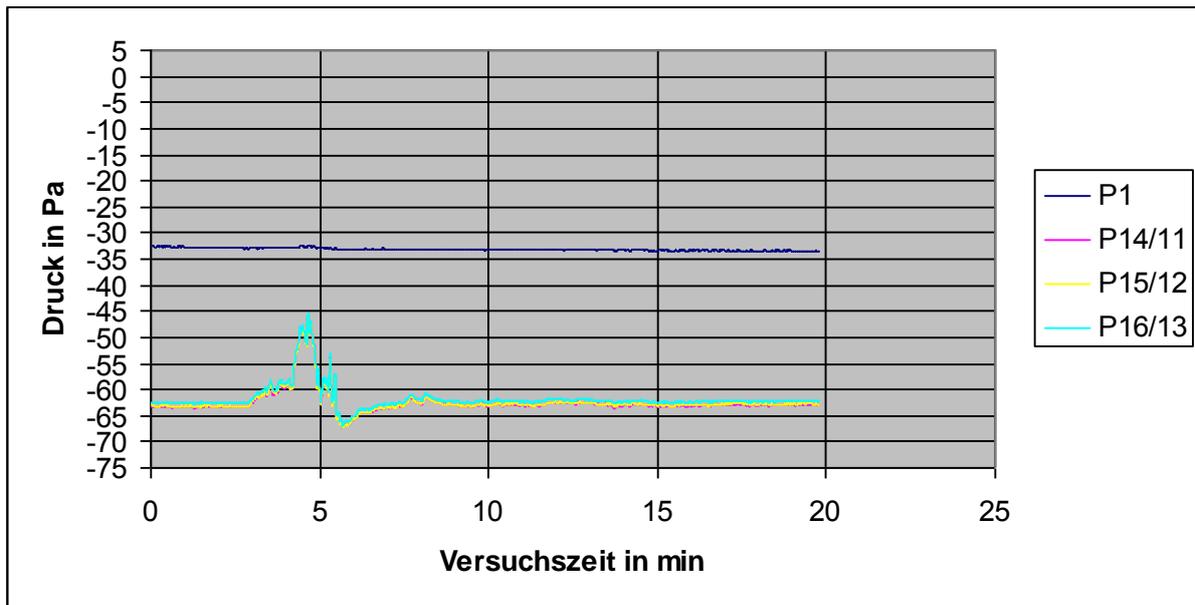


Abbildung 69: Versuch Br2 - Druckverlauf im Versuchslabor mit Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.

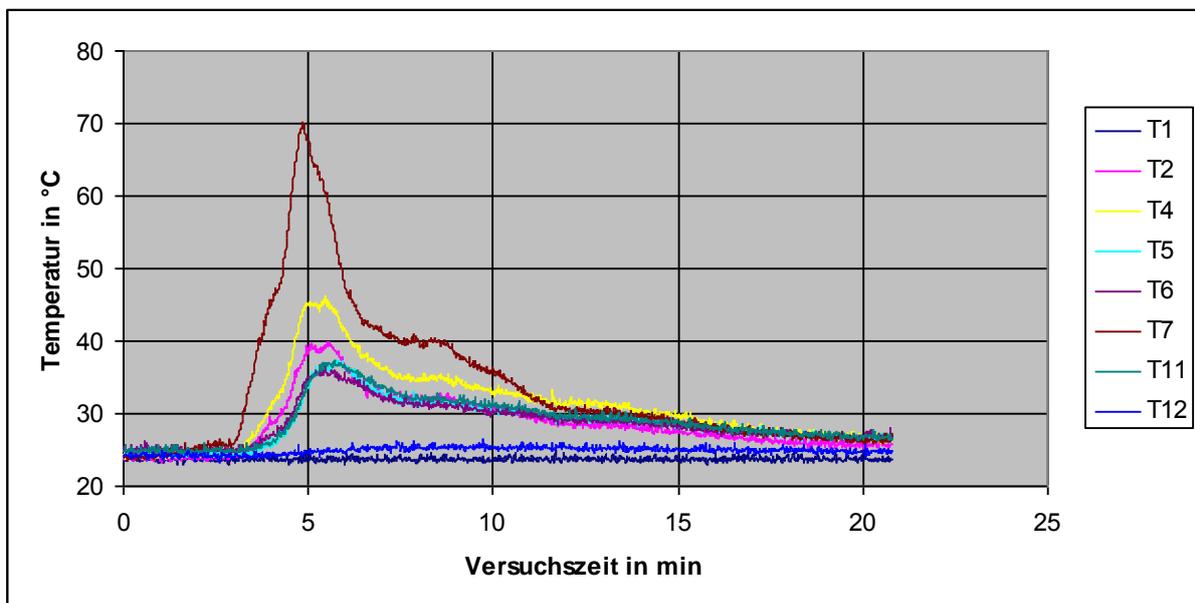


Abbildung 70: Versuch Br2 - Temperaturverläufe im Versuchslabor mit Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.

Die Temperaturmaxima im Versuchslabor waren im Schnitt um 5 K geringer als bei Versuch Br1 mit Absaugöffnung im Bodenbereich (Abbildung 70).

Hingegen war hier ein Temperaturanstieg an Messstelle 20 direkt am Lüftungskanalaustritt aus dem Labor um mehr als 5 K während des Brandes zu registrieren

(Abbildung 71), wo hingegen im vorangegangenen Versuch Br1 ein Temperaturanstieg im Lüftungskanal nicht beobachtet wurde.

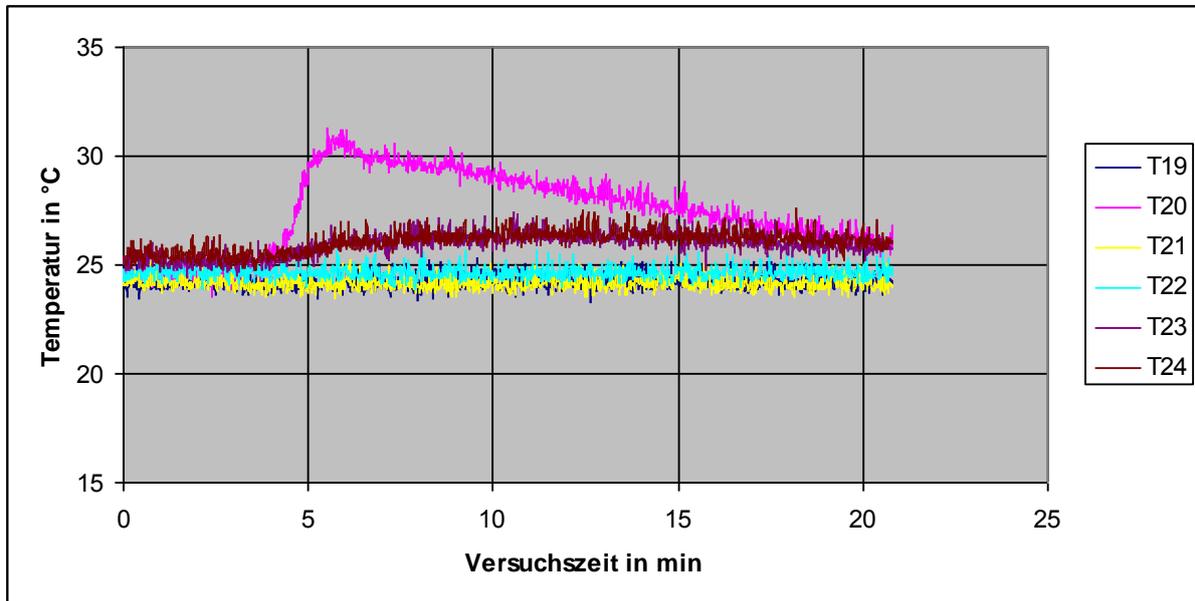


Abbildung 71: Versuch Br2 - Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen mit Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.

Während des Versuchs wurden lt. Tabelle 14 folgende maximalen Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid bzw. minimale Konzentration von Sauerstoff in halber Höhe Versuchslaborhöhe (Messstelle 12) gemessen:

Tabelle 14: Versuch Br2 – Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)

Sauerstoff (Min.)	20,38 Vol.-%	8 min 11 s
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	200 ppm	10 min 45 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	1800 ppm	7 min 59 s

Im Bereich an der linken Wand Mitte, 20 cm unter der Decke wurden lt. Tabelle 15 an Messstelle 11 folgende Konzentrationen gemessen:

Tabelle 15: Versuch Br2 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)

Sauerstoff (Min.)	19,33 Vol.-%	8 min 35 s
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	600 ppm	9 min 1 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	3500 ppm	6 min 16 s

Man erkennt, dass bei diesem Versuch in halber Höhe des Raumes ebenfalls geringere Konzentration an CO und CO<sub>2</sub> gemessen wurden als 20 cm unter der Decke. Die O<sub>2</sub>-Konzentration weist dagegen an der Decke einen wesentlich niedrigeren Wert auf als auf halber Höhe.

Die Kohlenstoffmonoxid-Konzentration lag ebenfalls bei dieser kleinen Brandlast über dem ETW-Wert von 33 ppm.

Man erkennt, dass zum Zeitpunkt des Ansprechens des ersten Rauchmelders RM7 nach 3 min 28 s und des zweiten Rauchmelders RM4 nach 3 min 34 s die Sicht im Versuchslabor noch nicht beeinträchtigt wurde (siehe Abbildung 68).

Während des Versuchs wurden im Raum folgende Transmissionswerte gemessen (siehe Abbildung 72):

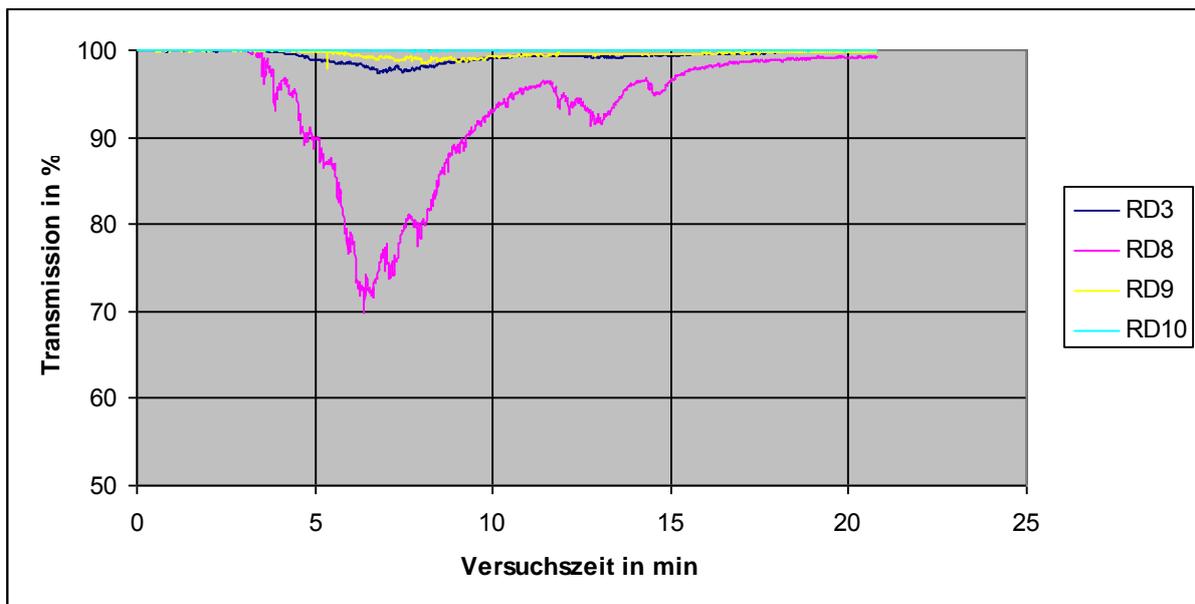


Abbildung 72: Versuch Br2 - Transmission bei Absaugung im Deckenbereich ohne Löscheinsatz.

Im Versuchslabor wurden hierbei folgende minimalen Werte für die Transmission  $\tau$ , bzw. maximalen Werte für den Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die optische Dichte  $OD$  ermittelt.

Tabelle 16: Versuch Br2 – Werte für minimale Transmission  $\tau$  bzw. max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und max. optische Dichte  $OD$  im Versuchslabor.

RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 97 \%$ $\sigma = 0,22 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,094 \text{ m}^{-1}$	3 min 58 s
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 70 \%$ $\sigma = 2,55 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,11 \text{ m}^{-1}$	3 min 32 s
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 99 \%$ $\sigma = 0,07 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,03 \text{ m}^{-1}$	4 min 24 s
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	konstant über der Versuchszeit

Da sich auch die Rauchsicht nicht so weit wie in Versuch Br1 absenkte, kann davon ausgegangen werden, dass die Abluftöffnung in der Decke auch als Rauchabzug fungiert.

Diese Aussage wird auch dadurch bestätigt, dass die Transmissionswerte, außer an Messstelle RD8, über 97 % liegen.

Tabelle 17 zeigt die zeitlichen Verläufe und die maximalen relativen Luftfeuchtigkeiten in den jeweiligen Lüftungskanälen. Auch bei diesem Brandszenario lag die relative Luftfeuchtigkeit im unkritischen Bereich für HEPA- / ULPA-Filter.

Bemerkenswert bei diesem Versuch war der relativ hohe Wert der relativen Luftfeuchtigkeit der Zuluft von 77 %. Die Temperaturmessstelle T20 im Abluftkanal (Abbildung 71) zeigt eine Temperaturerhöhung. Hierdurch sinkt die relative Luftfeuchtigkeit. Durch die Zumischung der relativ feuchten Umgebungsluft zur Laborluft ergibt sich zeitweise eine höhere relative Luftfeuchtigkeit an der gemeinsamen Messstelle rf24 (Labor + Schleuse).

Über die Russbildung und die Auswirkung auf HEPA / ULPA-Filter kann bei diesem Versuch ebenfalls quantitativ keine Aussage gemacht werden.

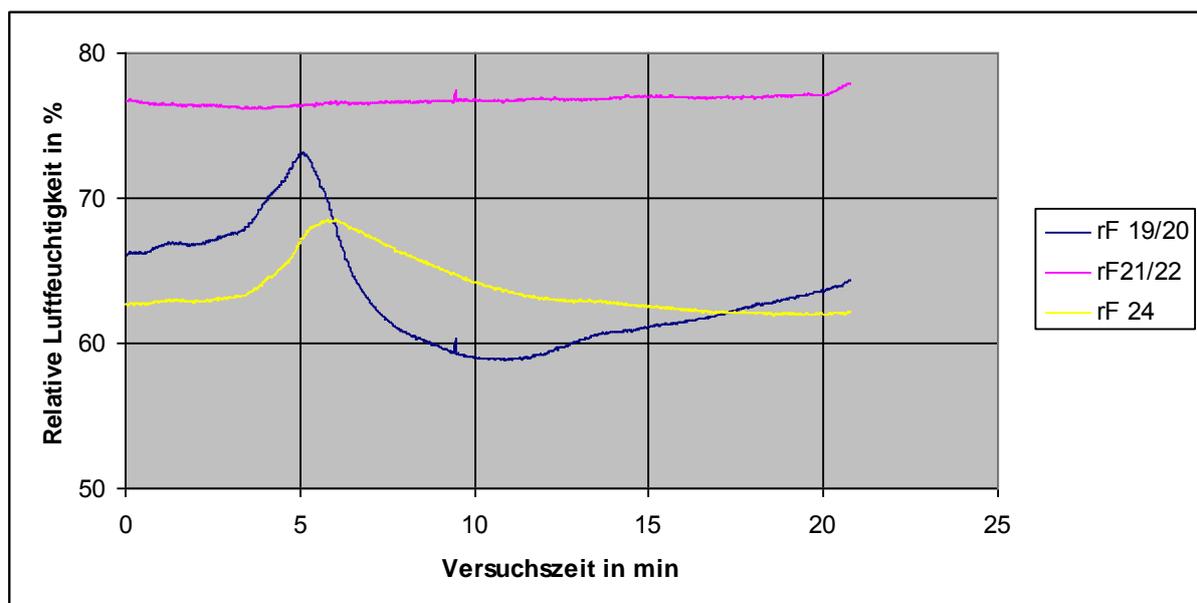


Abbildung 73: Versuch Br2 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen bei Absaugung im Bodenbereich.

Tabelle 17: Versuch Br2 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen

Versuch Br2		
Abluft	Abluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	73 % r. F.
Zuluft (unten)	Zuluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	77 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse), Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	69 % r. F.

### 5.3. Kaltsprühversuche mit Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel ohne Brandeinfluss

In Kaltsprühversuchen wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Welchen Einfluss hat die Position der Abluftöffnung (Deckenbereich, Bodenbereich) z. B. aufgrund von Fehlauflösungen der Löschanlage auf den Unterdruck im Versuchslabor?
- Wie kann sich eine erhöhte Luftfeuchtigkeit im Raum aufgrund der ausgelösten Wassernebellöschanlage im Lüftungskanalnetz und im Endeffekt auf die Funktionsfähigkeit der HEPA / ULPA-Filter auswirken? Also ist auch der Montageort der Schwebstofffilteranlage von Bedeutung. Wird die Filteranlage im vorliegenden Fall direkt in der Abluft des Labors stärker durch Feuchtigkeit belastet als im Treppenraum in der letzten Etage nach Zumischung von trockenerer Abluft aus der Schleuse? In der Praxis werden auch Hochleistungs-Schwebstofffilter direkt in Tierkäfigracks, insbesondere bei S4-Anlagen, eingebaut (Abbildung 1). Diese Filter sind dann unmittelbar von der Feuchtigkeit im Laborraum betroffen.
- Welche unterschiedlichen Sichtverhältnisse ergeben sich aufgrund der Lüftungsbedingungen im Raum?
- Welche unterschiedlichen Sichtverhältnisse ergeben sich durch unterschiedlichen Arten von Wassernebel (HD-, ND-Wassernebel) bereits im kalten Fall.
- Wie wirken sich unterschiedliche Arten von Wassernebel (HD-, ND-Wassernebel) auf die Wasserverteilung im Hinblick auf eine löschtfähige Konzentration aus?

Die Lüftungsbedingungen wurden analog zu den Versuchen DN2 und DN6 mit Disconebel eingestellt, um hauptsächlich eine Querströmung im Raum zu erzeugen.

- Öffnung 2 (Ö2): Eckbereich vorne links (vl) oben im Deckenbereich (links neben der Eingangstür in das Labor)
- Öffnung 6 (Ö6): Eckbereich hinten rechts (hr) unten im Bodenbereich

Die nachfolgende Tabelle 18 zeigt eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

Tabelle 18: Kaltsprühversuche ohne Brandeinfluss - Versuchsparameter.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers
L1 (HD-Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -79 Pa</li> <li>– Schleuse: -35 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>
L2 (HD-Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -64 Pa</li> <li>– Schleuse: -33 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>
L3 (ND-Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -79 Pa</li> <li>– Schleuse: -32 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>
L4 (ND-Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -70 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>

A Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich (Versuch L1)

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter bei Versuch L1 mit HD-Wassernebel.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers
L1 (HD-Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -79 Pa</li> <li>– Schleuse: -35 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min</li> <li>– <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>

Nach dem Auslösen der Hochdruck-Wassernebellöschanlage fiel der Unterdruck innerhalb von 3 s von -79 Pa (Ausgangswert zu Beginn des Versuchs) auf bis zu -142 Pa.

18 s später war der Druck auf bis zu -60 Pa gestiegen, um sich nach ca. 1,5 min wieder dem Ausgangswert anzugleichen (siehe Abbildung 74).

Durch Einsprühen des HD-Nebels kommt es zu einer kurzfristigen Abkühlung im Raum (Abbildung 75) und demgemäß auch zu einer kurzzeitigen Druckabsenkung.

Die anschließende kurzzeitige Druckerhöhung um ca. 20 Pa über den eingestellten Unterdruck könnte in der Praxis Auswirkungen auf das Regelverhalten einer realen Laboranlage und auf die HEPA / ULPA-Filter haben.

Im vorliegenden Fall blieb jedoch der erforderliche Unterdruck im Labor erhalten.

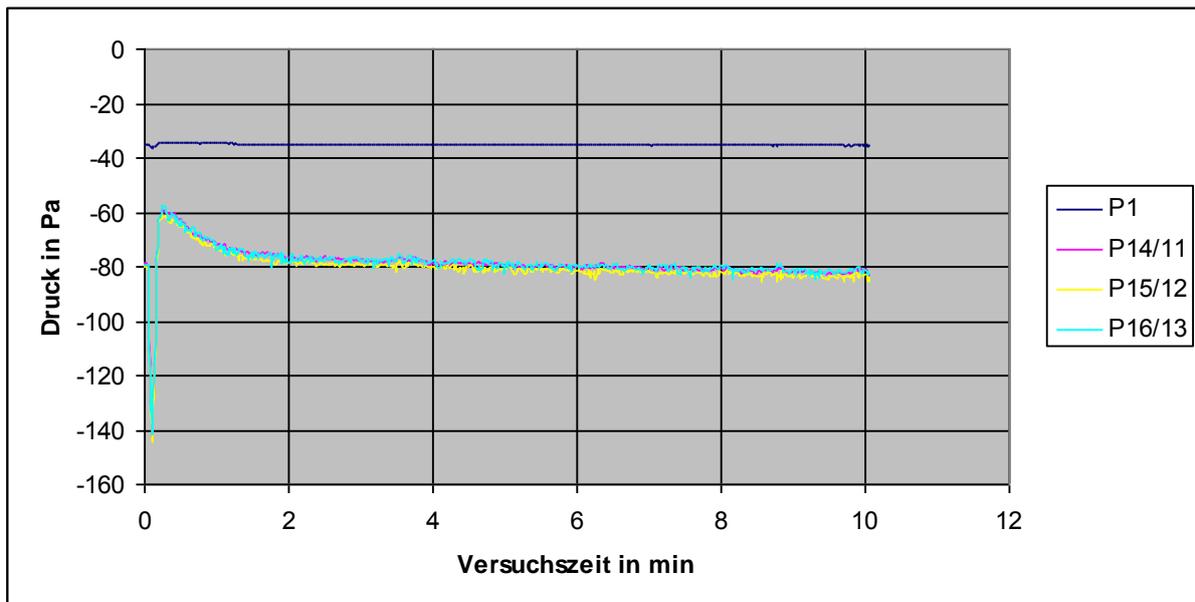


Abbildung 74: Versuch L1 - Druckverlauf im Versuchslabor während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

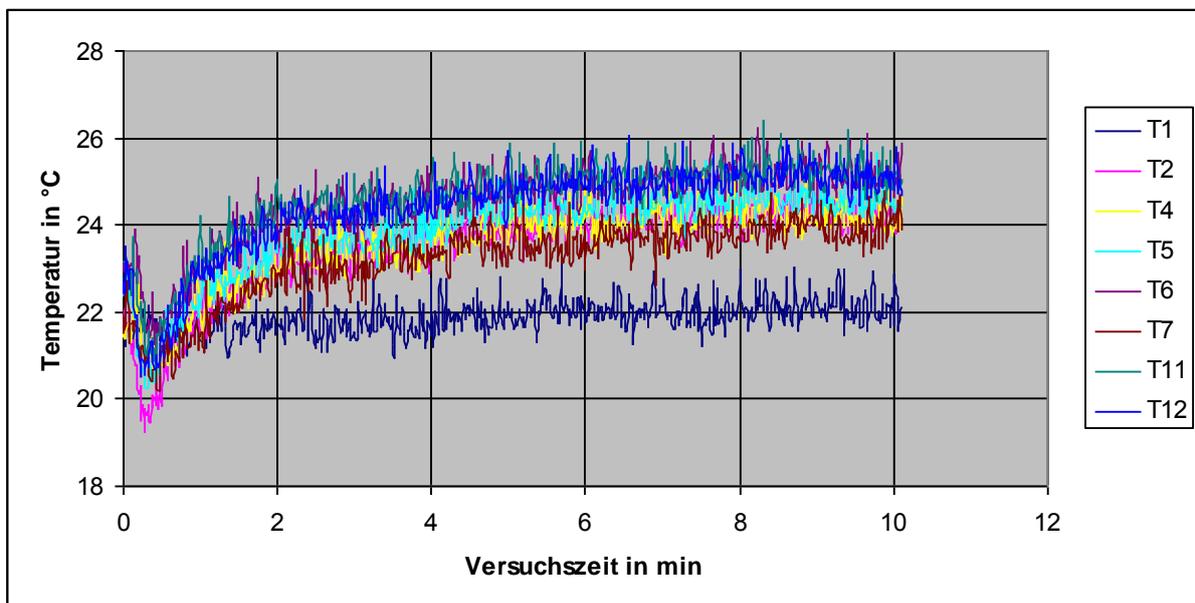


Abbildung 75: Versuch L1 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

In Abbildung 77 erkennt man, dass der Hochdruck-Wassernebel – Sprühkopf keine gleichmäßige Wasserverteilung über den Sprühquerschnitt aufgrund der gerichteten Sprühstrahlen der Einzeldüsen mit geringem Kegelwinkel (Strahlenbildung) erzeugte.

Abbildung 76 und Abbildung 77 zeigen, dass durch das Auslösen der HD-Wassernebellöschanlage innerhalb kurzer Zeit die Sicht im Versuchslabor stark eingeschränkt wurde. Die stark eingeschränkte Sicht wurde ebenfalls durch Messung der Transmission deutlich.

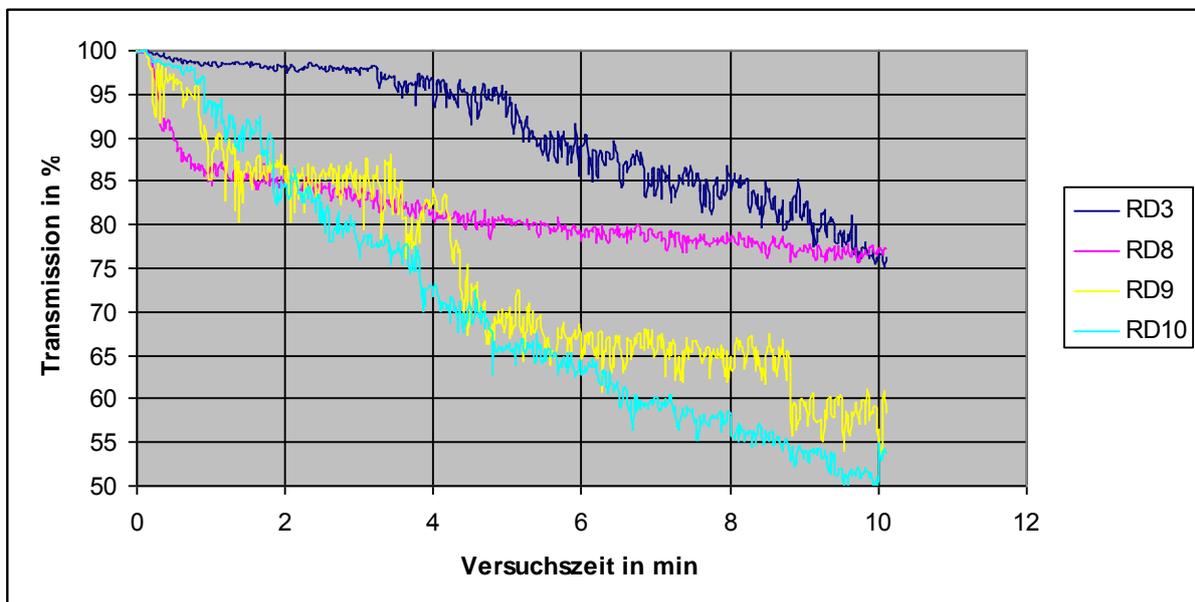


Abbildung 76: Versuch L1 - Transmission während des Sprühens mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Während des Versuchs L1 wurden im Raum It. Abbildung 77 folgende minimalen Werte für die Transmission  $\tau$ , bzw. maximalen Werte für den Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die optische Dichte  $OD$  nach 2 und 5 Minuten Sprühdauer gemessen. Die Videoprints zeigen die jeweiligen Sichtverhältnisse. Mit längerer Sprühdauer verschlechterte sich die Sicht. Dies ist bei der Beurteilung der Rauchfreihaltung von Rettungswegen zu beachten.

Bei der Beurteilung der Videoprints ist zu beachten, dass sich während des Sprühens ein Tropfenfilm auf die Scheibe legte, der das Bild der Videokamera etwas verschleierte.

Versuch L1 (HD-Nebel, Kalt- sprühversuch)  Sprühbeginn		
Transmission $\tau$ . Extinktionskoeffizient $\sigma$ optische Dichte $OD$	nach 2 min Sprühdauer	nach 5 min Sprühdauer
		
RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 98 \%$ $\sigma = 0,14 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,06 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 93 \%$ $\sigma = 0,52 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,22 \text{ m}^{-1}$
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 85 \%$ $\sigma = 1,16 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,50 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 81 \%$ $\sigma = 1,51 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,65 \text{ m}^{-1}$
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 86 \%$ $\sigma = 1,08 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,47 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 70 \%$ $\sigma = 2,55 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,11 \text{ m}^{-1}$
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 85 \%$ $\sigma = 1,16 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,50 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 66 \%$ $\sigma = 2,97 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,29 \text{ m}^{-1}$

Abbildung 77: Versuch L1 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebel-Sprühkopf und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Das folgende Diagramm (Abbildung 78) und die Tabelle 19 zeigen die zeitlichen Verläufe bzw. die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den jeweiligen Lüftungskanälen.

Nach Auslösen der Löschanlage stieg die relative Luftfeuchtigkeit im Lüftungssystem ausgehend vom Anfangswert von ca. 72 % r. F. auf ca. 96 % r. F. an.

Dieser Wert liegt relativ nahe beim kritischen Wert für HEPA / ULPA-Filter von 100% r. F. Trotz der Anreicherung mit der trockneren Abluft aus der Schleuse erreichte die relative Luftfeuchte am oberen Messpunkt 24 vor dem Anschluss an die Hallenrauchreinigungsanlage immer noch einen Wert von 86% r. F.

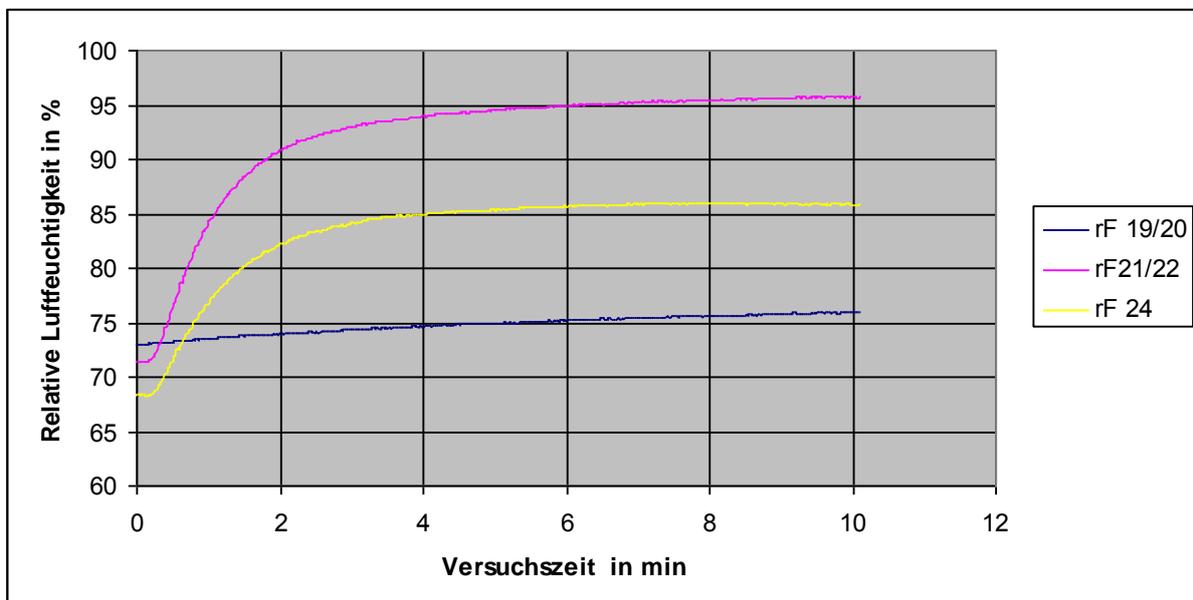


Abbildung 78: Versuch L1 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kalsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Tabelle 19: Versuch L1 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Versuch L1 (HD-Nebel)		
Zuluft	Zuluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	76 % r. F.
Abluft (unten)	Abluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	96 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	86 %

Bei der Messung der Wasserbeaufschlagung (Tabelle 20) mit Niederschlagsmessgeräten über die Sprühdauer von 10 min war die Strähnenbildung des HD-Sprühkopfes und die ungleichmäßige Wasserverteilung über dem Sprühquerschnitt ebenfalls deutlich erkennbar.

In der Tabelle bezeichnet die zweite Zeile die Werte der Niederschlagsmessgeräte, wobei die Niederschlagsmessgeräte NS29 und NS31 in einer Höhe von 1,1 m angebracht waren sowie NS30 und NS32 auf dem Boden standen. Die dritte Zeile gibt den umgerechneten Inhalt der auf dem Boden aufgestellten Messbecher.

Insbesondere war die Beaufschlagung des Eckbereichs hinten rechts sehr gering. Im Falle eines Brandes in diesem Bereich wäre eine ausreichende Löschwirkung fraglich.

Tabelle 20: Versuch L1 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlags- messgerät	0	2	124	59
Messbecher		4,6		36,7

**B Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich (Versuch L2)**

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter bei Versuch L2 mit HD-Wassernebel.

<b>Versuch</b>	<b>Lüftungssituation</b>	<b>Unterdrücke</b>	<b>Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers</b>
L2 (HD-Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -64 Pa</li> <li>– Schleuse: -33 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min</li> <li>– <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>

Bei diesem Kaltsprühversuch mit Deckenablufthöffnung wurde ein ähnlicher Kurvenverlauf bei der Luftdruckmessung im Raum ermittelt (siehe Abbildung 79), wie bei Versuch L1 mit Ablufthöffnung im Bodenbereich (siehe Abbildung 74), jedoch mit einer geringeren Druckabsenkung.

Der Unterdruck fiel bei Auslösung der Löschanlage nach ca. 2 s von -64 Pa auf -79 Pa und stieg nach weiteren 8 s bis auf -49 Pa an. Die Abkühlwirkung des eingesprühnten HD-Wassernebels zu Beginn des Versuchs war hierbei geringer als bei Versuch L1 (siehe Abbildung 80).

Im Anschluss glich sich der Unterdruck nach etwa 3 min dem Ausgangswert zu Beginn des Versuchs wieder an.

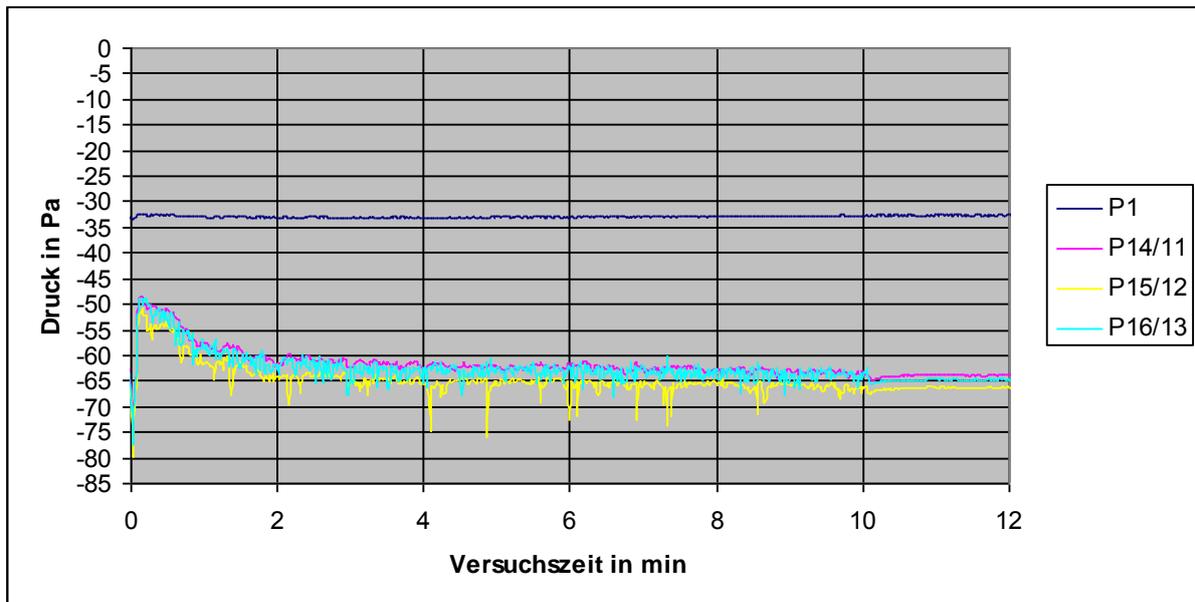


Abbildung 79: Versuch L2 - Druckverlauf im Raum während des Kalsprühversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

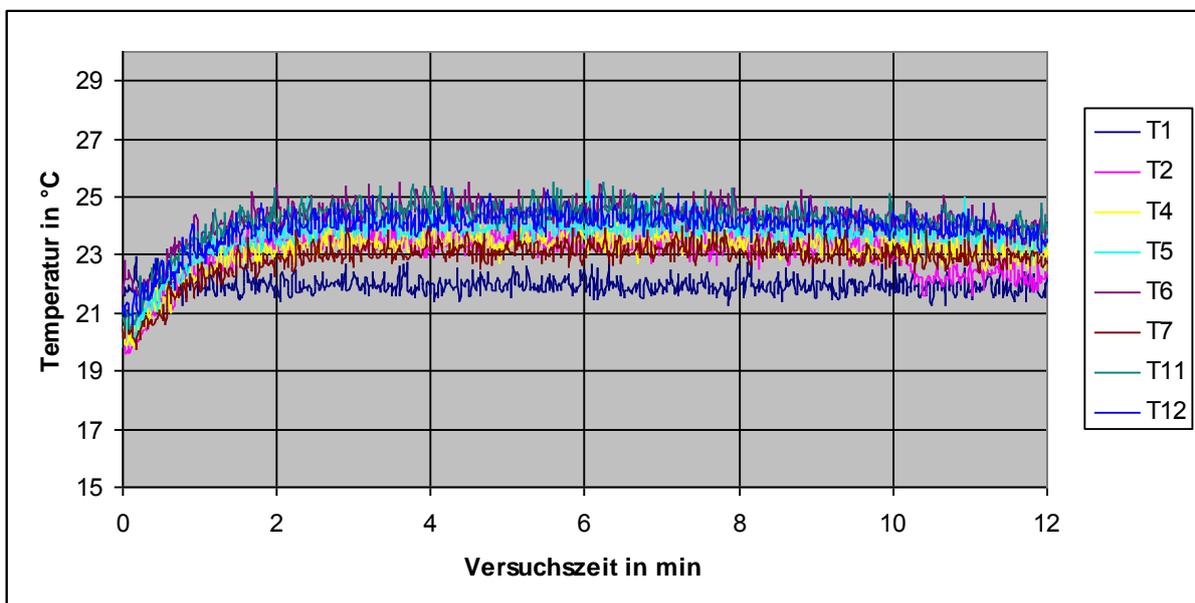


Abbildung 80: Versuch L2 -Temperaturverlauf im Raum während des Kalsprühversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Abbildung 81 und die Videoprints in Abbildung 82 zeigen, dass durch das Auslösen der HD-Wasserebellöschanlage innerhalb kurzer Zeit die Sicht im Versuchslabor stark eingeschränkt wurde. Die stark eingeschränkte Sicht wurde ebenfalls durch die Messwerte der Transmission bestätigt.

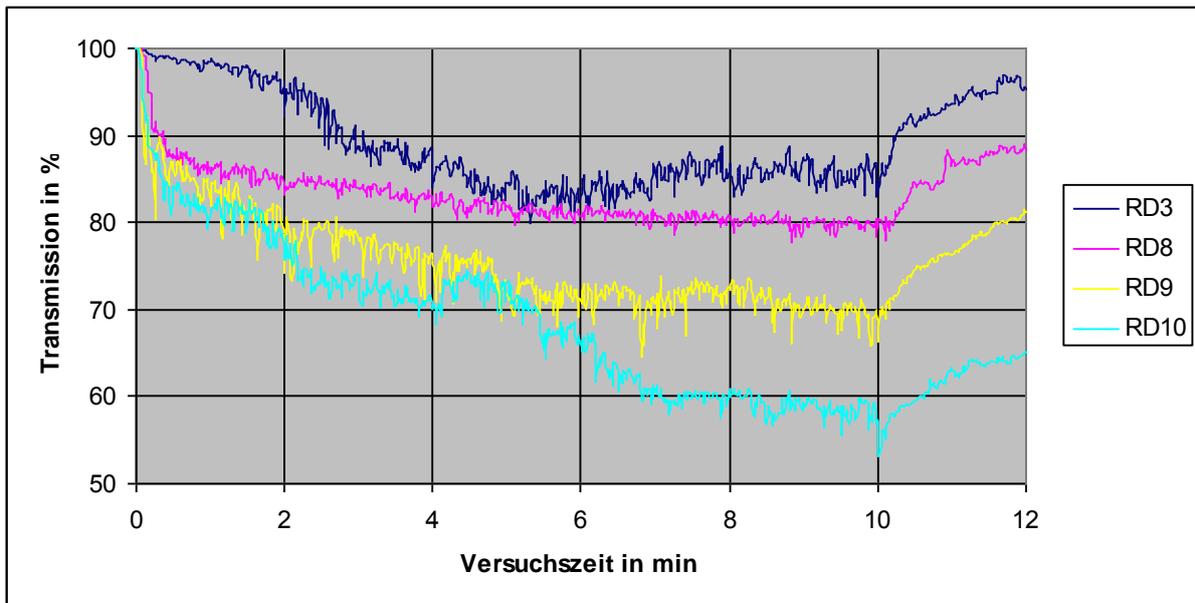


Abbildung 81: Versuch L2 - Transmission während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Während des Versuchs L2 wurden im Raum lt. Abbildung 82 folgende minimalen Werte für die Transmission  $\tau$  bzw. maximalen Werte für den Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die optische Dichte  $OD$  nach 2 und 5 Minuten Sprühdauer gemessen. Die Videoprints zeigen die jeweiligen Sichtverhältnisse. Bei der Beurteilung der Videoprints ist zu beachten, dass sich während des Sprühens ein Tropfenfilm auf die Scheibe legte, der das Bild der Videokamera etwas verschleierte.

Versuch L2 (HD-Nebel, Kalt- sprühversuch)  Sprühbeginn		
Transmission $\tau$ Extinktionskoeffizient $\sigma$ optische Dichte $OD$	nach 2 min Sprühdauer	nach 5 min Sprühdauer
		
RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 92 \%$ $\sigma = 0,59 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,26 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 84 \%$ $\sigma = 1,25 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,54 \text{ m}^{-1}$
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 83 \%$ $\sigma = 1,33 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,58 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 82\%$ $\sigma = 1,42 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,62 \text{ m}^{-1}$
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 74 \%$ $\sigma = 2,15 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,93 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 72 \%$ $\sigma = 2,35 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,02 \text{ m}^{-1}$
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 76 \%$ $\sigma = 1,96 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,85 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 73 \%$ $\sigma = 2,25 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,98 \text{ m}^{-1}$

Abbildung 82: Versuch L2 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebel-Sprühkopf und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Abbildung 83 und Tabelle 21 zeigen die zeitlichen Verläufe und die maximalen relativen Luftfeuchtigkeiten in den jeweiligen Lüftungskanälen.

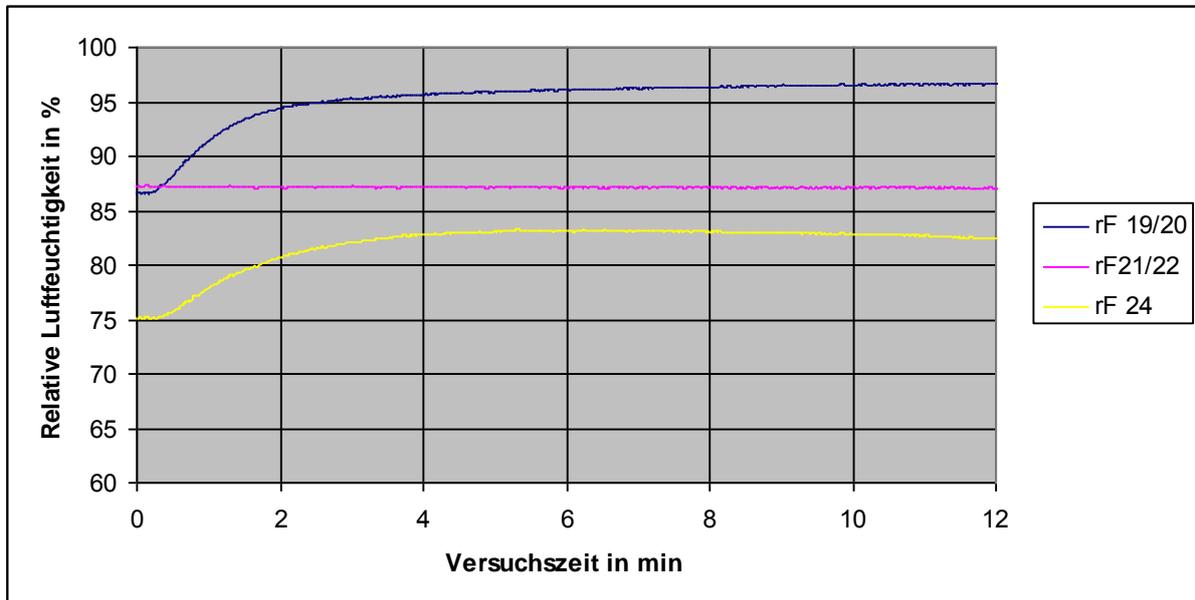


Abbildung 83: Versuch L2 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Tabelle 21: Versuch L2 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Versuch L2 (HD-Nebel)		
Abluft	Abluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	97 % r. F.
Zuluft (unten)	Zuluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	87 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	83 % r. F.

Die Sichtverhältnisse und der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit waren denen des Versuchs L1 sehr ähnlich.

Aufgrund veränderter Wetterbedingungen war der Ausgangswert der relativen Luftfeuchtigkeit in der Zuluft jedoch bei diesem Versuch mit 87 % r. F. höher als bei Versuch L1 (76 % r. F.).

Die maximale relative Luftfeuchtigkeit in der Abluft erreichte 97 % r. F. und lag somit sehr nahe beim kritischen Wert für HEPA / ULPA – Filter.

Bei der Ermittlung der Wasserbeaufschlagung über die Sprühdauer von 10 min im Versuchslabor ergaben sich gemäß Tabelle 22 die aufgeführten Niederschlagsmengen. Durch die geringe Wasserbeaufschlagung im Bodenbereich hinten rechts deutet sich durch diese Messwerte eine erschwerte Brandbekämpfung an, falls ein Brand an dieser Stelle ausbrechen sollte.

Tabelle 22: Versuch L2 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs mit Hochdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlags- messgerät	0	2	114	23
Messbecher		6,1		35,2

Auch bei Versuch L2 zeigt das Sprühbild des HD-Wassernebelsprühkopfes wie in Versuch L1 eine Strahlenbildung (siehe Abbildung 82) und ungleichmäßige Wasser-  
verteilung.

C Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich  
(Versuch L3)

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter bei Versuch L3 mit ND-Wassernebel.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom ,volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers
L3  (ND- Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -79 Pa</li> <li>– Schleuse: -32 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min</li> <li>– <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>

Bei diesem Versuch wurde anstatt des Hochdruck-Wassernebel – Sprühkopfs eine Niederdruck – Zwilling – Dralldüse verwendet.

Die Absaugung der Abluft erfolgte wie in Versuch L1 über eine Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 hinten rechts.

Auch bei diesem Versuch ergab sich bei Sprühbeginn eine Druckabsenkung von -79 Pa auf -103 Pa und anschließend eine Erhöhung von 6 Pa über den Ausgangsdruck auf -73 Pa. Die anschließende Druckerhöhung ist jedoch geringer als bei den Versuchen mit HD-Wassernebel (siehe Abbildung 84)

Die Öffnungen zur Messung der Differenzdrücke haben sich im Verlauf des Versuchs mit Wasser gefüllt, was zu einer Verfälschung der Messergebnisse führte.

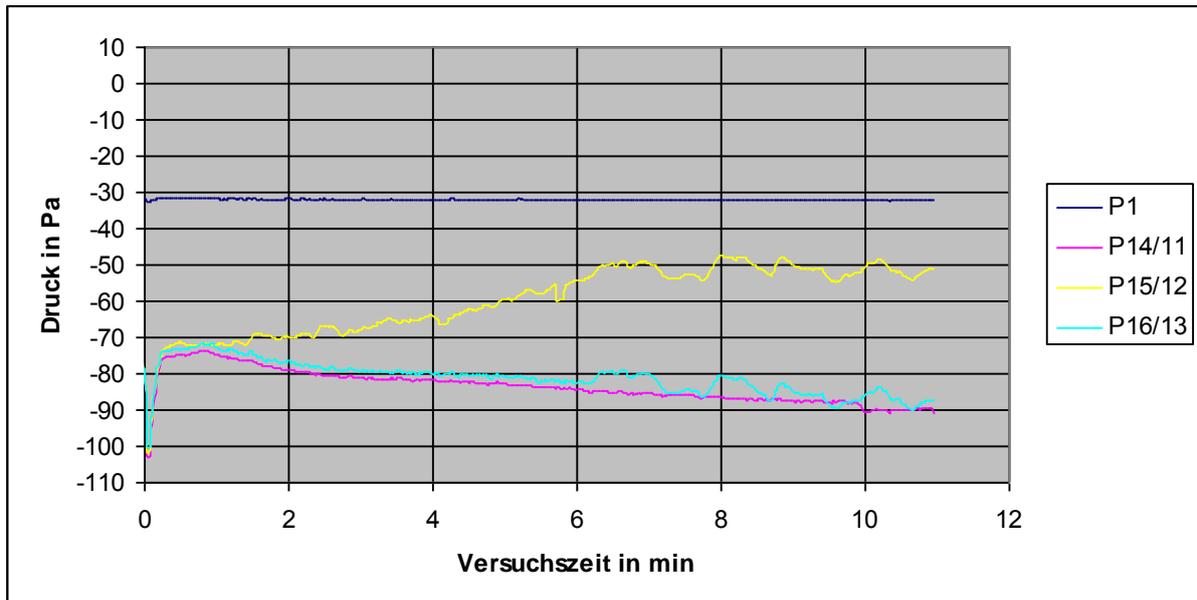


Abbildung 84: Versuch L3 - Druckverlauf im Versuchslabor während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Eine Temperaturabsenkung im Raum um ca. 2°C zu Beginn des Versuchs war hier ebenfalls feststellbar (siehe Abbildung 85).

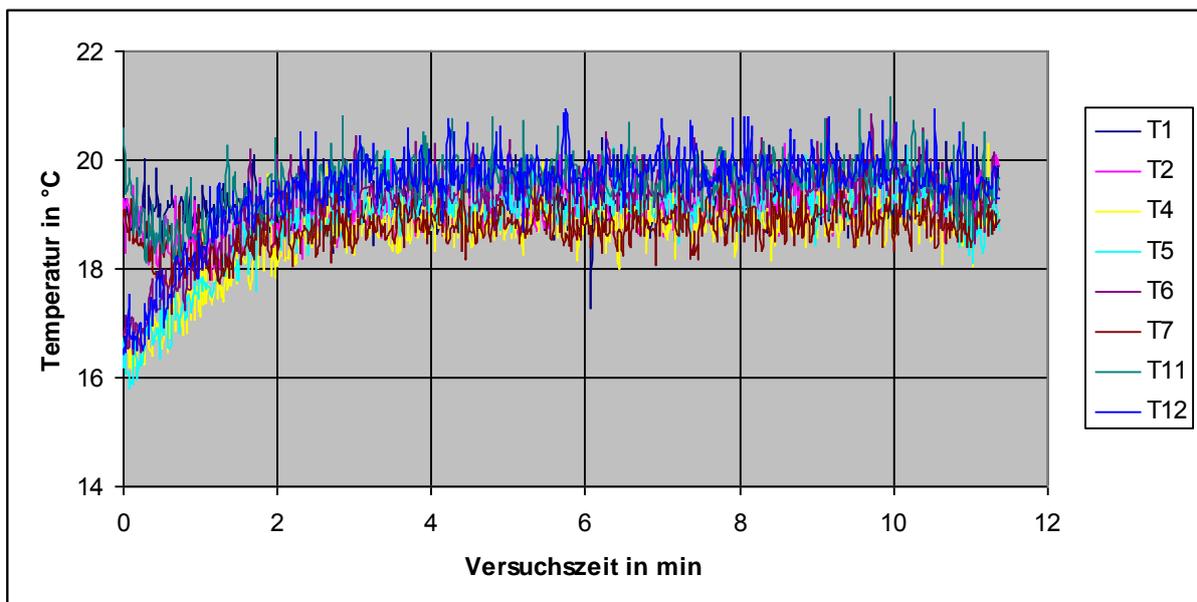


Abbildung 85: Versuch L3 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Abbildung 86 und Abbildung 87 zeigen, dass durch das Auslösen der ND-Wasserebellöschanlage die Sicht im Versuchslabor wesentlich weniger eingeschränkt wurde als durch HD-Wasserebel.

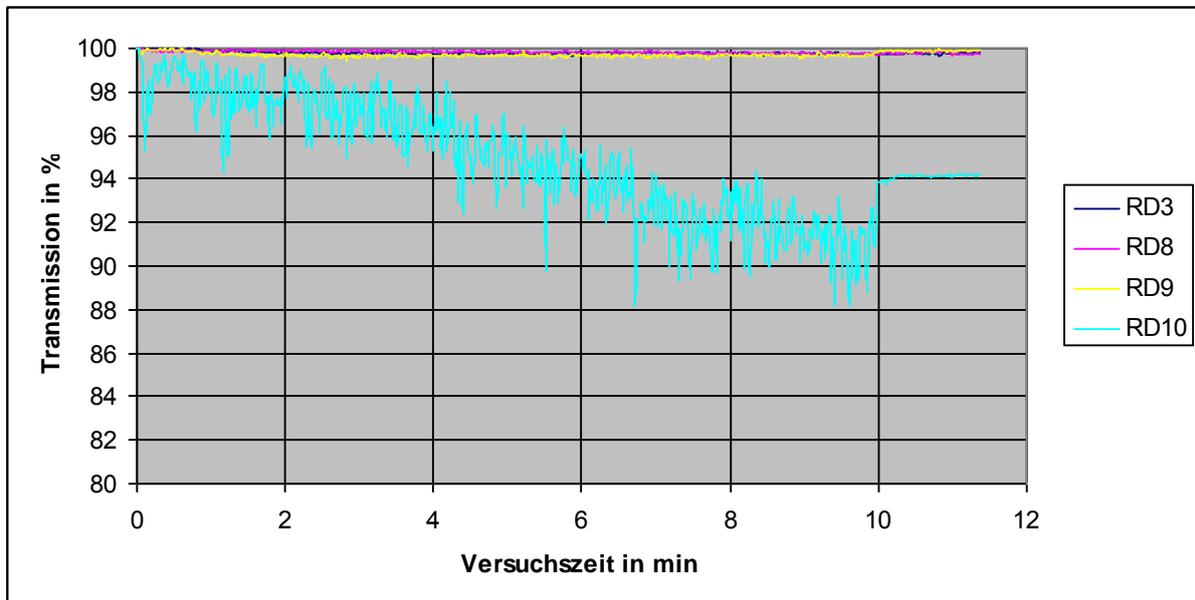


Abbildung 86: Versuch L3 - Transmission während des Sprühens mit Niederdruck- Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Während des Versuchs L3 wurden im Raum lt. Abbildung 87 folgende minimalen Werte für die Transmission  $\tau$  bzw. maximalen Werte für den Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die optische Dichte  $OD$  nach 2 und 5 Minuten Sprühdauer gemessen.

Die Videoprints zeigen die jeweiligen Sichtverhältnisse.

Bei der Beurteilung der Videoprints ist zu beachten, dass sich während des Sprühens ein Tropfenfilm auf die Scheibe legte, der das Bild der Videokamera etwas verschleierte. Dieser Niederschlag ist aber so gering, dass er sich bei - vermuteter - gleichartiger Beschichtung der Photodiode der Lasermessstrecke nicht auf das Messsignal ausgewirkt hat, worauf die in nachstehender Abbildung 87 mit 100% wiedergegebenen Transmissionsdaten hinweisen.

Versuch L3 (ND-Nebel, Kalt- sprühversuch)  Sprühbeginn		
Transmission $\tau$ Extinktionskoeffizient $\sigma$ optische Dichte $OD$	nach 2 min Sprühdauer	nach 5 min Sprühdauer
		
RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 99 \%$ $\sigma = 0,07 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,03 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 96 \%$ $\sigma = 0,29 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,13 \text{ m}^{-1}$

Abbildung 87: Versuch L3 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Das folgende Diagramm (Abbildung 88) und die Tabelle 23 zeigen die zeitlichen Verläufe und die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den jeweiligen Lüftungskanälen.

Die relative Luftfeuchtigkeit stieg nach Auslösen der Löschanlage in der Abluft an Messstelle rF21/ 22 von 80% r. F. auf 94% r. F. (siehe Abbildung 88 und Tabelle 23).

Nach Zumischung der Abluft aus der Schleuse ergab sich eine maximale relative Luftfeuchtigkeit von 72 % r. F.

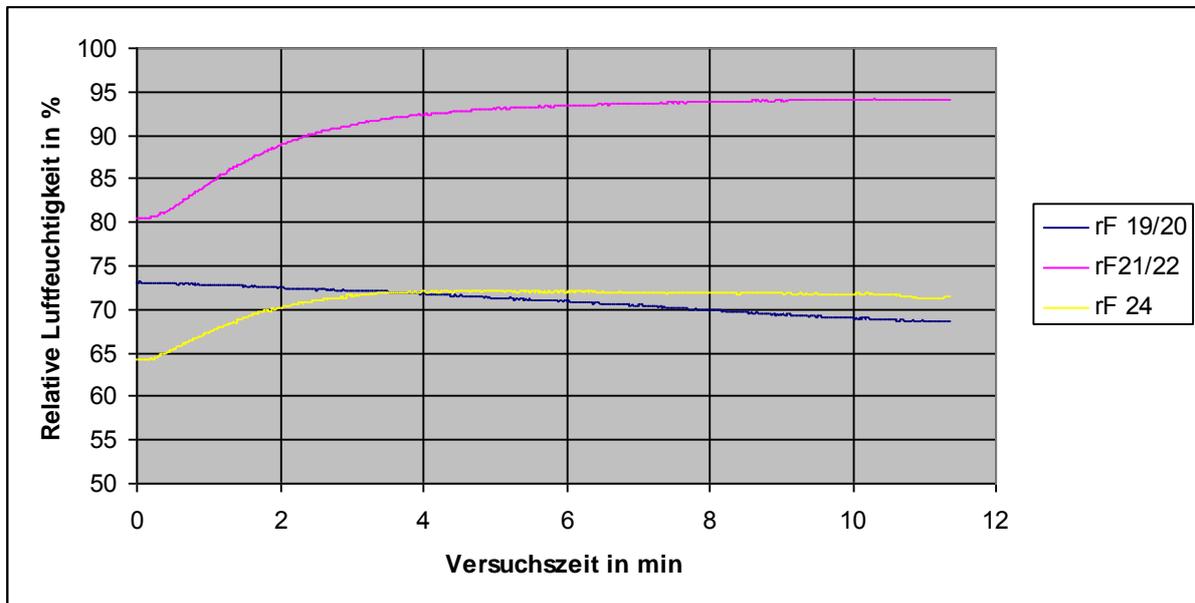


Abbildung 88: Versuch L3 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Tabelle 23: Versuch L3 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Versuch L3 (ND-Nebel)		
Zuluft	Zuluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	73 % r. F.
Abluft (unten)	Abluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	94 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	72 % r. F.

Die aufgefangenen Niederschlagsmengen über die Sprühdauer von 10 min (Tabelle 24) zeigen bei ND-Wassernebel eine gleichmäßigere Wasserbeaufschlagung im Versuchslabor und eine größere Wasserbeaufschlagung im Bodenbereich hinten rechts als bei HD-Wassernebel.

Tabelle 24: Versuch L3 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlags- messgerät	1	8	10	7
Messbecher		10,7		9,2

D Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich  
(Versuch L4)

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter bei Versuch L4 mit ND-Wassernebel.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers
L4 (ND-Wassernebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -70 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min</li> <li>– <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>

Bei diesem Versuch wurde mit der Niederdruck – Zwilling – Dralldüse das Löschwasser zerstäubt und die Abluftabsaugung erfolgte wie in Versuch L2 über die Deckenöffnung an Position Ö2 (vl oben).

Auch hier war ein, allerdings sehr geringer, Druckabfall von max. 3 Pa unmittelbar nach dem Auslösen der Niederdruck-Wassernebellöschanlage zu verzeichnen (siehe Abbildung 89).

Bei diesem Versuch ergab sich der geringste Druckabfall bei Sprühbeginn.

Eine nennenswerte Temperaturabsenkung bei Sprühbeginn war nicht messbar (Abbildung 90). (Vergleiche hierzu Abbildung 75 von Versuch L1 mit deutlich erkennbarer Temperaturabsenkung)

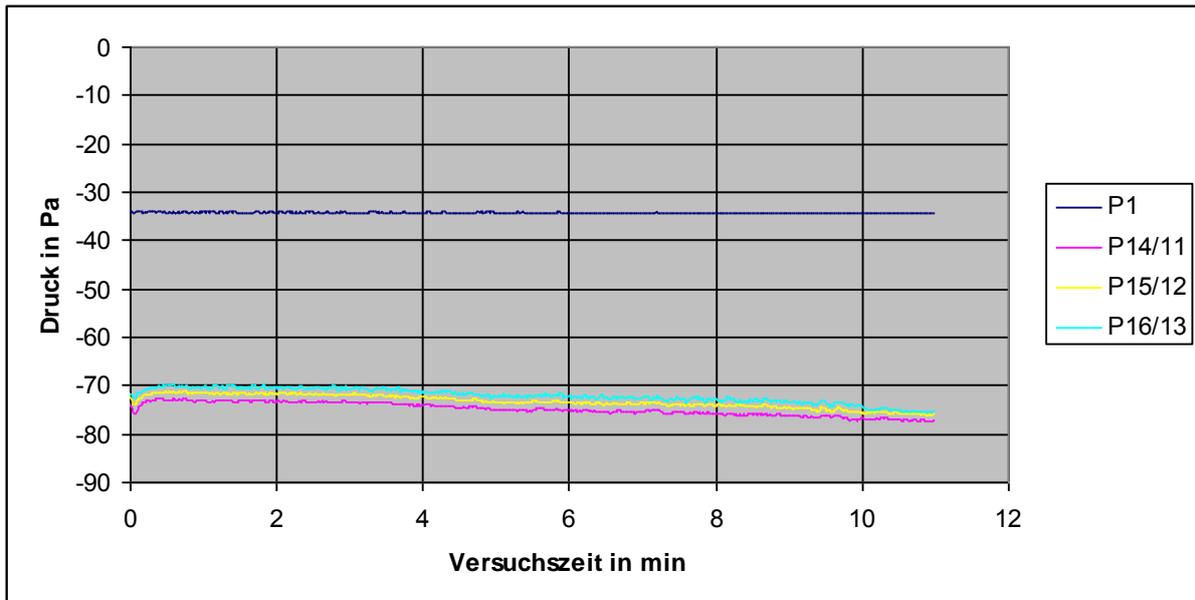


Abbildung 89: Versuch L4 - Druckverlauf im Raum während eines Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Abluftöffnung im Deckenbereich.

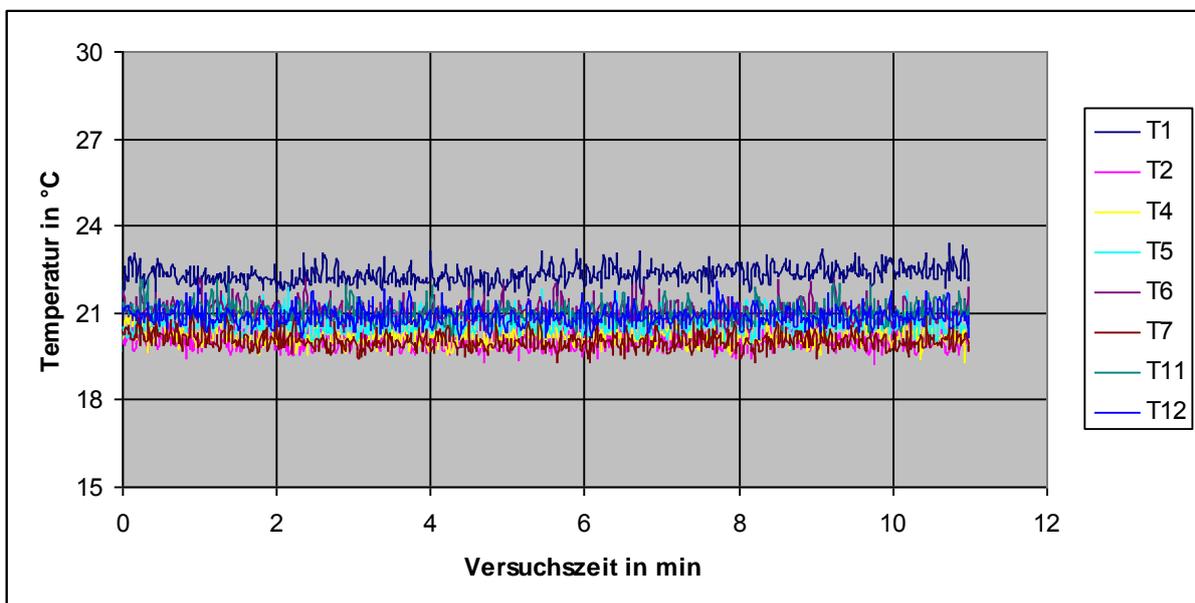


Abbildung 90: Versuch L4 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während eines Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Abluftöffnung im Deckenbereich.

Abbildung 91 und Abbildung 92 zeigen, dass durch das Auslösen der ND-Wassernebellöschanlage die Sicht im Versuchslabor wiederum wesentlich weniger eingeschränkt wurde als durch HD-Wassernebel.

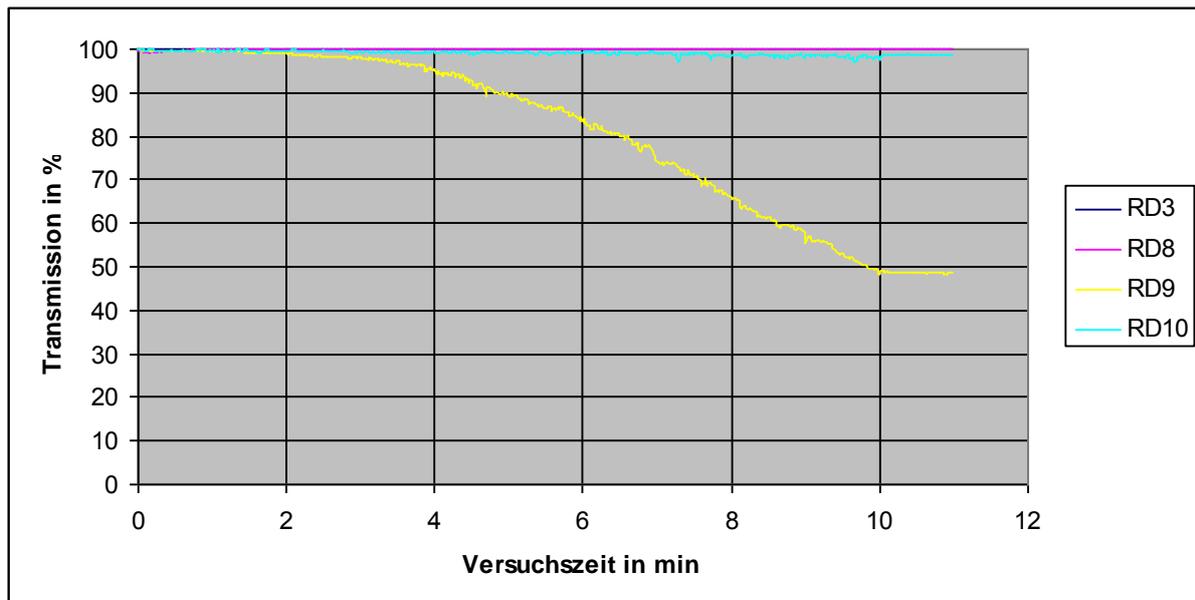


Abbildung 91: Versuch L4 - Transmission im Versuchslabor während eines Kalsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Abluftöffnung im Deckenbereich.

Während des Versuchs L4 wurden im Raum It. Abbildung 92 folgende minimalen Werte für die Transmission  $\tau$  bzw. maximalen Werte für den Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die optische Dichte  $OD$  bei 2 und 5 Minuten Sprühdauer gemessen.

Bei der Beurteilung der Videoprints ist zu beachten, dass sich während des Sprühens ein Tropfenfilm auf die Scheibe legte, der das Bild der Videokamera etwas verschleierte. Dieser Niederschlag ist aber so gering, dass er sich bei - vermuteter - gleichartiger Beschichtung der Photodiode der Lasermessstrecke nicht auf das Messsignal ausgewirkt hat, worauf die in nachstehender Abbildung 92 wiedergegebenen Transmissionsdaten hinweisen.

Versuch L4 (ND-Nebel, Kalt- sprühversuch)  Sprühbeginn		
Transmission $\tau$ Extinktionskoeffizient $\sigma$ optische Dichte $OD$	nach 2 min Sprühdauer	nach 5 min Sprühdauer
		
RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 99 \%$ $\sigma = 0,07 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,03 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 89 \%$ $\sigma = 0,83 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,36 \text{ m}^{-1}$
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	$\tau = 99 \%$ $\sigma = 0,07 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,03 \text{ m}^{-1}$

Abbildung 92: Versuch L4 - Sichtverhältnisse im Versuchsraum während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebel-Sprühkopf und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Die folgende Abbildung 93 und die Tabelle 25 zeigen die zeitlichen Verläufe bzw. die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den jeweiligen Lüftungskanälen.

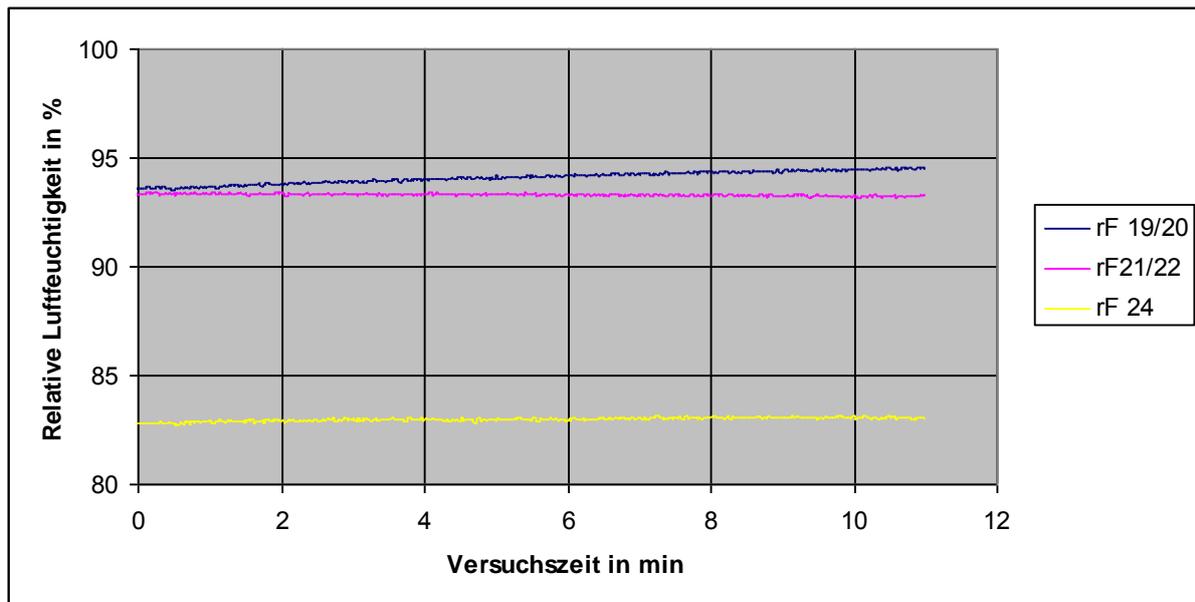


Abbildung 93: Versuch L4 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Tabelle 25: Versuch L4 – Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Kaltsprühversuchs mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Versuch L4 (ND-Nebel)		
Abluft	Abluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	94 % r. F.
Zuluft (unten)	Zuluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	93 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	83 % r. F.

Bedingt durch die erhöhte Ausgangsluftfeuchtigkeit von ca. 93 % r. F. aufgrund der Wetterbedingungen stieg die relative Luftfeuchtigkeit um 1% auf ca. 94 % r. F. an der Messstelle rF19/20 an.

Die geringere relative Luftfeuchtigkeit an Messstelle rF 24 ist gegenwärtig nicht erklärbar, da auch die Temperaturmessstelle T24 nur eine um ca. 1°C höhere Temperatur als an den übrigen Feuchtemessstellen aufwies.

Die aufgefangenen Niederschlagsmengen über der Sprühdauer von 10 min können der Tabelle 26 entnommen werden.

Auch diese Messwerte für die Wasserbeaufschlagung zeigen die bei ND-Wassernebel gleichmäßigere Wasserbeaufschlagung im Versuchslabor und eine größere Wasserbeaufschlagung im Bodenbereich hinten rechts im Raum als bei HD-Wassernebel.

Tabelle 26: Versuch L4 – Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs bei Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Deckenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlags- messgerät	2	10	18	8
Messbecher		12,2		15,3

## 5.4. Brand- und Löschversuche

In Brand- und Löschversuchen wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Welchen Einfluss hat die Position der Abluftöffnung (Deckenbereich, Bodenbereich) bei der Brandbekämpfung mit HD- oder mit ND-Wassernebel auf den zeitlichen Verlauf des Unterdruckes im Versuchslabor?
- Wie kann sich eine erhöhte Luftfeuchtigkeit im Raum aufgrund der Brandbekämpfung mit HD- oder mit ND-Wassernebel im Lüftungskanalnetz und im Endeffekt auf die Funktionsfähigkeit der HEPA / ULPA-Filter auswirken? Auch hier ist z. B. der Montageort der Schwebstofffilteranlage von Bedeutung. Wird die Filteranlage im vorliegenden Fall direkt in der Abluft des Labors stärker durch Feuchtigkeit belastet als im Treppenraum in der letzten Etage nach Zumischung von trockenerer Abluft aus der Schleuse? In der Praxis werden auch Hochleitungs-Schwebstofffilter direkt in Tierkäfigracks, insbesondere bei S4-Anlagen, eingebaut (Abbildung 1). Diese Filter sind dann unmittelbar von der Feuchtigkeit im Laborraum betroffen.
- Welche unterschiedlichen Sichtverhältnisse ergeben sich aufgrund Brandbekämpfung im Versuchslabor mit HD- oder mit ND-Wassernebel?
- Wie effektiv ist die Brandbekämpfung mit HD- oder mit ND-Wassernebel bei der eingesetzten Brandlast?

Nachfolgend werden Brand- und Löschversuche mit Nieder- und Hochdruck-Wassernebellöschanlagen beschrieben. Hierzu wurden die Versuchsparameter aus Tabelle 27 gewählt.

Die Lüftungsbedingungen wurden analog zu den Versuchen DN2 und DN6 mit Disconebl eingestellt, um hauptsächlich eine Querströmung im Raum zu erzeugen.

- Öffnung 2: Eckbereich vorne links (vl) oben im Deckenbereich (links neben der Eingangstür in das Labor)
- Öffnung 6: Eckbereich hinten rechts (hl) unten im Bodenbereich

Die nachfolgende Tabelle 27 zeigt eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

Tabelle 27: Versuchsparameter bei den Brand- und Löschversuchen.

	<b>Lüftungssituation</b>	<b>Unterdrücke</b>	<b>Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers</b>	<b>Brandlast</b>
BrL1 HD- Wasser- nebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -85 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 90 g Wiesensheu</li> <li>– verbrannte Masse: 146 g</li> </ul>
BrL2 HD- Wasser- nebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -61 Pa</li> <li>– Schleuse: -32 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 90 g Wiesensheu</li> <li>– verbrannte Masse: 109 g</li> </ul>
BrL3 ND- Wasser- nebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -63 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 90 g Wiesensheu</li> <li>– aufgrund der Wasseraufnahme des Heus ergab sich nach dem Brandversuch eine höhere Masse als der Ausgangswert</li> </ul>
BrL4 ND- Wasser- nebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -77 Pa</li> <li>– Schleuse: -33 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Holzkrippe 2960 g</li> <li>– 100 ml Spiritus</li> <li>– verbrannte Masse: 520 g</li> </ul>

A Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich – Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu (Versuch BrL1)

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter sowie die Brandlast bei Versuch BrL1.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers	Brandlast
BrL1 HD-Wassernebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -85 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 90 g Wiesenheu</li> <li>– verbrannte Masse: 146 g</li> </ul>

Bei diesem Versuch wurde Hochdruck-Wassernebel zur Brandbekämpfung einer in Brand gesetzten Tierkäfigschale aus Polycarbonat eingesetzt.

Hierbei erfolgte die Abführung der Abluft über die Bodenöffnung an Position Ö6 (hr unten).

Unter Berücksichtigung des Zweimelderkriteriums, bei dem 2 Rauchmelder im Raum ansprechen müssen, um ein Auslösen der Löschanlage zu bewirken, wurde die Löschanlage bei den Versuchen mit Käfigschalen manuell ausgelöst.

Die folgende Bilderserie (Abbildung 94) zeigt anhand von Videoprints den zeitlichen Versuchsablauf, das Auslösen der Rauchmelder, die Auslösung der Wassernebellöschanlage, die Verrauchung im Raum sowie die Brandlast vor und nach dem Versuch.

Zeit	Ereignis	Videoprints
	Brandlast vor dem Versuch (PC- Käfigschale mit Wiesenheu) (hinten links im Raum)	
0	Wärmestrahler ein	
2 min 54 s	Entzündung der Brandlast	
3 min 22 s	Rauchmelder RM7 (hinten links über der Brandlast) Deckentemperatur bei Ansprechen: $T_7 = 31^\circ\text{C}$ $T_{7_{\max}} = 38^\circ\text{C}$ (3min 40s)	

3 min 29 s	Rauchmelder RM4 (hinten rechts)	 A video frame showing a room with smoke rising from a fire source. The smoke is concentrated in the lower part of the room. The timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 14:00:43".
3 min 36 s	Löschbeginn HD-Wassernebel  Zweimelderkriterium für Auslösung: RM7 (hl) + RM4 (hr)	 A video frame showing the room with smoke and a mist of water from a fire extinguisher. The smoke is still visible but partially obscured by the mist. The timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 14:00:50".
3 min 39 s	Schnelle Verschlechterung der Sicht (Löschzeit 3 s)	 A video frame showing the room with a significant amount of smoke, making the view very hazy. The timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 14:00:53".
3 min 57 s	Rauchmelder RM6, (vorne links) Rauchmelder RM2 (Decke Mitte)	 A video frame showing the room with smoke obscuring the ceiling and the front of the room. The timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 14:01:11".

4 min 7 s	Rauchmelder RM5 (vorne rechts)	 <p>29 6 2011 14:01:21</p> <p style="text-align: center;">”</p>
9 min 19 s	Löschanlage aus,	 <p>29 6 2011 14:06:33</p>
13 min 35 s	<p>Versuchsende Brandlast nach dem Versuch (teilweise geschmolzene Poly- carbonat-Tierkäfig- schale), Löschwasserverbrauch ohne Nachlöscharbei- ten: 74,36 l (Löschzeit: 5 min 43 s), Glutbrand musste ma- nuell abgelöscht wer- den</p>	

Abbildung 94: Versuch BrL1 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Von der ursprünglichen Masse verbrannten 146 g Polycarbonat und Wiesenheu.

Die Hochdruck-Wassernebellöschanlage war hierbei nicht in der Lage, den Brand zu löschen. Nach dem Versuch glimmte das Heu weiter. Dies deutet auf die zu geringe Wasserbeaufschlagung im Bereich der Brandlast hin.

Die Glut des Wiesenheus befand sich am Boden der Tierkäfigschale und bewirkte das Schmelzen des Käfigschalenbodens.

Abbildung 95 zeigt den Verlauf des Unterdruckes, Abbildung 96 und Abbildung 97 zeigen die zeitlichen Verläufe der Temperaturen im Versuchslabor und in den Lüftungskanälen.

Bei der Entzündung der Brandlast (=> Flammenbrand) nach 2 min 54 s löste der 1. Rauchmelder RM7 (hinten links) bei 3 min 22 aus. Dies bedeutet, dass die Brandrauchentwicklung beim Aufheizvorgang vor der Entzündung zu gering war um den Schwelbrand zu detektieren.

Man erkennt, dass zum Zeitpunkt des Ansprechens des ersten Rauchmelders RM7 nach 3 min 22 s und des zweiten Rauchmelders RM4 nach 3 min 29 s die Sicht im Versuchslabor noch nicht beeinträchtigt wurde (siehe Abbildung 94).

Bei Löschbeginn (3 min 36 s) ergab sich wieder der charakteristische Drucksprung bei Sprühbeginn, der sich schon bei den Kaltsprühversuchen mit HD-Wassernebel (siehe Abschnitt 5.3) gezeigt hatte, zunächst mit einer Erhöhung des Unterdruckes (ca. -85 Pa => ca. -130 Pa) und dann mit einer Verminderung des Unterdruckes (=> ca. -60 Pa) und anschließendem Angleichen an den Anfangsunterdruck.

Im Versuchslabor wurde eine maximale Temperatur von 38°C an Messstelle T7 über der Brandlast gemessen. Die übrigen Temperaturen waren bedeutend niedriger und blieben bei geringem Anstieg nahe den Ausgangstemperaturen.

Der letzte Rauchmelder RM5 (vorne rechts) löste nach 4 min 7 s aus. Man erkennt die relative große Zeitdifferenz von 45 s zwischen RM7 und RM5 in diesem relativ kleinen Versuchslabor.

Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus im Versuchslabor lösten die Indikatordiskontroller nicht aus.

Dieses niedrige Temperaturniveau wäre unkritisch für HEPA / ULPA-Filter.

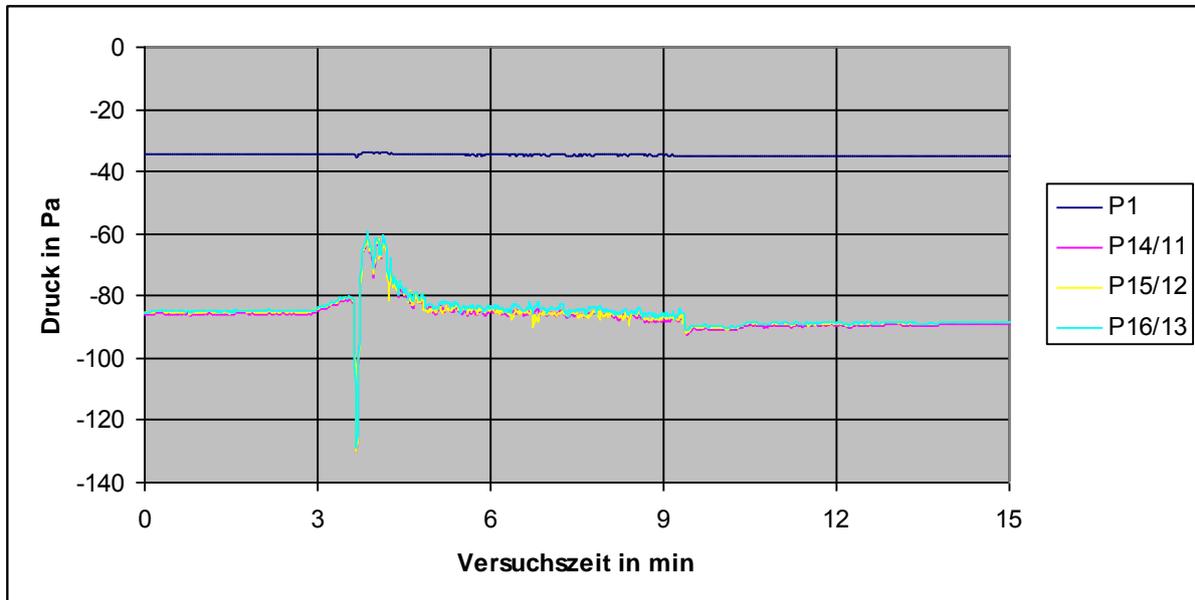


Abbildung 95: Versuch BrL1 - Druckverlauf im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

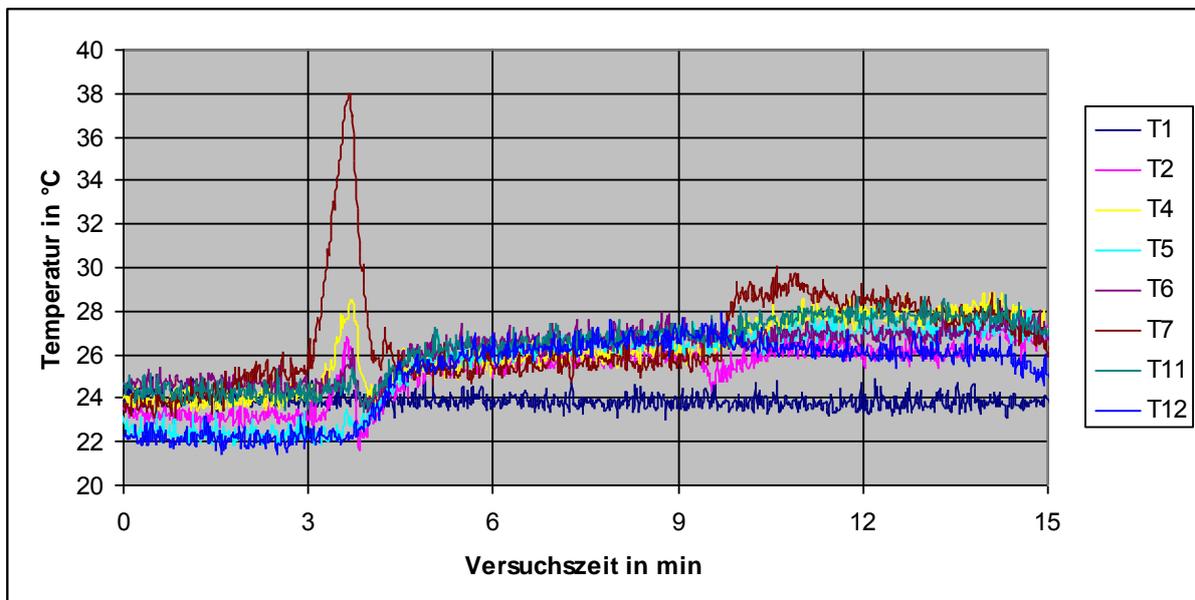


Abbildung 96: Versuch BrL1- Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

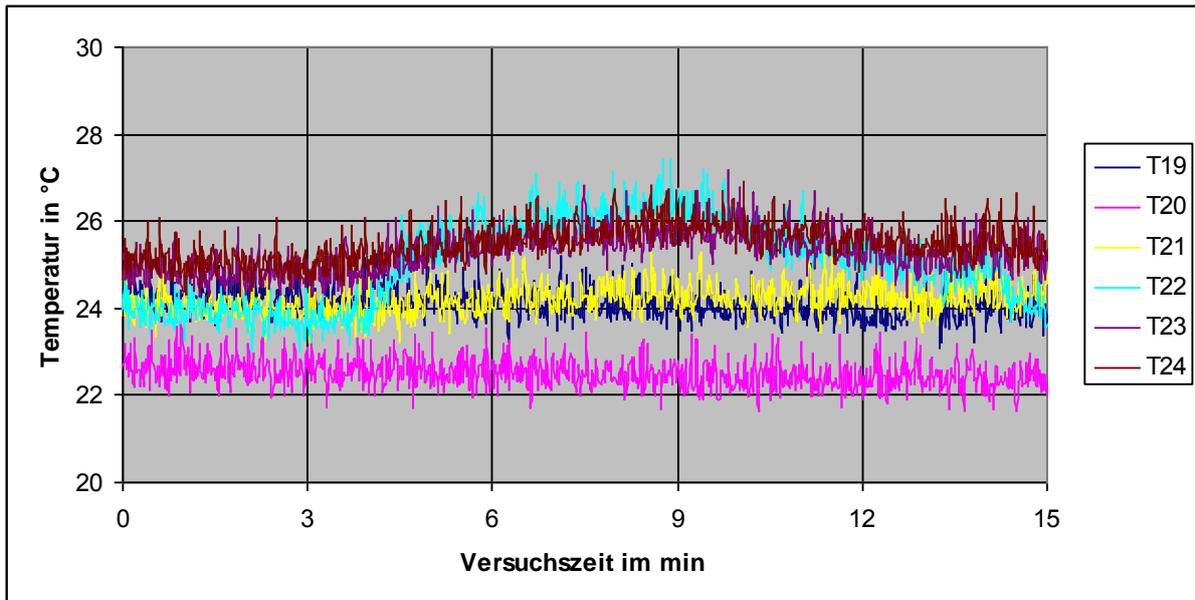


Abbildung 97: Versuch BrL1- Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Während des Versuchs wurden lt. Tabelle 28 folgende maximale Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid bzw. minimale Konzentration von Sauerstoff in halber Versuchslaborhöhe (linke Wand, Messstelle 12) gemessen:

Tabelle 28: Versuch BrL1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe) und zugehörige Versuchszeit

Sauerstoff (Min.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	400 ppm	13 min 6 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	1300 ppm	14 min 35 s

Im Bereich an der linken Wand Mitte, 20 cm unter der Decke wurden lt. Tabelle 29 an Messstelle 11 folgende Konzentrationen gemessen:

Tabelle 29: Versuch BrL1 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke) und zugehörige Versuchszeit.

Sauerstoff (Min.)	19,4 Vol. %	4 min 37 s
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	400 ppm	11 min 29 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	2100 ppm	15 min 16 s

Der ETW-Wert von Kohlenstoffmonoxid von 33 ppm wurde im Versuch überschritten.

Beim Versuch wurde unmittelbar nach Auslösung der Hochdruck-Wassernebel-löschanlage die Sicht im Raum stark eingeschränkt. Hierfür ist neben dem Hochdruck-Wassernebel auch der beim Brand entstehende Brandrauch mit Russpartikeln verantwortlich.

Dies zeigt auch der Abfall der Messwerte für die Transmission (Abbildung 98).

Direkt nach dem Abschalten der Löschanlage bei 9 min 19 s ist ein Anstieg der Transmission durch eine Verringerung des Wassernebels und eine Verbesserung der Sicht zu beobachten.

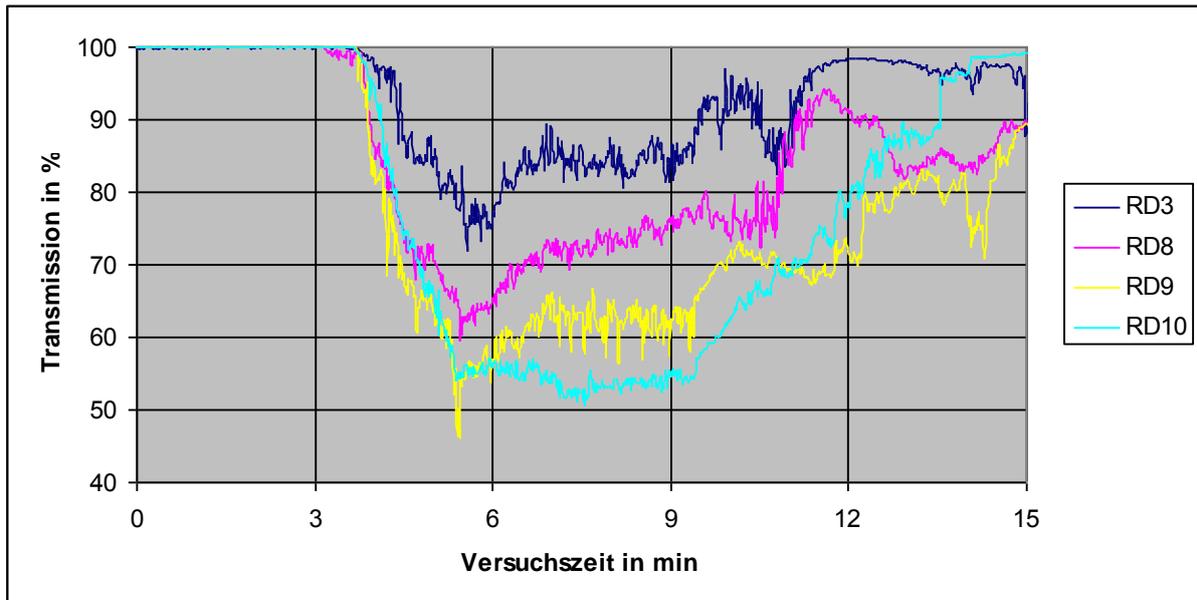


Abbildung 98: Versuch BrL1 - Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Während des Versuchs wurden im Raum folgende Werte für die minimale Transmission  $\tau$  bzw. den max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die max. optische Dichte  $OD$  gemessen.

Tabelle 30: Versuch BrL1 – minimale Transmission  $\tau$  bzw. max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und max. optische Dichte  $OD$  im Versuchslabor und zugehörige Versuchszeit.

RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 72 \%$ $\sigma = 2,35 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,02 \text{ m}^{-1}$	5 min 34 s
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 60 \%$ $\sigma = 3,65 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,58 \text{ m}^{-1}$	5 min 27 s
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 46 \%$ $\sigma = 5,55 \text{ m}^{-1}$ $OD = 2,41 \text{ m}^{-1}$	5 min 26 s
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 51 \%$ $\sigma = 4,81 \text{ m}^{-1}$ $OD = 2,09 \text{ m}^{-1}$	7 min 32 s

Diese Messwerte für die Transmission „Brand und Löschen“ sind erheblich geringer als beim analogen Kaltsprühversuch L1 (Abbildung 77). Durch den Brandrauch wird die Sicht zusätzlich verschlechtert.

Die folgende Abbildung 99 und die Tabelle 31 zeigen die zeitlichen Verläufe bzw. die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den jeweiligen Lüftungskanälen.

Die relative Luftfeuchtigkeit stieg von 83% r. F. auf einen maximalen Wert von ca. 96 % r. F. im Abluftkanal (Messstelle rF21/22) des Versuchslabors an und liegt somit sehr nahe am kritischen Wert für HEPA / ULPA-Filter (siehe Abbildung 99 und Tabelle 31).

Die relative Luftfeuchtigkeit erreichte in der Gesamtabluft (Labor + Schleuse) einen Wert von 89 % r. F.

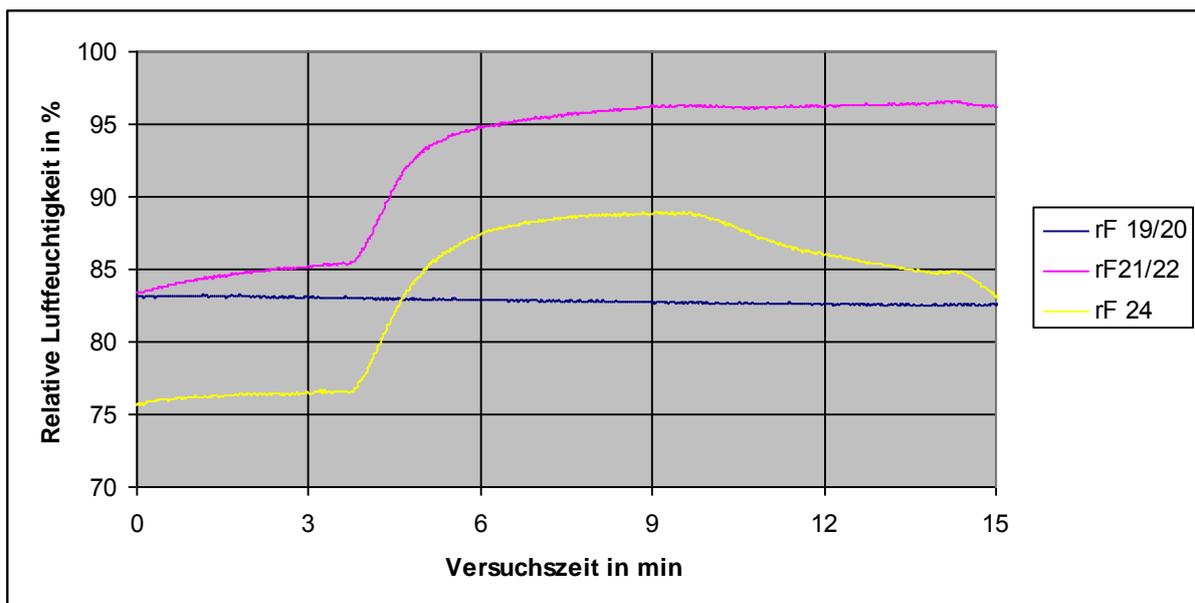


Abbildung 99: Versuch BrL1 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Tabelle 31: Versuch BrL1 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen

Versuch BrL1 (HD-Nebel)		
Zuluft	Zuluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	83 % r. F.
Abluft (unten)	Abluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	96 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	89 % r. F.

Wie bereits die Kaltsprühversuche mit HD-Wassernebel gezeigt hatten, war auch bei diesem Versuch die Verteilung des aufgefangenen Löschwassers über die Löschzeit von 5 min 43 s inhomogen (siehe Tabelle 32). Dies wird auch durch die geringe Löscheffektivität bestätigt.

Tabelle 32: Versuch BrL1 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs nach Brandereignis mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlagsmessgerät	1	1	75	33
Messbecher		3,1		15,3

B Hochdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich – Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu (Versuch BrL2)

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter sowie die Brandlast bei Versuch BrL2.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers	Brandlast
BrL2 HD-Wassernebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -61 Pa</li> <li>– Schleuse: -32 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 135 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 90 g Wiesenheu</li> <li>– verbrannte Masse: 109 g</li> </ul>

Im Unterschied zu Versuch BrL1 erfolgte bei Versuch BrL2 die Abführung der Abluft über die Deckenöffnung an Position Ö2 (vl oben)

Die folgende Bildserie in Abbildung 100 zeigt anhand von Videoprints den zeitlichen Versuchsablauf, das Auslösen der Rauchmelder, die Auslösung der Wassernebellöschanlage, die Verrauchung im Raum sowie die Brandlast vor und nach dem Versuch.

Zeit	Ereignis	Videoprints
	Brandlast vor dem Versuch (PC-Käfigschale mit Wiesenheu) (hinten links im Raum)	
0	Wärmestrahler ein	
2 min 56 s	Entzündung der Brandlast	
3 min 29 s	Rauchmelder RM7 (hinten links) Deckentemperatur bei Ansprechen: $T_7 = 34^{\circ}\text{C}$  $T_{7_{\max}} = 38^{\circ}\text{C}$ (3 min 40s)	

3 min 30 s	Rauchmelder RM4 (hinten rechts)	
3 min 31 s	Rauchmelder RM2 (Decke Mitte)	
3 min 36 s	Löschbeginn HD-Wassernebel  Zweimelderkriterium für Auslösung: RM7 (hl) + RM4 (hr)	
3 min 37 s	Rauchmelder RM6 (vorne links)	

3 min 40 s	Schnelle Verschlechterung der Sicht (Löschzeit: 4 s)	
3 min 52 s	Rauchmelder RM5 (vorne rechts)	
9 min 30 s	Löschanlage aus,	
15 min 56 s	Versuchsende Brandlast nach dem Versuch, Löschwasserverbrauch ohne Nachlöscharbeiten: 76,7 l (Löschzeit: 5 min 54 s), Glutbrand musste manuell abgelöscht werden	

Abbildung 100: Versuch BrL2 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wasserebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Von der ursprünglichen Masse verbrannten 109 g Polycarbonat und Wiesenheu.

Die Hochdruck-Wassernebellöschanlage war hierbei nicht in der Lage, den Brand zu löschen. Nach dem Versuch glimmte das Heu weiter. Dies deutet auf die zu geringe Wasserbeaufschlagung im Bereich der Brandlast hin.

Abbildung 101 zeigt den Verlauf des Unterdruckes, Abbildung 102 und Abbildung 103 zeigen die Temperaturen im Versuchslabor und in den Lüftungskanälen.

Bei der Entzündung der Brandlast (=> Flammenbrand) nach 2 min 56 s löste der 1. Rauchmelder RM7 (hinten links) bei 3 min 29 s aus. Dies bedeutet, dass die Brandrauchentwicklung beim Aufheizvorgang vor der Entzündung zu gering war, um den Schwelbrand zu detektieren.

Man erkennt, dass zum Zeitpunkt des Ansprechens des ersten Rauchmelders RM7 nach 3 min 29 s und des zweiten Rauchmelders RM4 nach 3 min 30 s die Sicht im Versuchslabor noch nicht beeinträchtigt wurde.

Bei Löschbeginn (3 min 36 s) ergab sich wieder der charakteristische Drucksprung, der sich schon bei den Kaltsprühversuchen mit HD-Wassernebel gezeigt hat, zunächst mit einer Erhöhung des Unterdruckes (ca. -61 Pa => ca. -122 Pa) und dann mit einer Verminderung des Unterdruckes (=> ca. -36 Pa) und anschließendem Angleichen an den Anfangsunterdruck.

Im Versuchslabor wurde eine maximale Temperatur von 38°C an Messstelle T7 über der Brandlast gemessen. Die übrigen Temperaturen waren bedeutend niedriger, wie auch bereits bei Versuch BrL1.

Der letzte Rauchmelder RM5 (vorne rechts) löste nach 3 min 52 s aus. Man erkennt die relative große Zeitdifferenz von 45 s zwischen RM7 und RM5 in diesem relativ kleinen Versuchslabor.

Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus (Abbildung 102) im Versuchslabor lösten die Indikatorsprinkler nicht aus.

Das hierdurch bedingte niedrige Temperaturniveau in den Lüftungskanälen (Abbildung 103) wäre wiederum unkritisch für HEPA / ULPA-Filter.

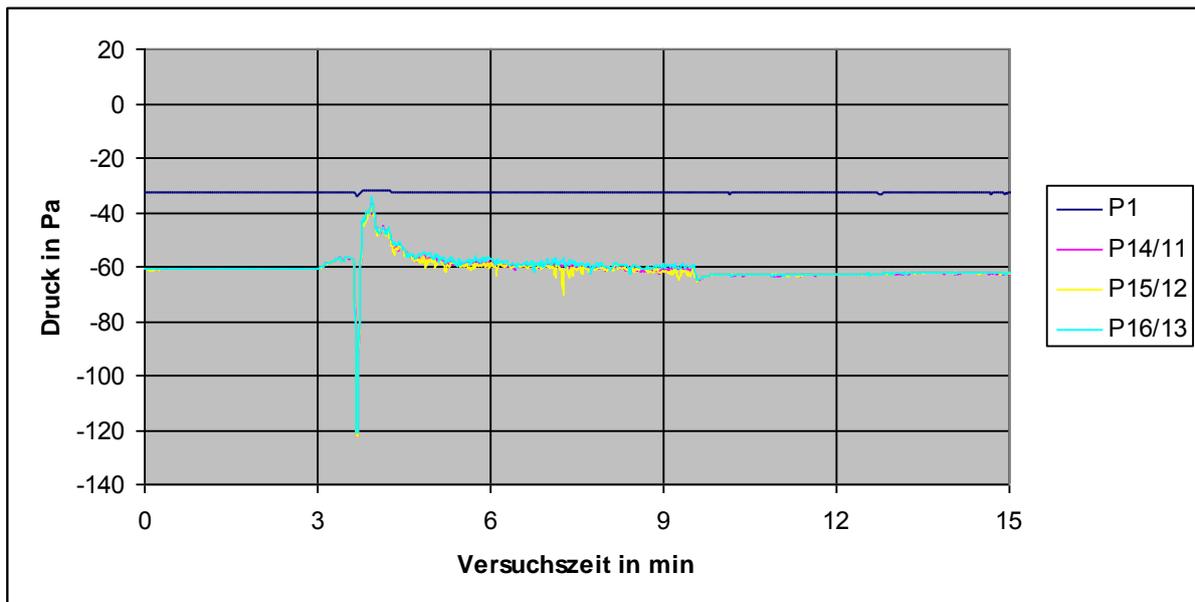


Abbildung 101: Versuch BrL2 - Druckverlauf im Raum während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Deckenabluftöffnung.

Der Temperaturanstieg infolge des Brandes bis zum Einsetzen der Löschanlage ist gut über die Temperaturverlauf erkennbar. Auch hier zeigte sich wieder eine kurzzeitige Abkühlung der Raumluft unter die Ausgangstemperatur zu Beginn des Löschens durch den eingetragenen kalten Sprühnebel.

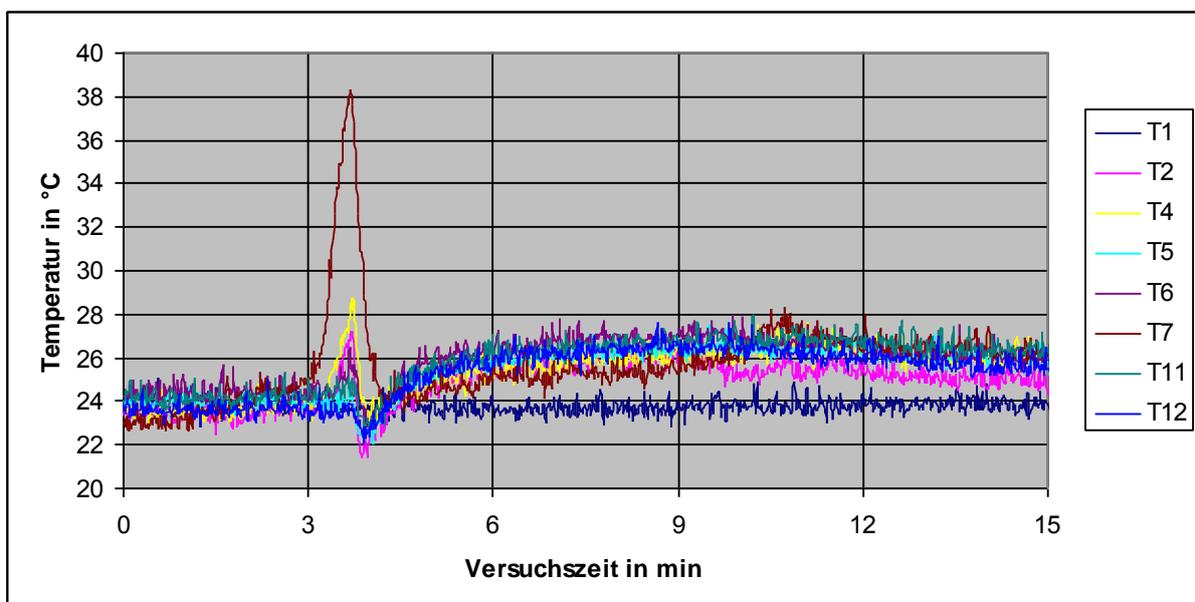


Abbildung 102: Versuch BrL2 - Temperaturverlauf im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

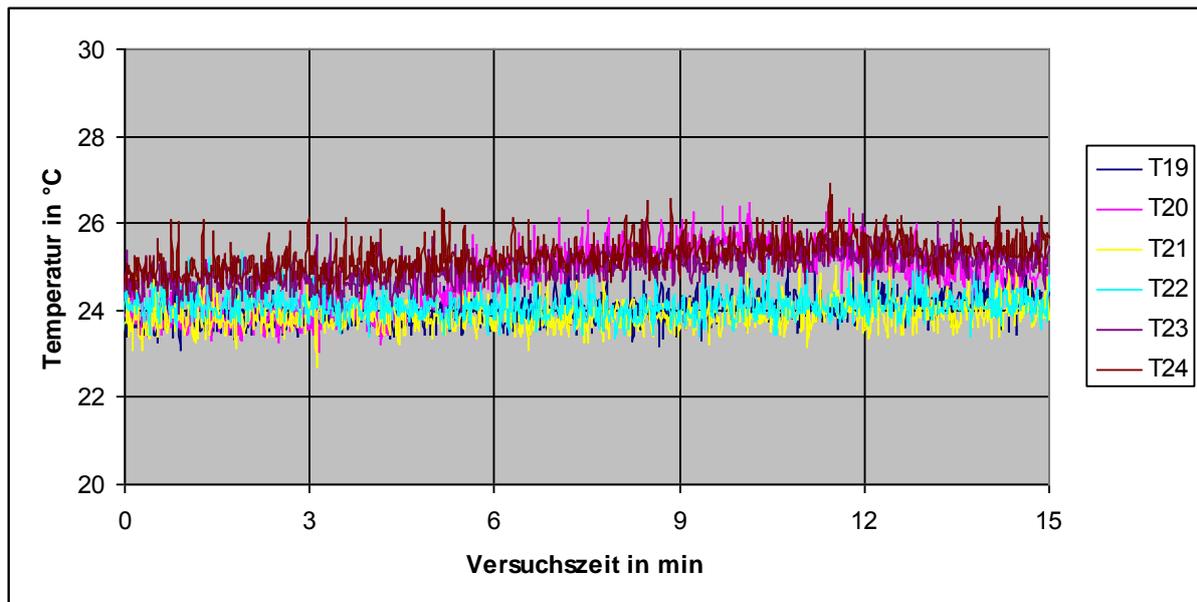


Abbildung 103: Versuch BrL2 - Temperaturverlauf in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Während des Versuchs wurden folgende maximalen Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid bzw. minimale Konzentration von Sauerstoff in halber Versuchslaborhöhe (linke Wand, Messstelle 12) lt. Tabelle 33 gemessen:

Tabelle 33: Versuch BrL2 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe) und zugehörige Versuchszeit

Sauerstoff (Min.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	200 ppm	5 min 50 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	700 ppm	7 min 59 s

Im Bereich an der linken Wand Mitte, 20 cm unter der Decke wurden an Messstelle 11 folgende Konzentrationen lt. Tabelle 34 gemessen.

Tabelle 34: Versuch BrL2 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke) und zugehörige Versuchszeit.

Sauerstoff (Min.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	200 ppm	7 min 49 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	600 ppm	8 min 21 s

Man erkennt an den Konzentrationswerten, dass durch die Löschanlage selbst zum einen für Mensch und Tier keine kritischen Sauerstoffkonzentrationen entstehen und dass durch die Brandbekämpfung die Bildung von Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid gegenüber einem nicht bekämpften Brand (siehe Versuche Br1 und Br2) deutlich geringer ist. Der ETW-Wert von Kohlenstoffmonoxid von 33 ppm wurde jedoch im Versuch überschritten.

Beim Versuch wurde unmittelbar nach Auslösung der Hochdruck-Wasserebel-löschanlage die Sicht im Raum stark eingeschränkt. Hierfür ist neben dem Hochdruck-Wasserebel auch der beim Brand entstehende Brandrauch mit Russpartikeln verantwortlich.

Dies spiegelt sich auch im Abfall der Messwerte für die Transmission wider (Abbildung 104).

Direkt nach dem Abschalten der Löschanlage bei 9 min 30 s ist ein Anstieg der Transmission durch eine Verringerung des Nebels und eine Verbesserung der Sicht zu beobachten.

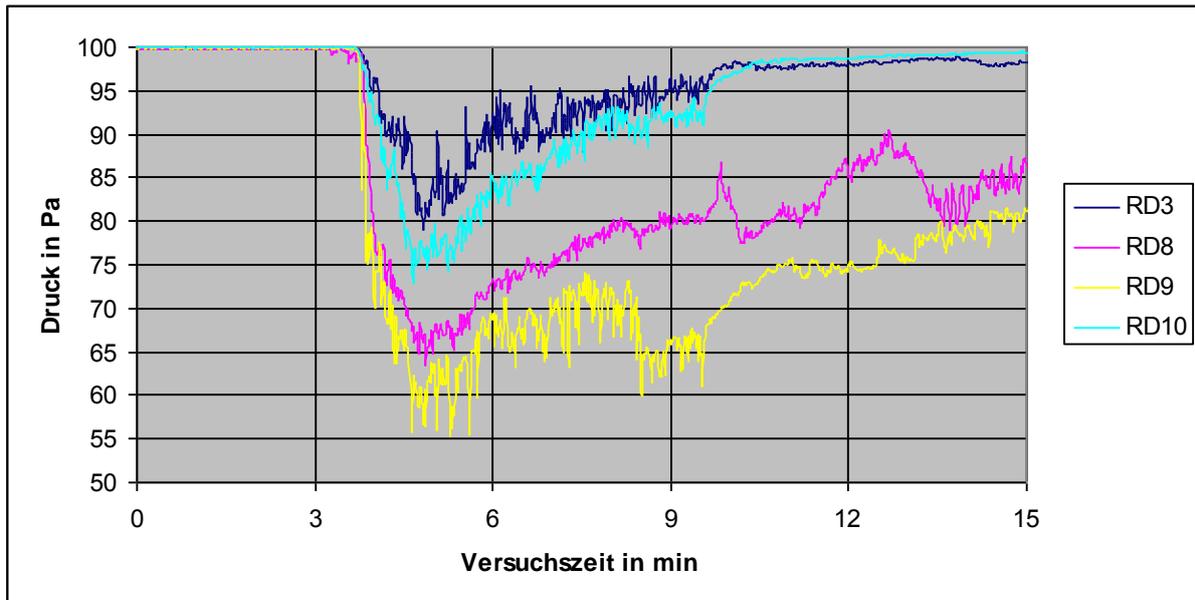


Abbildung 104: Versuch BrL2 - Verlauf der Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Während des Versuchs wurden im Raum folgende Werte für die minimale Transmission  $\tau$  bzw. den max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die max. optische Dichte  $OD$  lt. Tabelle 35 gemessen.

Tabelle 35: Versuch BrL2 – minimale Transmission  $\tau$  bzw. max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und max. optische Dichte  $OD$  im Versuchslabor und zugehörige Versuchszeit.

RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 80 \%$ $\sigma = 1,59 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,69 \text{ m}^{-1}$	4 min 49 s
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 63 \%$ $\sigma = 3,30 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,43 \text{ m}^{-1}$	4 min 52 s
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 56 \%$ $\sigma = 4,14 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,80 \text{ m}^{-1}$	4 min 52 s
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 73 \%$ $\sigma = 2,25 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,98 \text{ m}^{-1}$	4 min 39 s

Diese Messwerte für die Transmission „Brand und Löschen“ sind ebenfalls erheblich geringer als beim analogen Kaltsprühversuch L2 (Abbildung 82).

Durch den Brandrauch wurde die Sicht zusätzlich verschlechtert.

Abbildung 105 und Tabelle 36 zeigen die zeitlichen Verläufe bzw. die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den jeweiligen Lüftungskanälen.

Die relative Luftfeuchtigkeit erreichte in der Abluft des Versuchslabors einen maximalen Wert von 97 % r. F. und in der Gesamtabluft (Labor + Schleuse) einen maximalen Wert von 81 % r. F.

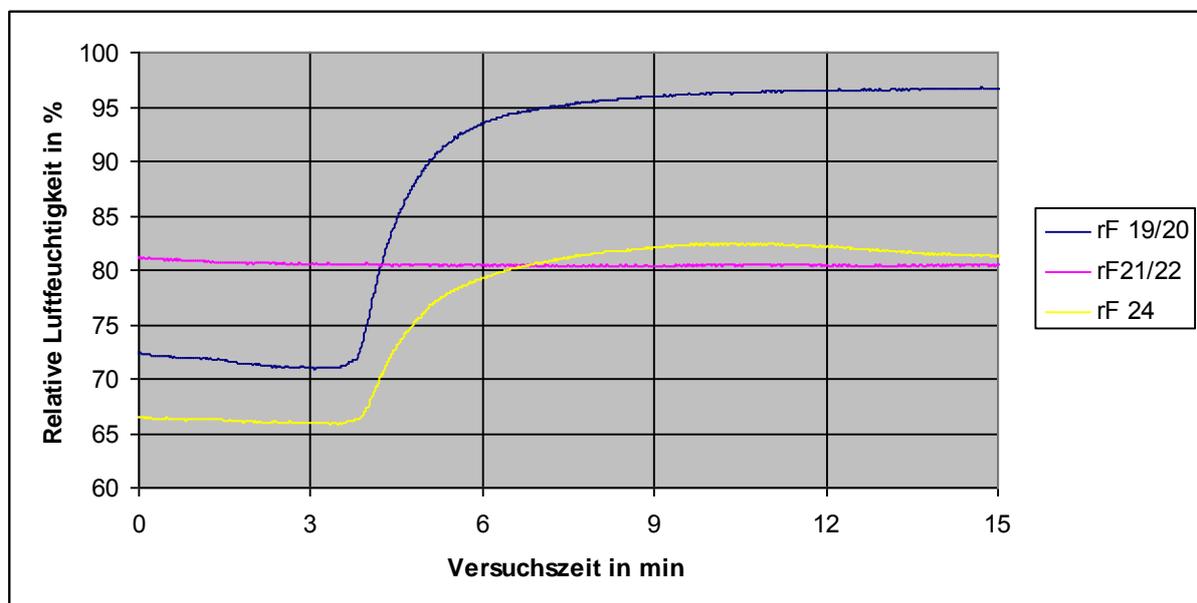


Abbildung 105: Versuch BrL2 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Die nachfolgende Tabelle 36 zeigt die gemessenen maximalen relativen Luftfeuchten in den jeweiligen Lüftungskanälen.

Tabelle 36: Versuch BrL2 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen

Versuch BrL2 (HD-Nebel)		
Abluft	Abluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	97 % r. F.
Zuluft (unten)	Zuluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	81 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	81 % r. F.

Wie bereits die Kaltsprühversuche mit HD-Wassernebel gezeigt hatten, war auch bei diesem Versuch die Verteilung des Löschwassers nach der Löschzeit von 5 min 54 s inhomogen (siehe Tabelle 37). Dies wird auch durch die geringe Löscheffektivität bei der Brandlast hinten links im Raum bestätigt.

Tabelle 37: Versuch BrL2 - Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs nach Brandereignis mit Hochdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlagsmessgerät	0	1	82	26
Messbecher		3,1		15,3

C Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Deckenbereich – Käfigschale aus Polycarbonat mit Wiesenheu (Versuch BrL3)

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter sowie die Brandlast.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers	Brandlast
BrL3 ND- Wassernebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> <li>– Zuluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -63 Pa</li> <li>– Schleuse: -34 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 600 g Polycarbonat</li> <li>– 90 g Wiesenheu</li> <li>– aufgrund der Wasseraufnahme des Heus ergab sich nach dem Brandversuch eine höhere Masse</li> </ul>

Bei diesem Versuch wurde die Abluft wie in Versuch BrL2 über die Deckenabluftöffnung an Position Ö2 (vl oben) abgeführt.

Die folgende Bilderserie in Abbildung 106 zeigt anhand von Videoprints den zeitlichen Versuchsablauf, das Auslösen der Rauchmelder, die Auslösung der Wassernebellöschanlage, die Verrauchung im Raum sowie die Brandlast vor und nach dem Versuch.

Bei diesem Versuch wurde der Brand mit der Niederdruck – Zwillings – Dralldüse im Gegensatz zum mit HD-Wassernebel durchgeführten Vergleichsversuch BrL2 gelöscht. Dabei verbrannte nur ein geringer Teil des Wiesenheus. Der Rest des Wiesenheus saugte sich mit Löschwasser voll, sodass nach Versuchsende eine Masse von 865 g gewogen wurde. Der Kunststoffbehälter der Käfigschale hatte nur ein infolge der Wärmebeaufschlagung durch den Heizstrahler geschmolzenes Loch in der Wandung.

Zeit	Ereignis	Videoprints
	Brandlast vor dem Versuch (PC-Käfigschale mit Wiesenheu) (hinten links im Raum)	
0	Wärmestrahler ein	
3 min 11 s	Entzündung der Brandlast	
3 min 43 s	Rauchmelder RM4 (hinten rechts) T4 = 23°C	

3 min 48 s	Rauchmelder RM7 (hinten links) T7 = 28 °C  T7 <sub>max</sub> = 29°C (3min 54 s)	 A video frame showing a fire test in a room. A fire is visible in the center. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 11:12:02".
3 min 53 s	Löschbeginn ND-Wassernebel  Zweimelderkriterium für Auslösung: RM4 (hr) + RM7 (hl)	 A video frame showing the fire being extinguished. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 11:12:07".
3 min 57 s	Rauchmelder RM6 (vorne links)	 A video frame showing smoke detector RM6 activation. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 11:12:11".
4 min 38 s	Rauchmelder RM5 (vorne rechts)	 A video frame showing smoke detector RM5 activation. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 11:12:52".

5 min 19 s	Rauchmelder RM2 (Decke Mitte)  keine weitere Verschlechterung der Sicht im Verlauf des Versuchs	
5 min 38 s	Brand gelöscht  (Löschwasserverbrauch: 22,8 l in 1 min 45 s Löschzeit)	
9 min 37 s	Löschanlage aus (Löschwasserverbrauch gesamt: 74,5 l in 5 min 44 s Löschzeit)	
	Versuchsende Brandlast nach dem Versuch, Brand wurde durch den ND-Wassernebel vollständig gelöscht	

Abbildung 106: Versuch BrL3 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Abbildung 107 zeigt den Verlauf des Unterdruckes, Abbildung 108 und Abbildung 109 zeigen die Temperaturen im Versuchslabor und in den Lüftungskanälen.

Die Druckschwankung mit einer kurzzeitigen Absenkung des Unterdruckes um ca. 7 Pa war hier hierbei wesentlich geringer als beim gleichen Versuch mit HD-Wassernebel.

Im Versuchslabor wurde eine maximale Temperatur von 29°C an Messstelle T7 über der Brandlast gemessen. Die übrigen Temperaturen waren bedeutend niedriger.

Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus im Versuchslabor lösten die Indikatorsprinkler nicht aus.

Dieses niedrige Temperaturniveau wäre unkritisch für HEPA / ULPA-Filter.

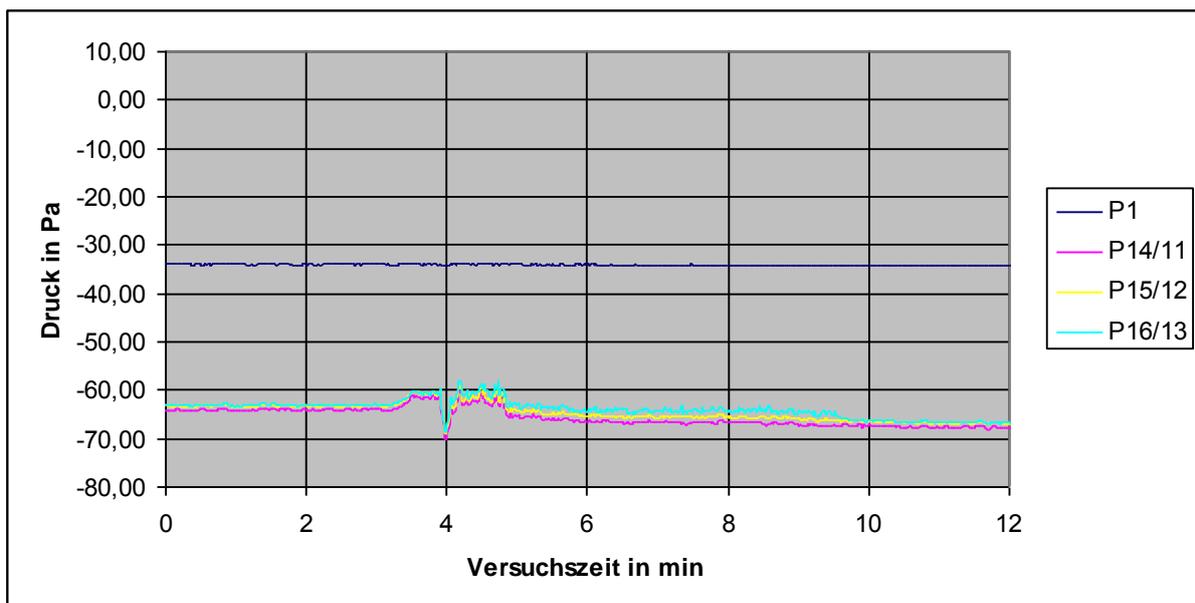


Abbildung 107: Versuch BrL3 - Druckverlauf im Raum während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

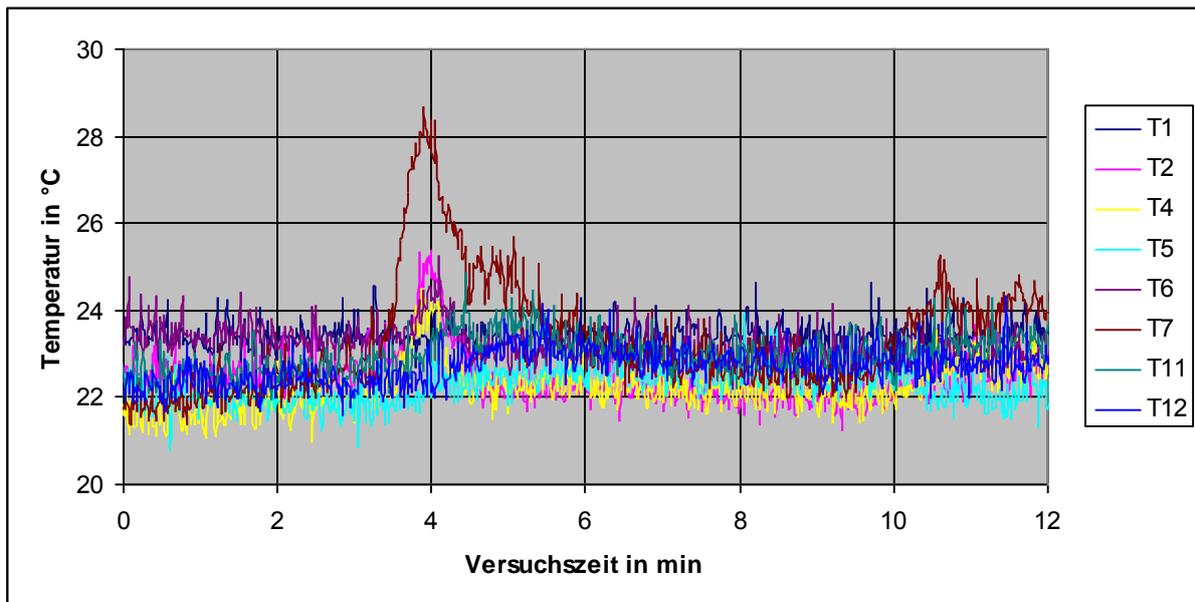


Abbildung 108: Versuch BrL3 - Temperaturverlauf im Raum während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

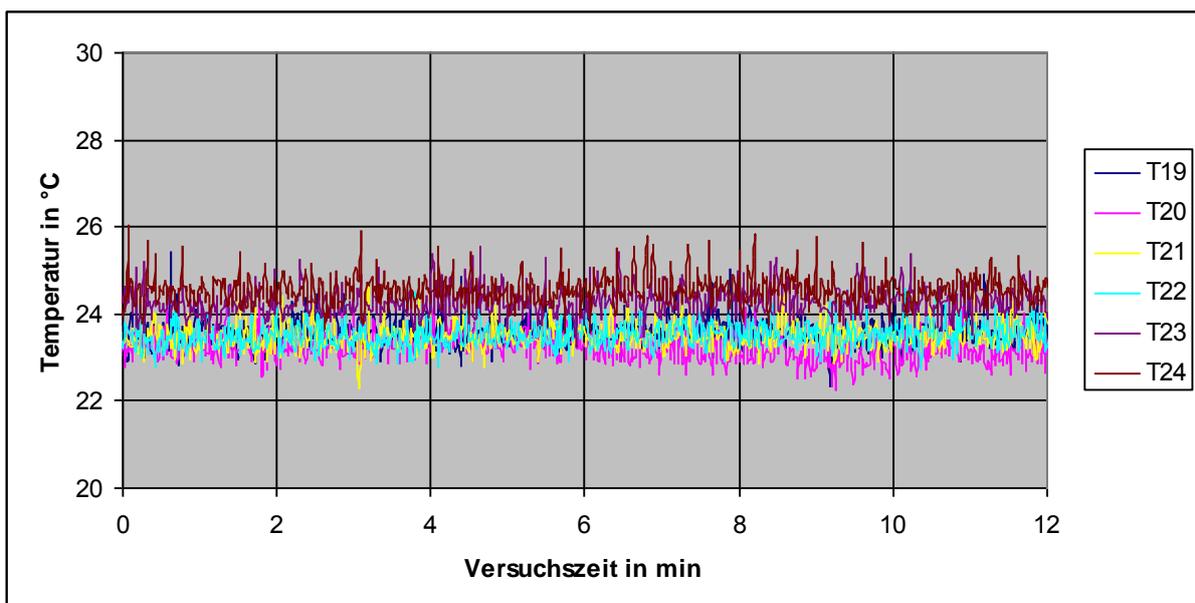


Abbildung 109: Versuch BrL3 - Temperaturverlauf in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Man erkennt, dass zum Zeitpunkt des Ansprechens des ersten Rauchmelders RM4 (hinten rechts) nach 3 min 43 s und des zweiten Rauchmelders RM7 nach 3 min 48 s die Sicht im Versuchslabor praktisch noch nicht beeinträchtigt war (siehe Abbildung 106).

Während des gesamten Löschvorganges mit ND-Wassernebel wurde die Sicht im Versuchslabor weniger beeinträchtigt als bei den analogen Versuchen HD-Wassernebel.

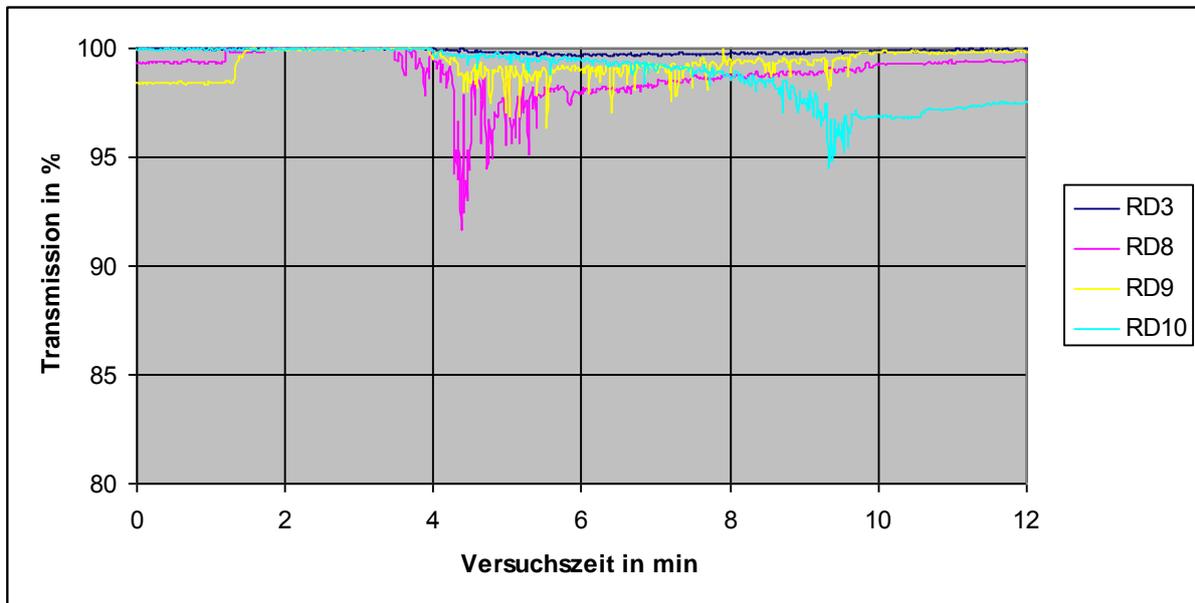


Abbildung 110: Versuch BrL3 - Verlauf der Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Während des Versuchs wurden lt. Tabelle 38 im Raum folgende Werte für die minimale Transmission  $\tau$  bzw. den max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die max. optische Dichte  $OD$  gemessen.

Tabelle 38: Versuch BrL3 – minimale Transmission  $\tau$  bzw. max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und max. optische Dichte  $OD$  im Versuchslabor.

RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 100 \%$ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0 \text{ m}^{-1}$	5 min 47 s
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 92 \%$ $\sigma = 0,60 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,26 \text{ m}^{-1}$	4 min 23 s
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 97 \%$ $\sigma = 0,22 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,09 \text{ m}^{-1}$	4 min 58 s
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 95 \%$ $\sigma = 0,37 \text{ m}^{-1}$ $OD = 0,16 \text{ m}^{-1}$	9 min 20 s

Während des Versuchs wurden folgende maximalen Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid bzw. minimale Konzentration von Sauerstoff in halber Versuchslaborhöhe (linke Wand, Messstelle 12) gemessen (Tabelle 39):

Tabelle 39: Versuch BrL3 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)

Sauerstoff (Min.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-
Kohlenstoffdioxid (Max.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-

Im Bereich an der linken Wand Mitte, 20 cm unter der Decke wurden an Messstelle 11 folgende Konzentrationen gemessen (Tabelle 40):

Tabelle 40: Versuch BrL3 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)

Sauerstoff (Min.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	100 ppm	4 min 38 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	keine wesentliche messbare Veränderung vom Ausgangswert	-

Abbildung 111 und Tabelle 41 zeigen die zeitlichen Verläufe bzw. die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den jeweiligen Lüftungskanälen.

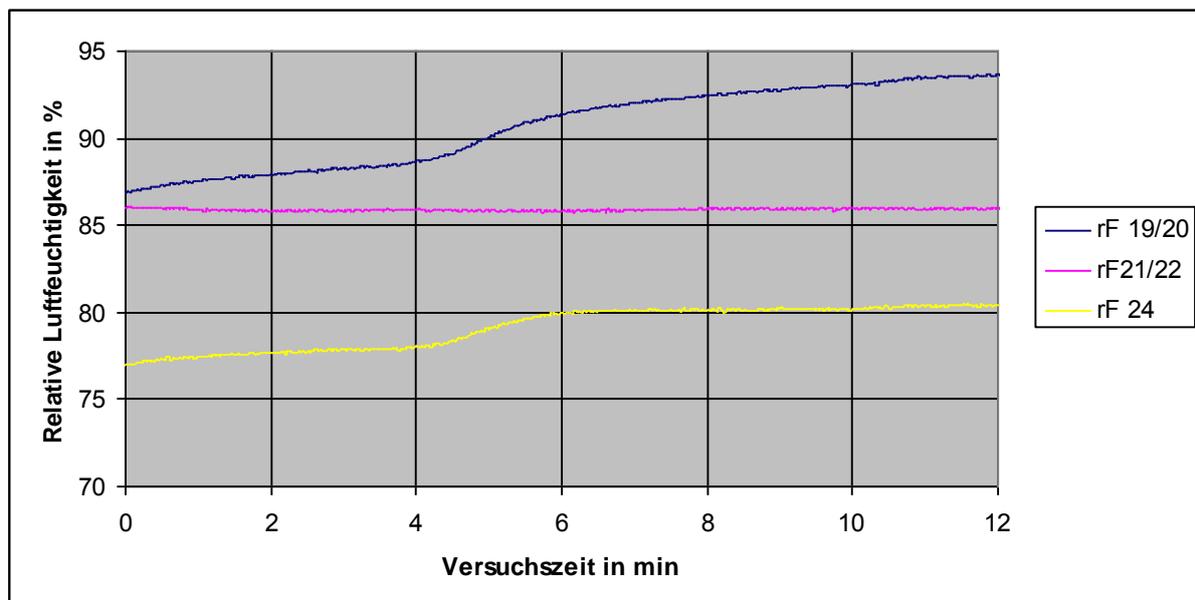


Abbildung 111: Versuch BrL3 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Deckenbereich.

Tabelle 41: Versuch BrL3 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen.

Versuch BrL3 (ND-Nebel)		
Abluft	Abluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	94 % r. F.
Zuluft (unten)	Zuluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	86 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	80 % r. F.

Die relative Luftfeuchtigkeit erreichte in der Abluft des Versuchslabors einen maximalen Wert von 94 % r. F. und in der Gesamtabluft (Labor + Schleuse) einen maximalen Wert von 80 % r. F.

Wie die folgende Tabelle 42 zeigt, wurde das Versuchslabor durch die Niederdruck-Wassernebellöschanlage gleichmäßiger als beim Hochdruck-Wassernebel während der Löschzeit von 5 min 44 s mit Löschwasser beaufschlagt. Dieses zeigt sich ebenfalls in der besseren Löscheffektivität von ND-Wassernebel gegenüber HD-Wassernebel bei der eingesetzten glutbildenden Brandlast.

Tabelle 42: Wasserbeaufschlagung während des Löschvorgangs nach Brandereignis bei Niederdruck-Wassernebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlagsmessgerät	8	5	9	4
Messbecher		6,1		7,6

D Niederdruck-Wassernebel, Abluft über Lüftungsöffnung im Bodenbereich -  
Holzkrippe (Versuch BrL4)

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Versuchsparameter sowie die Brandlast für den Versuch BrL4. Im Unterschied zu den vorangegangenen Versuchen wurde hier als Brandlast eine Holzkrippe aus Vierkanthölzern verwendet.

Bisherige Versuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik haben gezeigt, dass Holzkrippen mit HD-Wassernebel im Unterschied zu ND-Wassernebel nicht zu löschen sind (siehe Kunkelmann [2010]).

Holzkrippen zeichnen sich durch eine offene Struktur und große spezifische Oberfläche aus, die für die Brandbekämpfung mit dem Hochdruck-Wassernebel problematisch ist. Aufgrund der Position der Brandlast nicht direkt unter dem für die Auslösung der Löschanlage zuständigen Indikatorsprinkler oder Rauchmelder können sich Auslöseverzögerungen ergeben, von denen allerdings im realen Fall insbesondere auch bei größeren Räumen immer auszugehen ist. In dieser Zeit brennen dadurch nicht nur die Oberflächen der Krippenhölzer, sondern es hat sich bereits ein tiefsitzender Glutbrand ausgebildet, der durch die sehr feinen Tropfen des Hochdruck-Wassernesels nicht mehr entscheidend bekämpft werden kann. Für die optimale Brandbekämpfung ist es daher ganz entscheidend, dass die Löschanlage automatisch und sehr frühzeitig ausgelöst wird.

Im diesem Versuch wird daher nur ND-Wassernebel zur Brandbekämpfung untersucht.

Versuch	Lüftungssituation	Unterdrücke	Volumenstrom, volumetrische Wasserbeaufschlagung und Druck des Wassers	Brandlast
BrL4 ND- Wasser- nebel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten)</li> <li>– Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Labor: -77 Pa</li> <li>– Schleuse: -33 Pa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 13 l/min     <math>\triangleq 0,66 \text{ l}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})</math></li> <li>– 4,5 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Holzkrippe 2960 g</li> <li>– 100 ml Spiritus</li> <li>– verbrannte Masse: 520 g</li> </ul>

Im vorliegenden Fall wurde eine Holzkrippe mit 55 Vierkanthölzern mit den Abmessungen 2,5 cm x 2,5 cm x 25 cm als Brandlast mit einer Masse von 2960 g gewählt und auf dem Tisch im Versuchslabor positioniert. Gezündet wurde der Brandstoff mittels vier Weichholzfaserstreifen (3 cm x 2 cm x 20 cm), die mit jeweils 25 ml Spiritus getränkt wurden.

Als Kriterium zur Auslösung der Wassernebellöschanlage diene bei diesem Versuch das Ansprechen eines der 5 Indikatorsprinkler im Versuchslabor.

Die folgende Bilderserie in Abbildung 112 zeigt anhand von Videoprints den zeitlichen Versuchsablauf, das Auslösen der Rauchmelder, die Auslösung der Wassernebellöschanlage, das Ansprechen der Indikatorsprinkler, die Verrauchung im Raum sowie die Brandlast vor und nach dem Versuch.

Zeit	Ereignis	Videoprints
	Brandlast vor dem Versuch – Holzkrippe, Weichholzfaserstreifen, Spiritus (hinten links im Raum)	
9 s	Schließen der Tür nach manueller Zündung der Brandlast => Aufbau des Unterdruckes im Versuchslabor	
1 min 36 s	Rauchmelder RM6 (vorne links) $T_6 = 36\text{ °C}$	
1 min 45 s	Rauchmelder RM5 (vorne rechts)	

1 min 58 s	Indikatorsprinkler IS7 (hinten links) T7 = 97°C  T7 <sub>max</sub> = 146 °C (7 min 10 s)	
2 min 2 s	Löschbeginn ND-Wassernebel  Kriterium für Auslösung: ein Indikatorsprinkler	
2 min 45 s	Rauchmelder RM4 (hinten rechts)	
4 min 36 s	Rauchmelder RM7 (hinten links)	

6 min 9 s	Rauchmelder RM2 (Decke Mitte)	 A dark, dimly lit ceiling with a faint red glow in the center. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 15:14:32".
6 min 16 s	Indikatorsprinkler IS4 (hinten rechts) T4 = 91°C	 A dark ceiling with a faint red glow. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 15:14:39".
9 min 37 s	starke Verrauchung, kein Flammenschein mehr erkennbar	 A dark ceiling with a faint red glow. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 15:18:00".
18 min 42 s	Löschanlage zur visu- ellen Kontrolle des Brandes ausgeschaltet	 A dark ceiling with a faint red glow. A timestamp in the bottom left corner reads "29 6 2011 15:27:05".
25 min 5 s	Nachlöschen Löschanlage wieder eingeschaltet	

27 min 24 s	Öffnen der Tür (visuelle Überprüfung ob Brand gelöscht, Druckanstieg im Ver- suchslabor)	
28 min 44 s	Löschanlage aus  Löschzeit gesamt: 20 min 19 s Löschwasserverbrauch gesamt: 264 l	
	Versuchsende Brandlast nach dem Versuch, Brand wurde durch den ND- Wassernebel vollstän- dig gelöscht; die Holz- krippe weist noch Reststabilität auf (fällt nicht zusammen)	

Abbildung 112: Versuch BrL4 – Versuchsablauf während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe mit Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Abbildung 113 zeigt den Verlauf des Unterdruckes und Abbildung 114 zeigt die Temperaturen im Versuchslabor. An der Druckkurve erkennt man, dass aufgrund des Zündvorganges zu Beginn des Versuchs die Tür zunächst geöffnet ist und sich der Unterdruck beim Schließen der Tür wieder einregeln muss.

Im Vergleich zu Versuch BrL3, ebenfalls mit ND-Wassernebel, ergibt sich bei Versuch BrL4 bei Sprühbeginn kurzzeitig eine wesentlich größere Druckabsenkung auf ca. -160 Pa. Diese Druckabsenkung ist sogar größer als bei den Versuchen BrL1 und BrL2 mit HD-Wassernebel.

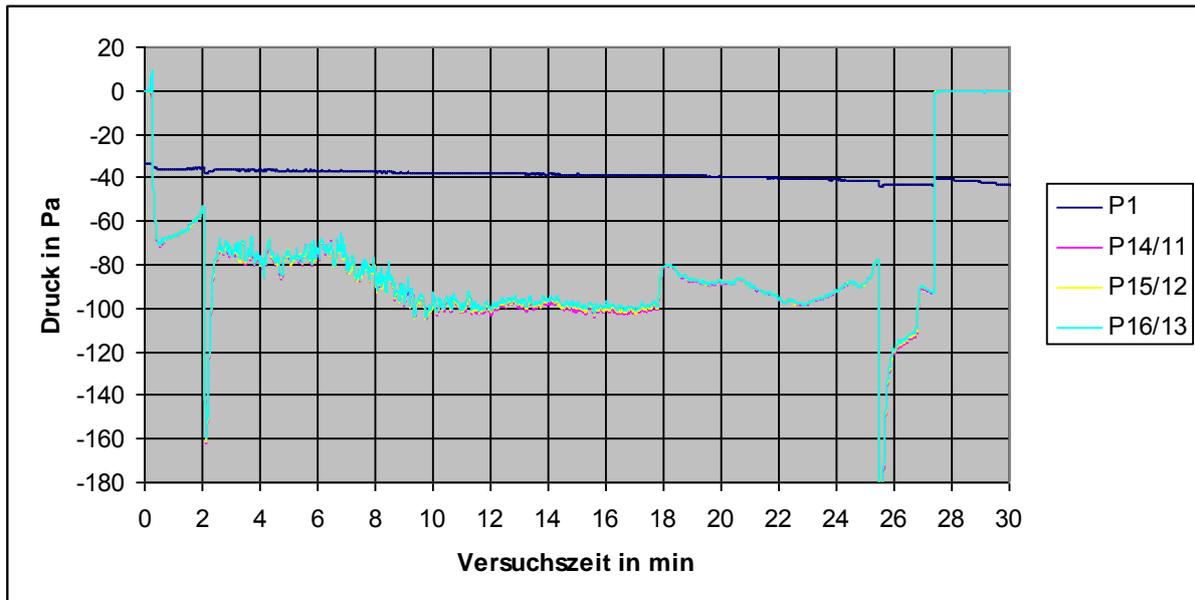


Abbildung 113: Versuch BrL4 - Druckverlauf während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Das Temperaturniveau im Versuchslabor liegt bei diesem Versuch insgesamt wesentlich höher als bei den bereits beschriebenen Versuchen mit Wärmestrahler, Käfigschale und Wiesenheu (Versuche BrL1 bis BrL3).

Der erste Rauchmelder RM6 löste nach 1 min 36 s aus, der zweite Rauchmelder RM5 nach 1 min 45 s. Man erkennt, dass zu diesem Zeitpunkt die Sicht im Versuchslabor noch nicht beeinträchtigt wurde (siehe Abbildung 112).

Aufgrund der schnelleren Brand- und Brandrauchentwicklung gegenüber den Versuchen mit Wärmestrahler und Käfigschale mit Wiesenheu ergaben sich bei diesem Versuch schnellere Auslösezeiten der Rauchmelder mit Ausnahme des Rauchmelders RM7 (hinten links im Raum).

Vermutlich wurde aufgrund der diagonalen Querströmung von der Zuluftöffnung im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) zur Abluftöffnung im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) bei diesem Versuch der Brandrauch in der Anfangsphase mit geringer Wärmeentwicklung so stark abgelenkt, dass der Rauchmelder RM7 (hinten links) direkt über der Brandlast erst sehr spät (4 min 36 s) und (nicht erklärbar) nach dem Indikatorsprinkler IS7, ebenfalls hinten links, auslöste. Weiterhin könnte die späte Auslösung auf die weitestgehend russfreie Verbrennung des als Brandbeschleuniger

verwendeten Spiritus zurückzuführen sein, der aber einen schnellen Temperaturanstieg an der Decke zur Folge hatte.

Der Indikatorsprinkler IS7 (hinten links über der Brandlast) löste nach 1 min 58 s bei  $T7 = 97^{\circ}\text{C}$  aus.

Der Löschbeginn erfolgte bei 2 min 2 s.

Aufgrund der starken Russbildung, der Verwirbelung der Rauchsicht durch den Wasserdampf sowie der Abluftöffnung im Bodenbereich, war die Sicht nach Auslösung der Löschanlage stark eingeschränkt.

Der Indikatorsprinkler IS4 (hinten rechts) löste nach 6 min 16 s bei  $T4 = 91^{\circ}\text{C}$  aus.

An Messstelle T7 wurde nach 7 min 10 s die maximale Temperatur von  $146^{\circ}\text{C}$  ermittelt.

Nach einer Versuchszeit von 18 min 42 s wurde die Löschanlage zum 1. mal ausgeschaltet. Die Temperaturen stiegen jedoch anschließend wieder, fielen nach ca. 21 min wieder ab und stiegen dann nach 23 min 30 s wiederum an.

Aufgrund des erneuten Temperaturanstiegs, der offensichtlich im Weiterglimmen der Holzkröppe seine Ursache hatte, wurde eine zweite Aktivierung der Löschanlage erforderlich.

Hierzu wurde die Löschanlage zum Nachlöschen nach 25 min 5 s zum 2. Mal eingeschaltet. Zum Zeitpunkt der zweiten Auslösung betrug die Temperatur an Messstelle  $109^{\circ}\text{C}$  an Messstelle T7 (hinten links).

Anschließend wurde die ND-Wasserdampflöschanlage bis 28 min 44 s bis zum vollständigen Löschen der Holzkröppe weiterbetrieben. Die Holzkröppe wies noch eine Reststabilität auf und fiel nicht zusammen, da ein vollständiger Abbrand der Hölzer durch den Löscheinsatz verhindert werden konnte. Die restlichen Vierkanthölzer wiesen noch eine Restmasse von 2440 g auf. Von der ursprünglichen Brandlastmasse verbrannten 520 g.

Man erkennt jedoch aus der Löschzeit von 20 min 19 s mit einem Gesamtlöschwasserverbrauch incl. Nachlöschen von 264 l unmittelbar das nicht unproblematische Ablöschen der im Eckbereich des Versuchslabors befindlichen Holzkrippe mit tiefsitzendem Glutbrand.

Nachfolgend wird der Einfluss des verbrennenden Spiritus auf die Wärmefreisetzung bei dem Holzkrippen abgeschätzt:

Beim Versuch wurde die Masse  $m_{\text{Holz}} = 520 \text{ g} (= 0,52 \text{ kg})$  des eingesetzten Holzes verbrannt.

Trockenes Fichten-/Tannenholz hat nach Beilicke [2010] einen mittleren Heizwert von  $H_{\text{U Holz}} = 18,4 \text{ MJ/kg}$ .

Allerdings hatten die hier verwendeten Holzstäbe eine Holzfeuchte von etwa 10%. Hierdurch reduziert sich der Heizwert auf ca. 16,6 KJ/kg.

Bei der Verbrennung von 0,52 kg Holz ergibt sich hieraus folgende Wärmefreisetzung

$$Q_{\text{Holz}} = H_{\text{U Holz}} \times m_{\text{Holz}} \cong 8,6 \text{ MJ}$$

Spiritus (=> Ethanol) hat einen mittleren Heizwert von  $H_{\text{U Spiritus}} = 24,9 \text{ MJ/kg}$  und bei 20°C eine Dichte von  $\rho_{\text{Spiritus}} = 790 \text{ kg/m}^3$ .

Für die Verbrennung von  $V_{\text{Spiritus}} = 100 \text{ ml}$  Spiritus ergibt sich nach der Berechnung der Masse ein Wert von

$$m_{\text{Spiritus}} = V_{\text{Spiritus}} \times \rho_{\text{Spiritus}} \cong 0,079 \text{ kg} \cong 79 \text{ g}$$

$$Q_{\text{Spiritus}} = H_{\text{U Spiritus}} \times m_{\text{Spiritus}} \cong 2 \text{ MJ}$$

Somit erhält man eine Gesamtwärmefreisetzung von

$$Q_{\text{Gesamt}} = Q_{\text{Holz}} + Q_{\text{Spiritus}} = 10.6 \text{ MJ}$$

Der Einfluss des Brandbeschleunigers wirkte sich hauptsächlich auf den Brandverlauf in der Brandentwicklungsphase aus und betrug knapp 20 % der gesamten Wärmefreisetzung. Die Brandleistung lag dabei über die Versuchsdauer gemittelt und unter Berücksichtigung des Löscheinsatzes in einer Größenordnung von 5 – 10 kW mit einem Spitzenwert vor Einsetzen der Löschwirkung von etwa 20 kW.

Abbildung 114 zeigt die Temperaturen im Versuchslabor.

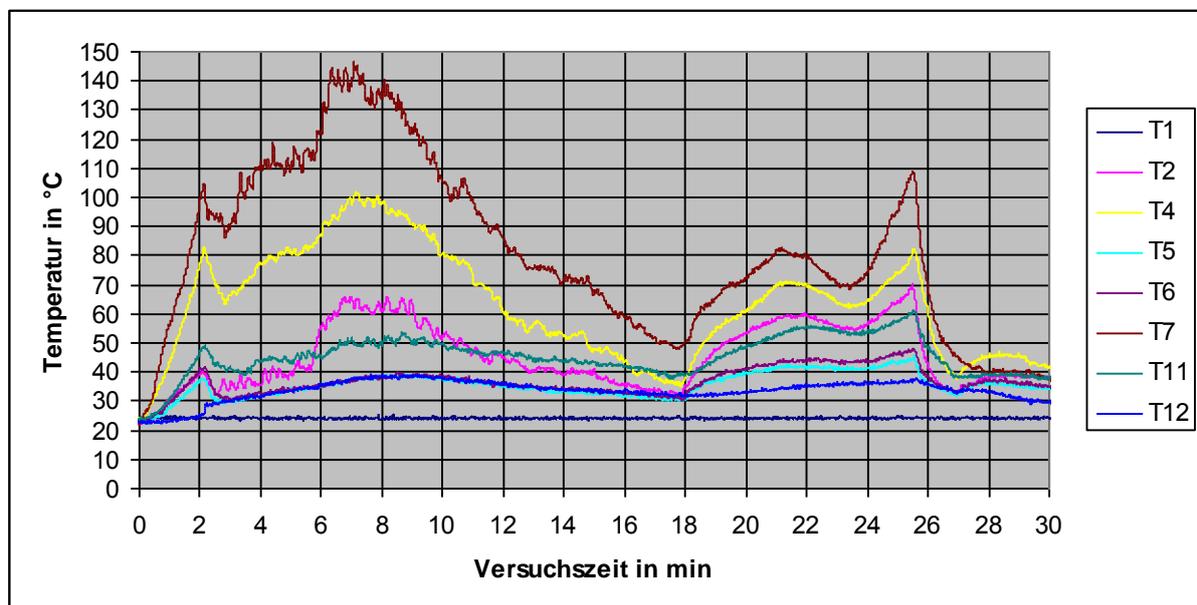


Abbildung 114: Versuch BrL4 – Temperaturverläufe im Versuchslabor während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Im Lüftungskanal der Abluft (siehe Temperaturverläufe in Abbildung 115) wurden zwar erhöhte Temperaturen gemessen, diese lagen jedoch unter 40°C (T22) und wären somit für handelsübliche HEPA / ULPA-Filter unkritisch.

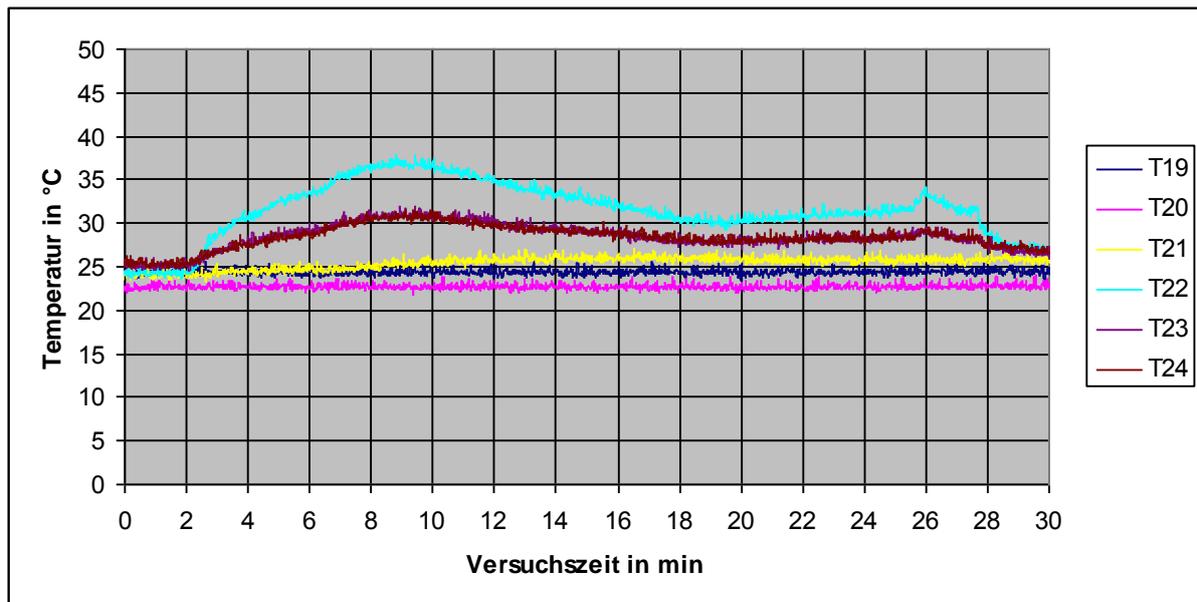


Abbildung 115: Versuch BrL4 – Temperaturverläufe in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Während des Versuchs wurden folgende maximalen Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid bzw. minimale Konzentration von Sauerstoff in halber Versuchslaborhöhe (linke Wand, Messstelle 12) gemessen (siehe Tabelle 43).

Tabelle 43: Versuch BrL4 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 12: halbe Versuchslaborhöhe)

Sauerstoff (Min.)	18,4 Vol. %	11 min 10 s
Kohlenstoffmonoxid (Max.)	1600 ppm	16 min 1 s
Kohlenstoffdioxid (Max.)	20800 ppm	10 min 58 s

Im Bereich an der linken Wand Mitte, 20 cm unter der Decke wurden lt. Tabelle 44 an Messstelle 11 folgende Konzentrationen gemessen:

Tabelle 44: Versuch BrL4 - Gaskonzentrationen im Versuchslabor (Messstelle 11: 20 cm unter der Decke)

Sauerstoff	17,2 Vol. %	11 min 26 s
Kohlenstoffmonoxid	2400 ppm	23 min 58 s
Kohlenstoffdioxid	18800 ppm	18 min 26 s

Der ETW-Wert von Kohlenstoffmonoxid von 33 ppm wurde im Versuch überschritten.

Bei diesem Versuch wurde unmittelbar nach Auslösung der Niederdruck-Wassernebellöschanlage die Sicht im Raum stark eingeschränkt. Im Vergleich mit Versuch mit BrL3, ebenfalls mit ND-Wassernebel, war die Verschlechterung der Sicht bei diesem Versuch wesentlich größer. Die Sicht war ebenfalls schlechter im Vergleich zu den Versuchen BrL1 und BrL2 mit HD-Wassernebel/ Käfigschale/Wiesen-heu. Hierfür war vermutlich die beim Brand entstehende größere Menge an Brandrauch mit Russpartikeln durch den Abbrand der Holzkrippe in Verbindung mit dem Wasserdampf-/Tropfenaerosol verantwortlich.

Dies zeigt auch der Abfall der Messwerte für die Transmission in Abbildung 116.

Direkt nach dem Abschalten der Löschanlage am Ende des Versuchs ist ein Anstieg der Transmission durch eine Verringerung des Nebels und eine Verbesserung der Sicht zu beobachten.

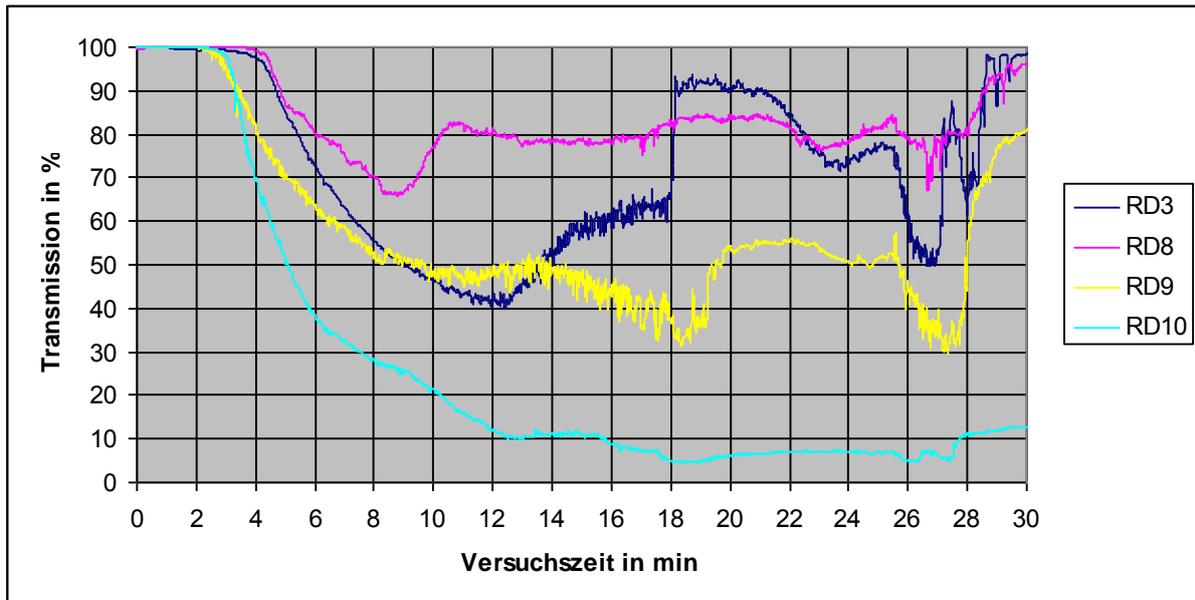


Abbildung 116: Versuch BrL4 - Verlauf der Transmission während des Brand- und Löschversuchs mit Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Während des Versuchs wurden im Raum lt. Tabelle 45 folgende Werte für die minimale Transmission  $\tau$  bzw. den max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und die max. optische Dichte  $OD$  gemessen.

Tabelle 45: Versuch BrL4 – minimale Transmission  $\tau$  bzw. max. Extinktionskoeffizient  $\sigma$  und max. optische Dichte  $OD$  im Versuchslabor.

RD3 (vorne rechts, Höhe= 1,5 m)	$\tau = 41 \%$ $\sigma = 6,37 \text{ m}^{-1}$ $OD = 2,76 \text{ m}^{-1}$	11 min 57 s
RD 8 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 2 m)	$\tau = 66 \%$ $\sigma = 2,97 \text{ m}^{-1}$ $OD = 1,29 \text{ m}^{-1}$	8 min 47 s
RD9 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 1,1 m)	$\tau = 32 \%$ $\sigma = 8,14 \text{ m}^{-1}$ $OD = 3,53 \text{ m}^{-1}$	18 min 24 s
RD10 (linker Wandbe- reich, Mitte, Höhe = 0,2 m)	$\tau = 5 \%$ $\sigma = 21,40 \text{ m}^{-1}$ $OD = 9,29 \text{ m}^{-1}$	18 min 25 s

Das folgende Abbildung 117 und die Tabelle 46 zeigen die zeitlichen Verläufe bzw. die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den jeweiligen Lüftungskanälen.

Die relative Luftfeuchtigkeit stieg von 82% r. F. auf einen maximalen Wert von ca. 98 % r. F. im Abluftkanal (Messstelle rF21/22) des Versuchslabors und 96 % r. F. im Abluftkanal Versuchslabor/Schleuse (Messstelle rF24) an und liegt somit sehr nahe am kritischen Wert für HEPA / ULPA-Filter (Abbildung 117, Tabelle 46).

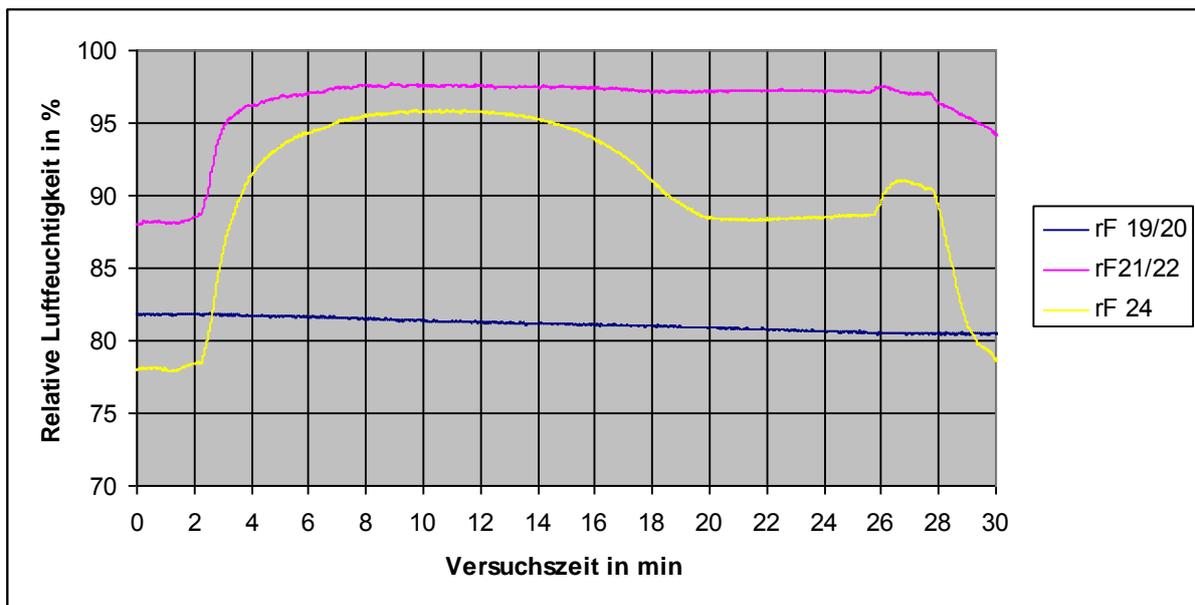


Abbildung 117: Versuch BrL4 - Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in den Lüftungskanälen während des Brand- und Löschversuchs mit einer Holzkrippe, Niederdruck-Wasserebellöschanlage und Abluftöffnung im Bodenbereich.

Tabelle 46: Versuch BrL4 - Relative Luftfeuchtigkeit im Versuchslabor

Versuch BrL4 (ND-Nebel)		
Zuluft	Zuluft (Labor) im Deckenbereich, Position Ö2 (vl oben) rF19/20	82 % r. F.
Abluft (unten)	Abluft (Labor) im Bodenbereich an Position Ö6 (hr unten) rF21/22	98 % r. F.
Abluft (oben)	Abluft (Labor und Schleuse) Treppenraum oberste Etage (Höhe ca. 9 m) rF24	96 % r. F.

Aufgrund der erwarteten höheren Temperaturen wurde bei diesem Versuch auf die Aufstellung der Messbecher verzichtet, sodass die Messung der Wasserbeaufschlagung nur durch die Niederschlagsmesser erfolgte. Die Niederschlagsmengen über der Löschzeit von 20 min 19 s sind der nachstehenden Tabelle 47 zu entnehmen.

Tabelle 47: Versuch BrL4 - Wasserbeaufschlagung während des Brand- und Löschversuchs mit Holzkrippe, Niederdruck-Wassernebel und Abluftöffnung im Bodenbereich.

	<b>NS29 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Höhe: 1,1 m)	<b>NS30 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (hinten rechts, Boden)	<b>NS31 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Höhe: 1,1 m)	<b>NS32 [mm/m<sup>2</sup>]</b> (Raummitte, Boden)
Niederschlagsmessgerät	32	16	8	7

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkung sowie die Brandbekämpfung eines Entstehungsbrandes in einem mikrobiologischen bzw. gentechnischen Labor der höchsten Sicherheitsstufen S3 und S4 untersucht.

Die Auslösung von Löschanlagen in Laboren, Tierhaltungsräumen und Produktionsbereichen mit diesen Sicherheitsstufen kann im Brandfall und im Fall der Fehlauslösung zu kritischen Zuständen mit erheblicher Rückwirkung auf die Gewährleistung der Aufrechterhaltung der für mikrobiologische und gentechnische Bereiche dieser Sicherheitsstufen erforderlichen Betriebsbedingungen führen.

Insbesondere muss die Aufrechthaltung des Unterdrucks unter allen Umständen wegen der größtenteils hochgefährlichen Krankheitserreger gewährleistet werden.

Von ganz entscheidender Bedeutung sind hierbei die Eigenschaften der eingesetzten Brandmeldetechnik und der ortsfesten Löschanlagen im Hinblick auf die vorhandene Brandlast und die Löschmittelrückhaltung, die Inaktivierung des ggf. mit Organismen kontaminierten Löschmittels und die Wechselwirkungen des Brandrauches und des Löschmittels mit den HEPA / ULPA-Filtern.

Wie die Untersuchungen in Teil 1 der Untersuchungen bereits gezeigt haben, haben gasförmige bzw. chemische Löschmittel nur eine geringe bis keine Löschwirkung bei tief sitzenden Schwel- und Glut- bzw. Glimmbränden. Diese können auch noch bei einer Sauerstoffkonzentration von 2 Vol.-% auftreten.

Gasförmige Löschmittel haben gemeinsam, dass sie im Allgemeinen rückstandsfrei löschen und somit den Betrieb und die weitere Nutzung der Geräte in den Räumen nach einem Ausströmen nur kurzfristig behindern. Allerdings ist diese Aussage bei den Halonersatzstoffen im Hinblick auf eine rückstandsfreie Löschung einzuschränken, da diese in Flammen und an heißen Oberflächen teilweise zerfallen und hierbei ätzende, giftige und korrosive Fluorverbindungen, wie z. B. Fluorwasserstoff, Carbonylfluorid oder Perfluorisobutylen entstehen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Bekämpfung von Schwel- und Glimmbränden zu beachten.

In Abhängigkeit des Löschmittels und der Löschmittelkonzentration im Raum ergeben sich weiterhin unterschiedliche Anforderungen an den Personenschutz und an den Schutz von Versuchstieren.

Aufgrund dieser Tatsachen wurde in den hier beschriebenen Brand- und Löschversuchen daher ausschließlich Wasser in Form von Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel eingesetzt.

Zur Untersuchung der Einflussgrößen war es erforderlich, strömungstechnische Untersuchungen sowie Brand- und Löschversuche in einer an realen Laboren orientierten Versuchsanordnung mit praxisnahen Bedingungen bzgl. Lüftungstechnik, Unterdruckbedingungen, Brandlast, Brandmelde- und Löschtechnik durchzuführen.

In Vorversuchen wurden verschiedene Brandlasten (Tierkäfigschalen aus verschiedenen Materialien, Streu etc.) in einer kleinen Brandkammer einer Brandrauchanalyse mit FTIR-Messtechnik unterzogen. Hierbei wurden für die analysierten Substanzen die maximal gemessenen Konzentrationen ermittelt und einigen wesentlichen, die Sicherheit am Arbeitsplatz kennzeichnenden Größen wie Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW), die Einsatztoleranzwerten (ETW), Dichte, die Flammpunkt, die Zündtemperatur sowie die untere Explosionsgrenze (UEG) und obere Explosionsgrenze (OEG) gegenübergestellt.

Diese Kennwerte können in Verbindung mit den gemessenen Konzentrationen zur Beurteilung der Toxizität des Brandrauches und der evtl. Gefährdung durch eine Rauchgasdurchzündung / Rollover bzw. Backdraft in einem relativ dichten Raum herangezogen werden.

Weiterhin werden detailliert der Aufbau und die Versuche in einem Versuchslabor beschrieben, das in Anlehnung an ein Labor der Sicherheitsstufe S3 mit Schleuse errichtet wurde.

Die durchgeführten Kaltsprüh- sowie Brand- und Löschversuche bestätigen, dass erhebliche Unterschiede der Wirkungsweise zwischen Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebellöschanlagen bei der Brandbekämpfung bestehen.

Die volumetrische Wasserbeaufschlagung ist stark vom Sprühbild bzw. der Ausrichtung der Düsen am Sprühkopf abhängig.

Maßgeblich hierbei sind für den Sprühnebel von Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel die unterschiedlichen Betriebsdrücke der Löschanlagen mit den daraus resultierenden unterschiedlichen Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsverteilungen sowie der Wasserverteilung über dem Sprühquerschnitt, um auch in weiter entfernten Eckbereichen des Raumes löschrähige Konzentrationen zu erzielen.

Der eingesetzte Sprühkopf mit Hochdruckdüsen erzeugte aufgrund der engen Sprühkegelwinkel der Düsen kein gleichmäßiges Sprühbild über dem Sprühquerschnitt (strähnenförmig), dadurch ergibt sich eine nur geringe Wasserbeaufschlagung in den Ecken des Raumes für die Brandbekämpfung.

Ein Vergleich des bei den Versuchen eingesetzten HD-Wassernebel-Sprühkopfes mit den Sprühbildern handelsüblicher HD-Wassernebel-Sprühköpfe (Google-Bild-Recherche) bestätigt teilweise diese allgemeine Feststellung der Strähnenbildung.

Die eingesetzte Niederdruck-Zwillingsdüse erzeugt ein relativ gleichmäßiges Sprühbild über dem Sprühquerschnitt und hat hierdurch eine höhere Wasserbeaufschlagung in den Eckbereichen.

Bei Sprühbeginn ergab sich insbesondere bei Hochdruck-Wassernebel sowohl bei den Kalt- als auch bei den Warmversuchen ein charakteristischer Drucksprung, zunächst mit einer Erhöhung des Unterdruckes, anschließend mit einer Verminderung des Unterdruckes und anschließendem Angleichen an den Anfangsunterdruck. Ein hinreichend hoher Unterdruck wurde jedoch im Labor und Schleuse durch die eingesetzte Lüftungstechnik sichergestellt. An die Regelung des Lüftungssystems zur Aufrechterhaltung des Unterdruckes werden hierbei erhöhte Anforderungen gestellt. Dies ist bei realen Laboranlagen unbedingt zu berücksichtigen. Allerdings gilt es in weiteren Untersuchungen zu klären, warum es zu solch großen Druckdifferenzen insbesondere bei der wiederholten Auslösung von Wassernebellöschanlagen kommt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird davon ausgegangen, dass aufgrund der schlagartigen Abkühlung der Raumtemperatur durch den feinen Sprühnebel der Druck sinkt.

Die kleinen Druckschwankungen, die während den Messungen im Raum erkennbar waren, verringerten sich nach Beendigung des Löschvorganges, was darauf schlie-

ßen lässt, dass der Eintrag von Wasser unmittelbar einen Einfluss auf den Verlauf des Unterdruckes im Raum hat.

Handelsübliche Schwebstofffilter HEPA (High Efficiency Particulate Air)- und ULPA (Ultra Low Penetration Air)-Filter haben eine maximale Betriebstemperatur von 70°C bis kurzfristig 90°C und eine maximal zulässige relative Luftfeuchtigkeit von 100%.

Bei sämtlichen Versuchen wurden sowohl bei Hochdruck-Wassernebel als auch bei Niederdruck-Wassernebel weder der kritische Wert von 100% relative Luftfeuchtigkeit noch kritische Temperaturen für Schwebstofffilter erreicht.

Durch Taupunktunterschreitungen bei niedrigen Temperaturen ist ein Überschreiten der zulässigen Feuchtigkeit jedoch möglich.

Die Auswirkungen von Russbildung auf die Funktionsfähigkeit von Filteranlagen wurden in dieser Arbeit nicht untersucht. Um hier auf der sicheren Seite zu liegen, wäre zu überdenken, vor den HEPA / ULPA-Filtern eine Wasserabscheideanlage (Tropfenabscheider) und ein Grobschmutzfilter anzuordnen, um die Lüftungsanlage während des Löschvorganges weiter betreiben zu können.

Die Untersuchungen konnten jedoch die anfängliche Vermutung, dass bei Hochdruck-Wassernebel eine höhere Luftfeuchtigkeit im Lüftungskanal zu erwarten ist als bei Niederdruck-Wassernebel nicht sicher bestätigen.

Bei der Durchführung der Brand- und Löschversuche schwankte die Luftfeuchtigkeit aufgrund von unterschiedlichen Witterungsbedingungen zum Teil beträchtlich. Um Aussagen treffen zu können, welcher Löschanlagentyp eine höhere relative Luftfeuchtigkeit für HEPA / ULPA-Filter bedeutet, müssten beide Anlagen bei annähernd gleichen Anfangsbedingungen verglichen werden. Versuchstechnisch ist dies zum einen wegen der Umrüstzeiten zum anderen wegen der Luftfeuchtigkeit aufgrund vorhergehender Versuche mit erforderlichen Trocknungszeiten nur schwer realisierbar.

Weiterhin haben die Untersuchungen gezeigt, dass im Hinblick auf die Sichtweite nach der Auslösung der Löschanlage eine Niederdruck-Wassernebellöschanlage gegen über einer Hochdruck-Wassernebellöschanlage deutliche Vorteile aufweisen kann.

Durch HD-Wassernebel wird die Sicht bereits bei Fehlauflösungen im kalten Fall innerhalb weniger Sekunden stark beeinträchtigt, sodass die Evakuierung im Raum befindlichen Personals erschwert wird.

Insgesamt waren die Sichtverhältnisse bei der Brandlast Polycarbonat-Käfigschale mit Wiesenheu bei der Ansaugung im Deckenbereich etwas besser als bei der Absaugung im Bodenbereich. Dieser positive Effekt könnte allerdings dann vermindert werden, wenn Schwelgase entstehen, die schwerer als Luft sind. Hierzu zählt z. B. Chlorwasserstoff bei Kabelbränden. Hier dürfte sich dann die Bodenabsaugung positiv auswirken.

Die Auswertungen der Messwerte für die Sauerstoffkonzentrationen zeigen einen weiteren Vorteil von Wassernebellöschanlagen gegenüber Gaslöschanlagen in Bezug auf den Personenschutz. So lag die Sauerstoff-Konzentration während der Versuche an allen betrachteten Messstellen stets über 17 Vol. %. Gaslöschanlagen dagegen können Sauerstoff-Konzentrationen im Raum von deutlich unter 15 Vol.%, wodurch diese gefluteten Räume daher nicht mehr begehbar sind.

Die Wassernebellöschanlage wurde in den Versuchen überwiegend unter Berücksichtigung des Zweimelderkriteriums, bei dem zwei Rauchmelder im Raum ansprechen müssen, um ein Auslösen der Löschanlage zu bewirken, manuell ausgelöst.

Bzgl. der Auslösung des 1. und 2. Rauchmelders konnten keine nennenswerten Unterschiede bzgl. der Absaugung im Boden- oder Deckenbereich festgestellt werden. Bei der Brandlast Polycarbonat-Käfigschale mit Wiesenheu lösten der 1. Rauchmelder im Mittel bei ca. 3 min 30 s und der 2. Rauchmelder ca. 5 s später aus. Überwiegend lösten der Rauchmelder RM7 (hinten links) zuerst und dann der Rauchmelder RM4 (hinten rechts) als 2. Melder aus. Dieses kann sicherlich nicht auf alle Räume übertragen werden. In der Realität ist z.B. die Deckenkonstruktion bzgl. ihrer Struktur im Hinblick die Anordnung der Rauchmelder zu berücksichtigen.

Beim dem größeren Brand mit der Holzkrippe löste der 1. Rauchmelder RM6 (vorne links) nach 1 min 36 s und der 2. Rauchmelder RM5 (vorne rechts) nach 1 min 45 s aus. (Bei diesem Versuch wurde die Löschanlage allerdings erst nach dem Ansprechen des Indikatorsprinklers manuell ausgelöst.)

Beim Auslösen des 1. und 2. Rauchmelders waren die Sichtverhältnisse im Raum gut und somit unproblematisch für Personen. In der Realität ist allerdings insbesondere in S4-Bereichen der Zeitbedarf für die Desinfektionsdusche und das Umkleiden aus den Vollschutzanzügen zu berücksichtigen.

Weiterhin könnte es aus der Sicht des Sachwertschutzes sinnvoll sein, ein manuelles Ein- und Ausschalten der Löschanlage durch das Laborpersonal zu ermöglichen, um Löschwasserschäden zu verringern.

An dieser Stelle muss jedoch auch bedacht werden, dass die Feuerwehr üblicherweise keinen Zutritt z.B. in den S4-Bereich hat und das Geschehen bestenfalls von außen durch Verglasungen beobachten und leiten kann.

Während der Versuche mit Hochdruck- und Niederdruckwassernebel ergaben sich zahlreiche Hinweise darauf, dass Niederdruck-Wassernebel für den Einsatz in Laboren der Sicherheitsstufe S3 und S4 besser geeignet ist als Hochdruck-Wassernebel bei vergleichbar gleichem Löschwasservolumenstrom und betragsmäßig gleicher volumetrischer Wasserbeaufschlagung im Raum. Die nachfolgende Tabelle 48 zeigt Versuchsergebnisse, die zu dieser Einschätzung führen.

Tabelle 48: Qualitativer Vergleich von Hochdruck- und Niederdruck-Wasserebel-löschanlagen bei mikrobiologischen und gentechnischen Laboren und Bereichen bezüglich Sicht, Löschwirkung, Wasserbeaufschlagung, Unterdruck im Raum und Luftfeuchtigkeit.

	<b>Hochdruck-Wasserebel</b>	<b>Niederdruck-Wasserebel</b>
Sichtverhältnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>– geringe Sichtweite im Raum im kalten Fall auch ohne den Einfluss von Brandrauch aerosol, bereits wenige Sekunden nach Auslösung der Anlage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ohne den Einfluss von Brandrauch aerosol und bei hinreichender Abführung des Brandrauch aerosols ausreichende Sichtweite im Versuchslabor.</li> </ul>
Wasserbeaufschlagung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– aufgrund von Strahlenbildung am Düsenaustritt ungleichmäßige Verteilung des Löschwassers im Versuchslabor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Zwillings-Dralldüse erzeugte zwei Sprühkegel.</li> <li>– hierdurch ausreichende und gleichmäßige Wasserbeaufschlagung im gesamten Raum.</li> </ul>
Löschwirkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ungeeignet zum Ablöschen eines Brandes mit glutbildenden Brandstoffen (z.B. Holz, Streumaterialien).</li> <li>– das Schmelzen der Tierkäfigschale konnte nicht verhindert werden.</li> <li>– allerdings wird die umgebende Brandlast mit Wasser benetzt, was einer weiteren Brandausbreitung entgegenwirkt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– alle in den Versuchsreihen verwendeten Brandlasten wurden zuverlässig gelöscht.</li> <li>– zur Kühlung und Löschung von glutbildenden Brandstoffen (z.B. Tierstreu) sind größere Tropfen erforderlich, um die brennende Oberfläche zu erreichen als zur reinen Flammenkühlung bzw. Flammenlöschung. Diese größeren Tropfen sind bei Niederdruck-Wasserebel vorhanden und besser dazu geeignet, den Flammen- und Rauchgasbereich zu durchdringen als die sehr feinen Tropfen von Hochdruck-Wasserebel.</li> </ul>

	<b>Hochdruck-Wassernebel</b>	<b>Niederdruck-Wassernebel</b>
Unterdruck im Raum	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Druckschwankungen im Raum bei den Kaltsprühversuchen (ohne Brand) sind höher. Sie bewegten sich im Bereich zwischen -63 Pa und 60 Pa bei Abluftöffnung im Bodenbereich bzw. -15 Pa und 15 Pa bei der Abluftöffnung im Deckenbereich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Druckschwankungen im Raum bei den Kaltsprühversuchen (ohne Brand) sind geringer. Sie bewegten sich im Bereich zwischen -24 Pa und 6 Pa bei Abluftöffnung im Bodenbereich bzw. -3 Pa und rund 0 Pa bei der Abluftöffnung im Deckenbereich.</li> </ul>
Luftfeuchtigkeit im Lüftungskanal	<ul style="list-style-type: none"> <li>– aufgrund der Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit im Versuchslabor von der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft konnten keine zuverlässigen Ergebnisse gewonnen werden, die einen Vergleich der Wassernebellöschsysteme bzgl. der möglichen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit von HEPA / ULPA-Filtern durch Feuchtigkeitseintrag durch die Löschanlage ermöglichen.</li> </ul>	

Weiterhin wurden die Unterschiede der Ablufführung aus dem Versuchslabor über Öffnungen im Boden- oder Deckenbereich bei Kaltsprüh-, Brand- sowie Brand- und Löschversuchen aufgezeigt, die jedoch keine eindeutige, zu bevorzugende Anordnung erkennen ließen.

Trotz der einfachen Bauweise des Versuchstandes, bei dem aber die Einflussparameter der Unterdruck- und Strömungsbedingungen auf Brände in realen Laboren der Sicherheitsstufe S3 und S4 berücksichtigt wurden konnte gezeigt werden, dass die gewonnenen Erkenntnisse mit Brandrauchanalysen, Kaltversuchen sowie Brand- und Löschversuchen auf reale Labore übertragbar sind.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei S3- und S4- Laboren und -Bereichen eine brandschutztechnische Ausrüstung mit Niederdruck-Wassernebellöschanlagen gegenüber derzeit verfügbaren Hochdruck-Wassernebel- und Gaslöschanlagen empfehlenswert ist.

## 7. Literaturverzeichnis

[1]	Kunkelmann, J.: [2010]	<p>Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen Teil 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden - Allgemeine Gefährungsdarstellung</li> <li>• Biologische Gefährdung - Besonderheiten in Gebäuden mit mikrobiologischen und gentechnischen Bereichen</li> <li>• Eigenschaften von ortsfesten Löschanlagen (Sprinkler, Wassernebel, Inertgas, Sauerstoffreduktion, Halonersatzstoffe)</li> <li>• Beurteilungskriterien für den Einsatz von ortsfesten Löschanlagen in mikrobiologischen und gentechnischen Bereichen</li> </ul> <p>Forschungsbericht Nr. 149 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2010) <a href="http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._149_Kunkelmann_Brandschutz_in_Genlaboren_Teil_1-240.pdf">http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._149_Kunkelmann_Brandschutz_in_Genlaboren_Teil_1-240.pdf</a></p>
[2]	Franke, E.: [2011]	<p>Brandschutz in Genlaboren – Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen. Bachelorarbeit, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik; Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2011 (unveröffentlicht)</p>
[3]	Wechinger, M.: [2010]	<p>Brandschutz in Genlaboren – Einsatz von Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen. Bachelorarbeit, Hochschule Karlsruhe, Technik und Wirtschaft Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2010 (unveröffentlicht)</p>
[4]	Tecniplast [2012]	<p>Tecniplast <a href="http://germany.tecniplast.it/index.php">http://germany.tecniplast.it/index.php</a> 2012</p>
[5]	Bussenius, S.: [1996]	<p>Bussenius, S.: Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, 1996</p>

[6]	Kunkelmann, J.: [2010]	<p>Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer `Brandgefahrenklasse`.</p> <p>Teil 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im 25 m<sup>2</sup>- Brandraum</li> <li>• Auslöseverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und thermischen Glasfass-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen</li> </ul> <p>Forschungsbericht Nr. 144 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2010), <a href="http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._144_Kunkelmann_Anwendungsbereiche_Wassernebel_Teil_2-170.pdf">http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._144_Kunkelmann_Anwendungsbereiche_Wassernebel_Teil_2-170.pdf</a></p>
[7]	Kunkelmann, J.: [2006]	<p>Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer `Brandgefahrenklasse`.</p> <p>Teil 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im Holztreppenraum (ohne und mit Windeinfluß auf einen natürlichen Rauchabzug)</li> <li>• Vergleich mit Niederdruck-Wassernebel und Sprinkler.</li> </ul> <p>Forschungsbericht Nr. 143 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2006) <a href="http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/AGF143_Kunkelmann_Anwendung_Wassernebel_Hochdruck_Teil_1-20_komp.pdf">http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/AGF143_Kunkelmann_Anwendung_Wassernebel_Hochdruck_Teil_1-20_komp.pdf</a></p>
[8]	McCaffrey, B. J., Heskestad, G.: [1976]	<p>A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application, Combustion and Flame 26, American Elsevier Publishing Company, 1976</p>
[9]	Jin, T.: [1981]	<p>Studies of Emotional Instability in Smoke from Fires, Journal of Fire and Flammability, Vol. 12, p. 130 – 142, Tokyo 1981</p>

[10]	Jin, T.: [1977]	Visibility through Fire Smoke. Journal of Fire and Flammability, Vol. 9, p. 135 – 155, Tokyo, 1977
[11]	Bayer [2011]	Makrolon® sheet, Ausgabe 2009, URL: <a href="http://www.bayermaterialscience.de/internet/global_portal/cms.nsf/id/4851F9B7F1EDFFB9C125775E0043FB6A/\$file/1_BMS00045880_de.pdf">http://www.bayermaterialscience.de/internet/global_portal/cms.nsf/id/4851F9B7F1EDFFB9C125775E0043FB6A/\$file/1_BMS00045880_de.pdf</a> , 2011
[12]	Walters, Richard N. et al. [2011]	Heats of Combustion of High Temperature Polymers, Atlantic City Airport, URL: <a href="http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/hoc.pdf">http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/hoc.pdf</a> , 2012
[13]	Westlakes Plastic Company [2011]	Radel ® Polyphenylsulfone Data-sheet, URL: <a href="http://www.portplastics.com/download/pdf/plastics/highPerformance/highPerformance29.pdf">http://www.portplastics.com/download/pdf/plastics/highPerformance/highPerformance29.pdf</a> , 2012
[14]	UM.BWL [2011]	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Land Baden - Württemberg: Betrieblicher Umweltschutz in Baden - Württemberg, Kunststoffe, Polypropylen, URL: <a href="http://www.umweltschutz-bw.de/?lvi=945">http://www.umweltschutz-bw.de/?lvi=945</a> , 2012
[15]	Beilicke, G.: [2010]	Bautechnischer Brandschutz, BBV Beilicke Brandschutz Verlag, Leipzig 2010
[16]	Hommel, G.: [1996]	Handbuch der gefährlichen Güter; Springer Verlag; Heidelberg 1996
[17]	BAuA [2011]	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Technische Regeln für Gefahrstoffe – Arbeitsplatzgrenzwerte TRGS900, Dortmund 2006, URL: <a href="http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-900.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=8">http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-900.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=8</a> , 2012
[18]	Nabert, K. et al.: [2004]	Sicherheitstechnische Kenngrößen brennbarer Gase und Dämpfe. 3. Auflage, Deutscher Eichverlag, Hamburg 2004
[19]	GESTIS [2012]	GESTIS-Stoffdatenbank - Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung <a href="http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/stoffdb/index.jsp">http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/stoffdb/index.jsp</a> , Sankt Augustin, 2012
[20]	GSBL [2012]	GSBL - Gemeinsamer Stoffdatenpool Bund / Länder <a href="http://www.gsbl.de/gsblweb30/main.do">http://www.gsbl.de/gsblweb30/main.do</a> , Dessau-Roßlau, 2012

[21]	vfdb 10/01 [2008]	Bewertung von Schadstoffkonzentrationen im Feuerwehreinsatz, vfdb-Richtlinie 10/01, Altenberge, Köln, Ausgabe:2005 mit Korrektur vom 6.6.2008
[22]	US Environmental Protection Agency [2012]	Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) US Environmental Protection Agency Washington, 2012 <a href="http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/chemlist.htm">http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/chemlist.htm</a>
[23]	UBA [2012]	Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2012 <a href="http://www.umweltbundesamt.de/nachhaltige-produktion-anlagensicherheit/anlagen/AEGLWEB/Pages/Pages-De/Seite_1.html">http://www.umweltbundesamt.de/nachhaltige-produktion-anlagensicherheit/anlagen/AEGLWEB/Pages/Pages-De/Seite_1.html</a>
[24]	Wagner, W.: [1997]	Lufttechnische Anlagen. 1. Auflage, Vogel Fachbuch, Würzburg, 1997
[25]	Kaiser, G.: [2012]	„O.R.B.I.T. 2010“ – Aktuelle Erkenntnisse zu medizinischen und rettungstechnischen Grundlagen der Planung im Feuerwehrwesen. Vortrag bei der vfdb Jahresfachtagung, Köln 2012 sowie <a href="http://www.giz-nord.de/cms/images/stories/Science/PCYAN/kaiser_vfdb2012.pdf">http://www.giz-nord.de/cms/images/stories/Science/PCYAN/kaiser_vfdb2012.pdf</a>
[26]	Reinmuth, F.: [1996]	Raumluftechnik. 1.Auflage, Vogel Fachbuch, Würzburg, 1996
[27]	VdS CEA 4001	VdS CEA Richtlinien für Sprinkleranlagen – Planung und Einbau, Köln, Ausgabe 2010-11 (04)

## **H i n w e i s**

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

**<http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/>**

und des

**Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge**

**<http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/index.php?id=25361>**

eingesehen werden.