

# **BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG**

**DER BUNDESLÄNDER**

**BERICHTE**

Studie zur Brandbekämpfung mit Wassernebel-Löschanlagen – Be-  
standsaufnahme zum aktuellen Stand der Technik und der Einsatzge-  
biete sowie Normungs- und Richtlinienarbeit

von

T. Bruder

T. Muth

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

**218**

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

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

Forschungsbericht Nr. 218

**Studie zur Brandbekämpfung mit Wassernebel-Löschanlagen – Bestandsaufnahme zum aktuellen Stand der Technik und der Einsatzgebiete sowie Normungs- und Richtlinienarbeit**

von

Tillmann Bruder (M.Sc.)

Tanja Muth (Dipl.-Ing. FH)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

2025

FA.Nr. 255 (2,2022)

ISSN 0170-0060

## Berichtskennblatt

<b>Nummer des Berichtes:</b>  <b>218</b>	<b>Titel des Berichtes:</b>  Studie zur Brandbekämpfung mit Wassernebel-Löschanlagen – Bestandsaufnahme zum aktuellen Stand der Technik und der Einsatzgebiete sowie Normungs- und Richtlinienarbeit			<b>ISSN:</b>  0170-0060
<b>Autoren:</b>  Tillmann Bruder (M.Sc.) Tanja Muth (Dipl.-Ing. FH)	<b>durchführende Institution:</b>  Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe			
<b>Nummer des Auftrages:</b> 255 (2/2022)	<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 2025				
<b>Seitenzahl:</b> 68	<b>Bilder:</b> 11	<b>Tabellen:</b> 4	<b>Literaturverweise:</b> 65	
<b>Kurzfassung:</b>  <b>In dieser Studie werden die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Sprinkler- und Hochdruckwassernebelanlagen aufgezeigt.</b>				
<b>Schlagwörter:</b> Sprinkler, Hochdruckwassernebel, Tröpfchenverteilung, Tröpfchenspektrum, Wasserschaden				

# **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>VII</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>VIII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>IX</b>
<b>1      EINLEITUNG</b>	<b>10</b>
<b>2      WASSERNEBEL ALS LÖSCHMITTEL</b>	<b>12</b>
2.1    Wasser als Löschmittel	12
2.2    Eigenschaften von Wassernebel	15
2.3    Wirkung auf Feuer	17
2.3.1   Feste Brennstoffe	18
2.3.2   Flüssige Brennstoffe	20
2.3.3   Fettbrände	22
2.3.4   Metallbrennstoffe	22
2.3.5   Brände von Gasen	23
2.4    Wirkung auf Wärmestrahlung	24
2.5    Wirkung auf Raumtemperaturen	25
2.6    Wirkung auf den Feuerwiderstand von Bauteilen	27
2.7    Wirkung auf Rauch und gesundheitsschädigende Gase	29
2.8    Wirkung auf die Sichtverhältnisse/Rettungswege	31
2.9    Wasserschäden durch Wassernebel	33
<b>3      TECHNIK VON WASSERNEBEL-LÖSCHANLAGEN</b>	<b>33</b>
3.1    Normungssituation	34
3.1.1   DIN EN 14972	34
3.1.2   VdS-Richtlinien	34
3.2    Technischer Aufbau	35
3.2.1   Mehrstoff-Löschanlagen	37

3.3	Detektion	37
3.4	Auslösung	38
3.5	Auslegung und Löschwasserversorgung	40
3.5.1	DIN EN 14972	41
3.5.2	VdS-Richtlinien	41
3.6	Löschwasserrückhaltung	42
3.7	Kosten	43
3.8	Akzeptanz von Behörden	45
3.9	Meinungen von Feuerwehren und Erfahrungen aus dem Löscheinsatz	46
3.10	Aktuelle Technische Anwendung	46

## **4 ANWENDUNG AUF DIE NUTZUNGSBEISPIELE KRANKENHÄUSER/PFLEGEHEIME UND VERSAMMLUNGSSTÄTTEN**

4.1	Krankenhäuser/Pflegeheime	49
4.1.1	Besonderheiten der Nutzung als Krankenhaus/Pflegeheim	49
4.1.2	Rechtliche Situation	51
4.1.3	Mögliche Vorteile von Wassernebel-Löschanlagen	52
4.1.4	Mögliche Nachteile von Wassernebel-Löschanlagen	52
4.1.5	Aktuelle Beispiele von Anwendungen in Krankenhäusern/Pflegeheimen	53
4.2	Versammlungsstätten	53
4.2.1	Besonderheiten der Nutzung als Versammlungsstätte	53
4.2.2	Rechtliche Situation	54
4.2.3	Mögliche Vorteile von Wassernebel-Löschanlagen	55
4.2.4	Mögliche Nachteile von Wassernebel-Löschanlagen	56
4.2.5	Aktuelle Beispiele von Anwendungen in Versammlungsstätten	57

<b>5</b>	<b>VOR- UND NACHTEILE HDWN vs. SPRINKLER IN KÜRZE</b>	<b>58</b>
5.1	Eindeutige Vorteile HDWN	58
5.2	Eindeutige Nachteile HDWN	58
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>63</b>

## **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

<i>Abbildung 1: Verbrennungsdreieck, eigene Darstellung</i> .....	12
<i>Abbildung 2: Energieaufnahme von Wasser bei Normaldruck; eigene Darstellung nach Herterich (6)</i> .....	14
<i>Abbildung 3: Strahlungsdurchlässigkeit eines Wasservorhangs in Abhängigkeit des Tropfenradius und der Wasserbeladung; Ravigururajan (25)</i> .....	25
<i>Abbildung 4: Temperaturentwicklung in einer Raumecke nach Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage; Dinkov (29)</i> .....	26
<i>Abbildung 5:Temperaturentwicklung an einer Brandquelle nach Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage; Dinkov (29)</i> .....	27
<i>Abbildung 6: Kritische von Druckstäben aus Stahl der Güte S275 bei unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren und Schlankheitsgraden in Abhängigkeit der Temperatur; Bauforumstahl (31)</i> .....	28
<i>Abbildung 7: Sichtbehinderung durch Rauch, Wasserdampf und Wassernebel; Dinkov (29)</i> .....	32
<i>Abbildung 8: Aufbau einer Niederdruck-Wassernebel-Löschanlage; Minimax GmbH (42)</i> .....	36
<i>Abbildung 9: geschlossene Hochdruck-Wassernebel-Düsenkopf, Callies Brandbekämpfungssysteme GmbH (45)</i> .....	38
<i>Abbildung 10: geschlossenen Niederdruck-Wassernebel-Düsenkopf; Hansenebel GmbH (46)</i> .....	39
<i>Abbildung 11: Offene Hochdruck-Wassernebel-Düsenkopf; Callies Brandbekämpfungssysteme GmbH (45)</i> .....	40

## TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1: Beispielwerte für die Oberfläche von 1 Liter Wasser; eigene Darstellung</i>	15
<i>Tabelle 2: Exemplarische Düsenparameter; eigene Darstellung nach Schremmer (44)</i>	
.....	37
<i>Tabelle 3: Anzahl der Neuinstallationen und Erweiterungen pro Jahr; eigene Darstellung nach Festag, Döbbeling (56) .....</i>	47
<i>Tabelle 4: Ursachen für Brände in Krankenhäusern in Deutschland; bvfa – Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. (58) .....</i>	50

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

DIN	Deutsches Institut für Normung
EWG	Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft
DIN EN	Europäische Norm
NRW	Nordrhein-Westfalen
VdS	Verband der Sachversicherer
RWG	Rauch- und Wärmeabzugsgerät
MRA	Maschinelle Rauchabzugsanlage
VdS CEA	Richtlinie für Sprinkleranlagen des Verbands der Sachversicherer
LöRÜRL	Löschwasser-Rückhalteanlagen Richtlinie
ARGEBAU	Arbeitsgemeinschaft der für das Bau-, Wohnungs- und Siedlungs-wesen
MBO	Musterbauordnung
KhBauVO	Krankenhausbauverordnung
MVStättVO	Muster-Versammlungsstätten Verordnung
bvfa	Bundesverband Technischer Brandschutz e.V.

## 1 Einleitung

Immer wieder kommt es in den Medien zu Berichten über die Erhöhung der Baukosten und Einschränkungen der Nutzung von baulichen Anlagen durch als zu hoch angesehene Vorschriften für den Brandschutz. (1) Auch der Bedarf an zusätzlichem und zu bezahlbaren Preisen verfügbarem Wohnraum in dicht besiedelten Gebieten stellt eine Herausforderung an den Brandschutz dar. Ungeachtet dessen, ob die Forderungen nach niedrigeren Vorgaben gerechtfertigt sind, zeigt sich ein Bedürfnis nach Lösungen, die, bei gleichem Sicherheitsniveau, sowohl günstiger als auch leichter umsetzbar für Bauherren und Nutzer sind. Hinzu kommt, dass es in Zukunft auch in Deutschland vermehrt zu einer Herausforderung werden wird, sauberes Wasser zu gewinnen. Dies ist unter anderem eine Folge des fortschreitenden Klimawandels und vor allem der zunehmenden Versiegelung von Flächen. (2) Für die genannten Problemstellungen gilt es, effiziente Lösungen zu entwickeln. Durch eine breite Auswahl von Methoden können für individuelle Ausgangslagen passende Lösungen gefunden werden.

Ein Weg zur Sicherstellung des Brandschutzes ist die Nutzung von stationären Löschanlagen. Sie sind fest in ein Gebäude integriert und können nach Detektion eines Brandes selbsttätig auslösen. Sie werden in besonders gefährdeten Bereichen eingesetzt, können aber auch bei anderen Bauten sinnvoll sein, da hierdurch beispielsweise günstigere Gebäudegeometrien oder Bauteile ermöglicht werden können. Die unterschiedlichen Arten von Löschanlagen unterscheiden sich in den verwendeten Löschmitteln, aber auch in den Formen, in welcher diese freigesetzt werden.

Wassernebel-Löschanlagen sind Wasserlöschanlagen, die feine Tropfenspektren versprühen. Sie wurden bereits seit Anfang der 1930er Jahre erprobt, erlangten in Deutschland aber erst in den 1990er Jahren durch das Verbot von Fluorchlorwasserstoffen, als Ersatzsystem für Gaslöschanlagen, an Relevanz. Auch wenn Wassernebel nicht die gleiche Löschwirkung und Verteilung im Raum wie Löschgase aufweist, wurden Vorteile bei der Anwendung in technischen Anlagen und im maritimen Bereich gegenüber herkömmlichen Wasserlöschanlagen in Bezug auf den Wasserverbrauch und die Löschwirkung, gesehen. Heutzutage finden sie auch Einsatz

in Gebäuden. Ihnen werden ein geringer Wasserverbrauch und dadurch bedingte kompaktere Abmessungen zugesprochen. (3)

Sollten Wassernebel-Löschanlagen mit deutlich geringeren Wassermengen ein vergleichbares oder womöglich höheres Schutzniveau als andere Wasserlöschanlagen bieten und zusätzlich zur Kompensation von aufwändigeren und weniger attraktiven Brandschutzlösungen eingesetzt werden können, würde deren Verwendung für alle Beteiligten von Interesse sein. Es gilt zu untersuchen, ob dies zutreffend ist, und bei welchen Randbedingungen der Einsatz der Anlagen möglich ist.

Ziel dieser Studie ist es, einen Überblick über den aktuellen Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen in Deutschland zu schaffen. Es werden die Eigenschaften des Löschmittels Wasser in der Form von Wassernebel dargestellt und auf die Wirkung im Brandfall eingegangen. Des Weiteren wird auch der aktuelle Stand der Technik von Wassernebel-Löschanlagen und deren Verbreitung aufgezeigt und die aktuelle Normungssituation in Deutschland dargestellt. Hierbei sind auch Aspekte enthalten, auf die in der Planung, Installation und dem Betrieb der Anlagen geachtet werden muss. Es soll auch in Erfahrung gebracht werden, wie die Positionen von Behörden und Feuerwehren zu Wassernebel-Anlagen sind und ob Daten aus Brändeinsätzen mit den Anlagen vorliegen.

Auf die Anwendung der Wassernebel-Technik in Gebäuden, die als Krankenhaus/Pflegeheim oder als Versammlungsstätte genutzt werden, wird im Speziellen eingegangen. Hierbei werden die Besonderheiten, die sich aus den Nutzungen ergeben, dargestellt und in Kontext mit dem Einsatz von Wassernebel gebracht. Es wird auch genauer auf die baurechtlichen Anforderungen an den Brandschutz in der jeweiligen Nutzung eingegangen.

Der Fokus hierbei richtet sich nicht auf den Vergleich mit anderen Löschsystem oder baulichen Lösungen. Der Leser soll eine Zusammenfassung der relevanten Aspekte für die Installation, Nutzung und Löschwirkung von Wassernebel-Löschanlagen erhalten.

## 2 Wassernebel als Löschmittel

### 2.1 Wasser als Löschmittel

Wasser ist als Löschmittel vielseitig einsetzbar. Es weist durch seine physikalischen und chemischen Eigenschaften zahlreiche Vorteile gegenüber anderen Löschmitteln auf. Durch seine Verfügbarkeit in der Natur ist es einfach und günstig in großen Mengen beschaffbar. Es ist in seiner Anwendung sowohl durch die Wahl der Tropfengröße als auch durch die Beigabe von Zusatzstoffen modifizierbar. Allerdings hängt die Wirksamkeit des Wassers als Löschmittel stark von der Form ab, in der es dem Brand zugeführt wird. Auch gibt es Stoffe, die nicht durch Wasser gelöscht werden können, da sich bei Ihnen die Löschwirkung nicht entfaltet oder es zu ungünstigen chemischen Reaktionen kommt.

Um die richtige Anwendungsform für die Brandbekämpfung zu wählen, sollte man die grundlegenden Eigenschaften von Wasser, aber auch dessen Wechselwirkung mit Feuer bei verschiedenen Brennstoffen, verstehen.

Für die Entstehung und Aufrechterhaltung eines Feuers sind drei Komponenten notwendig. Häufig werden diese mit Hilfe des Verbrennungsdreiecks dargestellt:

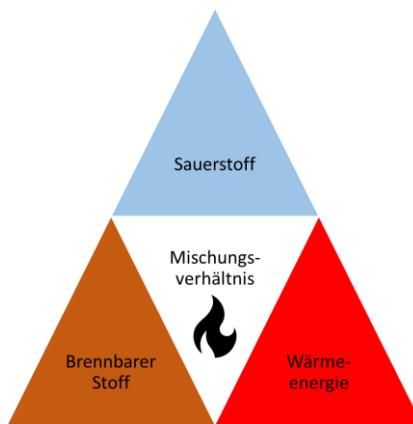


Abbildung 1: Verbrennungsdreieck, eigene Darstellung

Hier lässt sich erkennen, dass für ein Feuer ein brennbarer Stoff, Sauerstoff und eine Zündenergie in Form von Wärme benötigt werden. Allerdings ist dies nicht die einzige Bedingung für die Entstehung eines Feuers. Entscheidend ist, dass die drei Komponenten im richtigen Mischungsverhältnis zueinanderstehen. Das bedeutet, dass beispielsweise die Oberfläche des brennbaren Stoffes groß genug sein muss, damit ausreichend viel Sauerstoff und Wärme an

diesen gelangen kann. Eine Verbrennung ist ein Prozess, in dem fortlaufend diese Bedingungen erfüllt sein müssen. Wird ein Element entfernt oder ist nicht mehr in ausreichend großer Menge vorhanden, kommt es zum Erliegen des Feuers. Durch dieses Wissen über die Funktionsweise einer Verbrennung lassen sich gezielt Maßnahmen sowohl für den vorbeugenden als auch für den abwehrenden Brandschutz ableiten.

Im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes besteht die Möglichkeit, es zu verhindern, dass die genannten drei Komponenten in ausreichend großer Menge interagieren können. Dies kann beispielsweise durch nichtbrennbare Baustoffe oder Vorschriften im Umgang mit Zündquellen, wie zum Beispiel einem Rauchverbot, erfolgen. Bei technischen Anlagen wie Rechenzentren, gibt es Systeme, die durch den Einsatz von Stickstoff den Sauerstoffgehalt reduzieren und somit der Entstehung eines Brandes vorbeugen. (4)

Ist es zum Brand gekommen, da die vorbeugenden Maßnahmen nicht ausreichend waren, lässt sich durch das gezielte Reduzieren oder Entfernen von einzelnen Komponenten die Verbrennungskette unterbrechen. Erfolgt dies in ausreichendem Maße, wird das Feuer eingedämmt und gelöscht. (5)

Mit Hilfe von Wasser lassen sich zwei der drei Bestandteile eines Feuers reduzieren. Zum einen kann das Wasser genutzt werden, um dem Feuer Wärmeenergie zu entziehen. Hierfür sind die physikalischen Eigenschaften von Wasser genauer zu betrachten. Der Siedepunkt von Wasser liegt bei Normaldruck bei 100 °C. Um die Menge von 1 kg Wasser auf diese Temperatur zu erhitzen, benötigt man eine Energie von 4,18 kJ pro Kelvin Temperaturanstieg. Ist die Temperatur von 100 °C erreicht, wird für den Übergang von dem flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand die Verdampfungswärme benötigt. Diese beträgt pro 1 kg Wasser ca. 2.255,6 kJ. Um 1 kg Wasser von einer Temperatur von 10 °C zur Verdampfung zu bringen, wird folglich insgesamt eine Energie von ca. 2.632 kJ benötigt. Diese Energie wird aus der Umgebung gewonnen. Wird Wasser also gezielt am Brandherd eingebracht, wird dem Feuer ein Teil der Wärmeenergie entzogen. Dies bewirkt bei ausreichender Intensität, dass es zu einer Durchbrechung der Verbrennungskette durch eine zu geringe Zündenergie kommt. (6)

In Abbildung 2 ist zur Veranschaulichung die benötigte Wärmeenergie zum Erhitzen und Verdampfen von 1 kg Wasser bei Normaldruck dargestellt:

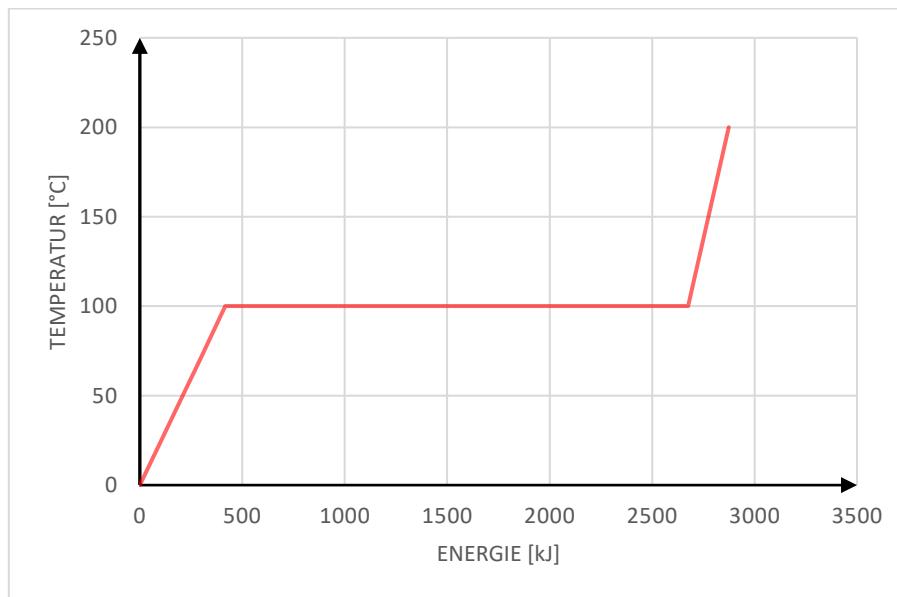


Abbildung 2: Energieaufnahme von Wasser bei Normaldruck; eigene Darstellung nach Herterich (6)

Wasser kann auch zum Ersticken eines Feuers verwendet werden. Dies kann zum einen dadurch erreicht werden, dass bei kleineren Bränden der brennende Stoff komplett von der Flüssigkeit überdeckt wird. Somit ist die Sauerstoffzufuhr unterbunden und das Feuer erlischt. Möglich wird dieser Effekt mit weniger Wasser durch die Zugabe von Schaummittel. Durch den entstehenden Schaum wird der Brand überdeckt und es gelangt keine ausreichende Menge an Sauerstoff mehr an das Feuer. Der zweite Weg, auf dem das Wasser eine erstickende Wirkung haben kann, ist die Verdrängung der sauerstoffhaltigen Luft durch Wasserdampf. Wasser erfährt durch die Verdampfung eine hohe Volumenvergrößerung. Das Volumen des Wassers steigt bei 100 °C bei Normaldruck im Verhältnis von ungefähr 1:1.700 an. Das bedeutet, dass aus einem Liter flüssigem Wasser ca. 1.700 Liter Wasserdampf entstehen. Nimmt der Wasserdampf höhere Temperaturen an, sinkt seine Dichte noch weiter und es entstehen noch größere Volumina. (7) Kommt es zu einer gezielten Verdampfung von Wasser am Brandherd, führt dies zu einer Verdrängung der Umgebungsluft mit der Folge, dass dem Feuer Sauerstoff entzogen wird. In geschlossenen Räumen kann es auch dazu kommen, dass durch die Bildung von Wasserdampf der Sauerstoffanteil in der Luft reduziert wird. (5)

Die Bedeutung der Wasseroberfläche des eingebrachten Wassers und der Besonderheit von Wassernebel bei den beschriebenen Löscheffekten wird im Laufe dieser Arbeit genauer betrachtet.

Wasser kann durch unterschiedliche Systeme einem Brand zugeführt werden. Hierzu zählen an Druckschläuche angeschlossene Strahlrohre, Feuerlöscher, Werfer und stationäre Löschanlagen.

## 2.2 Eigenschaften von Wassernebel

Laut der DIN 14972-1 ist Wassernebel Sprühwasser mit einem  $D_{v0,9}$ , der unter 1 mm liegt. Dies wird in einem Abstand von 1 m von der Düse entfernt bei Mindestbetriebsdruck gemessen. Bei dem  $D_{v0,9}$  handelt es sich um einen Wert, der die Größenverteilung in einem Tropfenspektrum beschreibt. Er gibt an, dass die Durchmesser der Tropfen, die 90 % des Gesamtvolumens einer Wassermenge enthalten, kleiner oder gleich seines Betrages sind. (8) Ein weiterer Wert, der zur Angabe des mittleren Durchmessers einer Tropfenverteilung verwendet wird, ist der Sauter-Durchmesser. Hierbei wird ein Mittelwert über die spezifische Oberfläche der Tropfenverteilung berechnet unter der Annahme, dass das vorhandene Gesamtvolume der Menge zu gleich großen Kugeln geformt wird. (9) Die Größe und Geschwindigkeit der Tropfen hängen von der Bauart der Düse und dem jeweiligen Druck der Anlage ab. Bei Annahme eines kugelförmigen Tropfens lässt sich die Oberfläche pro Liter durch die folgende Funktion beschreiben:

$$O = \frac{6}{d} \text{ in } [\text{m}^2/\text{dm}^3]$$

d in [mm]

Es ist zu erkennen, dass bei Verringerung des Tropfendurchmessers bei gleichbleibendem Gesamtvolume die Wasseroberfläche eine immer starke Zunahme erfährt. In Tabelle 1 sind Beispielwerte für die Oberfläche von 1 Liter Wasser bei unterschiedlichen Durchmessern angegeben.

Tropfendurchmesser in $\mu\text{m}$	Oberfläche in $\text{m}^2$
3.000	2
1.000	1
200	30
50	120

Tabelle 1: Beispielwerte für die Oberfläche von 1 Liter Wasser; eigene Darstellung

Durch die größere Oberfläche wird die Geschwindigkeit, mit dem der einzelne Tropfen erhitzt und verdampft, deutlich erhöht. Dieses Phänomen hat Oskar Herterich in seinem Buch „Wasser als Lösungsmittel“ beschrieben. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, ist die Energie, die benötigt wird, um flüssiges Wasser zu erhitzen, deutlich geringer als die Energie, die benötigt wird, um dieselbe Wassermenge zu verdampfen. Daraus folgt, dass es förderlich ist, das Wasser möglichst schnell zu verdampfen, um ein Feuer möglichst effizient zu löschen. (6) Dies wird mit Wassernebel, durch geringe Tropfendurchmesser und der daraus folgenden größeren Wasseroberfläche erreicht. Dieser Effekt kann dazu führen, dass durch die effizientere Löschung deutlich geringere Wassermengen als bei herkömmlichen Löschanlagen wie Sprinkleranlagen mit höheren Tropfendurchmessern erreicht werden. Bei diesen kommt es eher dazu, dass ein Teil des eingebrachten Wassers nicht an der Kühlung teilnimmt und abfließt.

Ein Vorteil des Wassernebels ist, dass er im Gegensatz zu größeren Wassertropfen weniger stark in Richtung des Bodens beschleunigt wird und sich deshalb freier im Raum bewegen kann. Somit ist er auch eher in der Lage, verdeckte Bereiche zu erreichen und den Raum mit Tröpfchen auszufüllen. (10)

Durch die geringe Tropfengröße besteht aber auch die Gefahr, dass die Wassertropfen des Nebels den Brandherd nicht erreichen. Ein Grund hierfür kann sein, dass sie vorher in der heißen Luft oder der Flammenzone verdampfen. Ein anderer Grund können Luftströmungen sein, die beispielsweise durch die Branddynamik, Wind oder maschinelle Entrauchung entstehen können und die Tropfen von dem Brandgeschehen ableiten könnten. (11)

Generell lässt sich sagen, dass durch höhere Drücke erzeugter Wassernebel geringe Tropfengrößen aufweist. Dies ist aber auch von der Bauart der Düsen, in denen der Wassernebel erzeugt wird, abhängig. (12)

Das Verhalten von Wassernebel ist nicht nur von seiner Tropfengröße abhängig, sondern auch von seiner Erzeugung. Der Betriebsdruck einer Anlage hat einen Einfluss auf seine Geschwindigkeit, Ausbreitung im Raum und seine Anfälligkeit auf Luftströmungen. (13) Auch das Sprühbild der Düsen und die daraus resultierende Form des Tropfenschwams ist relevant. (14)

Im Folgenden wird auf verschiedene brandschutzrelevante Gesichtspunkte im Zusammenspiel mit Wassernebel eingegangen.

## 2.3 Wirkung auf Feuer

Laut Gressmann lassen sich vier Effekte von Wassernebel auf Feuer feststellen (5):

- Physikalische Kühlung: Die Verdampfung des Wassers in der Flammenzone entzieht dem Feuer Wärmeenergie. Dies bewirkt bei Unterschreitung der notwendigen Verbrennungstemperatur die Löschung. Das Wasser muss direkt in die Verbrennungszone gelangen, um den Effekt der physikalischen Kühlung zu erreichen.
- Antikatalytischer Effekt: Bei der Verbrennung entstandene Radikale lagern sich an sehr kleinen Wassertropfen an und werden somit der Reaktion entzogen. Dies beeinträchtigt den Reaktionsablauf. Hierfür wird auch der Begriff Wandeffekt verwendet.
- Inertisierungseffekt: Durch die starke Ausdehnung des Wassers bei dem Übergang zu Wasserdampf wird sauerstoffhaltige Luft verdrängt. Dies entzieht dem Feuer den notwendigen Sauerstoff.
- Reduktion der Strahlungsrückkopplung von der Flamme zum Brandgut: Die Wärmestrahlung von den Flammen zum Brandgut wird verringert. Hierdurch wird die Energiemenge am Brandherd noch schneller verringert.

Gressmann nennt für eine gute Löschwirkung von Wassernebel eine Tröpfchenkonzentration von ca.  $500 \text{ g/m}^3$  und  $800 \text{ g/m}^3$  im Brandraum. Um diese gleichmäßig im Raum zu erreichen, sei die richtige Anordnung und Anzahl von Löschdüsen entscheidend. Außerdem entfalte der Wassernebel seine Löschwirkung nicht mehr, wenn er sich auf Oberflächen absetze. Um das Absetzen der Tropfen zu vermeiden, sei es förderlich den Wassernebel erst bei höheren Raumtemperaturen von ca.  $80^\circ\text{C}$  bis  $90^\circ\text{C}$  einzubringen, sodass es zu einer beschleunigten Verdampfung kommt. (5)

Die Wirkung des Wassernebels ist auch von der Art des brennenden Materials abhängig.

Generell ist zu den Erkenntnissen aus Versuchen in den folgenden Kapiteln zu erwähnen, dass sie zu großen Teilen in kleineren Versuchsräumen, die in ihren Abmessungen mit einem Wohn- oder Schlafzimmer vergleichbar sind, oder kleineren Treppenräumen durchgeführt wurden. Zu Versuchen in größeren Versuchsräumen in Form von Hallen oder längeren Korridoren liegen keine Daten vor. Hierbei könnte man untersuchen, welchen Einfluss Faktoren wie die Strömungsverhältnisse oder größere Abstände von den Düsen zum Brandherd auf die Löschwirkung von Wassernebel haben.

In den folgenden Kapiteln wird für den Druck die Einheit Bar statt Pascal verwendet. Auch wenn sie nicht im Internationalen Einheitensystem enthalten ist, wird sie im technischen Sprachgebrauch und in den Löschanlagen betreffenden Normen und Richtlinien verwendet und ist laut der Richtlinie 80/181/EWG der Europäischen Union (15) zur Angabe von Drücken zulässig.

### **2.3.1 Feste Brennstoffe**

In den ausgewerteten Forschungsberichten befinden sich zahlreiche Versuchsdaten zu brennenden Feststoffen. Es zeigt sich, dass Wassernebel-Löschanlagen sowohl in der Lage sind, Brände von Feststoffen in ihrer Ausbreitung zu unterdrücken und einzudämmen als auch diese vollständig zu löschen. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Materialien ausgewertet. Hierzu zählen Holz, Kunststoffe und Textilien.

Kunkelmann hat zahlreiche Forschungsberichte zu der Anwendung von Wassernebel auf Feststoffbrände veröffentlicht. In einer Versuchsreihe hat er die Löschwirksamkeit von unterschiedlichen Anlagentypen getestet und verglichen. Die Löschungen erfolgten mit einer Niederdruck- und einer Hochdruck-Wassernebel-Anlage und einer Sprinkleranlage. Als Brandlasten dienten Holzkrippen und eine aus Polypropylen bestehende Kiste, die mit Kanthölzern und Windeln gefüllt war. Diese wurden auf einem Treppenpodest in einem nachgebauten Treppenraum positioniert. Die Zündung erfolgte jeweils mit 0,5 Liter Heptan. Hier hat sich gezeigt, dass die Wassernebel-Löschanlagen deutlich weniger Wasser benötigten, um Brände mit den beschriebenen Brandlasten zu löschen. Er gibt an, dass Niederdruck-Wassernebel 20 % und Hochdruck-Wassernebel nur 15 % der Löschwassermenge der Sprinkleranlage benötigte, um eine vergleichbare Löschwirkung zu erzielen. Die Niederdruck-Wassernebel-Löschanlage und die Sprinkleranlage hatten vergleichbare Löscheiten. Die Löscheiten bei Hochdruck-Wassernebel waren um ca. 22 % geringer als bei den beiden anderen Systemen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe decken sich mit anderen Versuchen mit ähnlichem Aufbau. (12)

Bei Versuchen mit aus Holzkrippen, Linoleum und Teppichboden (Hartnadelbodenteppich) bestehenden Brandlasten konnten im Niederdruckbereich bei Betriebsdrücken von 4,1 Bar und 8,4 Bar eine vergleichbar gute Löschwirkung festgestellt werden. Der Brandschaden wurde von Kunkelmann als gering bewertet. (16)

In Versuchen mit Kunststoffen konnten sowohl mit Niederdruck- als auch Hochdruck-Wassernebel erfolgreiche Löschungen durchgeführt werden. Als Brandlast dienten ein Sessel aus Voll- und Sperrholz mit Polsterung aus Polyurethanschaum und Bezügen aus Polyester und weiteren Konstruktionen, die einen Sessel simulieren sollten. Die simulierten Sessel bestanden aus einer Sperrholzplatte mit den Abmessungen 1000 mm x 1000 mm x 12 mm und einem darauf festgeklebten Kissen aus Polyurethanschaum. Es wurden unterschiedliche Drücke, Düsenarten und Durchflüsse getestet. Für alle Arten des Einsatzes von Wassernebel konnte eine gute Löschwirkung festgestellt werden. (17)

Auch Kunkelmann beschreibt, dass Wassernebel bei Kunststoffbränden ohne Löschmittelzusätze eine gute Löschwirkung erzielen kann. (16)

Nach DIN EN 2 werden Kunststoffe wie Polyester in die Brandklasse B für flüssige oder flüssig werdende Stoffe eingeteilt. Dies liegt daran, dass Polyester abtropfend brennt. Aus Gründen der Verständlichkeit wurden die Löschergebnisse von Wassernebel für diesen Stoff dennoch im Kapitel der festen Brennstoffe behandelt. (18)

Aus einem Forschungsbericht von Kunkelmann mit brennenden Holzkrippen geht hervor, dass Hochdruck-Wassernebel nicht in der Lage war, tief sitzende Glutbrände abzulöschen. Mit Niederdruck-Wassernebel war dies möglich. Dies könnte man darauf zurückführen, dass die Tropfen von Hochdruck-Wassernebel in der Regel einen geringeren Durchmesser als die von Niederdruck-Wassernebel aufweisen. (19)

Diese Problematik beschreibt auch Schillocks in einem Fachartikel. Er führt die Unfähigkeit des sehr feinen Wassernebels, Glutbrände zu löschen, auf aufsteigende Brandgase zurück, welche die Wassertropfen vom Brandherd ableiten. Aufgrund des geringeren Durchmessers werde Wassernebel stärker von Luftströmungen beeinflusst. (14)

Hieraus lässt sich ableiten, dass Hochdruck-Wassernebel-Löschanlagen so eingesetzt werden sollten, dass sie direkt den Entstehungsbrand bekämpfen, bevor es zu einer zu starken Glutbildung kommen kann. Hierfür ist unter anderem ein sensibles Detektionssystem notwendig, das frühzeitig Brände erkennt und die Anlage auslöst. In Bereichen, in denen ein schnelles

Eingreifen der Löschanlage nicht möglich ist, könnte die Wahl einer Niederdruck- oder Sprinkleranlage von Vorteil sein. Dennoch ist im Versuch von Kunkelmann zu erkennen, dass der Brand auch bei verspäteter Einwirkung durch den Hochdrucknebel stark eingedämmt werden konnte. (19) Dies würde im Einsatz die Löscharbeiten der Feuerwehr erleichtern.

### **2.3.2 Flüssige Brennstoffe**

Die Löschwirkung von Wasser bei brennenden Flüssigkeiten ist stark von den physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit abhängig. Herterich (6) teilt diese hierfür in zwei Gruppen ein: Flüssigkeiten mit einem Siedepunkt unter 80 °C und mit einem Siedepunkt über 80 °C. Für die beiden Gruppen empfiehlt er unterschiedliches Vorgehen, bei der Verwendung von Wasser als Löschmittel.

Bei Flüssigkeiten mit einem Siedepunkt unter 80 °C ergibt sich eine Problematik bei der Kühlung der brennenden Flüssigkeit. Dringt das Wasser in die Flüssigkeit ein, kann es keine Temperatur über 80 °C annehmen, da die brennende Flüssigkeit an diesem Punkt schon verdampft. Hierdurch kommt es zu keiner schnellen Verdampfung des Löschwassers. Dies führt dazu, dass der starke Entzug von Verdampfungswärme ausbleibt. Bei Flüssigkeiten mit einem Siedepunkt unter 80 °C empfiehlt es sich folglich, feine Wassertropfen zu verwenden, die in der Flammenzone zu Wasserdampf werden und dadurch den Brand ersticken.

Bei der Gruppe der Flüssigkeiten mit einem Siedepunkt über 80 °C ist eine Kühlung der Flüssigkeit selbst durch Wasser besser möglich, da dieses dort auf eine ausreichend hohe Temperatur erhitzt wird, um schnell zu verdampfen. Soll dies erreicht werden, sind laut Herterich Tropfen mit größeren Durchmessern zu verwenden. Dies sei wichtig, um sicherzustellen, dass das Wasser die Flammenzone durchdringt und nicht von aufsteigenden Strömungen abgelenkt wird oder vorzeitig verdampft. Zu prüfen ist hierbei jedoch, ob sich durch das Verdampfen von Wasser in der brennenden Flüssigkeit die Gefahr einer schlagartigen Ausbreitung des Brennstoffes ergibt. Dieses Phänomen ist von Fettbränden bekannt. Durch die Volumenzunahme des in das Fett eingedrungenen Wassers bei dem Übergang in Wasserdampf wird das Fett fein verteilt in die Luft geschleudert und verbrennt in einer Tropfenwolke. Dies erzeugt

eine erhöhte Gefährdung der Umgebung und kann die Brandausbreitung fördern. Dieses Phänomen wird auch als Fettexplosion bezeichnet. (20) In Kapitel 2.3.3 wird die Wirkung von Wassernebel auf brennende Fette genauer betrachtet.

Aus Herterichs Erkenntnissen könnte man schlussfolgern, dass bei Flüssigkeiten mit einem Siedepunkt unter 80 °C der Wassernebel zum Ersticken des Feuers geeignet wäre, da größere Tropfen hier einen geringeren Löscheffekt aufweisen.

Eine weitere Problematik ergibt sich bei brennbaren Flüssigkeiten mit einer geringeren Dichte als Wasser, die nicht mit Wasser mischbar sind. Dringt das Wasser in die Flüssigkeit ein, lagert es sich unter dieser in einer getrennten Schicht ab. Dies kann auch dazu führen, dass sich Flüssigkeitsbrände durch das Überlaufen aus Behältnissen verteilen. In diesen Fällen ist die erststickende Wirkung von kleineren Tropfen, die in der Flammenzone verdampfen, von Vorteil. Ein Beispiel für eine solche Flüssigkeit ist Benzin. (21)

In einer Versuchsreihe des Landesumweltamtes NRW (22) wurden Brandversuche mit Waschbenzin und Brennspiritus durchgeführt. Die Erprobung fand mit einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage mit einem Druck von 100 Bar statt. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Düsentypen durchgeführt. Für die Versuche wurden die Behältnisse mit den brennenden Flüssigkeiten unverdeckt und durch eine Platte teilweise verdeckt und verdeckt mit Wasser beaufschlagt. Die Löschanlage war in der Lage, die Brände der beiden Flüssigkeit sowohl in verdecktem als auch unverdecktem Zustand zu löschen. Im Fall von Waschbenzin wurden die Brände im verdeckten und unverdeckten Zustand innerhalb von 10 s bis 360 s gelöscht. Bei Brennspiritus lagen die Löszeiten zwischen 1660 s und 2450 s. Der Wassernebel war zwar in der Lage, die verdeckten Brände zu löschen, die Löszeiten lagen aber deutlich über denen im unverdeckten Zustand.

Die längeren Löszeiten bei den Versuchen mit Brennspiritus könnten dadurch begründet sein, dass sich ein Teil des eingebrachten Löschwassers durch das Vermischen mit dem Spiritus nicht am Löschen beteiligt. Das Wasser-Spiritus-Gemisch ist bis zu einem gewissen Grad brennbar. Bei einem zu hohen Wasseranteil verliert es seine Brennbarkeit. (20) Die Ergebnisse mit Waschbenzin könnte man damit erklären, dass feine Tropfen des Hochdruck-Wassernebels in der Flammenzone verdampft sind und das Feuer dadurch erstickt wurde.

### 2.3.3 Fettbrände

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik des KIT wurden Brandversuche mit pflanzlichen Ölen durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass eine Niederdruck-Wassernebel-Löschanlage in der Lage war, das brennende Öl zu löschen. Die Versuche wurden mit Drücken von 4 bar und 8 bar durchgeführt. Es kam zu keiner Fettexplosion. (23) Dies könnte man damit erklären, dass der Wassernebel in der Flammenzone verdampfte und das Feuer dadurch erstickt wurde.

### 2.3.4 Metallbrennstoffe

Metallbrände lassen sich generell nur sehr schwer bis gar nicht mit Wasser löschen. Dies liegt daran, dass es bei einigen Metallen im Brandfall bei dem Kontakt mit Wasser zu exothermen Reaktionen und zur Bildung von ungünstigen Produkten, wie Wasserstoff, kommen kann. (16)

Bei Versuchen des Instituts für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge wurden Versuche mit brennenden Magnesium- und Aluminiumspänen durchgeführt. Zum Löschen wurden Wassernebel-Feuerlöscher eingesetzt. Die Magnesiumspäne konnten bei Vorbrennzeiten von weniger als 2 min gelöscht werden. Bei längeren Vorbrennzeiten war dies nicht möglich und es kam zu heftigen Reaktionen zwischen den Stoffen. Auch Aluminium konnte bei einer Vorbrennzeit von 2 min gelöscht werden. Allerdings war die Beobachtung hierbei, dass die Löschung durch die Trennung der brennenden Späne mittels des Wasserdrukcs erfolgte. Bei Aluminium kam es auch nach den erfolgreichen Löschversuchen noch zu Reaktionen unter Blasenbildung im Wasser. Aus den Ergebnissen wurde geschlussfolgert, dass Wassernebel-Feuerlöscher kein geeignetes Mittel für eine nachhaltige Löschung von Bränden von Magnesium oder Aluminium sind. Die Feuerlöscher wurden mit Drücken von 15 bar und 16 bar betrieben und versprühten Tropfen mit einem Sauter-Durchmesser zwischen ca. 40 µm und 170 µm. (24)

Zu Löschversuchen mit stationären Wassernebel-Löschanlagen bei Metallbränden liegen keine Ergebnisse vor. Dennoch deuten die Versuche mit den Feuerlöschern darauf hin, dass es auch bei größeren Wassernebel-Anlagen zu Problemen bei der Löschung von Metallbränden kommen könnte.

Unter anderem können bei folgenden Metallen im Brandfall kritische Reaktionen mit Wasser hervorgerufen werden können (5) (24):

- Lithium
- Natrium
- Kalium
- Magnesium
- Titan
- Zirkon
- Uran
- Plutonium
- Aluminium
- Caesium

### 2.3.5 Brände von Gasen

Ergebnisse von Löschversuchen mit Wassernebel-Löschanlagen bei brennenden Gasen konnten nicht gefunden werden.

Herterich beschreibt Beobachtungen von Löschversuchen mit Strahlrohren bei Gasbränden aus Öffnungen, die auch für den Einsatz von Wassernebel bei Gasbränden von Relevanz sein könnten. Er unterscheidet zwischen zwei Bandszenarien beim Löschen von aus Öffnungen brennendem Gas. Tritt brennendes Gas mit hohem Druck aus einer Öffnung aus, sei mit dem Sprühstrahl keine Wirkung zu erzielen, da das Wasser von dem strömenden Gas abgelenkt werde. In diesem Fall helfe nur ein scharfer Wasserstrahl mit hohem Druck, der direkt bei der Öffnung quer in das Gas gerichtet wird. Dadurch könne der Brand ersticken werden. Bei zu hohem Druck des Gases sei dies aber auch nicht möglich. Bei langsam strömendem Gas könne man Löscherfolge mit dem Sprühstrahl erzielen. (6) Die Ergebnisse Herterichs zeigen, dass bei Gasbränden die Lagerungsverhältnisse des Brennstoffes einen Einfluss auf die Wirksamkeit von Löschmethoden haben können. Deshalb sollten bei Untersuchungen mit Wassernebel auch der Druck und das daraus resultierende Strömungsverhalten von brennbaren Gasen berücksichtigt werden.

## 2.4 Wirkung auf Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist neben Konvektion und Wärmeleitung einer der Wärmetransportmechanismen. Sie hat das Alleinstellungsmerkmal, dass sie kein Medium zum Wärmetransport benötigt. Wärmestrahlung kann von Stoffen, auf die sie einwirkt, transmittiert, reflektiert oder absorbiert werden. Es ist im Sinne des Brandschutzes, Wärmestrahlung möglichst einzuschränken, da sie zur Brandausbreitung beiträgt. Sie verursacht, dass Oberflächen in von Bränden betroffenen Räumen erhitzt werden und sich dadurch entzünden. Reduziert man die Intensität der Wärmestrahlung, verringert man die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Feuers und hilft dabei, es auf einen lokalen Bereich einzuschränken. (5) In Versuchen wurde die Wärmestrahlungsdurchlässigkeit von Wassernebel untersucht.

Ravigururajan hat Untersuchungen mit verschiedenen Tropfengrößen und Wasserbeladungen durchgeführt. Der Begriff Wasserbeladung bezeichnet die Masse an Wasser je Volumeneinheit. Sie wird in  $[g/m^3]$  angegeben. Bei den Versuchen wurde ein Wasservorhang vor einer Flamme erzeugt. In einem Abstand von 3 m von der Flamme wurde eine Aluminiumplatte hinter dem Wasservorhang mit Temperaturmessinstrumenten positioniert. Über die Temperatursteigerung konnte der Wärmestrahlungseintrag auf die Aluminiumplatte bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 3 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Wasserbeladung und sinkendem Tropfendurchmesser die Strahlungsdurchlässigkeit des Wassernebel-Vorhangs sinkt. (25)

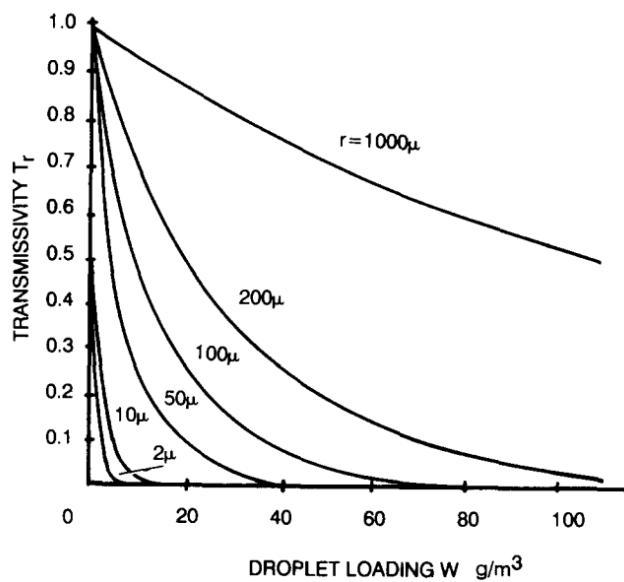


Abbildung 3: Strahlungsdurchlässigkeit eines Wasservorhangs in Abhängigkeit des Tropfenradius und der Wasserbeladung; Ravigururajan (25)

In weiteren Versuchen wurde ebenfalls die Interaktion von Wassernebel und Wärmestrahlung untersucht. Bei den Untersuchungen wurde die Effektivität eines Vorhangs aus Wassernebel zum Abschirmen von Wärmestrahlung überprüft. Der Vorhang wurde mit Hilfe eines Düsenkopfes erzeugt und hatte eine Stärke von ca. 40 cm. Der mittlere Tropfendurchmesser betrug bei einem Druck von 20 bar 56  $\mu\text{m}$ . Es wurde festgestellt, dass 82 %, der von einem Becken mit brennendem Diesel emittierten Wärmestrahlung durch den Wassernebel abgehalten wurden. (26)

In den Versuchen zeigt sich, dass durch Wassernebel im Brandfall große Teile der Wärmestrahlung abgehalten werden können. Kleine Tropfen und eine hohe Wasserbeladung scheinen dies zu verstärken.

## 2.5 Wirkung auf Raumtemperaturen

Die Reduktion von Temperaturen durch Wassernebel in Brandräumen wurde in einer Vielzahl von Versuchen dokumentiert. Sowohl bei der Anwendung von Niederdruck-Wassernebel als auch bei Hochdruck-Wassernebel. (12) (16) Die schnelle Verdampfung durch die große Oberfläche des Wassernebels entzieht dem Brandraum große Mengen an Wärmeenergie. Auch bei nicht vollständiger Löschung können hierdurch Verletzungen und Sachschäden vorgebeugt

werden. Eine Verringerung der Raumtemperaturen sorgt für sicherere Begehbarkeit für Flüchtende und Rettungskräfte. Sie reduziert zudem die Wahrscheinlichkeit der Brandausbreitung auf weitere Gegenstände.

Auch die Gefahr einer Rauchgasdurchzündung wird verringert. Hierbei handelt es sich um die schlagartige Entzündung von brennbaren Gasen. Dies geschieht, wenn ein Brand in einem Raum aufgrund von Sauerstoffmangel erloschen ist, aber die Temperaturen noch zur Zündung der unverbrannten Pyrolysegase ausreichen. Wird dem Raum dann, beispielsweise durch das Öffnen einer Tür, wieder Sauerstoff zugeführt, kann es zu einer Durchzündung kommen. (27) Durch eine Wassernebel-Löschanlage könnte die Temperatur unter den zur Durchzündung notwendigen Wert gebracht werden. Dieses Prinzip wird von Feuerwehren auch mit Löschanlagen angewendet. Mit Hilfe dieser Armaturen wird fein zerstäubtes Wasser durch kleine Öffnungen in einen Brandraum eingebracht, um zu verhindern, dass zu viel Sauerstoff eindringen kann, und um den Innenangriff vorzubereiten. (28)

In den Abbildungen 4 und 5 ist der Temperaturverlauf auf unterschiedlichen Höhen in einer Ecke eines Brandversuchsraumes und an der Brandquelle nach Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage dargestellt.

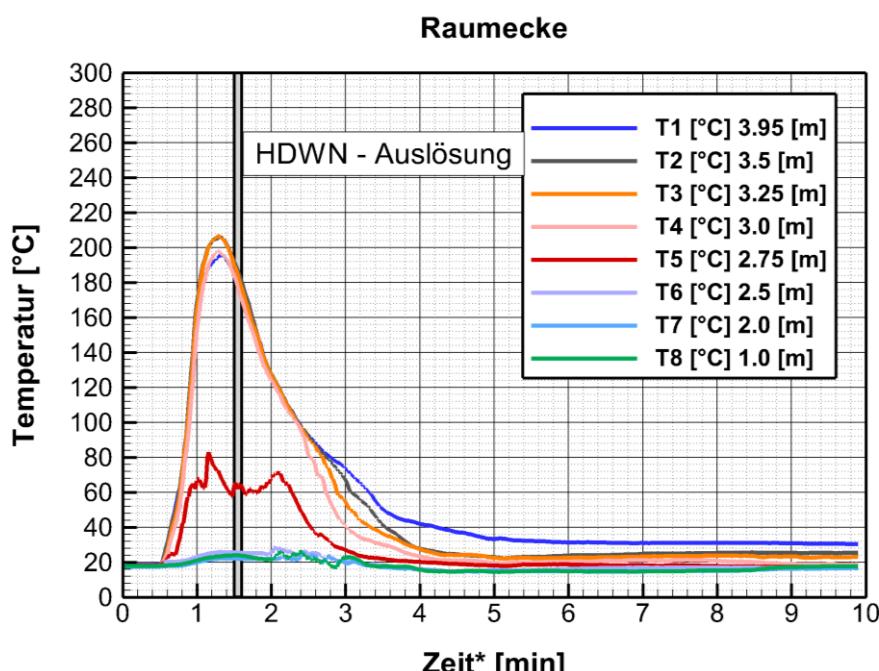


Abbildung 4: Temperaturrentwicklung in einer Raumecke nach Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage; Dinkov (29)

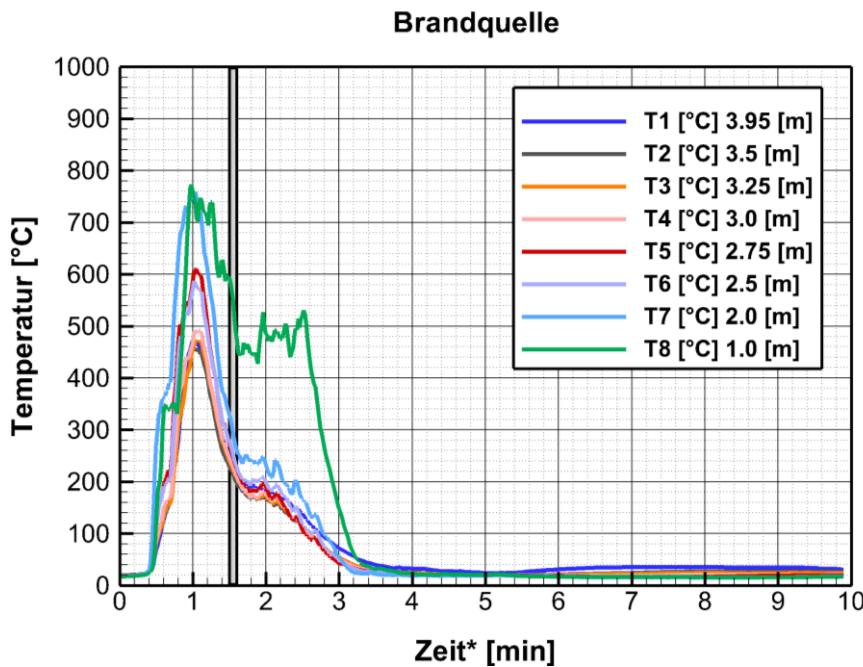


Abbildung 5: Temperaturrentwicklung an einer Brandquelle nach Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage; Dinkov (29)

In einem Merkblatt der VdS Schadensverhütung GmbH (VdS) wird darauf hingewiesen, dass sich durch Wassernebel-Löschanlagen die oberen Raumschichten stärker abkühlen als bei Anlagen mit größeren Tropfendurchmessern. Dies liege daran, dass bei Löschanlagen mit größeren Tropfen das Wasser direkt in Bodenrichtung falle. Wassernebel verteile sich gleichmäßiger im Raum und interagiere hierdurch auch stärker mit den oberen Raumschichten. Hierbei wird es als problematisch angesehen, dass dies die thermische Auslösung von Rauch- und Wärmeabzugsgeräten (RWG) behindern könne. Die schnelle Abkühlung des Raumes durch eine Wassernebel-Löschanlage könne laut VdS aber auch dazu führen, dass sich ein Unterdruck ausbilde. Dies könne zur Folge haben, dass der natürliche Rauchabzug behindert werde. Als positiv wird es allerdings angesehen, dass die Volumenreduktion der Raumluft durch die Kühlung die Effektivität von maschinellen Rauchabzugsanlagen (MRA) steigern könne. (30)

## 2.6 Wirkung auf den Feuerwiderstand von Bauteilen

Bei Bränden besteht die Gefahr, dass Bauteile durch hohe Temperaturen oder dadurch, dass sie selbst in Flammen geraten, beschädigt werden. Dies kann dazu führen, dass sie ihre Funk-

tionstüchtigkeit als Raumabschluss oder Tragwerk verlieren. Hierdurch kann es zu einer verstärkten Ausbreitung von Rauch und Feuer oder zur Gefährdung der Stabilität einer baulichen Anlage kommen. Besonders bei tragenden Konstruktionen aus Metallen, wie zum Beispiel Stahl, ist dies zu beachten. Stahl hat neben einer hohen Wärmeleitfähigkeit auch die Eigenschaft, bei starker Erwärmung schnell an Tragfähigkeit zu verlieren. (16) In Abbildung 6 sind die kritischen Temperaturen von Stahl der Güte S275 in Bezug auf die Tragfähigkeit dargestellt.

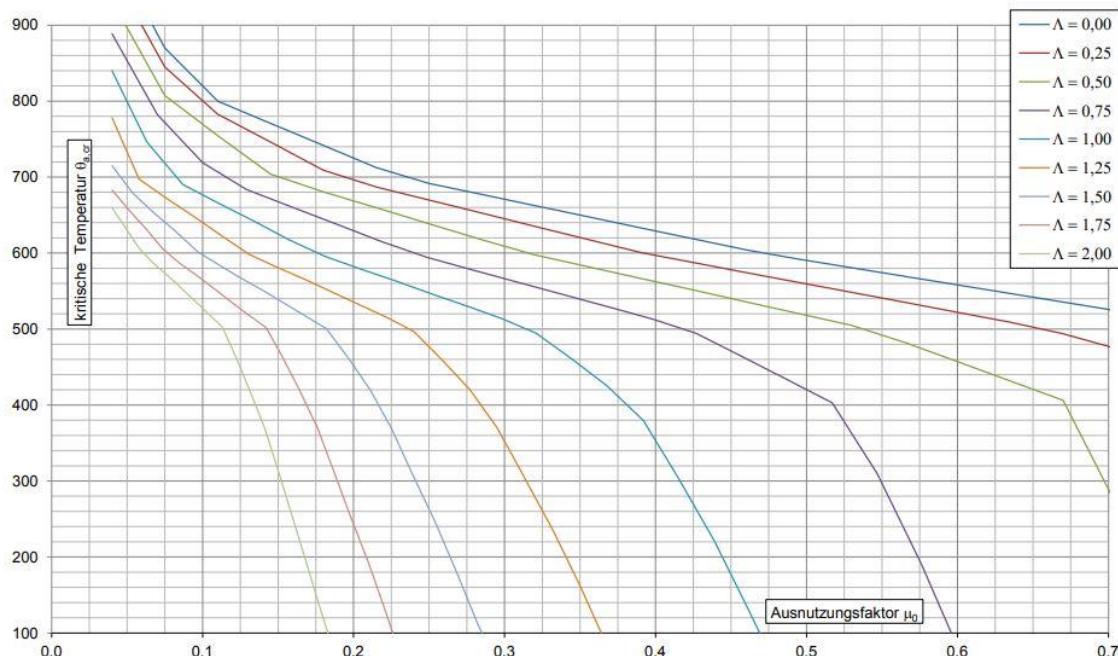


Abbildung 6: Kritische Temperaturen von Druckstäben aus Stahl der Güte S275 bei unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren und Schlankheitsgraden in Abhängigkeit der Temperatur; Bauforumstahl (31)

Bei Glas ergibt sich die Problematik, dass es brechen kann, wenn es bei der Ausdehnung aufgrund einer Temperaturerhöhung behindert wird. Auch bei Temperaturunterschieden innerhalb eines Glasbauteils kommt es zu Spannungen, die Risse oder das komplette Versagen des Bauteils hervorrufen können. Es gibt verschiedene Arten von Gläsern, die auch unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber Hitze aufweisen. Bei Mehrfachverglasung ist die Gefahr eines Bauteilversagens geringer. (32) Kommt es jedoch zum Zerbrechen von Glasbauteilen, können dadurch Verletzungen verursacht werden und es kann zu einer unerwünschten Zufuhr von Sauerstoff in den Brandraum kommen.

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik des KIT wurden Brandversuche mit Stahl-Glas-Fassadenelementen durchgeführt. An verschiedenen Stellen im Versuchsräum wurde die Temperatur erfasst. Nach Auslösen der Wassernebel-Löschanlage kam es zu einem schnellen Temperaturabfall im Raum, sodass zu keinem Zeitpunkt die kritischen Temperaturen von Stahl und Glas überschritten wurden. (16)

Aus den Erkenntnissen aus den Kapiteln 2.4 und 2.5 über die Wirkung von Wassernebel auf Wärmestrahlung und Raumtemperaturen geht hervor, dass die Wärmestrahlungsintensität und die lokale Umgebungstemperatur durch die Löschanlagen reduziert werden kann. Dies sorgt auch für einen reduzierten Wärmeeintrag auf Oberflächen. Durch den gezielten Einsatz von Wassernebel ist somit der Schutz von empfindlichen Bauteilen möglich.

Die Installation einer Wassernebel-Löschanlage zur Bauteilertüchtigung allgemein als festes Kriterium für die Einstufung in eine höhere Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102-2 zu verwenden, scheint jedoch nicht sinnvoll. Die Einstufung in Feuerwiderstandsklassen erfolgt durch ein Prüfverfahren, in dem ein Brand nach Vorbild der Einheits-Temperaturzeitkurve erzeugt wird. Die Einheits-Temperaturzeitkurve gibt einen festgelegten Verlauf der Temperaturentwicklung über die Zeit an. Erhält ein Bauteil für die vorgegebene Dauer unter diesen Bedingungen seine Funktionstüchtigkeit, wird es in eine entsprechende Feuerwiderstandsklasse eingestuft. Eine Prüfsituation durch einen Brand mit der Charakteristik der Einheits-Temperaturzeitkurve ist unter Einfluss von Wassernebel vermutlich nur schwer zu erzeugen. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Anlagentypen und des möglichen Einflusses der Anordnung der Löschdüsen scheint keine einheitliche Bewertung möglich. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob eine Kompensation der Feuerwiderstandsklasse von Bauteilen durch Wassernebel durchgeführt werden kann. (33)

## 2.7 Wirkung auf Rauch und gesundheitsschädigende Gase

Bei der Wirkung von Wassernebel auf Rauch muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden.

Der erste Fall ist, dass im Bereich der Düse bei Auslösung der Anlage schon eine starke Rauchentwicklung vorliegt. Versuche der Forschungsstelle für Brandschutztechnik des KIT haben ge-

zeigt, dass Wassernebel-Löschanlagen einen starken Einfluss auf die Stabilität der Rauchschicht haben können. Diese bildet sich im oberen Bereich des Raumes unter der Decke aus. Besonders bei mit Hochdruck betriebenen Anlagen wird durch den Tropfenimpuls der Rauch verwirbelt und es kommt zu einer Zerstörung der klaren Rauchgrenze. Dies führt dazu, dass der Rauch sich über die gesamte Höhe des Raumes verteilt. Bei Niederdruckanlagen ist dieser Effekt aufgrund der geringeren Geschwindigkeit und geringeren Anzahl an Tropfen weniger stark ausgeprägt.

Der zweite Fall ist, dass die Wassernebel-Löschanlage aktiviert wird, bevor Rauch bis in ihren Sprühbereich vorgedrungen ist. Über die Wirksamkeit von Wassernebel als Barriere gegen Rauch liegen unterschiedliche Erkenntnisse vor.

Es wurden Versuche durchgeführt, die überprüfen sollten, ob es möglich ist mit Hilfe von Wassernebel Rauch an seiner Ausbreitung zu hindern. Hierbei wurde in einer 18 m langen Röhre mit einer Querschnittsfläche von 1.100 mm auf 400 mm eine Wanne mit Ethanol entzündet. Anschließend wurde in Entfernung zu der Wanne eine Wassernebel-Anlage aktiviert und die Rauchdurchlässigkeit des Nebels erfasst. Die Versuche wurden mit Betriebsdrücken von 3 bar und 5 bar durchgeführt. Die Daten wurden bei natürlicher und maschineller Belüftung mit 0,8 m/s Strömungsgeschwindigkeit erfasst. Der Wassernebel war bei natürlicher Belüftung in der Lage, den Rauch abzuhalten. Bei maschineller Belüftung war dies nicht der Fall. (34)

Diese Versuche ergeben, dass Wassernebel in der Lage ist, als Barriere gegen Rauch zu fungieren. Diese Eigenschaft kann aber durch Luftströmungen beeinträchtigt werden. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf Brandsituationen in Räumen in realen Gebäuden ist aufgrund der kleinen Dimensionen des Versuchsaufbaus nicht möglich.

Dem gegenüber stehen Versuche der Technischen Universität Braunschweig mit Niederdruckanlagen. Hierbei wurden in leerstehenden Wohnungen Holzkrippen entzündet. Bei den Wohnungseingangstüren waren jeweils in der Wohnung und im Treppenraum eine Löschausdehnung installiert. Es sollte überprüft werden, inwiefern eine gebrauchsübliche Wohnungstür in Kombination mit Niederdruck-Wassernebel in der Lage ist, Rauch und Feuer von der Ausbreitung in den Treppenraum abzuhalten. Bei geschlossener Tür und aktiver Löschanlage konnte kaum Rauch aus der Wohnung in den Treppenraum eindringen. Bei einem weiteren Versuch

wurde die Tür bei aktivierter Anlage zeitweise geöffnet. In diesem Fall konnte das Eindringen von Rauch und Wasserdampf in den Treppenraum nicht durch die Anlage verhindert werden. (35)

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Fähigkeit von Wassernebel als Barriere gegen Wasserdampf und Rauch stark von den lokalen Umständen abhängt. Möglicherweise haben auch Art und Menge der Brandlast einen Einfluss auf die Effektivität. Für die praktische Anwendung muss man im Einzelfall prüfen, ob ein Einsatz von Wassernebel zum Schutz vor Rauch möglich ist.

Bei Brandversuchen in einem Treppenraum wurde festgestellt, dass durch die Abkühlung der Rauchgase durch den Wassernebel der natürliche Rauchabzug durch eine Öffnung im oberen Bereich des Treppenraumes erschwert werden kann. Dadurch könnte es notwendig sein, entsprechende Rauchabzugstechnik zu installieren. (10)

In Bezug auf den Einfluss der Rauchtemperatur sind auch die in Kapitel 2.5 beschriebenen Hinweise der VdS zu beachten.

Es hat sich gezeigt, dass durch eine schnelle Eindämmung eines Brandes durch eine Wassernebel-Löschanlage der Ausstoß von gesundheitsschädigenden Brandgasen in der Luft, wie zum Beispiel Kohlenstoffmonoxid, reduziert und die Sauerstoffkonzentration auf einem höheren Niveau gehalten werden kann. (36)

Zur Auswaschung von Rauchgasen durch Lösung im Wassernebel liegen keine Messdaten vor. Allerdings ist damit zu rechnen, dass lösungsfreudige Gase, wie zum Beispiel Ammoniak, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, Stickoxide und Zyanwasserstoff durch den Wassernebel zum Teil aus der Luft entfernt werden können. Bei Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid ist von keiner signifikanten Wirkung auszugehen. (19)

## **2.8 Wirkung auf die Sichtverhältnisse/Rettungswege**

Durch die feinen dicht nebeneinanderliegenden Tropfen kann es zu starken Sichtbehinderungen durch den Wassernebel kommen. Diese Problematik zeigt sich vor allem bei Hochdruck-Wassernebel-Löschanlagen, da diese eine höhere Zahl an Tropfen abgeben. Hinzu kommt

durch die beschleunigte Verdampfung sich schneller und in größeren Mengen bildender Wasserdampf. Dies kann neben Rauch und Wassernebel zusätzlich zu Sichtbehinderungen für Flüchtende und Rettungskräfte sorgen. (12) Für die Darstellung der Sichtverschlechterung kann der sogenannte Extinktionskoeffizient genutzt werden. Dieser ist ein Messwert für den Verlust der Lichtintensität pro Meter. Es wurde festgestellt, dass ab einem Extinktionskoeffizienten von  $0,15 \text{ m}^{-1}$  bei Menschen, die nicht den Kontakt mit Brandrauch gewohnt sind, Stressreaktionen, wie zum Beispiel Pulserhöhungen, auftreten. Stärkere Sichtverschlechterungen können auch zu Panik führen. (36) Dies kann zusätzlich zu Verletzungen durch unüberlegtes Handeln oder zur Behinderung von Rettungskräften führen.

Auch die in Kapitel 2.7 beschriebene Störung der stabilen Rauchschicht kann zu einer Sichtverschlechterung beitragen. Hierdurch besteht für Personen ohne Schutz durch ein Pressluftatemgerät ein erhöhtes Risiko, eine Rauchgasvergiftung zu erleiden. In Abbildung 7 ist die Wirkung des Einsatzes von Hochdruck-Wassernebel auf eine Sichtverhältnisse dargestellt.



Abbildung 7: Sichtbehinderung durch Rauch, Wasserdampf und Wassernebel; Dinkov (29)

Eine Verschlechterung der Sicht und dadurch hervorgerufene Panikreaktionen erschweren die zügige Evakuierung von gefährdeten Bereichen. Besonders in Gebäuden, in denen sich ortskundige Personen aufhalten, stellt dies ein Problem dar. Durch Vorrichtungen für den Rauch- und Wärmeabzug könnte die Sichtbehinderung reduziert und die Sicherheit der Rettungswege erhöht werden. Auch eine eindeutige und gut erkennbare Ausschilderung von Rettungswegen trägt hierzu bei.

## 2.9 Wasserschäden durch Wassernebel

Im Brandfall verursachen nicht nur das Feuer und der Rauch Schäden an Gebäuden und deren Inneneinrichtung, sondern auch das Löschwasser kann große Schäden anrichten. Es kommt auch immer wieder zu Fehlauslösungen und technischen Defekten bei Wasserlöschanlagen. Hieraus kann es zu hohen Kosten sowohl für die Sanierung des betroffenen Bereiches als auch für den Nutzungsausfall, zum Beispiel in Fertigungsanlagen oder Veranstaltungsräumen, kommen. (37) Es wurde bereits festgestellt, dass Wassernebel-Löschanlagen mit geringeren Wassermengen eine vergleichbare Löschwirkung wie herkömmliche Sprinkleranlagen aufweisen können. Deshalb können diese Anlagen mit deutlich geringeren Durchflussraten betrieben werden. Kommt es also zu einer Auslösung einer solchen Anlage ist sowohl im Brandfall als auch bei einer Fehlauslösung mit geringeren Wasserschäden zu rechnen. Diese Annahme bestätigte sich auch in Versuchen, wo nach Beendigung der Lösung durch eine Wassernebel-Löschanlage nur eine geringe Umgebungsbefeuchtung im Raum festgestellt wurde. (16)

## 3 Technik von Wassernebel-Löschanlagen

Bei Wassernebel-Löschanlagen handelt es sich um stationäre Löschanlagen. Sie werden auch als Feinsprüh-Löschanlagen bezeichnet. Allgemein werden Wassernebel-Löschanlagen über die Größe der Tropfen, die sie versprühen, definiert. Die Größe des Tropfenspektrums von Wassernebel liegt laut DIN EN 14972-1 und VdS CEN 3188 unter 1 mm im  $D_{V90}$ -Wert. Eine Kategorisierung der Anlagen untereinander erfolgt über den Betriebsdruck und die Auslösung. (8) (38)

Wassernebel-Löschanlagen können auf verschiedene Arten ausgeführt sein. Es gibt Unterschiede in der Höhe der verwendeten Anlagendrücke, der Druckerzeugung, der Auslösung der Anlagen und der Konstruktion von Rohrsystemen und der Löschedüsen.

Es ergeben sich bei Nieder- und Hochdruckanlage neben der Tropfengröße auch Unterschiede in der Bewegungsdynamik des abgegebenen Wassers. Durch die unterschiedlichen Drücke werden auch Austrittsgeschwindigkeit, Sprühwinkel und die Art, wie sich die Tropfen im Raum verteilen, beeinflusst. (13)

### **3.1 Normungssituation**

#### **3.1.1 DIN EN 14972**

Das Deutsche Institut für Normung regelt die Definition und Vorgaben zu Installation und Betrieb von Wassernebel-Löschanlagen mit der DIN EN 14972-1. Hierbei werden die Anlagen aber lediglich über die Größe der versprühten Wassertropfen definiert. Eine Unterscheidung zwischen Nieder- (unter 12,5 bar), Mittel- (zwischen 12,5 bar und 35 bar) und Hochdruck (über 35 bar) wurde bis zu der Fassung aus dem Jahr 2011 vorgenommen, ist in der Aktuellen Fassung von 2021 aber nicht mehr enthalten. Die Norm erfasst geschlossene und offene Systeme. In der DIN EN 14972-1 werden Anforderungen an die technische Ausführung und Instandhaltung gestellt. Dies umfasst beispielsweise Vorgaben für die Bauart von Rohrleitungen, Pumpen, Stromerzeugungsanlagen, Düsenköpfen und Wasserversorgung. Für die Instandhaltung der Anlagen werden Intervalle für Inspektionen und Wartungen und deren Umfang festgelegt. In der Normenreihe DIN EN 14972 sind auch Vorgaben für die Auslegung der Anlagen enthalten. (8)

#### **3.1.2 VdS-Richtlinien**

Neben der Norm des Deutschen Instituts für Normung hat auch der VdS Schadensverhütung Richtlinien zur Wassernebeltechnik erstellt. Hierbei wird zwischen Niederdruck (unter 16 bar) und Hochdruck (über 16 bar) unterschieden. Für Hochdruckanlagen gilt die VdS 3188. Für Niederdruckanlagen, die als geschlossene Systeme ausgeführt werden, gilt die VdS CEA 4001. Die VdS CEA 4001 ist die allgemeine VdS-Richtlinie für Sprinkleranlagen. Für Niederdruckanlagen, die mit offenen Düsen arbeiten, gilt die VdS 2109. Dies ist die Richtlinie für Sprühwasser-Löschanlagen. Hierbei kann man erkennen, dass der VdS nur im Hochdruckbereich über 16 bar eine eigene Regelung für Wassernebel-Anlagen vorsieht. Niederdruck-Anlagen werden mit Löscherfahren mit größeren Tropfenspektren zusammengefasst. Auch die VdS-Richtlinien stellen Anforderungen an die Auslegung, Installation, Komponenten und den Betrieb von Wassernebel-Löschanlagen. (38) (39) (40)

### 3.2 Technischer Aufbau

Bei den technischen Komponenten von Wassernebel-Löschanlagen muss zwischen Niederdruck- und Hochdruckanlagen unterschieden werden. Hinzu kommt, dass sich der Aufbau je nach Hersteller unterscheiden kann, gewisse Grundelemente lassen sich aber nennen.

Die Löschwasserversorgung kann über den Anschluss an das öffentliche Wassernetz oder durch Vorratsbehälter in verschiedenen Ausführungen erfolgen. Grundsätzlich muss die Versorgung der Löschanlagen für einen bestimmten Zeitraum sichergestellt sein. Dies gilt auch für die Stromversorgung im Brandfall. Es wird auch eine Komponente für die Erzeugung des notwendigen Druckes benötigt. Zum Transport und der Freisetzung des Wassers dienen Versorgungsleitungen, und die Düsenköpfe an den Leitungen. Hinzu kommen elektronische Steuerungselemente, Messvorrichtungen und Ventile zur Regelung des Durchflusses. Erfolgt eine elektronische Auslösung, kann eine Anbindung an die Brandmeldeanlage eingerichtet werden. Je nach Begebenheiten kann es notwendig sein, weitere Komponenten hinzuzufügen. Ein Beispiel hierfür ist eine Heizung für im Freien stehende Löschwasserbehälter. Bei offenen Systemen, die in Gruppen ausgelöst werden, muss jede Gruppe eine eigene Ventilstation am Hauptleitungsstrang haben, um einzeln eingesetzt zu werden. Bei hohen Gebäuden kann es notwendig sein, Druckerhöhungsanlagen zu installieren, um auch in den oberen Geschossen den notwendigen Betriebsdruck zu gewährleisten. (8)

Bei Niederdruckanlagen besteht die Möglichkeit, dass man die Löschwasserversorgung über die Hauswasserversorgung sicherstellt, ohne zusätzliche Pumpentechnik zu installieren. Hierbei müssen aber Vorgaben für die Hygiene des Trinkwassernetzes erfüllt werden und es muss sichergestellt sein, dass im Brandfall der notwendige Betriebsdruck verfügbar ist. Außerdem kann auch Löschwasser durch die Feuerwehr über Löschwassereinspeisungsanschlüsse zugeführt werden. (41) Neben Pumpen besteht im Niederdruckbereich auch die Möglichkeit durch Tanks, in denen sich verdichtete Gase befinden, Druck zu erzeugen. (40) (8)

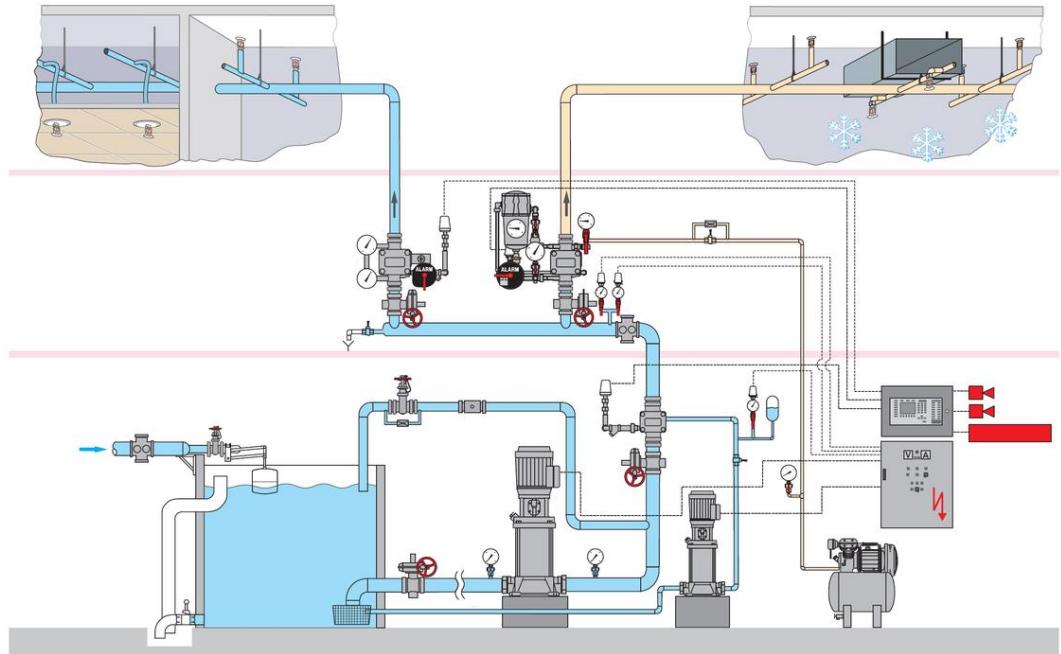


Abbildung 8: Aufbau einer Niederdruck-Wassernebel-Löschanlage; Minimax GmbH (42)

Bei Hochdruckanlagen müssen Hochdruckpumpen verbaut werden. Auch hier besteht die Möglichkeit, Löschwasser über ein Feuerwehrfahrzeug einzuspeisen. Allerdings muss dieses Fahrzeug dann ebenfalls mit einer Hochdruckpumpe ausgestattet sein. Aufgrund des seltenen Vorkommens der Wassernebeltechnik scheint diese Methode für kommunale Feuerwehren nicht geeignet, kann aber für Werkfeuerwehren von Betrieben, in denen die entsprechende Anlagentechnik vorhanden ist, sinnvoll sein. (43)

Der Wassernebel wird in den Düsen gebildet. Die Düsen werden in verschiedenen Ausführungen gefertigt. Es gibt Variationen der Düsenanzahl pro Kopf, der Ausrichtung der Düsenöffnungen und der Ausrichtung des Düsenkopfes.

Es besteht auch die Möglichkeit, Wassernebel durch Vermengen des Wassers mit Zerstörungsgasen zu bilden. Hierauf wird in Kapitel 3.2.1 eingegangen.

In Tabelle 2 sind exemplarisch einige Parameter von Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel-Düsen dargestellt.

Parameter	Niederdruck		Hochdruck
Druck	4 - 8	2 - 14	60 – 80

[bar]			
Tropfengrößenbereich [ $\mu\text{m}$ ]	20 - 200	60 - 150	20 – 150
Durchflussrate [l/min]	8 - 65	11 - 45	3 – 20
Sprühwinkel [°]	90 - 140	60 - 90	60 – 90

Tabelle 2:Exemplarische Düsenparameter; eigene Darstellung nach Schremmer (44)

### 3.2.1 Mehrstoff-Löschanlagen

Neben den Wassernebel-Löschanlagen, bei denen durch die Löschanlagen reiner Wassernebel abgegeben wird, gibt es zwei weitere Arten von Systemen. Bei diesen kommt Stickstoff zum Einsatz.

Bei der ersten Variante handelt es sich um Wassernebel-Stickstoff-Löschanlagen. Hierbei erfolgt die Zerstäubung des Wassers in der Löschdüse durch einen Strahl von reinem Stickstoff. In diesem Fall dient das Gas in erster Linie der Erzeugung des Wassernebels und leistet keinen signifikanten Beitrag zu der Löschwirkung. Der Löscheffekt gleicht einer klassischen Wassernebel-Löschanlage.

Die zweite Variante ist die Stickstoff-Wassernebel-Löschanlage. Bei dieser Ausführung werden Stickstoff und Wassernebel abgegeben, um deren Löschwirkungen zu kombinieren. Durch den Stickstoff soll das Feuer erstickt werden, durch den Wassernebel die Kühlung erfolgen. (5)

## 3.3 Detektion

Die Detektion eines Brandes kann über verschiedene Systeme erfolgen.

Zur Auswahl stehen heutzutage mehrere Arten von Meldern. Hierzu zählen Rauchmelder, Thermomelder, Rauchansaugsysteme und Flammenmelder. Rauchmelder entdecken Brände, indem sie die Luft, beispielsweise durch optische Sensoren, auf Rauchpartikel untersuchen. Thermomelder schlagen an, sobald eine festgelegte Grenztemperatur überschritten wird. Rauchansaugsysteme haben das gleiche Funktionsprinzip wie ein Rauchmelder, mit dem Unterschied, dass sie aktiv Luftproben ansaugen. Flammenmelder sind in der Lage, die von einem

Brand ausgehende Strahlung zu erfassen und die Frequenz des Flackerns einer Flamme zu erkennen. (5)

Nach der Erkennung von Anzeichen eines Brandes durch die genannten Systeme besteht die Möglichkeit, das Signal an eine Brandmeldeanlage weiterzugeben, über die dann Alarmsignale ausgelöst, die Feuerwehr alarmiert oder anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen eingeleitet werden. (8)

Es ist möglich, die Alarmierung mit einer Zwei-Melder-Abhängigkeit zu versehen, um das Risiko einer Fehlauslösung zu verringern. In diesem Fall alarmiert die Brandmeldeanlage erst nach der Detektion durch zwei voneinander unabhängige Melder. (10) Dies kann aber auch zu der verzögerten Entdeckung von Bränden führen.

### 3.4 Auslösung

Wassernebel-Löschanlagen können auf unterschiedliche Arten ausgelöst werden.

Bei einer geschlossenen Düse mit Glasfass oder Schmelzlot erfolgt dies über direkte thermische Einwirkung auf den Düsenkopf. Die Düsenöffnung ist im Normalfall durch eines der beiden genannten Bauteile verschlossen. Kommt es im Brandfall zu einer thermischen Einwirkung auf den Düsenkopf, erweitert sich die Flüssigkeit im Glasfass und es zerspringt oder das Schmelzlot gibt nach. Durch diesen Mechanismus werden die Düsenöffnungen frei. In der Leitung herrscht ein ständiger Vordruck. Durch das Freiwerden der Öffnungen strömt das Wasser aus, sodass es zu einem Druckabfall in der Leitung kommt. Dieser wird festgestellt und die Pumpe der Löschanlage aktiviert. Bei dieser Bauweise wird nur der Bereich mit Wasser beaufschlagt, in dem sich Düsenköpfe befinden, die eine ausreichende thermische Einwirkung erfahren haben. Die Auslösetemperatur kann durch die Wärmeresistenz der Glasfässer bzw. der Schmelzlöte angepasst werden. (3)



Abbildung 9: geschlossene Hochdruck-Wassernebel-Düsenkopf, Callies Brandbekämpfungssysteme GmbH (45)



Abbildung 10: geschlossenen Niederdruck-Wassernebel-Düsenkopf; Hansenebel GmbH (46)

Der Vorteil des geschlossenen Systems ist, dass nur einzelne Düsenköpfe ausgelöst werden und nicht direkt ein ganzer Bereich beaufschlagt wird, was eine gezieltere Lösung ermöglicht und Wasserschäden reduziert. Allerdings muss auch sichergestellt sein, dass die thermische Strömung des Brandes auch den Düsenkopf erreicht, der sich über dem Feuer befindet. Bei Räumen mit großen Deckenmaßen und starken Luftströmungen könnte dies nicht immer der Fall sein. Generell können geschlossene Systeme, die ständig Wasser führen, nur in Bereichen installiert werden, in denen sichergestellt ist, dass das Wasser in der Leitung nicht gefriert. Alternativ können geschlossene Anlagen auch als Trockensysteme ausgeführt werden. In diesem Fall führt die Leitung, an die die Düsenköpfe angeschlossen sind, nicht dauerhaft Wasser. Die Auslösung erfolgt dann über die Detektion eines Druckabfalls der Luft in der Leitung durch eine Trockenalarmventilstation. (3)

Bei offenen Systemen wird die Anlage elektronisch oder manuell ausgelöst. Im Fall der elektronischen Auslösung wird die Löschanlage, nachdem die in Kapitel 3.3 genannten Detektionsysteme angeschlagen haben, über die Brandmeldeanlage aktiviert. Die Pumpe wird gestartet und das Wasser strömt aus den Düsen. Bei dieser Art der Auslösung können mehrere Düsenköpfe in einer Gruppe zusammengefasst werden. Dies bedeutet, dass gezielt Düsenköpfe in einzelnen Bereichen ausgelöst werden können. Alle Düsen einer Gruppe müssen an einem Leitungsstrang liegen, der durch ein eigenes Ventilsystem freigegeben wird. Offene Systeme sind stets Trockensysteme, da sie durch ihre Bauart kein Wasser halten können. (3)



Abbildung 11: Offene Hochdruck-Wassernebel-Düsenkopf; Callies Brandbekämpfungssysteme GmbH (45)

Der Vorteil von offenen Systemen ist, dass sie durch die Gruppenauslösung schnell Wassernebel in einem Bereich verteilen. Dies kann bei einer Fehlauslösung oder kleinen Bränden aber auch dafür sorgen, dass es zu einem erhöhten Schaden durch Wasser kommt. Der elektronische Anschluss an die Brandmeldeanlage birgt die Gefahr von Fehlauslösungen durch das ungewollte Anschlagen eines Detektionssystems oder der unbeabsichtigten Betätigung eines Handmelders. (47) Bei geschlossenen Systemen kann eine Fehlauslösung durch ein Bauteilversagen oder durch eine Beschädigung des Düsenkopfes erfolgen.

Ein Vorteil von Wassernebel-Löschanlagen besteht darin, dass sie nach der Auslösung schnell Bereiche mit Wassernebel ausfüllen. Anders als Sprinkleranlagen haben sie keinen eingegrenzten Kegel, sondern versprühen den Nebel gleichmäßiger im Raum. Dies ist besonders bei Niederdruckanlagen der Fall. Die Tropfen des Nebels werden hierbei durch den geringeren Druck weniger stark beschleunigt, sodass sich die gleichmäßigste Wasserverteilung ausbildet. (41)

### 3.5 Auslegung und Löschwasserversorgung

Zu der Auslegung von Wassernebel-Löschanlagen können Vorgaben aus der DIN EN 14972 und den VdS-Richtlinien VdS 3188, VdS CEA 4001 und der VdS 2109 entnommen werden. Im einzelnen Planungsfall ist deren Verbindlichkeit von den Genehmigungsbehörden, Versicherungen und anderen Institutionen abhängig. Auch wenn sie keinen rechtlich bindenden Charakter besitzen, können sie als Orientierung genutzt werden. (48)

Bei der Löschwasserversorgung durch einen Vorratsbehälter kann sich ein Vorteil gegenüber anderen Wasserlöschanlagen ergeben. Durch die effizientere Löschwirkung von Wassernebel können deutlich geringere Volumina für die Erfüllung der notwendigen Löschzeiten aus den

Richtlinien notwendig sein. Hierdurch kann Platz eingespart werden. Dies gilt für die Vorgaben beider Institutionen.

### **3.5.1 DIN EN 14972**

In der Normreihe DIN EN 14972 sind Brandprüfprotokolle enthalten, die Vorgaben an Realbrandversuche stellen. Durch diese soll die Wirksamkeit der Feinsprühtechnik für spezifische Nutzungen nachgewiesen werden. Die Brandprüfprotokolle dürfen nur für die für sie ausgewiesene Nutzung verwendet werden. Die Brandprüfprotokolle geben vor, mit welchen Brandlasten und unter welchen Rahmenbedingungen die Brandversuche durchgeführt werden müssen. Des Weiteren fordert die DIN EN 14972 die Auslegung auf Basis von durch den Hersteller der Anlage erstellten Handbücher für Planung, Errichtung, Betrieb und Instandhaltung. Entscheidend für die Auslegung sind unter anderem die zu schützende Fläche, die Art und Menge an voraussichtlicher Brandlast, die Luftströmungsverhältnisse und die voraussichtliche Löschdauer. Hieraus ergeben sich Anforderungen an die Ausführung der Wasserabgabe, der Fördertechnik, der Stromversorgung und der Löschwasserversorgung. Die Löschwasserversorgung von Wassernebel-Löschanlagen ist laut DIN EN 14972-1 für eine Mindestbetriebszeit zu gewährleisten. Diese errechnet sich aus Faktoren, wie beispielsweise der Nutzung der baulichen Anlage, des vorliegenden Gefahrenpotenzials und der zu schützenden Fläche. Zulässig zur Löschwasserversorgung sind der Anschluss an die öffentliche Wasserversorgung und die Bevorratung von Wasser in Druck-, Zylinder- und Hochbehältern oder eine Kombination aus einem Wasserreservoir und automatischen Feuerlöschpumpen. Für alle diese Versorgungsarten werden in der Norm Anforderungen beschrieben. (8)

### **3.5.2 VdS-Richtlinien**

Die VdS Schadensverhütung beschreibt die Auslegung von Wassernebel-Löschanlagen in den Richtlinien VdS CEA 4001, VdS 3188 und VdS 2109.

Für Hochdruck-Anlagen werden nach VdS 3188 in der Regel Versuche durchgeführt, mit denen der Nachweis für die Wirksamkeit für eine spezifische Anwendung erbracht werden muss. (38)

Für Niederdrucksysteme mit geschlossenen Düsen nach VdS CEA 4001 wird die Auslegung der Anlage in Abhängigkeit von Brandgefahrenklassen festgelegt. Diese berücksichtigen unter anderem die Menge und Art der vorhandenen Brandlasten und die Abmessungen des zu schützenden Bereiches. Hieraus ergeben sich die notwendige Beaufschlagung und die Wirkfläche der Anlage. Es werden zusätzlich Anforderungen für bestimmte Gebäudenutzungen gestellt. (39)

Die VdS 2109 enthält Vorgaben für die Auslegung von Niederdrucksystemen mit offenen Düsen. Hierbei wird zwischen der Wirkfläche der gesamten Löschanlage und der Wirkfläche der einzelnen Gruppen unterschieden. Die Richtlinie enthält Vorgaben für die Wirkflächen, Beaufschlagungen und Betriebszeiten für einzelne Nutzungen. Über Nutzungen, die nicht enthalten sind, muss sich gesondert mit dem VdS beraten werden. (40)

Laut VdS ist generell eine Art der Wasserversorgung zu wählen, die automatisch bei Auslösung der Anlage das Löschwasser freigibt. Nach VdS 3188 ist bei Hochdruck-Wassernebel-Systemen die Löschwasserversorgung durch das öffentliche Wassernetz, Zwischen- oder Vorratsbehälter oder durch Flaschensysteme zulässig. Für Niederdruck-Wassernebel-Anlagen sind laut VdS CEA 4001 und VdS 2109 ist zusätzlich auch die Bevorratung in Luftdruckbehältern möglich. Auch bei Anwendung der VdS-Richtlinien sind Handbücher der Hersteller der Löschsysteme in die Auslegung miteinzubeziehen. (38) (39) (40)

### **3.6 Löschwasserrückhaltung**

Wird im Brandfall Wasser als Löschmittel eingesetzt, wird es in der Regel nicht vollständig verdampft. Das verbleibende Wasser kann dann Schadstoffe enthalten, die eine Gefährdung für die Umwelt und den Menschen haben kann. Dies ist besonders bei baulichen Anlagen, in denen Materialien gelagert oder verarbeitet werden, von denen ein erhöhtes Risiko ausgeht, von Relevanz. Um ein unkontrolliertes Abfließen in die Umgebung zu vermeiden, müssen dann Maßnahmen zur Löschwasserrückhaltung ergriffen werden. Dies kann beispielsweise mit Barrieren erreicht werden, über die das Löschwasser in Behälter geleitet wird. Mit der Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe (LÖRÜRL) wurde 1992 ein Muster für die Regelung dieser Maßnahmen auf Bundesebene erstellt. Sie dient als Orientierung für Regelungen auf Landesebene und wurde zu großen Teilen

von den Ländern übernommen. Hieraus kann man entnehmen, wann Anlagen zur Löschwasserrückhaltung notwendig sind und wie diese dimensioniert sein müssen. Der Berechnung des Rückhaltevolumens werden verschiedenen Faktoren zu Grunde gelegt. Auch die Anlagentechnische Ausstattung des Gebäudes. Ist eine automatische Löschanlage installiert, kann aufgrund des höheren Schutzniveaus das Rückhaltevolumen abgemindert werden. Da durch die effizientere Lösung durch den Wassernebel geringere Löschwassermengen benötigt werden, kann auch die Menge, die insgesamt an Löschwasser anfällt, als geringer angesehen werden. (49)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Anwendung von Wassernebel, durch die geringeren Löschwassermengen, in Bereichen mit Gefahrstoffen im Brandfall weniger kontaminiertes Wasser anfällt als bei anderen Löschenmethoden mit Wasser. Dies verringert die Umweltgefährdung und den Aufwand zum Auffangen des Wassers.

### 3.7 Kosten

Die Kosten für Wassernebel-Löschanlagen lassen sich schwer allgemein beziffern, da jede Anlage für den jeweiligen Anwendungsfall dimensioniert werden muss. Auch der Vergleich mit andern Wasserlöschanlagen, wie Sprinkleranlagen, kann so nur in der konkreten Planungssituation am Objekt gezogen werden. Generell kann man aber einige Punkte festhalten, die die Kosten einer brandschutztechnischen Lösung mit Wassernebel beeinflussen können. Sie sind aber stets von den Rahmenbedingungen abhängig und müssen in der Planungssituation ganzheitlich betrachtet werden. Hierbei muss aufgrund des technischen Aufbaus zum Teil zwischen Nieder- und Hochdruckanlagen unterschieden werden. Für beide Systemtypen gilt, dass die Wirksamkeit der Anlagen zum Teil durch Brandversuche nachgewiesen werden muss. Hierdurch kann es zu erhöhten Planungskosten im Vergleich zu anderen Löschanlagen kommen.

Bei Niederdruckanlagen ergeben sich auf der kostentechnischen Seite mehrere Vorteile. Dadurch, dass die Anlagen nur in geringen Druckbereichen betrieben werden, ist es möglich, die Wasserversorgung durch den Hausanschluss zu erreichen. Notwendig hierfür ist natürlich, dass der Anschluss eine ausreichende Menge an Wasser fördert. Außerdem muss sichergestellt sein, dass an jeder Düse der notwendige Druck anliegt. Ist dies nicht der Fall, besteht die Möglichkeit, dies mit Druckerhöhungsanlagen zu erreichen. Allgemein lässt sich aber sagen,

dass bei kleineren zu schützenden Objekten hierdurch Kosten für aufwendige Anlagentechnik vermieden werden können. Niederdruckanlagen weisen im Vergleich zu Anlagen mit größeren Tropfenspektren den Vorteil auf, dass einige ihrer Komponenten aufgrund des geringeren Wasserbedarfs platzsparender dimensioniert werden können, wodurch die Kosten für den Einbau sinken.

Hochdruckanlagen sind technisch komplexer aufgebaut als Niederdruckanlagen. Um die hohen Drücke zu erreichen, bedarf es ausreichend dimensionierter Pumpentechnik. Außerdem ist es aufgrund der hohen Drücke in den Leitungen notwendig, Edelstahl als Material für die Rohre zu verwenden. Dies sorgt zwar für einen höheren Widerstand gegen Korrosion, ist aber in der Anschaffung teurer als rostfreier Stahl, der für gewöhnlich bei Löschanlagen verwendet wird. Zudem ist es notwendig, das Wasser zu filtern, um eine Beschädigung durch Partikel zu verhindern. (41) Der Vorteil von Hochdruck-Wassernebellöschanlagen ist der geringere Wasserbedarf durch noch effizienteren Einsatz des Löschmittels als bei Niederdruckanlagen. Hierdurch sind bei einigen Komponenten geringere Abmessungen möglich. Auch die Löschwasserbevorratung ist hierdurch reduziert. Dies sorgt dafür, dass Hochdruck-Wassernebel-Anlagen deutlich platzsparender als andere Wasserlöschanlagen installiert werden können. Dies macht sie neben dem Neubau, vor allem beim Bauen im Bestand besonders attraktiv. Nachträglich neuen Raum in bestehenden, möglicherweise historischen Gebäuden zu schaffen, kann sehr kostenintensiv sein. Es lässt sich also sagen, dass obwohl Hochdruck-Wassernebel-Löschanlagen möglicherweise in Hinblick auf die Anlagentechnik die teuerste Option darstellen, abhängig von dem zu schützenden Objekt, eine günstige Lösung sein können.

Auch bei der Löschwasserrückhaltung ergeben sich Vorteile durch Wassernebel-Löschanlagen in Hinblick auf die Kosten. Die geringeren notwendigen Auffangkapazitäten sparen Kosten für Bau und Instandhaltung der Rückhalteanlagen und lassen zu, dass das Grundstück des Gebäudes durch Platzeinsparung potenziell einer intensiveren wirtschaftlichen Nutzung unterzogen werden kann. Im Nachgang eines Brandes ergibt sich der Vorteil, dass durch die effiziente Löschwirkung von Wassernebel weniger kontaminiertes Wasser anfällt und entsorgt werden muss.

Neben den Kosten für die Anschaffung und den Betrieb von Wassernebel-Anlagen kann es der Fall sein, dass durch die Installation einer solchen Anlage andere brandschutztechnische Maßnahmen entfallen können, die ein gleiches Schutzniveau bieten, aber für höhere Kosten sorgen. Dies kann besonders im Bestand der Fall sein, wenn wegen einer nachträglichen brandschutztechnischen Ertüchtigung Änderungen vorgenommen werden sollen, die mit hohen Baukosten, einer weniger effizienten Nutzung der vorhandenen Fläche oder einem erhöhten Personalbedarf einhergehen. Das Baurecht lässt dies über den § 67 der Musterbauordnung zu. Hierbei werden Abweichung von den Vorschriften der Verordnungen zugelassen, wenn das Erreichen des Schutzniveaus in gleichem Maße gewährleistet ist. (50) Ob ein solcher Fall vorliegt, muss im Einzelfall geprüft werden. Auf den Rechtscharakter der Musterbauordnung und deren Inhalt wird in Kapitel 4 genauer eingegangen.

### **3.8 Akzeptanz von Behörden**

Konkrete Stellungnahmen von Behörden zur Anwendung der Wassernebel-Technik lassen sich kaum finden.

Von der Baubehörde Hamburg liegt ein Merkblatt vor, in dem die Ertüchtigung von Treppenräumen bei Bestandsgebäuden aufgrund der Erweiterung des Wohnraumes durch eine Niederdruck-Wassernebel-Löschanlage als möglich erklärt wird. Die wissenschaftliche Grundlage hierfür lieferten Versuche der Technischen Universität Braunschweig in leerstehenden Wohnhäusern in Hamburg. Die Schaffung weiteren Wohnraumes in bestehenden Wohnhäusern sei ohne zweiten Rettungsweg möglich, wenn vor und hinter den Wohnungseingangstüren eine Niederdruckdüse installiert wird. Dies soll nach Ansicht der Behörde im Brandfall für eine ausreichend lange Zeit den Rettungsweg über den Treppenraum gewährleisten. Ob auch weitere Baubehörden in Deutschland diese Ertüchtigung als ausreichend ansehen, ist nicht bekannt. (51)

Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin hat 2006 eine Stellungnahme zu Löschanlagen in Laboren der Sicherheitsstufen S2 und S3 veröffentlicht. Laut dieser sind bei dem Einbau von Löschanlagen in Labore der Sicherheitsstufe S3 Hochdruck-Wassernebel-Löschanlagen zu wählen. Unter bestimmten Bedingungen werden auch Gaslöschanlagen als geeignet angesehen. (52)

### **3.9 Meinungen von Feuerwehren und Erfahrungen aus dem Löscheinsatz**

Zu der Wirksamkeit von Wassernebel-Löschanlagen im Brandeinsatz finden sich keine statistischen Daten in ausreichender Menge und Qualität. Es gibt auch keine offizielle Position zu den Löschsystemen von Vertretern der Feuerwehren. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Anlagen deutlicher seltener als beispielsweise Sprinkleranlagen sind. Hierdurch kann weniger Erfahrung mit der Wirkung von Wassernebel im Brandeinsatz gesammelt werden, sodass sich nur schwer Aussagen über die Wirksamkeit im konkreten Szenario treffen lassen. Auf Verbreitung von Wassernebel-Löschanlagen wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

### **3.10 Aktuelle Technische Anwendung**

Wassernebel-Löschanlagen werden in verschiedenen Bereichen eingesetzt. Zu diesen zählen Industrieanlagen, Bürogebäude, Hotelbetriebe, Versammlungsstätten, Krankenhäuser, Labore, Hochhäuser und Großküchen. Auch in Kabelkanälen oder in Lagerhallen an Hochregalen kommen sie zum Einsatz. Außerhalb von baulichen Anlagen finden die Systeme auch auf Schiffen Verwendung. (53) (54) (55)

Über die genaue Anzahl der Löschanlagen in den einzelnen Anwendungsbereichen liegen keine Daten vor. In einer Statistik der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes ist jedoch die Anzahl der jährlich neu installierten oder erweiterten Anlagen zwischen den Jahren 2003 und 2015 erfasst. Daraus geht hervor, dass die Löschanlagen im Vergleich zu den konventionellen Sprinklersystemen deutlich seltener installiert und erweitert werden. Allerdings wurden hierbei nur Anlagen von Errichtern mit VdS-Anerkennung aufgenommen. Dadurch ist es wahrscheinlich, dass die Zahlen auch bei den Wassernebel-Anlagen höher liegen. Eine präzise Aussage über das Verhältnis zwischen den Neuzulassungen der unterschiedlichen Löschsysteme lässt sich also nicht treffen. (56)

Jahr	Wasserlöschanlagen gesamt	Sprinkler	Wassernebel

2003	1680	1612	9
2004	1715	1625	6
2005	1756	1662	12
2006	1867	1735	21
2007	1857	1743	42
2008	1735	1618	36
2009	1295	1217	32
2010	1333	1244	36
2011	1473	1405	22
2012	1498	1406	36
2013	1392	1305	35
2014	1439	1328	37
2015	1536	1435	37

*Tabelle 3: Anzahl der Neuinstallationen und Erweiterungen pro Jahr; eigene Darstellung nach Festag,  
Döbbeling (56)*

## 4 Anwendung auf die Nutzungsbeispiele Krankenhäuser/Pflegeheime und Versammlungsstätten

Bei der brandschutztechnischen Bewertung von baulichen Anlagen müssen in Deutschland stets die Schutzziele des Brandschutzes im Blick behalten werden. Grundlage hierfür bietet der § 14 der Musterbauordnung. Die Schutzziele lauten:

- Der Entstehung eines Brandes und der Entwicklung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) muss vorgebeugt werden.
- Bei einem Brand muss die Rettung von Menschen und Tieren möglich sein.
- Bei einem Brand müssen wirksame Löscharbeiten möglich sein.

(50)

Diese Schutzziele sind allgemein für alle Arten von baulichen Anlagen gültig. Bei Bauvorhaben mit speziellen Nutzungen müssen aufgrund von besonderen Gegebenheiten, die sich aus der Nutzung ergeben, auch besondere Vorkehrungen zur Erfüllung der Schutzziele ergriffen werden. Dies ist auch im Baurecht berücksichtigt. Für einige Nutzungen gelten gesonderte Verordnungen, die die allgemeinen Bauordnungen ergänzen.

In Deutschland wird das Baurecht auf Landesebene festgelegt. Daher gibt es in den Bundesländern unterschiedliche Anforderungen an den Bau und Betrieb von baulichen Anlagen. Allerdings gibt es auf Bundesebene Musterbauordnungen, die von der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) erstellt und veröffentlicht werden. Diese haben keinen rechtlich bindenden Charakter, werden aber von vielen Ländern in Teilen übernommen oder als Orientierung genutzt, wenn keine vergleichbaren Regelungen auf Landesebene festgeschrieben sind. (57)

Für die folgenden Nutzungen als medizinische Einrichtung und Versammlungsstätte wurden von der Bauministerkonferenz eigene Musterverordnungen erstellt, die eine Ergänzung der Musterbauordnung (MBO) darstellen. Bei Krankenhäusern handelt es sich hierbei um das Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Krankenhäusern (KhBauVO). Für Versammlungsstätten gibt es die Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (MVStättVO).

In dieser **Studie** werden diese Musterverordnungen als Referenz für das Baurecht verwendet. Der Grund hierfür ist die mangelnde Einheitlichkeit des Baurechts auf Bundesebene in

Deutschland. Deshalb dienen sie dazu, einen groben Überblick über die Rechtslage in Deutschland in Bezug auf den Brandschutz liefern zu können. Tatsächlich gültiges Recht muss aber auf Landesebene betrachtet werden.

Im Folgenden werden die besonderen Bedingungen, die sich aus den Nutzungen als Krankenhaus/Pflegeheim und Versammlungsstätten ergeben, dargestellt und mögliche Vor- und Nachteile der Anwendung von Wassernebel-Löschanlagen in Gebäuden der beiden Nutzungen erörtert.

## 4.1 Krankenhäuser/Pflegeheime

### 4.1.1 Besonderheiten der Nutzung als Krankenhaus/Pflegeheim

In der brandschutztechnischen Betrachtung von Krankenhäusern müssen besondere Aspekte beachtet werden, die in dieser Form nicht bei anderen Nutzungen auftreten. Diese betreffen die Brandentstehung, Evakuierung und Brandbekämpfung.

In einer Statistik über Brände in deutschen Krankenhäusern des bvfa – Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. lassen sich Rückschlüsse auf häufige Ursachen von Bränden ziehen. In Tabelle 4 ist ein Teil der Ergebnisse zusammengefasst. Hierbei muss aber angemerkt werden, dass die Statistik nur einen Teil der Brände erfasst. Es gibt auch Schwankungen bei der Anzahl der jährlich erfassten Brände. Dennoch erlaubt sie einen Einblick in das Brandgeschehen in deutschen Krankenhäusern. (58)

Jahr	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Ge-samt-anzahl Brände	40	7	6	7	24	45	51	64	49
In Patien-tent-zim-mer	3	1	2	2	11	11	19	33	29
Brand-stif-tung	5	0	1	2	2	8	4	6	9

Ver-mu-tete Brand-stif-tung	2	0	0	1	0	3	5	9	9
Tech-nische Ursache	12	1	1	0	4	4	12	9	9
Fahr-lässig-keit	5	1	3	2	6	6	7	7	4
Unbe-kannte Ursache	16	5	1	2	12	24	23	33	18

*Tabelle 4: Ursachen für Brände in Krankenhäusern in Deutschland; bvfa – Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. (58)*

Als häufige Ursachen lassen sich, neben technischen Defekten, Brandstiftungen durch Patienten oder andere Personen und fahrlässiges Verhalten erkennen. Es liegt auch eine hohe Zahl an unbekannten Ursachen vor. Hierbei ist zu beachten, dass ein Krankenhausaufenthalt Menschen in besondere emotionale Situationen versetzen kann. Diese können durch schwerwiegende Diagnosen, Schmerzen oder durch lange Aufenthalte hervorgerufen werden. In psychiatrischen Einrichtungen sind Menschen mit zum Teil starken psychischen Erkrankungen untergebracht, die eine Neigung zu Brandstiftung oder Vandalismus entwickeln können oder auch durch suizidale Absichten eine Gefahr für sich und andere darstellen. In Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen sind auch häufig ältere Menschen untergebracht, die sich durch Demenz in verwirrten Zuständen befinden. Erschwerend kommt auch hinzu, dass Menschen aus mangelnder Beweglichkeit bei dem unerlaubten Umgang mit Feuer ungewollt einen Brand verursachen können. Dies lässt die Annahme zu, dass sich in medizinischen Einrichtungen häufiger Menschen aufhalten, deren Verhalten durch die akute Situation oder Erkrankungen eine besondere Gefahr in Bezug auf die Verursachung von Bränden darstellen können.

Eine weitere Problematik ergibt sich aus der Verfügbarkeit von hoch konzentriertem Sauerstoff und Alkohol in Form von Desinfektionsmittel in Behandlungs- und Patientenzimmern.

Diese beiden Stoffe können die Brandentstehungsgeschwindigkeit erhöhen. Ein Beispiel hierfür ist ein Brand in einer Klinik in Mönchengladbach im Jahr 2019. Ein Patient hatte seine Beatmungsmaske abgesetzt und neben ihr eine Zigarette geraucht. Es kam zu einer Entzündung seines Bettes, in deren Folge er verstarb. (59)

Den erhöhten Gefahren der Brandentstehung und einer beschleunigten Brandentwicklung durch Alkohol und Sauerstoff stehen in medizinischen Einrichtungen erschwerte Bedingungen bei der Evakuierung von Patienten gegenüber.

Viele Patienten sind durch Verletzungen, Krankheiten oder hohes Alter mobilitätseingeschränkt. Manche befinden sich zusätzlich in kritischen Verfassungen und bedürfen einer besonderen Sorgfalt bei dem Transport. Bei anderen Patienten können sich aufgrund ihrer psychischen Verfassung mit erhöhtem Risiko Panikreaktionen entwickeln. Dies führt dazu, dass eine Räumung des Gebäudes sehr personalaufwendig ist. In Krankenhäusern und Pflegeheimen sind aber auf die Anzahl der Patienten gerechnet in der Regel nur wenige medizinisch ausgebildete Personen anwesend. (60)

Aus den oben genannten Bedingungen stellen sich zur Erfüllung der Schutzziele des Brandschutzes besondere Anforderungen an den Bau und Betrieb von medizinischen Einrichtungen. Es gilt zu prüfen, ob Teile dieser Problematiken durch den Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen behandelt werden können.

#### **4.1.2 Rechtliche Situation**

In der Musterbauordnung für Krankenhäusern sind stationäre Löschanlagen nicht explizit gefordert. (61)

Aus § 67 MBO lässt sich aber ableiten, dass es möglich ist, andere Anforderungen zu kompensieren und eine Abweichung zuzulassen, wenn das geforderte Schutzniveau erfüllt wird. Außerdem kann es auch vorkommen, dass durch die Genehmigungsbehörde, Feuerwehr oder Gebäudeversicherung ein erhöhtes Sicherheitsniveau gefordert wird oder der Bauherr sich freiwillig für erhöhte Sicherheitsmaßnahmen entscheidet. Hierbei könnte die Anwendung einer Wassernebel-Löschanlage sinnvoll sein. Die tatsächliche Erfüllung der geforderten Wirksamkeit muss dann für den Anwendungsfall nachgewiesen sein. (50)

#### **4.1.3 Mögliche Vorteile von Wassernebel-Löschanlagen**

Ein möglicher Anwendungsort in einem Krankenhaus ist das Patientenzimmer. Um einer schnellen, möglicherweise durch reinen Sauerstoff oder Alkohol geförderten Brandentwicklung entgegenzuwirken, bedarf es einer schnellen Löschwirkung. Wassernebel verbreitet sich schnell nach Auslösung der Anlage im Raum und kann auch in verdeckten Bereichen wirken. Dies trägt besonders dazu bei, den Entstehungsbrand schnell und wirksam einzudämmen. Wassernebel ist nicht gesundheitsschädigend und stellt somit keine Gefahr für Personen dar, die sich im Raum aufhalten. Auch die Raumtemperaturen können dadurch schnell gesenkt und auf einem geringeren Niveau gehalten werden.

Um wie oben beschrieben schnell den Entstehungsbrand zu bekämpfen, bedarf es sensibler Detektions- und Alarmierungstechnik. Dies kann jedoch auch dazu führen, dass es häufiger zu Fehlalarmen kommt. Wenn die Wassernebel-Anlage trotz Sicherheitsstufen wie Zwei-Melder-Abhängigkeiten grundlos auslöst, kommt es aufgrund der geringeren abgegebenen Wassermenge zu kleineren Schäden durch das Löschwasser als bei anderen Wasserlöschsystemen. Auch nach einer Auslösung im Brandfall wäre mit geringeren Löschwasserschäden zu rechnen. Hierdurch könnten auch Schäden an medizinischen Geräten vermieden werden.

Bei Krankenhäusern handelt es sich oft um ältere Bestandsgebäude. Bei einer nachträglichen Erhöhung des Brandschutzniveaus könnten die kleineren Rohrleitungen von Wassernebel-Löschanlagen über bestehende Installationsschächte geführt werden. Hinzu kommt, dass bei Niederdruckanlagen die Möglichkeit besteht, diese mit dem Hauswasseranschluss zu verbinden. Hierbei muss jedoch geprüft werden, ob ein ausreichender Druck auch in höheren Geschossen gewährleistet ist.

#### **4.1.4 Mögliche Nachteile von Wassernebel-Löschanlagen**

Besonders mit Hochdruckanlagen bestehen Schwierigkeiten dabei, einen weiter entwickelten Brand zu löschen, wenn es bereits zu Bildung von Glut gekommen ist. Durch Alkohol und konzentrierten Sauerstoff kann es zu einer Beschleunigung des Entstehungsbrandes kommen, sodass es schneller zu einem weiter entwickelten Brand kommt. Bei einer verzögerten Auslösung der Wassernebel-Löschanlage könnte dies die Löschung des Feuers erschweren.

Besonders bei Hochdruck-Anlagen ist mit einer starken Verschlechterung der Sichtverhältnisse durch die feinen Tropfen und den Wasserdampf zu rechnen. Dieser Effekt dürfte besonders bei längeren Korridoren und größeren Eingangshallen zum Tragen kommen. Dies behindert bei Evakuierung und Löscharbeiten Patienten, Klinikpersonal und Rettungskräfte und hat eine zusätzlich negative psychologische Wirkung. Menschen, die durch Erkrankungen psychisch vorbelastet sind, könnten hiervon besonders betroffen sein.

Bei Hochdruckanlagen ist auch zu beachten, dass die Stabilität der Rauchschicht im oberen Bereich der Räume durch den Tropfenimpuls des Wassernebels gefährdet ist. Dies führt ebenfalls zu einer Verschlechterung der Sichtverhältnisse und fördert die Ausbreitung giftiger Brandgase in untere Luftschichten.

Diese Aspekte können sich negativ auf die Sicherheit der Rettungswege auswirken, da durch die Auslösung einer Wassernebel-Löschanlage im Brandfall deren Begehbarkeit erschwert und die Dynamik von Rauch und Brandgasen nachteilig beeinflusst werden kann.

#### **4.1.5 Aktuelle Beispiele von Anwendungen in Krankenhäusern/Pflegeheimen**

Wassernebel-Löschanlagen sind in einigen Krankenhäusern in Deutschland vorzufinden. Im Bettenhochhaus an der Uniklinik Charité in Berlin wurde eine Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage flächendeckend zum Schutz von Fluren und Patientenzimmern eingebaut. Auch im Uniklinikum Carl Gustav Carus in Dresden wurde eine Hochdruck-Anlage in OP-Sälen, Laboren und Patientenzimmern, aber auch in Technikräumen und zum Schutz der Flucht- und Rettungswege in einem Schwesternheim installiert. Weitere Beispiele für Krankenhäuser mit Wassernebel-Löschanlagen sind das Krankenhaus Ernst von Bergmann in Potsdam, das Uniklinikum Marienhospital in Herne und das Rotkreuz Krankenhaus in München. (62)

### **4.2 Versammlungsstätten**

#### **4.2.1 Besonderheiten der Nutzung als Versammlungsstätte**

In der Musterverordnung für Versammlungsstätten sind Versammlungsstätten unter anderem als bauliche Anlagen oder Teile baulicher Anlagen, in denen sich viele Menschen bei Ver-

anstaltungen gleichzeitig aufhalten, definiert. Daraus folgt, dass im Brandfall auch eine größere Anzahl an Personen als bei anderen Nutzungen evakuiert werden müssen. Häufig handelt es sich hierbei um größere Gebäude wie zum Beispiel Theater, Konzerthäuser oder Kongresszentren. In derartig genutzten Gebäuden befinden sich häufig Räume mit großen Abmessungen in der Höhe und der horizontalen Ausdehnung. Hieraus ergibt sich ein erhöhter Aufwand für die Kräfte der Feuerwehr bei der Suche nach vermissten Personen, besonders in größeren verrauchten Räumen oder Bereichen, in denen die Sicht durch Objekte wie Bestuhlung oder Präsentationsaufsteller behindert ist. In größeren Räumen kann es im Vergleich zu kleinen Räumen Unterschiede in der Dynamik der Rauch- und Wärmeausbreitung geben.

Durch die großen Abmessungen vieler Versammlungsstätten ist es auch möglich, dass kleinere Entstehungsbrände erst verzögert entdeckt werden. Die Überwachung der baulichen Anlage durch entsprechende Detektionstechnik kann dem entgegenwirken.

In manchen Bereichen ist mit einer erhöhten Brandlast aufgrund der Inneneinrichtung zu rechnen. Unter anderem durch Stoffbezüge, Präsentationsmaterial oder Vorhänge.

Mögliche Brandursachen sind Defekte an technischen Anlagen, wie Scheinwerfern oder Tontechnik, Pyrotechnik oder Fahrlässigkeit von Besuchern oder Personal.

Zum Teil ist in Versammlungsstätten teure Veranstaltungstechnik vorhanden. An dieser gilt es Schäden zu minimieren. Sowohl für die Kosten im Falle der Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit als auch die Kosten für einen etwaigen Betriebsausfall.

Bei Veranstaltung mit erhöhter Brandgefahr oder bei Großbühnen muss für die Dauer der Veranstaltung eine Brandsicherheitswache der Feuerwehr oder eine vergleichbar ausgebildete Person vor Ort sein. (63)

#### **4.2.2 Rechtliche Situation**

Laut der Musterbauordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (63) müssen Versammlungsstätten mit Versammlungsräumen mit einer Grundfläche von mehr als 3.600 m<sup>2</sup> eine automatische Löschanlage haben. Ausgenommen sind Versammlungsstätten, in denen die Versammlungsräume jeweils nicht größer als 400 m<sup>2</sup> sind. Außerdem sind in Ver-

sammlungsräumen ab einer Höhe der Fußbodenebene von 22 m über Gelände, in Versammlungsräumen in Kellergeschossern ab einer gewissen Tiefe und Fläche und bei offenen Küchen in Versammlungsräumen ab einer Fläche von 30 m<sup>2</sup> automatische Löschanlagen vorgeschrieben. Großbühnen müssen mit einer Sprühwasserlöschanlage ausgestattet sein, die auch den Schutzvorhang beaufschlagt.

Bestimmte bauliche Anforderungen entfallen bei Versammlungsstätten mit automatischen Löschanlagen. Diese betreffen unter anderem den Feuerwiderstand von tragenden und raumabschließenden Bauteilen.

Hinzu kommt, dass durch den § 67 der Musterbauordnung, wie bereits in Kapitel 4.1.2 beschrieben, auch Abweichungen durch die Installation einer automatischen Wasserlöschanlage möglich sein können. (50)

#### **4.2.3 Mögliche Vorteile von Wassernebel-Löschanlagen**

In der Vergangenheit kam es häufig zu Wasserschäden in Theatern und Veranstaltungsräumen. Besonders häufig war dies bei im Bühnenbereich vorgeschrieben Sprühwasserlöschanlagen der Fall. Ein Beispiel hierfür ist das Theater der Stadt Duisburg. Hier wurde vermutlich durch Fehler bei Instandhaltungsarbeiten die Sprühwasserlöschanlage im Bühnenbereich ausgelöst. Dies sorgte dafür, dass ca. 80 m<sup>3</sup> Wasser freigesetzt wurden und die Bühne und Bühnentechnik beschädigten. Die Folge war ein eingeschränkter Spielbetrieb über Monate und geschätzte Sanierungskosten in Höhe von 2.128.000 Euro. (47) (64) Es gibt viele Ursachen, die zu einer Fehlauslösung führen können. Hierzu zählt die Aktivierung von Detektionsgeräten durch Luftverschmutzungen bei Bauarbeiten, bei Aufführungen mit künstlichem Nebel oder durch Pyrotechnik. Auch die unbeabsichtigte Betätigung von Handdruckmeldern oder die unsachgemäße Durchführung von Wartungsarbeiten können die Auslösung von Löschanlagen verursachen. Bessere Aufklärung der beteiligten Personen über die Funktionsweise der Löschanlagen minimiert zwar die Risiken von Fehlauslösungen, dennoch lassen sich diese nie gänzlich ausschließen. Durch die geringeren Durchflussraten von Wassernebel-Löschanlagen könnten die Schäden an Bauteilen und der Veranstaltungstechnik im Falle einer Fehlauslösung minimiert und so die Gefahr von hohen Kosten für Instandsetzungsmaßnahmen und Betriebsausfälle reduziert werden.

Besonders bei Versammlungsstätten in älteren Bestandsbauten kann es aufwändig sein, nachträglich die Brandsicherheit zu erhöhen. Durch die kompakteren Abmessungen der Anlagen-technik könnte durch die Installation einer Wassernebel-Löschanlage eine wirtschaftliche Lösung gefunden werden, die sich möglicherweise auch gut optisch in die bestehende Architektur eingliedern lässt und das Erfüllen der Schutzziele ermöglicht.

Aus Versuchen kann man ableiten, dass Wassernebel zumindest unter den richtigen Bedingungen als Barriere gegen die Ausbreitung von Rauch angewendet werden kann. (34) Es ist vorstellbar, dass dies auch in Versammlungsstätten angewendet werden könnte. Im Gegensatz zu festen Raumunterteilungen wie Wänden und Rauchschutztüren ließe sich eine solche Anlage leichter in den Raum integrieren und würde auch den Veranstaltungsbetrieb in den betroffenen Räumen in geringerem Maße behindern. Die Wirksamkeit einer solchen Anwendung muss aber für den konkreten Fall, in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse geprüft werden.

Entscheidungen für bestimmte Brandschutzmaßnahmen aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit oder ihres höheren praktischen Nutzens dürfen allerdings nur bei Gewährleistung eines angemessenen Schutzniveaus getroffen werden.

Im Bereich von Großküchen in Versammlungsstätten wäre der Einsatz von Wassernebel möglich. Die in Kapitel 2.3.3 beschriebene Fähigkeit des Wassernebels, Fettbrände ohne die Gefahr einer Fettexplosion zu bekämpfen, könnte in Bereichen mit Industriefritteusen von Vorteil sein.

#### **4.2.4 Mögliche Nachteile von Wassernebel-Löschanlagen**

Auch bei Versammlungsstätten besteht die Problematik, dass die durch Wassernebel und die Verwirbelung von Rauch hervorgerufenen Sichtbehinderungen die Rettungswegsituations beeinträchtigen. In großen Hallen mit Emporen oder offenen Treppenräumen könnte die Rauchausbreitung zusätzlich verstärkt werden, wenn der Wassernebel einen zu starken Impuls auf die Rauchschichten ausübt. Hier besteht auch die Gefahr, dass sich der Rauch in niedrigere Ebenen ausbreitet. Neben der Gefährdung durch die stärker verteilten Rauchgase könnten hierdurch Panikreaktionen hervorgerufen werden. Bei großen Personenströmen könnte dies

die Gefahr erhöhen, dass sich Flüchtende gegenseitig verletzen und die Evakuierung behindern. Besonders bei ortskundigen Personen würde es eine Verschlechterung der Sicht erschweren, den vorgesehenen Rettungswegen zu folgen.

Auch ist fraglich, ob die schnelle Ausbreitung des Löschmittels und effiziente Löschwirkung, die in Versuchen festgestellt werden konnte, auch in Gebäuden mit größeren Raumvolumina in diesem Maße zur Geltung kommt. Problematisch könnten hierbei Düsen sein, die an hohen Decken montiert wären und deren Wassernebel auf dem längeren Weg bis zum Brandherd stärker durch Luftströmungen beeinflusst würde. Allerdings liegen hierzu keine Daten aus größer angelegten Brandversuchen vor.

#### **4.2.5 Aktuelle Beispiele von Anwendungen in Versammlungsstätten**

Wassernebel-Löschanlagen finden in Versammlungsstätten Anwendung. Ein Beispiel hierfür ist das alte Hallenbad in Heidelberg. Hierbei handelt es sich um ein denkmalgeschütztes Gebäude, das nach einer Sanierung für Veranstaltungen, Gastronomie, Einzelhandel und Hotelbetrieb genutzt wird. Hier wurde eine Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage zur Verhinderung des Brandüberschlags in andere Geschosse, sowie zur Sicherung von Flächen, wie beispielsweise Großküchen und der Tiefgarage, installiert. (53) Im Theater Kammerspiele in Berlin wurde eine Niederdruck-Wassernebel-Löschanlage im Bühnenbereich installiert. (65)

## 5 Vor- und Nachteile HDWN vs. Sprinkler in Kürze

### 5.1 Eindeutige Vorteile HDWN

- Fehlauslösung einer HDWN führt wegen des geringeren Wasserdurchsatzes zu geringeren Schäden
- Einbau einer HDWN-Anlage bei stark beengten Bedingungen möglich, da die Rohrdurchmesser der Leitungen kleiner sind
- Statische Anforderungen an die Deckenlast ist beim Einbau einer HDWN-Anlage geringer als bei Sprinkleranlage

### 5.2 Eindeutige Nachteile HDWN

- Einsatz in Fluchtwegen nur bedingt möglich, da die Sicht stark beeinträchtigt wird
- Aufwendigere Anlagentechnik (i.d.R. zweistufige Hochdruckpumpen)
- Montage der HDWN – Anlage (z.B. bei der Verrohrung) stellt höhere Anforderungen an Umgebung (staubfrei)

## 6 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus den ausgewerteten Quellen und eigenen Schlussfolgerungen zusammengefasst.

Es wurden bei der Wirkung von Wassernebel positive und negative Erkenntnisse aus Versuchsberichten gewonnen. Allgemein lässt sich hierbei sagen, dass weitere Versuche mit größeren Versuchsräumen und weiteren Brandmaterialien eine deutlichere Aussagekraft erzeugen würden. Die betrachteten Versuche fanden in kleinen Brandräumen statt, bei denen unter anderem die Wirkung von Strömungen nicht direkt auf größere Raumvolumina übertragen werden kann.

Bei der Wirkung auf Feuer konnten gute Ergebnisse bei Feststoffen, Flüssigkeiten und Fetten festgestellt werden. Mit Hilfe von Wassernebel konnten Brände dieser Stoffe mit geringeren Wassermengen als bei anderen Löschanlagen gelöscht werden. Es ergaben sich hierbei aber Probleme bei der Löschung von Glut durch Hochdruckwassernebel. Bei Brennspiritus wurden längere Löschzeiten festgestellt, dennoch war der Wassernebel in der Lage, den Brand frühzeitig einzudämmen. Als nicht geeignet hat sich Wassernebel bei Metallbränden erwiesen. Zu Gasbränden konnten keine ausreichenden Untersuchungen gefunden werden, allerdings ist es möglich, dass sich hierbei Probleme beim Löschen, von unter hohem Druck stehenden Gasen, durch die Ableitung des Wassernebels ergeben.

Wassernebel kann effektiv zur Abschirmung von Wärmestrahlung verwendet werden und mit Hilfe von Wassernebel können hohe Raumtemperaturen schnell gesenkt werden. Der Temperaturabfall kann sowohl negative als auch positive Wirkungen auf die Rauchableitung und Rauchausbreitung haben. Die Senkung der Raumtemperatur und die Verringerung der Wärmestrahlungsintensität wirken sich jedoch positiv auf den Feuerwiderstand von Bauteilen aus.

Stabile Rauchschichten können insbesondere von Hochdruck-Wassernebel verwirbelt werden, was zu einer verstärkten Rauchausbreitung über die Höhe eines Raumes führt. Es hat sich aber auch gezeigt, dass Wassernebel unter günstigen Umständen in der Lage ist, als Barriere gegen Rauch zu fungieren. Dies kann allerdings durch Luftströmungen beeinträchtigt zu werden.

Die feinen Tropfen von Wassernebel, besonders von Hochdruck-Anlagen, Wasserdampf und Rauch können starke Sichtbehinderungen verursachen, durch die die Begehbarkeit von Rettungswegen beeinträchtigt wird.

Durch die geringeren Wassermengen, die durch Wassernebel-Löschanlagen versprüht werden, sinkt auch der Schaden durch Löschwasser im Falle eines Brandes oder einer Fehlauslösung.

Bei der Untersuchung der Technik von Wassernebel-Löschanlagen wurde festgestellt, dass Wassernebel-Löschanlagen im Allgemeinen anhand ihres Betriebsdrucks in Hoch- und Niederdruck-Wassernebel-Löschanlagen kategorisiert werden. Dies ist allerdings nicht mehr in der aktuellen DIN EN 14072 enthalten. Der VdS nimmt diese Unterscheidung vor und ordnet die Niederdruck-Anlagen in Abhängigkeit ihrer Auslösungssysteme den Richtlinien für Sprinkler- und Sprühflut-Löschanlagen zu.

Für die Funktion von Hoch- und Niederdruck-Anlagen werden zum Teil unterschiedliche Komponenten benötigt. Niederdruck-Wassernebel-Anlagen können beispielsweise bei ausreichendem Druck ohne Pumpentechnik an das Hauswassernetz angeschlossen werden.

Wassernebel-Löschanlagen können als geschlossene und offene Systeme ausgeführt sein. Geschlossene Systeme werden über thermische Elemente an den Düsenköpfen ausgelöst. Bei offenen Systemen erfolgt die Auslösung manuell oder wird über eine Brandmeldeanlage, die durch Branddetektionstechnik ausgelöst wird, gesteuert. Geschlossene Systeme können in einzelnen Gruppen ausgelöst werden.

Die Auslegung der Löschanlagen kann auf Grundlage der Vorgaben von DIN-Normen oder VdS-Richtlinien erfolgen. Zur Erbringung des Nachweises der Eignung einer Anlage sind unter anderem Brandversuche notwendig. Aus der Auslegung einer Anlage ergeben sich auch Vorgaben für die Löschwasserversorgung. Diese kann durch das öffentliche Leitungsnetz oder Löschwasservorratsbehälter erfolgen. Aus dem geringeren Löschwasserbedarf ergeben sich geringere Volumina für die Löschwasserbevorratung, aber auch für die Löschwasserrückhaltung nach der Löschwasserrückhalterichtlinie.

Die Kosten für die Errichtung und den Betrieb von Wassernebel-Löschanlagen lassen sich nicht pauschal beziffern, da eine Anlage immer den lokalen Bedingungen entsprechend ausgelegt werden muss. Es lässt sich aber sagen, dass Kosteneinsparpotenziale durch die geringen Abmessungen von Rohrleitungen, Löschwasserbehältern und Löschwasserrückhaltungsmaßnahmen gegenüber anderen Wasserlöschanlagen bestehen. Durch den Einsatz von Wassernebel können andere Anforderungen kompensiert werden, die höhere Kosten verursachen. Bei Hochdruck-Wassernebel-Anlagen ist aufgrund der höheren Anforderungen an Bauteile und Anlagentechnik mit erhöhten Kosten in der Anschaffung zu rechnen. Sie haben aber in der Regel einen kleineren Platzbedarf als Niederdruckanlagen.

Über die Akzeptanz der Löschanlagen bei Behörden und den Feuerwehren gibt es kaum Daten. Die Baubehörde Hamburg hat durch ein Merkblatt die Möglichkeit der Ertüchtigung von Treppenräumen durch Niederdruck-Wassernebel eingeräumt. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin hat sich positiv zur Nutzung von Hochdruck-Wassernebel in Laboren der Sicherheitsstufe S3 geäußert. Von Seiten der Feuerwehren liegen keine Stellungnahmen vor. Es wurden auch keine Erfahrungen aus Brändeinsätzen veröffentlicht.

Wasserlöschanlagen finden heutzutage in Gebäuden unterschiedlicher Nutzung Einsatz und werden auch in kleineren technischen Anlagen und auf Schiffen verbaut. Aus statistischen Daten geht hervor, dass die Anzahl der jährlich neu errichteten und erweiterten Anlagen deutlich unter der von Sprinkleranlagen liegt.

Für die Nutzungsbeispiele Krankenhaus/Pflegeheim und Versammlungsstätten wurden die brandschutzrelevanten Besonderheiten der Nutzungen dargestellt und die baurechtliche Situation in Bezug auf Löschanlagen erläutert. Anschließend wurde anhand dieser Kriterien die Eignung von Wassernebel-Löschanlagen diskutiert.

Hierbei wurde festgestellt, dass der Einsatz von Wassernebel in Krankenhäusern/Pflegeheimen durch eine schnelle Auslösung und Wirkung effektiv Brände in Patientenzimmern einzämmen könnte, ohne dabei hohe Löschwasserschäden zu verursachen. In älteren Krankenhäusern bestünde die Möglichkeit, die Rohrleitungen der Anlagen in bestehende Installationsschächte zu integrieren. Allerdings könnte durch Wassernebel und dessen Wirkung auf Rauch

die Fluchtwegsituation beeinträchtigt werden. Durch Alkohol und reinen Sauerstoff beschleunigte Brände könnten durch Wassernebel schwer zu löschen sein.

In Versammlungsstätten ergibt sich der Vorteil, dass das Risiko hoher Wasserschäden, die häufig durch Wasserlöschanlagen verursacht werden, durch die Wahl einer Wassernebel-Löschanlage verringert würde. Hinzu kommt, dass Wassernebel-Löschanlagen bei älteren Versammlungsstätten leicht integriert werden könnten und beim Einsatz gegen Rauchausbreitung den Veranstaltungsbetrieb weniger als feste Barrieren beeinflussen. Auch in Großküchen könnten sie aufgrund ihrer Fähigkeit, Fettbrände zu löschen, eingesetzt werden. In Versammlungsstätten können sie aber auch die Rettung durch Sichtbehinderung erschweren und es ist nach dem Wissenstand aus den ausgewerteten Quellen unklar, ob sich die Wirkung von Wassernebel auch in großen Räumen effektiv entfaltet.

Es lässt sich abschließend sagen, dass die Anzahl der zur Verfügung stehenden Berichte zur Anwendung und Wirksamkeit von Wassernebel-Löschanlagen zum Teil noch sehr gering ist. In einigen Bereichen besteht noch Bedarf an der weiteren Erforschung der Technik. Dies betrifft insbesondere Gasbrände und den Einfluss der Strömungsverhältnisse in großen Gebäuden und Räumen. Die genauere Erfassung statistischer Daten in Bezug auf die Anwendungsgebiete und die Wirksamkeit in realen Brandeinsätzen durch die Feuerwehren würden ebenfalls eine bessere Bewertung des aktuellen Standes der Technik von Wassernebel-Löschanlagen zulassen. Allerdings kann man feststellen, dass Wassernebel für einige Anwendungsgebiete zur Brandbekämpfung eingesetzt werden kann und sich zum Teil Vorteile gegenüber anderen Löschanlagen ergeben. Da Wassernebel-Löschanlagen in Deutschland erst seit den 1990er Jahren Verwendung finden, ist es wahrscheinlich, dass es in Zukunft noch zu Weiterentwicklungen und Optimierungen der Technik kommen wird.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Balzter S. Wie die Brandschutzrepublik Deutschland ihre Bürger fordert und frustriert: Teure Verordnungen. Frankfurter Allgemeine Zeitung 07.11.2017 [Stand: 17.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/brandschutz-verordnungen-in-deutschland-werden-immer-teurer-15277814.html?printPagedArticle=true#pageIndex\\_2](https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/brandschutz-verordnungen-in-deutschland-werden-immer-teurer-15277814.html?printPagedArticle=true#pageIndex_2).
2. Ehring G. Politik plant Vorsorge / Warum das Wasser in Deutschland knapp wird; 2021 [Stand: 18.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.deutschlandfunk.de/politik-plant-vorsorge-warum-das-wasser-in-deutschland-100.html#b>.
3. bvfa - Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. Merkblatt Wassernebel-Löschanlagen: Technologien, Anforderungen, Anwendungsbereiche; 2013 [Stand: 28.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bvfa.de/181/presse-medien/publikationen/merkblaetter-positionspapiere-informationen/>.
4. Fähnrich A. Sauerstoffreduktion und Ansaugrauchmelder im Datacenter-Bunker. Datacenter Insider 20.06.2020 [Stand: 22.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.datacenter-insider.de/sauerstoffreduktion-und-ansaugrauchmelder-im-datacenter-bunker-a-943673/>.
5. Gressmann HJ. Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz: für Architekten, Bauingenieure und Feuerwehringenieure. 5. Aufl. Tübingen: expert; 2019.
6. Herterich O. Wasser als Löschmittel. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH; 1960.
7. Embacher F. Auf dem Weg vom Eis zum Wasserdampf: Universität Wien [Stand: 23.12.2021]. Verfügbar unter: <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Splitter/VomEisZumWasserdampf/>.
8. Deutsches Institut für Normung e.V. Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Feinsprüh-Löschanlagen: Teil 1: Planung, Einbau, Inspektion und Wartung. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2020 Dezember 2020.
9. Deutsches Institut für Normung e.V. Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 2: Berechnung von mittleren Partikelgrößen/-durchmessern und Momenten aus Partikelgrößenverteilungen. 2018-09. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2018 September 2018.
10. Kunkelmann J. Rauchausbreitung in Treppenräumen ohne und mit Einfluss von ortsfesten Wasserlöschanlagen: Teil 1 [Forschungsbericht Nr. 135]: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH); 2004.

11. Krüger A, Radusch R. Wasserzerstörung in Strahlrohren: Forschungsstelle für Feuerlöschtechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe; 1956 [Stand: 23.11.2021]. Verfügbar unter: [https://www.ffb.kit.edu/download/Krueger\\_Radusch\\_Wasserzerstaebung\\_im\\_Strahlrohr.pdf](https://www.ffb.kit.edu/download/Krueger_Radusch_Wasserzerstaebung_im_Strahlrohr.pdf).
12. Kunkelmann J. Anwendungsbereiche für Wassernebellöschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer Brandgefahrenklasse: Teil 1 [Forschungsbericht Nr. 143]: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH); 2007.
13. Kunkelmann J. Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen: Teil 2 [Forschungsbericht Nr. 160]: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik; 2012.
14. Schilloks O. Wassernebellöschanlagen. Kleine Tropfen mit großer Wirkung. Zeitschriftenaufsatz: Protector & WIK 2017; (4):48.
15. Rat der Europäischen Union. Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Einheiten im Meßwesen und zur Aufhebung der Richtlinie 71/354/EWG; 1979 20.12.1979. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31980L0181> [Stand: 23.12.2021].
16. Kunkelmann J. Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden im Brandfall durch thermische Entlastungsöffnungen und orstfeste Niederdruck-Wassernebellöschanlagen: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH); 2001 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.ffb.kit.edu/download/Verringerung\\_der\\_Temperaturen\\_an\\_Stahl\\_Glasfassaden\\_FFB\\_2001-2.pdf](https://www.ffb.kit.edu/download/Verringerung_der_Temperaturen_an_Stahl_Glasfassaden_FFB_2001-2.pdf).
17. Arvidson M. An evaluation of residential sprinklers and water mist nozzles in a residential area fire scenario [RISE Rapport 2017:40]: RISE Research Institutes of Sweden; 2017 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1166597/FULLTEXT01.pdf>.
18. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Brandklassen. 2016-11. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2005 01.2005.
19. Kunkelmann J. Anwendungsbereiche für Wassernebellöschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer Brandgefahrenklasse: Teil 2 [Forschungsbericht Nr. 144]: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik; 2010.
20. Pfeiffer A. Löschen in der Brandbekämpfung. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2016.
21. Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e.V. Umrechnungsformeln für Biokraftstoffe [Stand: 18.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bdbe.de/daten/umrechnung-und-formeln>.

22. Starke H, Wienecke F, Schütz M. Löschen von Flüssigkeitsbränden als Entstehungsbrand in Lägern mit Hochdruck-Wassernebel: Materialien [Band 64]: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW); 2004 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/lua/mat64\\_web.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/lua/mat64_web.pdf).
23. Kunkelmann J. Entwicklung und Erprobung neuartiger Löschanlagen für den mehrgeschossigen Holzbau zur Brandbekämpfung und Fluchtwegsicherung: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH); 2001 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.ffb.kit.edu/download/Neuartige\\_Loeschanlagen\\_fuer\\_den\\_mehrgeschossigen\\_Holzbau\\_FFB\\_2001-2.pdf](https://www.ffb.kit.edu/download/Neuartige_Loeschanlagen_fuer_den_mehrgeschossigen_Holzbau_FFB_2001-2.pdf).
24. Keutel K. Evaluierung neuer Löschverfahren bei Metallbränden: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge; 2017 [Stand: 21.12.2021]. Verfügbar unter: [https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Forschung/Fo\\_Publikationen/imk\\_ber/imk-bericht\\_189.pdf](https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Forschung/Fo_Publikationen/imk_ber/imk-bericht_189.pdf).
25. Ravigururajan T. S, Beltran M. R. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets. *Fire Safety Journal* 15(1989) 171–181; 1989 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379711289900027>.
26. Zhu P, Wang X, Wang Z, Cong H, Ni X. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain. *Journal of fire sciences*, Volume 33, Issue 4, July 2015, Page 269-289; 2015; [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734904115585796>.
27. Reick M. Türöffnungsprozedur mit einem mobilen Rauchverschluss: Erkennen und Vermeiden eines Backdrafts beim Öffnen von Brandraumtüren. *Deutsche Feuerwehr-Zeitung Brandschutz* 2006; (8):531–5 [Stand: 22.12.2021]. Verfügbar unter: [http://rauchverschluss.eu/0608\\_Reick.pdf](http://rauchverschluss.eu/0608_Reick.pdf).
28. Brein D, Kunkelmann J. Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei Gebäuden moderner Bauweise Teil 1 [Forschungsbericht Nr. 154]: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik; 2010 [Stand: 12.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.ffb.kit.edu/download/IMK\\_Ber.\\_Nr.\\_154\\_Brein\\_Kunkelmann\\_Moderne\\_Bauweise\\_Teil\\_1-36.pdf](https://www.ffb.kit.edu/download/IMK_Ber._Nr._154_Brein_Kunkelmann_Moderne_Bauweise_Teil_1-36.pdf).
29. Dinkov I. Auswirkungen aktiverter ortsfester Wasserlöschanlagen auf die Wirkung natürlicher Rauchabzüge [Forschungsbericht Nr. 165]: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik; 2019 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.ffb.kit.edu/download/IMK%20Ber.%20Nr.%20165%20Dinkov%20Auswirkungen\\_Wasserloeschanlagen\\_NRA.pdf](https://www.ffb.kit.edu/download/IMK%20Ber.%20Nr.%20165%20Dinkov%20Auswirkungen_Wasserloeschanlagen_NRA.pdf).
30. VdS Schadenverhütung GmbH. - Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) [Merblatt zum Brandschutz]; 2013 [Stand: 11.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.fvrl.de/downloads/VdS%20202815%20Mai%202018.pdf>.

31. Bauforumstahl e.V. Feuerwiderstand von Bauteilen aus Stahl [Stand: 07.12.2021]. Verfügbar unter: [https://bauforumstahl.de/upload/documents/brandschutz/nomogramme\\_en.pdf](https://bauforumstahl.de/upload/documents/brandschutz/nomogramme_en.pdf).
32. Kunkelmann J. Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise Teil 2 [Forschungsbericht Nr. 164]: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik; 2013 [Stand: 19.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.ffb.kit.edu/download/IMK\\_Ber.\\_Nr.\\_164\\_Kunkelmann\\_Moderne\\_Bauweise\\_Teil\\_2.pdf](https://www.ffb.kit.edu/download/IMK_Ber._Nr._164_Kunkelmann_Moderne_Bauweise_Teil_2.pdf).
33. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1977 1977-09.
34. Sun J, Fang Z, Tang Z, Beji T, Bart M. Experimental study of the effectiveness of a water system in blocking fire-induced smoke and heat in reduced-scale tunnel tests. *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 56, June 2016, Page 34-44; 2016; [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779815301711>.
35. Zehfuß J, Gößwein L. Projekt 19P002 - Wassernebellöschanlage Rettungsweg: Planung und Durchführung von Realbrandversuchen in einem Abrisshaus im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsleistungen zum Forschungsvorhaben: iBMB MPA TU Braunschweig; 2020.
36. Kunkelmann J. Einsatz von Niederdruck-Wassernebellöschanlagen in Gebäuden: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH).
37. Kleindienst J. Theater ahoi: Löschanlagen sorgen für Millionenschäden auf deutschen Bühnen. Hannoversche Allgemeine 19.01.2018 [Stand: 12.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.haz.de/Nachrichten/Kultur/Uebersicht/Loeschanlagen-sorgen-fuer-Millionenschaeeden-auf-deutschen-Buehnen>.
38. VdS Schadenverhütung GmbH. Wassernebel-Sprinkleranlagen und Wassernebel-Löschanlagen (Hochdruck-Systeme): Planung und Einbau. 2019-10 (02). Köln: VdS Schadenverhütung GmbH; 2019 Oktober 2019.
39. VdS Schadenverhütung GmbH. Richtlinien für Sprinkleranlagen: Planung und Einbau. 2018-01 (06). Köln: VdS Schadenverhütung GmbH; 2018 Januar 2018.
40. VdS Schadenverhütung GmbH. VdS-Richtlinien für Sprühwasser-Löschanlagen - Planung und Einbau. 2021-01. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2021 01.2021.
41. Kunkelmann J. Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen: Teil 1 [Forschungsbericht Nr. 149]: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik; 2010.

42. Minifog EconAqua: Innovative Niederdrucktechnik für effizienten Gebäudeschutz [Stand: 06.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.minimax.com/de/de/technologies/minifog-water-mist-systems/minifog-econaqua/>.
43. Halbstationäre Löschechnik [Stand: 14.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.olivercallies.de/halbstationaere-technik.html>.
44. Schremmer U. Stationäre automatische Wassernebellöschanlagen. Schadensprisma 1999; (2):4–9 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1999/sp\\_1999\\_2\\_1.pdf](https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1999/sp_1999_2_1.pdf).
45. Hochdruck-Wassernebel zur Brandbekämpfung: Wissenswertes und Wirksamkeit [Stand: 22.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.olivercallies.de/wassernebel.html>.
46. Willkommen auf der Homepage der Firma HanseNebel GmbH: Niederdruck-Wassernebel-Löschanlagen [Stand: 21.12.2021]. Verfügbar unter: <https://hansenebel.de/>.
47. Krause W. Brandschutz in Theatern und Opernhäusern: Fehlauslösungen von Wasserlöschanlagen. S+S Report 2020; (1):14–7.
48. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Rechtsverbindlichkeit von Normen [Stand: 13.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/normen-und-recht/rechtsverbindlichkeit-durch-normen>.
49. Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe: LöRÜRL; 1992 [Stand: 19.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bauministerkonferenz.de/suchen.aspx?id=991&o=75909860991&s=L%C3%B6schwasser>.
50. Musterbauordnung: MBO; 2020 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bauministerkonferenz.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=75909860991>.
51. Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen Hamburg. Merkblatt Nachträgliche Wohnraumschaffung bei Bestandsbauten: Sichere Benutzung des Treppenraumes durch Errichtung einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage; 2020 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/content-blob/14603338/4a5edc64dcde6b6fca4f1d15df946b33/data/nachtraegliche-wohnraumschaffung-bei-bestandsbauten-sichere-benutzung-des-treppenraums-durch-errichtung-einer-niederdruck-wassernebelloschanlage.pdf>.
52. Expertenkreis Labortechnik des Ausschusses für Biologische Arbeitsstoffe. Stellungnahme: Löschanlagen und Löschwasserrückhaltung in Laboratorien der Schutz- und Sicherheitsstufen S2 und S3: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; 2006 [Stand: 19.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Geschaefts-fuehrung-von-Ausschuessen/ABAS/pdf/Loeschanlagen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Geschaefts-fuehrung-von-Ausschuessen/ABAS/pdf/Loeschanlagen.pdf?__blob=publicationFile).
53. Stationäre Löschanlagen [Stand: 11.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.olivercallies.de/stationaere-anlagen.html>.
54. Minifog Wassernebel-Löschanlagen [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.minimax.com/de/de/technologies/minifog-water-mist-systems/>.

55. Krankenhäuser: Der Mensch im Mittelpunkt [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.minimax.com/de/de/solutions/infrastructure/hospitals/>.
56. Festag S, Döbbeling EP. vfdb-Brandschadenstatistik: Untersuchung der Wirksamkeit von (anlagentechnischen) Brandschutzmaßnahmen [vfdb TB 14-01]: Technisch Wissenschaftlicher Beirat (TWB) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Branschutzes e.V. (vfdb); 2020 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: [https://www.vfdb.de/fileadmin/download/merkblatt/14-01\\_Technischer\\_Bericht\\_vfdb-Brandschadenstatistik\\_02\\_2020\\_final\\_reduziert.pdf](https://www.vfdb.de/fileadmin/download/merkblatt/14-01_Technischer_Bericht_vfdb-Brandschadenstatistik_02_2020_final_reduziert.pdf).
57. Bauministerkonferenz. Bauministerkonferenz [Stand: 18.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bauministerkonferenz.de/verzeichnis.aspx?id=19173&o=7590986>.
58. bvfa - Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. Brände in Krankenhäusern ab 2013 (Deutschland); 2021 [Stand: 22.10.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bvfa.de/121/the->.
59. Peters G. Nachschwester wollte Patienten noch retten: Mann stirbt bei Feuer in Mönchengladbacher Krankenhaus. RP Online 16.08.2019 [Stand: 13.12.2021]. Verfügbar unter: [https://rp-online.de/nrw/staedte/moenchengladbach/brand-in-moenchengladbach-zigarette-loest-feuer-in-bethesda-klinik-aus\\_aid-45111687](https://rp-online.de/nrw/staedte/moenchengladbach/brand-in-moenchengladbach-zigarette-loest-feuer-in-bethesda-klinik-aus_aid-45111687).
60. Suhr F. Deutsche Krankenpflege am Limit; 2019 [Stand: 14.12.2021]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/infografik/16676/patientenzahl-pro-pflegekraft-im-internationalen-vergleich/>.
61. Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Krankenhäusern: Krankenhausbauverordnung - KhBauV0; 1976 [Stand: 19.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bauministerkonferenz.de/suchen.aspx?id=991&o=75909860991&s=L%C3%B6schwasser>.
62. Knaak T. Bauliche Kompensation mit Hochdruckwassernebel im Krankenhaus: MULTIMON Industrieanlagen GmbH; 2019 [Stand: 17.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.agvbmv.de/wp-content/uploads/2020/09/2019-Knaak-HD-Wassernebel-Krankenhaus.pdf>.
63. Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten: Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättVO; 2014 [Stand: 09.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bauministerkonferenz.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=75909860991>.
64. Klucken P. Theater-Sanierung kostet mehr als 2,1 Millionen. RP Online 11.09.2019 [Stand: 16.12.2021]. Verfügbar unter: [https://rp-online.de/nrw/staedte/duisburg/duisburg-theatersanierung-nach-wasserschaden-kostet-2128000-euro\\_aid-45764465](https://rp-online.de/nrw/staedte/duisburg/duisburg-theatersanierung-nach-wasserschaden-kostet-2128000-euro_aid-45764465).
65. Referenzen Wassernebelanlagen [Stand: 22.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.brandschutz-knopf.de/referenzen/referenzen-wassernebelanlagen/>.