

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Entwicklung von Grundlagen für  
ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der  
erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen  
von Bränden mit Wasser

Teil I - Literaturstudie

147

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

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

Forschungsbericht Nr. 147

Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische  
Methoden zur Berechnung der erforderlichen  
Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser.  
Teil I - Literaturstudie

von

Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl (Projektleiter),

Dr. rer. nat. Georg Pleß

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

Dezember 2007

## BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">147</div>	Titel des Berichtes  Entwicklung von Grundlagen für ingenieur-technische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser. Teil I - Literaturstudie	ISSN:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">0170-0060</div>	
Autoren: Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl, Dr. rer. nat. Georg Pleß	durchführende Institution: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge  Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski		
Nummer des Auftrages:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">54(4/2006)H</div>	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Datum des Berichtes:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">Dezember 2007</div>			
Seitenzahl:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">47</div>	Bilder:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">10*)</div>	Tabellen:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">13</div>	Literaturverweise:
Kurzfassung:  Die Literaturstudie gibt einen Überblick über die im Feuerwehrwesen eingesetzten ingenieur-technischen Methoden zur Berechnung des zum Löschen mit Wasser benötigten Volumenstroms. Dabei wird der Zusammenhang zur Modellierung einer modernen Theorie der komplexen Brandbekämpfungsabläufe erörtert. Auf einzelne Methoden zur Ermittlung der benötigten Löschintensitäten bzw. der Volumenströme wird eingegangen. Zur Schaffung von Grundlagen der ingenieur-technischen Methoden der Feuerwehr bildet die experimentelle Ermittlung der Löschintensitäten weiterhin eine wesentliche Grundlage. Die zur experimentellen Bestimmung von Löschintensitäten bzw. Löschkonzentrationen eingesetzten Methoden werden umrissen. Die Sauerstoffverbrauchskalorimetrie entwickelt sich zu einer Methode, die auch immer mehr zur Beurteilung des Löschprozesses herangezogen wird. Zukünftige Arbeiten müssen sowohl im Kleinmaßstab als auch im Großmaßstab durchgeführt werden und diese Methode nutzen.			
Schlagwörter:  <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">Brandbekämpfung, Berechnung, ingenieur-technische Methoden, Experiment,</div>			

\*) Farbseiteninformationen des Forschungsberichtes auf CD-ROM können bei Kostenerstattung von 5 € beim Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Biederitzer Str. 5, 39175 Heyrothsberge, abgefordert werden.

# INHALTSVERZEICHNIS

## VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER ERKENNTNISSE ZUM LÖSCHEN MIT WASSER</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1.1	Systembetrachtung und Definition	3
2.1.2	Klassifizierung des Löschprozesses und Wirkungsweise des Wassers	6
<b>2.2</b>	<b>Löschintensitäten bei der mobilen Brandbekämpfung der Feuerwehr</b>	<b>9</b>
2.2.1	Bevölkerungsabhängige Volumenströme	10
2.2.2	Volumenströme mit Bezug auf die Brandobjekte	10
2.2.3	Statistische Untersuchungen von Särdaqvist	14
2.2.4	Ableitung von Löschintensitäten aus Brandversuchen	15
2.2.5	Ableitung von Volumenströmen an Hand von theoretischen Ansätzen mittels Gesamtbilanz	17
2.2.6	Theoretische Ansätze zum Löschen in der Gasphase	26
2.2.7	Theoretische Ansätze zum Löschen an Oberflächen der kondensierten Phase	30
<b>3</b>	<b>VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER LÖSCHINTENSITÄTEN</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>42</b>
	<b>LITERATUR</b>	<b>43</b>

## **VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN**

- 2.1 Systembildung
- 2.2 Thermische Dissoziation von Wasser
- 2.3 Massenstrom für Gebäude nach ISO (Insurance Service Office)
- 2.4 Flussrate nach ITRII
- 2.5 Anwendungsrate nach ITRII
- 2.6 Gegenüberstellung der Massenströme durch Särdaqvist [Davis 2000]
- 2.7 Abhängigkeit des Massestromes an Wasser (Massenstrom) von der Raumhöhe nach Royer und Nelson
- 2.8 Konzentration der Komponenten in einem Mehrstoffgemisch
- 2.9 Holzkrippenbrand mit Wärmeübertragung durch Konvektion und verschiedenen Lagen der Brandstoffoberflächen
- 2.10 Freier Wasserfluss auf geneigten Flächen mit Bränden

## **VERZEICHNIS DER TABELLEN**

- 2.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften von Wasser
- 2.2 Anzahl der Schlauchleitungen pro Kopf der Bevölkerung nach Lindner
- 2.3 Korrekturfaktoren zum Konstruktionsfaktor
- 2.4 Faktoren zum Personenfaktor
- 2.5 Vergleich der Ergebnisse von Korrelationsuntersuchungen verschiedener Autoren
- 2.6 Effizienzfaktoren von Särdaqvist für verschiedene Strahlrohre
- 2.7 Löschintensitäten von Wasser und Schäumen bei brennbaren festen Stoffen nach [Lubosch et al. 1985]
- 2.8 Massenstrom für Brandflächen mit unterschiedlicher Gefährdung

- 2.9 Massenstrom zur Wasserkühlung von Gebäuden mit Strahlungsbeaufschlagung
- 2.10 Anteil der Verdampfungsleistung brennender Flüssigkeiten an der HRR
- 2.11 Brandobjekte nach DIN EN 3 für feste Stoffe
- 2.12 Massenströme bei Handfeuerlöschprüfungen
- 2.13 Ergebnisse der Löschversuche nach [Fuchs 1975]

## VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
HRR	Heat Release Rate
IdF LSA	Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
ISO	Insurance Services Office
ITRII	Illinois Institute of Technology Research

Die Dimensionen der physikalischen Größen werden als Potenzprodukt der Länge (L), Zeit (T), Masse (M), Temperatur ( $\Theta$ ), Stoffmenge (N) angegeben.

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Dimension</b>
$A$	Fläche	$L^2$
$B$	Bevölkerungszahl	Stück
$B$	Brandbelastung	$T^{-2} M$
$E$	Energiefreisetzungsrate	$L^2 T^{-3} M$
$\Delta H_H$	Heizwert	$L^2 T^{-2}$
$\Delta H_V$	Verdampfungsenthalpie	$L^2 T^{-2}$
$HRR$	Energiefreisetzungsrate	$L^2 T^{-3} M$
$I$	Löschintensität	$L^2 T^{-1} M$
$L$	Leistung	$L^2 T^{-3} M$
$M$	molare Masse	$M N^{-1}$
$Q$	Gesamtenergie	$L^2 T^{-2} M$
$Q_{Brd}$	Gesamtleistung	$L^2 T^{-3} M$
$Q_{Str}$	Gesamtstrahlungsleistung pro Fläche	$T^{-3} M$
$\dot{Q}_{Brd}$	Brandleistung	$L^2 T^{-3} M$

$\dot{Q}_w$	Löschwasserleistungsaufnahme	$L^2 T^{-3} M$
$T$	Absolute Temperatur	$\Theta$
$V$	Volumen	$L^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$L^3 T^{-1}$
$b$	Breite	$L$
$c_i$	Massenbruch der i-ten Komponente	-
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei p = konstant	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
$d$	Abstand der Strahlungsfläche	$L$
$h$	Höhe	$L$
$k$	mittlere turbulente kinetische Energie	$L^2 T^{-2} M$
$m$	Masse	$M$
$\dot{m}_r$	Massenstrom,	$T^{-1} M$
$\dot{m}''$	Massenstromdichte	$L^{-2} T^{-1} M$
$n$	Stoffmenge	$N$
$p$	hydrostatischer Druck	$L^{-1} T^{-2} M$
$t$	Zeit	$T$
$v$	Geschwindigkeit	$L T^{-1}$

Indizes

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
Brd	Brand
H	Heizwert
Leicht	Leichtschaum
Mittel	Mittelschaum
Schwer	Schwerschaum
St	Stoff
Spr	Sprühstrahl

Ten	Tensid
V	Verdampfung
Voll	Vollstrahl
W	Wasser
g	gaseous
l	liquid
$x, y, z$	Koordinatenrichtung

## 1 EINLEITUNG

Ein Brand stellt eine vom Menschen ungewollte, ungesteuerte Verbrennung dar. Er bildet ein kompliziertes, sich selbst organisierendes System. Die Überführung der ungesteuerten Verbrennung in eine gesteuerte Verbrennung stellt die Hauptaufgabe der Brandbekämpfung dar, um die Rettung von Menschen, die Verhinderung von Umweltschäden und die Erhaltung am Eigentum zu ermöglichen. Das gedankliche Vorausbestimmen der Handlungen der Feuerwehr ist gerade in diesem Fall unabdingbar und erhebt die Forderung nach ingenieur-technischen bzw. ingenieur-wissenschaftlichen Methoden für die mobile Brandbekämpfung und der damit verbundenen mathematisch-physikalischen Beschreibung. Führend auf diesem Gebiet in Europa ist u. a. Schweden, wo an den Problemen der Entwicklung von Modellen für taktische Maßnahmen der Feuerwehr als Teil des „Risk Managements“ intensiv gearbeitet wird [Särdqvist 96, Särdqvist 00, Särdqvist and Holmstedt 01]. Dabei kommt der Ermittlung der Brandbekämpfungsleistung einer Feuerwehr eine besondere Bedeutung zu. Sie wird u. a. durch die Schlagkraft bestimmt, die von [Särdqvist 96] durch die Energieabsorptionsgeschwindigkeit als physikalische Größe definiert wird. Dies führt in der Endkonsequenz für das Wasserlöschverfahren zur Ermittlung des zum Löschen benötigten Wasservolumenstroms bzw. der Löschintensität.

Ebenso ist ein stärker werdender Trend zu beobachten, zumindest z. B. die Leistung einer Werkfeuerwehr bei bautechnischen Brandschutzmaßnahmen als Kompensationskonto zu beachten. Erste Ideen hierzu wurden von [Schubert 79] entwickelt. Diese wurde in der Dissertation von Dehne aufgegriffen und ausgebaut [Dehne 03]. Im Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes werden sie ebenfalls aufgenommen werden [LIBS 06]. Der physikalische Hintergrund dieser Betrachtungen besteht darin, den Einfluss der Löschmaßnahmen auf die Energiefreisetzungsrate zu bestimmen, so dass bei erfolgreicher und schneller Brandbekämpfung mit einer entsprechenden niedrigeren Temperaturbelastung der Bauteile zu rechnen ist.

Noch weit reichender für die Entwicklung von ingenieur-technischen Methoden der Feuerwehr sind die Arbeiten von [Svenson 02] zur Entwicklung einer Theorie der Brandbekämpfungs- und Rettungsabläufe (firefighting and rescue operation) und deren Modellierung. Nach seiner Auffassung kann ein Einsatz der Feuerwehr in folgendem Ablauf zusammengefasst werden:

- Grundverfahren (taktisches Geschehen),
- Brandbekämpfung oder Rettung,

- Kontrolle.

Im Verlauf einer Brandbekämpfung bzw. einer Rettung werden die Grundverfahren als Basisbausteine taktisch so kombiniert, dass Kontrolle erreicht wird. Die Grundverfahren sind z. B. der Einsatz von Druckbelüftungsmaßnahmen, das Löschen von Bränden usw. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung von Grundlagen für ingenieur-technische Methoden zur Berechnung der Löschintensitäten für das Löschen mit Wasser als ein Beitrag zur Erarbeitung dieser Basisbausteine anzusehen. In den folgenden Seiten wird deshalb ein Überblick dazu gegeben.

## 2 STAND DER ERKENNTNISSE ZUM LÖSCHEN MIT WASSER

### 2.1 Theorie

#### 2.2.1 Systembetrachtungen und Definitionen

Um reale Prozesse einer wissenschaftlichen Beschreibung zugänglich zu machen, ist es u. a. notwendig, sich zuerst über die betrachteten Systeme, die beschreibenden Begriffe sowie über notwendige Vereinfachungen zu verständigen. Bei dem Versuch, die Prozesse beim Löschen zu klassifizieren, fällt auf, dass es international sehr unterschiedliche Betrachtungsweisen bei der Begriffsbildung und Systemauswahl zu geben scheint, die entweder vom Gesichtspunkt der Forschungs- und Löschanlagenentwicklung oder aus praktischer Sicht der mobilen Brandbekämpfung gewählt wurden. Hinsichtlich der Beschreibung ist zusätzlich die Tatsache zu beachten, dass die mobile Brandbekämpfung seit Jahrzehnten nur sporadisch im Blickfeld der Forschung lag.

Folgende Begriffe werden international verwandt:

- (fire) suppression – (Brand-) Unterdrückung [Prasad et al. 02]
- (fire) extinguishing – ablöschend [Atreya 93]
- extinction (of fire) – auslöschen [Rashbash 86]
- fire suppression- Löschen der offenen Flammen [Grant and Drysdale 96a]
- fire extinguishment - Unterbindung jeder Verbrennung [Grant and Drysdale 96a]

Nach [Arvindson 06] gibt der NFPA-Standard 750, Ausgabe 2003, folgende Definitionen an:

- Fire control (Brandkontrolle)
  - Begrenzung des Brandes durch Wasserverteilung, so dass die Energiefreisetzungsratesinkt sowie Befeuchtung des angrenzenden brennbaren Materials bei Kontrolle der Deckentemperaturen und Reduzierung der Wärmestrahlung zur Vermeidung von Bauwerksschäden.
- Fire suppression (Brandunterdrückung)
  - scharfe Reduzierung der Energiefreisetzungsrates des Brandes und Verhinderung des Wiederanwachsens des Brandes .
- Fire extinguishment (Brandlöschung)
  - vollständige Unterdrückung des Brandes bis kein Material mehr brennt.

Schon an dieser kleinen Zusammenstellung ist zu erkennen, dass keine einheitliche Begriffsbenutzung bzw. Definition existiert.

Es werden deshalb für den vorliegenden Bericht folgende Definitionen abgeleitet und verwandt.

Um einen Vorgang physikalisch-chemisch beschreiben zu können, wird ein System Brand gebildet, das den interessierenden Bereich von der Umgebung mittels einer Systemgrenze abtrennt. Ändert sich zeitlich der Zustand des Systems, so wird von einem Prozess gesprochen [Muschik 90].

Ein Brand im chemisch-physikalischen Sinn besteht aus mehreren heterogenen Systemen, die aus mehreren Phasen bestehen können, in die Wechselwirkungsprozesse wie chemische Reaktionen, Stoff- und Energieaustausch eingehen. Er besteht aus den Teilsystemen Flamme, Brandstoff und eventuell einer baulichen Hülle.

Eine Flamme ist ein Teilsystem, bestehend aus einem heterogenen, verbrennenden, strömenden Stoff, der aus Gasen, Ruß, Tröpfchen usw. besteht. Der Brandstoff ist ebenfalls ein heterogenes kondensiertes System, bestehend aus dem flüssigen oder festen Ausgangsbrandstoff, der Asche sowie der eventuell vorhandenen Holzkohle oder anderen Bestandteilen. In der kondensierten Phase können ebenfalls chemische Reaktionen wie z. B. Verbrennungsprozesse auftreten. Die Flamme in dieser Betrachtungsweise stellt nichts anderes als eine reagierende Strömung dar. Sie umfasst sowohl die heißen Rauchgase, als auch die gasförmigen oder flüssigen bzw. festen Reaktionsausgangsprodukte.

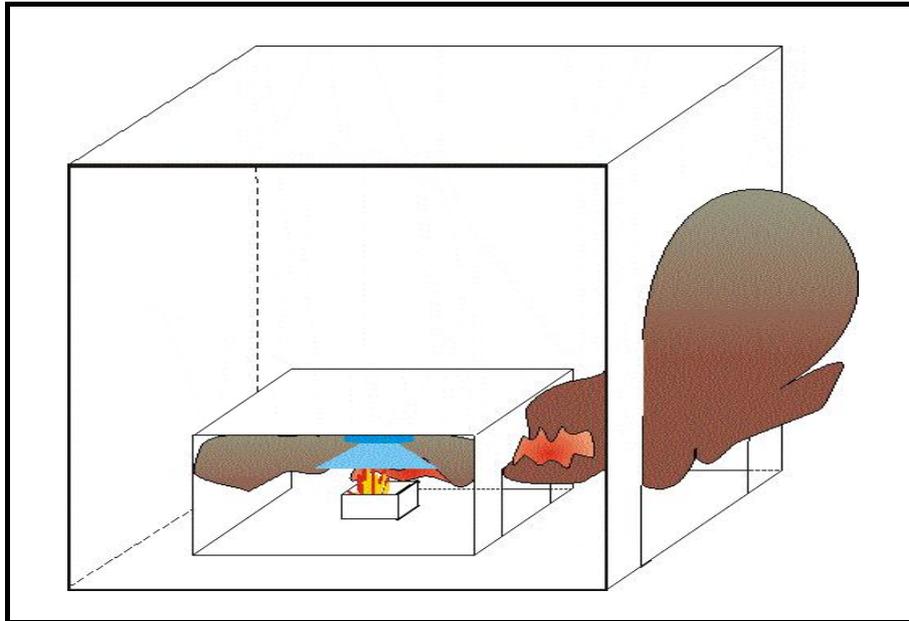
Die bei einem Brand auftretende Verbrennung stellt im Gegensatz zu technischen Verbrennungsvorgängen eine ungesteuerte Verbrennung dar. Die Überführung der ungesteuerten Verbrennung in eine gesteuerte Verbrennung wird in diesem Bericht als Brandbekämpfung bezeichnet. Der Begriff „Brandbekämpfung“ entspricht in dieser Definition somit dem englischen Begriff „fire control“. Er wird im Folgenden als Oberbegriff für das Löschen und die Brandunterdrückung angesehen. Die Brandbekämpfung kann direkt durch Wechselwirkung eines Arbeitsmediums, d. h. eines klassischen Löschmittels wie z. B. Wasser oder durch z. B. beschleunigte Gase beim Sprenglöschen mit dem Brand erreicht werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, diese durch indirekte Wechselwirkung, z. B. durch das Spritzen von Wasser auf heiße Flächen zur Verdampfung von Wasser und der damit verbundenen Inertisierung eines umhüllten Raums durch Wasserdampf, zu erreichen.

Der Begriff „Löschen“ soll den Prozess der vollständigen Unterbrechung der Verbrennung als chemischen Oxydationsvorgang und Stoffaustauschprozess in der Flamme und zwischen bzw. im Brandstoff beschreiben und findet seine englischen Äquivalente in den Begriffen

„extinction“ und „extinguishing“.

Ausgehend von [Atreya 93] soll unter dem Begriff der „Brandunterdrückung“ die dort enthaltene Definition für den englischen Begriff „suppression“ angewandt werden. Der Begriff Brandunterdrückung wird als Prozess der Verringerung der „Brandstärke“ aufgefasst. Der Begriff „Brandstärke“ ist ebenfalls unbestimmt. Er kann in erster Näherung als Energiefreisetzungsrate - Heat Release Rate (HRR) aufgefasst werden [Atreya 93], [Särdqvist 96]. Es sei gleichzeitig darauf hingewiesen, dass die HRR nicht ausreichend sein muss, um den Prozess zu charakterisieren. Es kann durchaus möglich sein, dass z. B. nicht die Verringerung der HRR sondern die Verringerung der Produktion toxischer Brandgase im Vordergrund der Brandunterdrückung steht. In Verallgemeinerung der Definition von [Atreya 93] wird hier unter Brandunterdrückung der Wechselwirkungsprozess eines Löschmittels mit einem Brand verstanden, bei dem der Brand in einen Zustand übergeht, so dass bei der Wechselwirkung mit der Umwelt bzw. der baulichen Hülle dort keine chemisch-physikalischen Veränderungen erzeugt werden, die zur Schädigung bzw. Zerstörung dieser Systeme führen. Diese Definition schließt sowohl die Verringerung der Energiefreisetzungsrate, der Rauchproduktion oder der Brandausbreitung im Sinne einer geometrischen Ausweitung eines Feuers ein. Das Löschen wird damit als ein spezieller Wechselwirkungsprozess aufgefasst. Wird zur Beeinflussung des Brandes ein Löschmittel eingesetzt, dann stellt sich der Prozess der Brandunterdrückung bzw. des Löschens als Wechselwirkung zwischen dem Brand, dem Löschmittel und der Anwendungstechnologie dar. Die Anwendungstechnologie kann als vorgeschriebene Verteilung des Löschmittels in Raum und Zeit aufgefasst und mathematisch durch die Massenstromdichte des Löschmittels beschrieben werden [Atreya 93]. Als Massenstromdichte ist der durch eine Fläche senkrecht hindurch tretende Massenstrom des Löschmittels zu verstehen. Im Feuerwehrwesen wird dieser oft als Löschantensität bezeichnet. Es kann der auf die Brandoberfläche auftreffende Massenstrom sein. Dabei ist festzustellen, dass diese Definition nicht überall angewandt wird. Aus praktischen Gründen wird auch der auf die Grundfläche des Brandraums bezogene Löschmittelmassenstrom oder der in einem Raum durch eine beliebige Fläche hindurch tretende benutzt. Die Brandbekämpfung stellt somit einen funktionellen Zusammenhang zwischen dem Brand, der Löschantensität und der Verteilung dieser in Raum und Zeit her. Ziel ist es, diesen Zusammenhang mathematisch beschreiben zu können. Für die Verteilung der Löschantensität in Raum und Zeit ist als äquivalenter Begriff aus dem Feuerwehrwesen hierfür der Begriff „Taktik der Brandbekämpfung“ anzusehen. Wie oben schon erwähnt, ist zur Beschreibung eines Brandes notwendig, mindestens zwei Teilsysteme zu betrachten. Das

ist zum einen das Feuer und zum anderen die restliche Umgebung. Findet der Brand in einer baulichen Hülle statt, so muss diese im Allgemeinen als zusätzliches System einbezogen werden. Das Löschmittel stellt ein weiteres System dar, das bei der Beschreibung von Brandunterdrückungs- und Löschvorgängen beachtet werden muss. Im Bild 2.1 ist dieser Sachverhalt kurz skizziert.



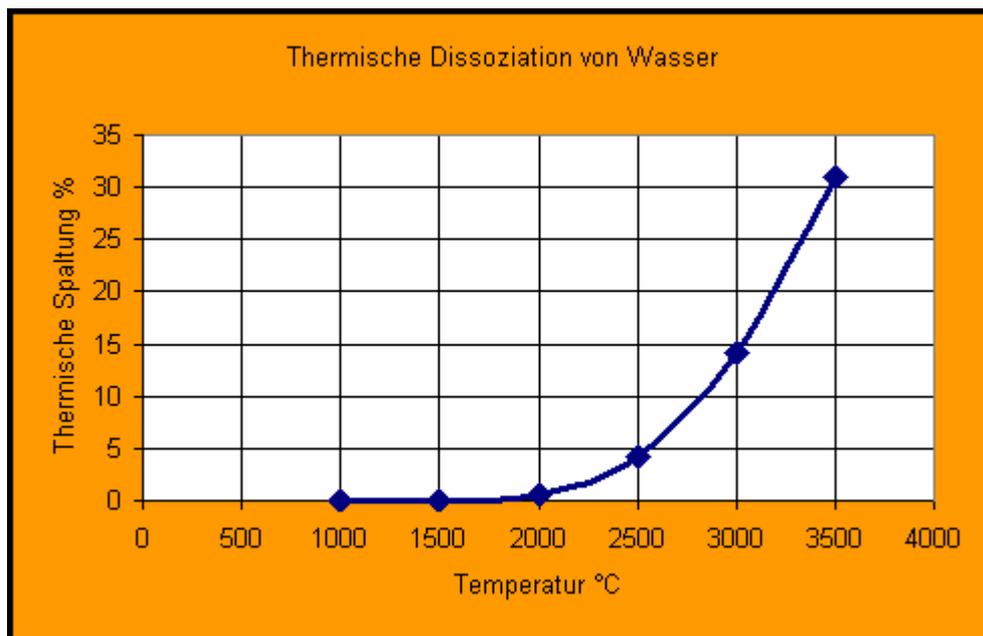
**Abbildung 2.1:** Systembildung

### **2.1.2 Klassifizierung des Löschprozesses und Wirkungsweise des Wassers**

Jeder Löschprozess kann nach der Art der Wechselwirkung des Löschmittels mit dem Brand in chemische und physikalische Wechselwirkungen eingeteilt werden. Diese Einteilung spielt insbesondere bei der Beurteilung des Löschens der Flamme eine wichtige Rolle [Ewing et al. 95]. Eine weitere Einteilung bezieht sich auf die Wechselwirkung mit den Teilsystemen. Tritt das Löschmittel mit der Flamme in Wechselwirkung so wird dies als Volumenlöschen bezeichnet. Dabei kann die Wechselwirkung durch Befüllen eines Raumes (globale bzw. indirekte Wirkung) oder durch lokale oder direkte Wechselwirkung erreicht werden. Diese Klassifizierung entspricht der von [Novozhilov 02, Novozhilov 07] eingeführten Gaslöschung. Erfolgt die Wechselwirkung in der kondensierten Phase, so wird vom Oberflächenlöschen gesprochen. Dies entspricht der in [Novozhilov 02, Novozhilov 07] definierten Oberflächenlöschung. Beim Löschen mit Wasser bestehen somit zwei unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten des Löschmittels. Es hat sich in Versuchen gezeigt, dass es eine kritische Löschmittelmassenstromdichte (Löschintensität) gibt, unter der keine

Möglichkeit besteht, eine Löschung zu erreichen [Hirst 89].

Wasser besitzt aufgrund seiner chemisch- physikalischen Eigenschaften, wesentliche Voraussetzungen, um bei Bränden in die Verbrennungsreaktion eingreifen zu können. Zunächst besitzt Wasser eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität und eine hohe Verdampfungswärme und kann damit die Wärme der Verbrennungsreaktion aufnehmen. Gleichzeitig ist es thermisch äußerst stabil und beginnt erst oberhalb von 1800 °C merklich zu dissoziieren.



**Abbildung 2.2:** Thermische Dissoziation von Wasser

Es kann damit die freigesetzte Energie einer Verbrennungsreaktion sicher aufnehmen ohne dabei selbst sich chemisch zu verändern. Die Aufnahme der Energie durch das Wasser erfolgt in der flüssigen Phase und vor allem beim Übergang in die Gasphase. Der entstehende Wasserdampf ist chemisch stabil und nicht brennbar. Der Wasserdampf bewirkt eine Verringerung der Konzentration des Sauerstoffes im brennenden Gas/Luft-System. Ab einer bestimmten Konzentration des Wasserdampfes im brennbaren System kann in diesem die Verbrennungsreaktion nicht mehr ablaufen und es kommt zum Verlöschen der Flammen. Ursache dieser Inhibierung durch Wasserdampf ist ebenso wie bei anderen nichtbrennbaren gasförmigen Löschmitteln, dass die Reaktionsketten der Verbrennung infolge größerer Weglängen im Reaktionssystem bzw. infolge von Wärmeaufnahme durch die inerten Verbindungen unterbrochen werden. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Wasser sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 2.1:** Physikalisch-chemische Eigenschaften von Wasser

Eigenschaften	Wert
Schmelzpunkt	0 °C
Siedepunkt	100 °C
Dichte Wasser bei 0 °C	0,9984 g/cm <sup>3</sup>
bei 4 °C	1,0000 g/cm <sup>3</sup>
bei 10 °C	0,9928 g/cm <sup>3</sup>
bei 100 °C	
Dichte des Wasserdampfes 100 °C	
Spezifische Wärmekapazität 14,5 °C	4,1868 kJ/kg
Spez. Wärmeleitfähigkeit Wasserdampf 100 °C	
Bildungsenthalpie	15,83 MJ/kg
Verdampfungsenthalpie	2,264 MJ/kg
Oberflächenspannung	71,96 mN/m
Viskosität	0,8937 mPa/s
Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit 100 °C	68,2 · 10 <sup>-4</sup> W/cmK
Wärmeleitfähigkeit des Dampfes	

Die Löschwirkung von Wasser wird aufgrund seiner Eigenschaften auf die Kühlung von heißen Oberflächen oder heißer Gasvolumina und die inertisierende Wirkung des entstehenden Wasserdampfes zurückgeführt. Im Brandfall kann die Kühlwirkung in der Gasphase innerhalb der Verbrennungszone erfolgen. Als Verbrennungszone muss näherungsweise die Reaktionszone angenommen werden, weil in dieser die Temperatur der heißen Gase ausreicht um von jedem Punkt der Flammenzone eine neue Reaktionskette auszulösen. Innerhalb der Reaktionszone wird der Wärmeübergang von den heißen Gasen durch Wärmeübertragung an das Löschwasser erfolgen müssen. In der Gasphase kann schließlich auch der bei der Verdampfung erzeugte Wasserdampf als Mittel zur Inertisierung der Verbrennungsreaktion wirksam werden. Die Beeinflussung dieser Reaktion muss fortgeführt werden bis die gesamte Verbrennungsreaktion unterbrochen ist.

Im Brandfall kann die Kühlwirkung aber auch dazu benutzt werden, um die Oberflächen der brennbaren Stoffe abzukühlen, die infolge der Wärmerückstrahlung aus den Flammen brennbare Gase und Dämpfe durch Verdampfung oder Pyrolyse bilden und die den Flammen kontinuierlich zuführen. Diese Reaktion stellt erfordert den Wärmeübergang zwischen zwei kondensierten Phasen, vorzugsweise durch Wärmeleitung. Gleichzeitig wird in diesen Fällen

aber auch der aus den Flammen abgestrahlte Energieanteil durch das Löschmittel absorbiert werden müssen. Ein Stoffübergang in die Gasphase ist auch in diesem Fall nicht zu verhindern und wird sowohl den brennbaren Stoff als auch das Löschmittel betreffen. Der entstehende Wasserdampf könnte schließlich in der Gasphase seine Wirkung entfalten und inertisierend wirksam werden. Die erforderliche Löschmittelmenge wird bei Löschgasen in  $\text{g/m}^3$  angegeben. Da die Löschwirkung aber bei Löschwasser nicht ausschließlich durch Inertisierung sondern auch durch heterogene Kühlung der Flammenzone zu erklären ist, müssen beide Löschwirkungen zusammengefasst werden. Deshalb wird die erforderliche Konzentration an Löschwasser als Volumenlöschmittel nicht als Löschkonzentration sondern als Massenstrom für ein geschlossenes Raumvolumen angegeben. Je mehr Wasser beim Volumenlöschen durch Öffnungen abströmen kann, desto geringer wird die Inertisierungsleistung ausfallen.

Der Einsatz des Löschmittels zur Kühlung der heißen Oberflächen des brennbaren Stoffes wird als Löschen an der kondensierten Phase bezeichnet. Der Einsatz des Löschwassers erfolgt dann als Oberflächenlöschmittel. Als vordringliches Ziel für das eingesetzte Löschwasser müssen die an der Oberfläche der kondensierten Phase auftreffenden Energieströme und die bereits innerhalb der freien Brandentwicklung in der kondensierten Phase gespeicherte Energie aufzunehmen. Die Energieaufnahme muss den Stofftransport von der kondensierten Phase in die Gasphase soweit verringern, dass die Verbrennung in der Gasphase nicht mehr ablaufen kann.

## **2.2. Löschintensitäten und Volumenströme bei der mobilen Brandbekämpfung der Feuerwehr**

Der Einsatz von Wasser zur Brandbekämpfung ist seit Urzeiten üblich. Wasservorräte und entsprechende Gefäße in historischen Siedlungen sprechen dafür. Die Organisation von speziellen Gruppen zur Brandbekämpfung ist bereits bei Vergil üblich. Vorgehalten wurden Äxte, Eimer und sonstige Geräte. Diese Ausrüstung und die damit verbundene Vorgehensweise blieb im Wesentlichen bis zur Erfindung von Wasserpumpen erhalten. Aber erst der Einsatz von Motorpumpen veränderte die Methode der Brandbekämpfung entscheidend. Diese Entwicklung führte schließlich auch dazu, dass man Entscheidungen über die vorzuhaltende Volumenströme bzw. Massenströme an Löschwasser treffen musste. Einerseits waren die bei Bränden erforderlichen Wassermengen durch die örtliche Versorgung nicht mehr zu gewährleisten ohne empfindliche Einschränkungen des normalen Wasserverbrauchs. Andererseits wurden die Volumenströme an Löschwasser immer mehr

Ursache von Sekundärschäden bei Bänden. Es mussten deshalb Regelungen gefunden werden, die sowohl die Wasserversorgung als auch den Löschwasserbedarf auf vernünftige Größenordnungen einschränkten.

### 2.2.1 Bevölkerungabhängige Volumenströme

Im Rahmen der Rekonstruktion der Wasserversorgungen in Städten und Gemeinden wurde im 19. und 20. Jahrhundert auch der Bedarf an Löschwasser durch die Feuerwehren berücksichtigt. Dies geschah im Wesentlichen durch eine Festlegung des Wasserbedarfs an Hand der Bevölkerungsdichte nach [Lindner 1997], wie in folgender Tabelle zu ersehen ist.

**Tabelle 2.2:** Anzahl der Schlauchleitungen pro Kopf der Bevölkerung nach Lindner

Autor	Jahr	Anzahl der Schlauchleitungen					Volumenstrom
		Population in Tausend					l/s
		1000	4000	5000	10 000	180 000	
Shedd	1889			5			12,6
Fanning	1892				10	25	
Kuichling	1897	3	6	6	6		
Freeman	1892	3				30	15,6

Die von Kuichling angewandte Formel zur Berechnung des Volumenstroms ( $r_w$ ) wurde aus der Quadratwurzel der Bevölkerung ( $B$ ) bestimmt.

$$r_w = 2,8 \sqrt{B} \quad \text{in l/s} \quad (1)$$

Freeman berücksichtigte in seiner Studie bereits den starken Druckabfall bei der Abnahme großer Wassermengen aus öffentlichen Wassernetzen. Seine Formel wurde die Grundlage für die Versicherungen der USA (NFBU = National Board of Fire Underwriters), die folgendes Aussehen besaß.

$$r_{ISO} = 64,4 \cdot \sqrt{B} \cdot (1 - 0,01 \cdot \sqrt{B}) \quad \text{in l/s} \quad (2)$$

### 2.2.2 Volumenströme mit Bezug auf die Brandobjekte

#### Die ISO (Insurance Services Office) Methode

Die ISO Methode ist nach Lindner eine umfassende häufig gebrauchte Methode zur

Bestimmung des Wasserbedarfs zur Brandbekämpfung in Gebäuden. Die Grundgleichung dieser Methode umfasst zwei gleichwertige Faktoren und einen gewichteten Faktor für die Volumenströme zur Brandbekämpfung.

$$r_{ISO} = (K_{Geb}) \cdot (N_{Geb}) \cdot (1 + \sum(Q_{Str,Umg} + BE)) \quad \text{bei } 1 < \sum(Q_{Str} + BE) < 1,5 \quad (3)$$

Darin sind:

- $K_{geb}$             Konstruktionsfaktor des Gebäudes
- $N_{geb}$             Nutzungsfaktor des Gebäudes
- $Q_{str,Umg}$         Strahlungssummand für umgebende Gebäude
- $BE$                 Summand der Brandentwicklung im Gebäude

Der Konstruktionsfaktor des Gebäudes wird durch folgende Gleichung bestimmt.

$$K_{Geb} = 18 f_{Konstr} \sqrt{(k_A A_{Raum})} \quad (4)$$

- $f_{Konstr}$             weiterer Konstruktionsfaktor
- $k_A$                 Flächenfaktor = 1,5
- $A_{Raum}$            Fläche des größten Brandraumes im Stockwerk

Die zu verwendenden Faktoren sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet.

**Tabelle 2.3:** Korrekturfaktoren zum Konstruktionsfaktor

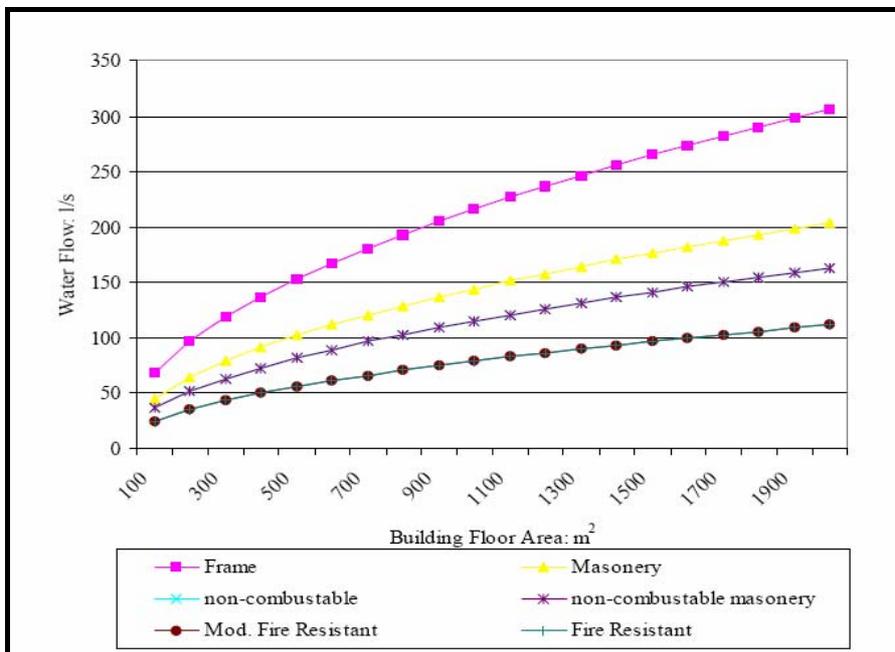
Klasse	Beschreibung	$f_{Konstr}$	$k_A$	$K_{Geb}$ min. l/s	$K_{Geb}$ max. l/s
1	Rahmen, Binder	1,5	1,5	32	505
2	Balkenträger	1,0	1,5	32	505
3	unbrennbar	0,8	1,5	32	378
4	Mauerwerk	0,8	1,5	32	378
5	teilweise feuerresistent	0,6	1,25	32	378
6	feuerresistent	0,6	1,25	32	378

Der Nutzungsfaktor spiegelt die vorwiegende Nutzung des Gebäudes wieder. Diesem Faktor werden tabellarisch entsprechend festgelegte Werte zugeordnet.

**Tabelle 2.4:** Faktoren zum Personenfaktor

Nutzungsklasse	Charakter des Gebäudes	Beispiel	N <sub>Geb</sub>
N <sub>1</sub>	nicht brennbar	Stahlwarenhaus	0,75
N <sub>2</sub>	langsam brennbar	Wohnung, Unterkünfte Handel und öffentliche Einrichtungen	0,85
N <sub>3</sub>	brennbar	Industrie und Einzelhandel	1,00
N <sub>4</sub>	frei brennend	Handels- und Industrieeinrichtungen	1,15
N <sub>5</sub>	hoch brennbar	Lager- und Industrieeinrichtungen	1,25

Der Strahlungssummand variiert zwischen dem Werten 0 und 0,25 je nach Entfernung. Die Brandentwicklung im Gebäude kann zwischen  $BE = 0$  (alle Türen geschlossen) und 0,3 liegen (Türen geöffnet). Die Summe der möglichen Werte darf nur zwischen 1 und 1,5 liegen. Im Ergebnis dieser Berechnungen ergeben sich die nachfolgenden flächenabhängigen Volumenströme für die verschiedenen Gebäude.



**Abbildung 2.3:** Massenstrom für Gebäude nach ISO (Insurance Service Office)

Aus Abbildung 2.3 ist ersichtlich, dass Volumenströme zwischen 1800 und 18 000 l/min für Gebäudebrände vorgehalten werden. Die Anwendungsraten schwanken zwischen 12 und 24 l/min·m<sup>2</sup> bei kleinen Brandflächen und zwischen 3,6 bis 9 l/min·m<sup>2</sup> bei großen Brandflächen.

### Die Methode des Illinois Institute of Technology Research (ITRII)

Diesem System liegt eine Bewertung von 134 Bränden zugrunde. Die beiden Gleichungen, für die Nutzungsart Wohnung und für Nutzungsarten ohne Wohnungen wurden durch Ausgleichskurven erhalten.

Nutzungsart Wohnung

$$r_{ITRII} = 0,395 \cdot A^2 + 20,38 \cdot A \quad \text{in l/min} \quad (5)$$

Nutzungsart ohne Wohnung

$$r_{ITRII} = -5,7 \cdot 10^{-3} \cdot A^2 + 17,12 \cdot A \quad \text{in l/min} \quad (6)$$

Aus diesen Gleichungen ergeben sich flächenabhängig unterschiedliche Fluss- und Anwendungsraten.

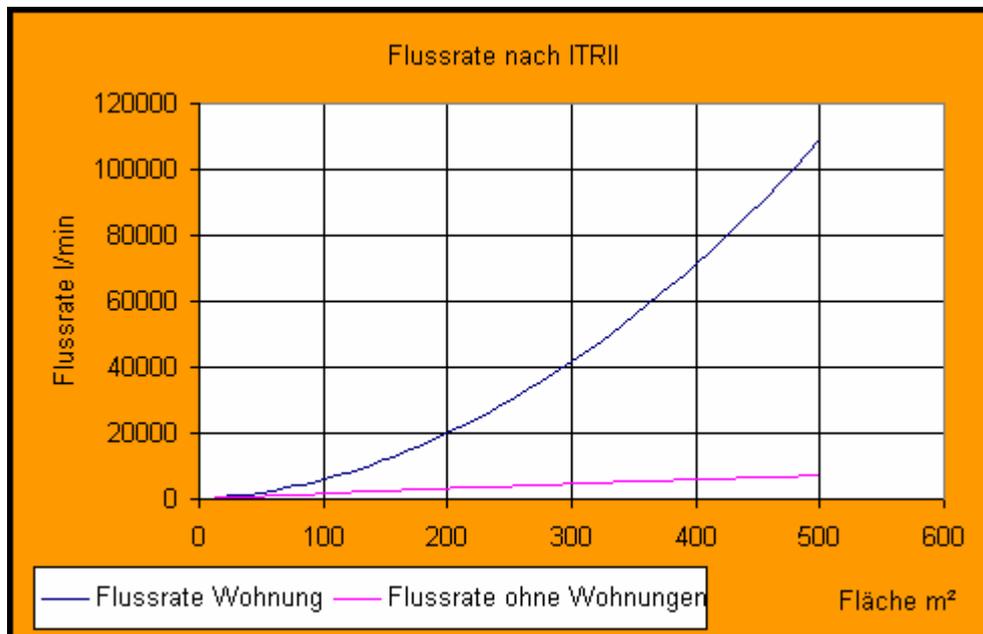
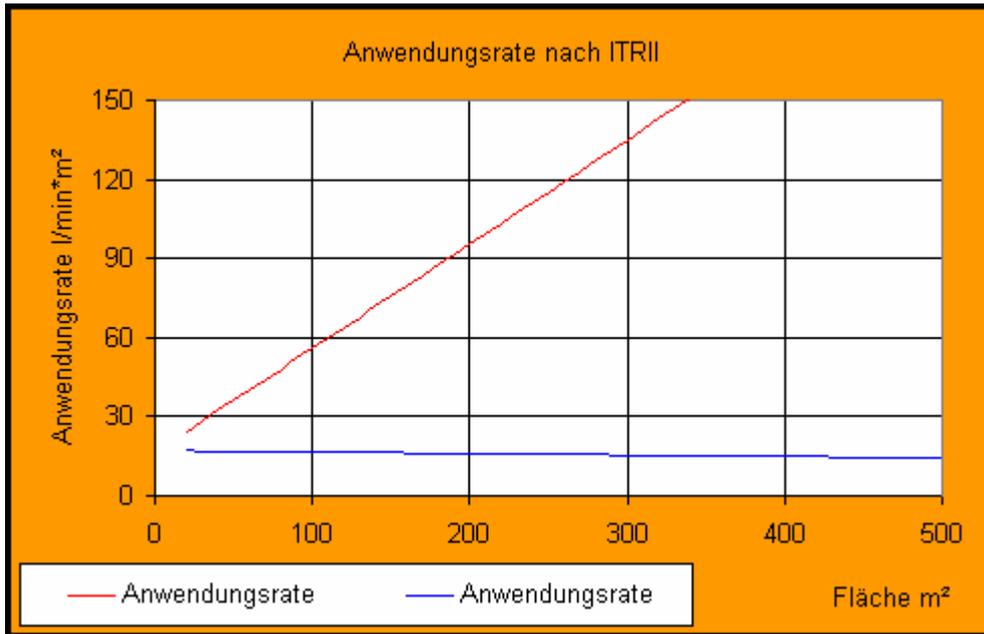


Abbildung 2.4: Flussrate nach ITRII



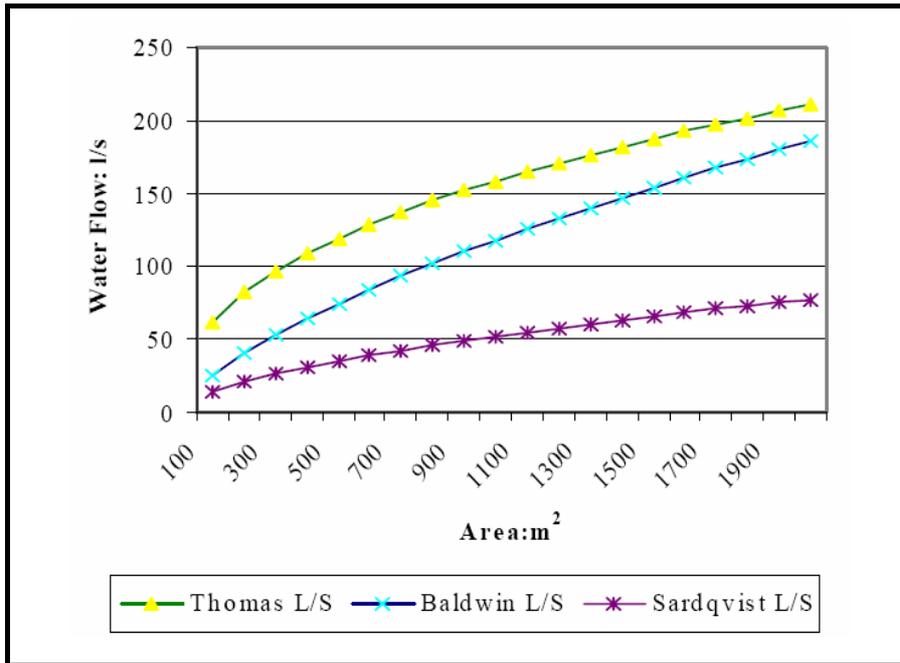
**Abbildung 2.5:** Anwendungsrate nach ITRII

### 2.2.3 Statistische Untersuchungen von Särdaqvist

[Särdaqvist 1998] untersuchte eine hohe Zahl realer Brände der Londoner Feuerwehr in den Jahren 1994 bis 1997. In die Untersuchungen wurden Brände öffentlicher und kommerzieller Einrichtungen, Schulen und Krankenhäuser, Industriebereiche und eine Untergruppe der Wohnbereiche nämlich Hotels und Pensionen. Die Studie wurde auf Korrelationen zwischen jeweils 1 Parameter: Entdeckungszeit und Endfläche der Brandausbreitung, Brandfläche und Massenstrom des Löschwassers begrenzt. Die Korrelationsdaten der Londoner Untersuchungen wurden von Särdaqvist mit anderen Autoren verglichen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Korrelationen.

**Tabelle 2.5:** Vergleich der Ergebnisse von Korrelationsuntersuchungen verschiedener Autoren

Author	Year	Location	No. of Fires	Area Size of Fire M <sup>2</sup>	Water Flow correlation l/min	Regression coefficient R <sup>2</sup>	Water Volume V (l)
Thomas	1950	UK	48	>200	$Q=560A^{0.41}$	0.59	$V=3500A^{0.84}$
Baldwin	1970	USA	134	>20	$Q=74A^{0.66}$	0.66	$V=123A^{0.12}$
Särdaqvist	1970	UK	307	0.1 - 1000	$Q=61A^{0.57}$	0.49	$V=115A^{1.1}$



**Abbildung 2.6:** Gegenüberstellung der Massenströme durch Särqvist [Davis 2000]

Die aus diesen Abhängigkeiten berechneten Anwendungsraten erreichen bei Särqvist und Baldwin bei Brandflächen von 600 m<sup>2</sup> annähernd 4 l/min\*m<sup>2</sup>; während bei Thomas noch 13 l/min\*m<sup>2</sup> gefordert werden. Allen Korrelationsgleichungen ist gemeinsam, dass die Anwendungsrate sich mit zunehmender Brandfläche verringert. Daneben hat sich auch Särqvist der Abhängigkeit zwischen der HRR bei Bränden und dem Kühlen durch Wasser gewidmet. Er benutzt die Energieaufnahme des Wassers bis auf eine Temperatur von 600 °C und schlägt deshalb einen Effizienzfaktor abhängig von den jeweiligen Strahlrohren für Löschwasser von  $f_{eff} = 0,2 \dots 0,4$  vor.

**Tabelle 2.6:** Effizienzfaktoren von Särqvist für verschiedene Strahlrohre

Interior Fog Nozzle	Large droplet Nozzle	Long Range Monitor	Long Range Nozzle	Short Range Nozzle
0.2	0.3	0.2	0.3	0.4

### 2.2.4 Ableitung von Anwendungsraten aus Brandversuchen [Pleiß und Kohl 1985]

Zahlreiche Lösversuche, die zu dieser Zeit mit Holzkrippen durchgeführt wurden, zeigten, dass zwischen Anwendungsrate und Löszeit eine Abhängigkeit bestand, die in Form einer Hyperbel dargestellt werden konnte. Für sehr kleine Löszeiten wurden hohe Anwendungsraten erforderlich, während bei geringen Anwendungsraten die Löszeit stark anstieg. Dagegen wies die Kurve für das Produkt aus Anwendungsrate und Volmenstrom, welches den Gesamtverbrauch an Löschwasser darstellte, in Abhängigkeit von der Löszeit

ein Minimum auf. Dieser Zusammenhang machte deutlich, dass ebenso wie bei sehr hohen, auch bei geringen Anwendungsraten nicht effizient gelöscht werden kann. Bei hohen Anwendungsraten wird ein Teil des Löschwassers nicht genutzt und fließt davon. Bei niedrigen Anwendungsraten kommt die Wirkung des Wassers nicht zum Tragen, weil die Brandausbreitung dies verhindert. Die höchste Effizienz des Löschwassers wurde erreicht, wenn Anwendungsraten gewählt wurden, die im Bereich des Wendepunktes der Hyperbel lagen. Es wurde festgestellt, dass dann auch der Gesamtwasserbrauch sein Minimum erreichte. In der DDR wurden sowohl Vollstrahlrohre als auch Sprühdüsen zu Brandbekämpfung eingesetzt. Als vorteilhaft wurde bei Vollstrahlrohren die große Reichweite erkannt. Nachteilig wirkte sich dagegen die geringere Verteilung der Vollstrahlen in Auftreffbereich des Löschwassers aus, wenn nicht durch Bewegung der Strahlrohre dieser Nachteil teilweise aufgehoben wurde. Bei den Sprühdüsen konnte eine bessere Verteilung des Löschwassers beobachtet werden, wobei allerdings die Reichweiten der Düsen geringer waren. Ein dritter Faktor war der Einsatz von Tensiden auch zur Brandbekämpfung fester Stoffe. Bereits Ende der 60er Jahre wurden dem Löschwasser von Tanklöschfahrzeugen, die zu dieser Zeit ein Fassungsvermögen von 2 m<sup>3</sup> Wasser besaßen, Tenside in Konzentrationen von ca. 1 Vol.-% zugemischt. Diese Zumischung entspricht den Anwendungskonzentrationen heutiger Schaummittel für die Brandklasse A (Class-A Foam). Zu Beginn der Anwendung vorgemischter Tensidlösungen wurden nur geringe Verbesserungen der Löschwirkung erzielt. Aber nach einigen Erfahrungen der Einsatzkräfte mit dem Löschmittel sank der Wasserverbrauch schnell und es konnte festgestellt werden, dass gegenüber reinem Wasser nur noch 60 bis 80% Tensidlösung für vergleichbare Brände verbraucht wurde [Schröder et al.1969]. Die Ergebnisse aller Untersuchungen einschließlich einer umfassenden Bewertung von Bränden, deren Parameter in der Brandstatistik der DDR 1978 bis 1984 festgehalten wurden, führten zur Festlegung konstanter Anwendungsraten für Löschwasser bei der Brandbekämpfung von Bränden brennbarer fester Stoffe, die in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt sind.

**Tabelle 2.7:** Löschintensitäten von Wasser und Schäumen bei brennbaren festen Stoffen nach [Lubosch et al. 1985].

Brandstoff	Wasserlöschverfahren			Schaumlöschverfahren		
	Löschintensitäten l/min*m <sup>2</sup>					
	I <sub>Voll-</sub>	I <sub>Spr-</sub>	I <sub>Spr-, Tens</sub>	I <sub>Schwer-</sub>	I <sub>Mittel-</sub>	I <sub>Leicht-</sub>
Brandklasse A ( Holz, Kohle, Papier, Stroh, Duroplast, Gummi)	10	8	6		2	2
Brandklasse B Schmelzende feste Stoffe (Thermoplaste, schmelzende organische Verbindungen)	8	6	4		1	1..2
Brennbare Flüssigkeiten	-	-	-	8	4	2
Heizöle	-	6	-	8	4	2

Die Anwendungsraten stellen praktisch nutzbare Werte dar, die einen Sicherheitsfaktor von  $f= 1,5 \dots 2$  beinhalten. Beim Schaumlöschverfahren sind die Werte ausschließlich auf Mehrbereichsschaumittel bezogen.

### 2.2.5 Ableitung von Volumenströmen für die Brandbekämpfung an Hand von theoretischen Ansätzen mittels Gesamtbilanz

Bereits seit den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde eine einfache Gesamtbilanz des Löschvorganges aufgestellt, um diese als möglichen Ansatz für die Bestimmung von Massenströmen zur Brandbekämpfung zu verwenden. Die Gesamtleistung der Verbrennung kann bei vollständigem Umsatz aus dem Produkt aus Massestrom des brennbaren Materials und Heizwert bestimmt werden:

$$\dot{m}_{St} \Delta H_H = L_{Brd} \quad \text{in kW} \quad (7)$$

Diese Gesamtleistung des Brandes muss durch das Löschwasser mittels Kühlung aufgenommen werden. Die maximale Leistung bei der Wärmeaufnahme des Wassers ergibt sich aus dem Produkt des Massestroms an Löschmittel und der Summe aus

Verdampfungsenthalpie und dem Wärmeaufnahmevermögen des Wassers zwischen 15 °C und 100 °C

$$\dot{m}_W (\Delta H_V + 85 c_{p,W}) = L_W \quad \text{in kW} \quad (8)$$

Bei vollständiger Wärmeaufnahme gilt  $L_{\text{brd}} = L_W$  und es ergibt sich der maximale Massestrom für das Löschen:

$$\dot{m}_W = \frac{\dot{m}_{St} \Delta H_H}{\Delta H_V + 85 c_{p,W}} \quad \text{in kg / s} \quad (9)$$

Führt man in diese Gleichung die bekannten Werte für die Verdampfungswärme und die spezifische Wärme des Wassers ein und bezieht die Masseströme jeweils auf 1 m<sup>2</sup>, dann erhält man:

$$I = 0,000337 \dot{m}_{St,m^2} \Delta H_H \quad \text{in kg / s} \cdot \text{m}^2 \quad (10)$$

Darin bedeutet I die Löschintensität, d.h. die Massestromdichte des Wassers. Der Massestrom des brennbaren Stoffs ist auf die Fläche von 1 m<sup>2</sup> bezogen.

### **Royer und Nelson Iowa University**

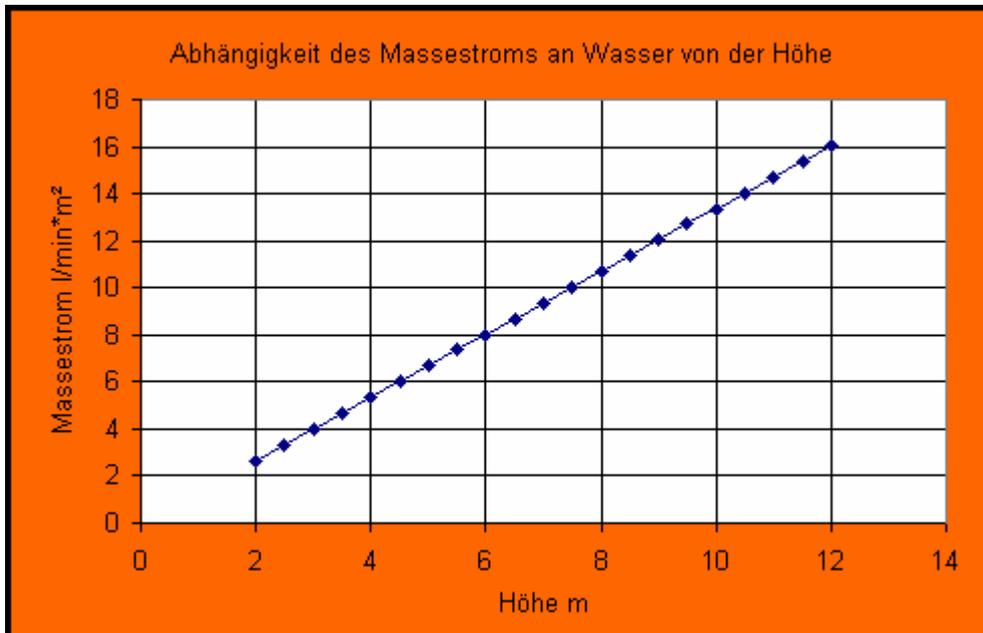
[Royer und Nelson 1959] entwickelten einen Ansatz, der auf der Grundlage des Wärmeaufnahmevermögens von Wasser und einer kalkulierten Wärmeentwicklung bei der Verbrennung in Räumen basierte. Zunächst gingen sie davon aus, dass eine Verbrennung im Raum durch den verfügbaren Sauerstoff bestimmt wird. Aus 1m<sup>3</sup> reinem Sauerstoff entstehen während der Verbrennung der meisten organischen Verbindungen ungefähr 19930 kJ. In Luft können aber nur maximal 7 % des Sauerstoffes für die Verbrennung nutzbar umgesetzt werden, weil unterhalb von 14 % Sauerstoffgehalt in der Luft die Produktion von Flammen in der Regel aufhören soll. Daraus ergeben sich je m<sup>3</sup> Luft eine Energiefreisetzung von etwa 1395 kJ. Unter der Voraussetzung, dass nur 80 % des Wassers verdampfen, müssen 1115 kJ/kg Wasser aufgenommen werden. Dies ist in jedem Fall möglich. Unter dieser Voraussetzung empfohlen Royer und Nelson die nachfolgende Formel für den Massestrom an Wasser:

$$\dot{m}_W = \frac{V_{Raum}}{0,745} \quad \text{in kg/min} \quad (11)$$

Ersetzt man das Volumen durch Grundfläche und Höhe erhält man schließlich folgende Gleichung für den Massenstrom:

$$\dot{m}_w = \frac{A_{\text{Raum}} h}{0,745} \text{ in } \text{kg/min} \quad (12)$$

Für 1 m<sup>2</sup> Grundfläche ergibt sich daraus der folgende Massestrom an Wasser, der gleichzeitig den von der Höhe des Raumes abhängigen Massenstrom an Wasser darstellt.



**Abbildung 2.7:** Abhängigkeit des Massestromes an Wasser (Massenstrom) von der Raumhöhe nach Royer und Wilson

Von Royer und Wilson wird schließlich darauf verwiesen, dass der ermittelte Zusammenhang für kleine Räume gilt. Es wird aber keine obere Begrenzung angegeben. Nach [Kleane und Sanders 2000] werden Räume mit Grundflächen bis 100 m<sup>2</sup> mit Hilfe dieser Methode berechnet.

#### **Methode von [Giselson und Rosander 1984]**

Sowohl von [Grimwood und Desmet 2003] als auch von [Chitty 2003] werden die grundlegenden Ansätze von Giselson und Rosander diskutiert. Die Grundvorstellung dieses Ansatzes geht davon aus, dass durch einen indirekten Einsatz Wasser gegen eine heiße Wand gesprüht und verdampft wird. Das nachfolgende von Chitty aufgezeichnete Beispiel verdeutlicht die Annahmen von Giselson und Rosander:

Ein Raum mit einer Grundfläche von 40m<sup>2</sup> und 2.5m Höhe ist gefüllt mit Rauchgasen. Durch die Anwendung von Wasser wird beabsichtigt, eine Atmosphäre mit 10% Wasserdampf bei 180°C zu schaffen. Das benötigte Wasserdampfvolumen bei 180 °C beträgt bei diesem Raum 10 m<sup>3</sup>.

Aus einem Liter Wasser entsteht bei 100 °C ein Volumen von 1700 l Wasserdampf. Bei 180 °C steigt das Volumen des Wasserdampfs auf 2065 l. Somit sind 4,84 l Wasser erforderlich, um diese Menge Dampf zu erzeugen.

Um diese Masse Wassers zu verdampfen, muss das Ausgangswasser, meist mit einer Temperatur von 10 °C, bis zum Siedepunkt erhitzt und danach vollständig verdampft werden. Der entstehende Wasserdampf muss schließlich auf 180 °C erhitzt werden. Dies ergibt folgende Gleichung für die Wärmeaufnahme:

$$Q_W = m_W [c_{p,l}(T_2 - T_1) + \Delta H_V + c_{p,g}(T_3 - T_2)] \quad (13)$$

Daraus ergibt sich eine Wärmeaufnahme für 1 kg Wasser von 2,783 MJ.

Um die erforderlichen 4,84 l Wasser verdampfen zu können, ist eine Wärmeaufnahme von 13,47 MJ durch das Wasser erforderlich. Diese Energiemenge ist nach den Vorstellungen von Giselson und Rosander an der Wand im Bereich bis maximal 1 mm verfügbar.

$$Q_{Wand} = A \cdot d \cdot \rho_{wand} \cdot c_{p,Wand} \cdot (\Delta T_{Wand}) \quad (14)$$

durch Umstellen nach der Fläche A erhält man:

$$A = \frac{Q_{Wand}}{d \cdot \rho_{Wand} \cdot c_{p,Wand} \cdot (\Delta T_{Wand})} \quad (15)$$

Mit der Annahme, dass die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{wand} = 320\text{K}$  ( $500\text{K} - 180\text{K}$ ) beträgt, die effiziente Dicke der Wand 1 mm beträgt, sowie Dichte und spezifische Wärmekapazität jeweils  $1000\text{ kg/m}^3$  bzw.  $1000\text{ J/kg K}$  betragen, erhält man eine Fläche von  $42,1\text{ m}^2$ .

Dementsprechend sollte man die erforderliche Wassermenge auf diese Fläche verteilen, was einer Flächenbelegung von  $0,11\text{ l/m}^2$  entspricht. Nach Giselson und Rosander tritt bei dieser indirekten Methode eine Verringerung des Sauerstoffgehaltes und eine Temperaturabsenkung ein. Ergebnis soll sein, dass die thermischen Wirkungen auf die Oberflächen der brennbaren Stoffe abnehmen und der Wärmeverlust an die Umgebung zunimmt.

Zu diesen Aussagen gibt es drei Bemerkungen:

- Da Flammen mit einer Konzentration von 10 % Wasserdampf in der Luft nicht gelöscht werden können und damit Verbrennung weiterhin abläuft, wird die Rückstrahlung auf die Oberflächen nur unwesentlich gemindert.
- Die Wärmeverluste werden vor allem über die Temperaturdifferenz bestimmt. Diese nimmt aber ab, so dass der Wärmübergang und damit die Verluste geringer werden sollten. Da aber die Wärmeleitung durch Wasserdampf verbessert wird, könnten

tatsächlich Verluste auftreten. Dazu fehlt allerdings der Nachweis.

- Die inertisierende Wirkung von Wasserdampf tritt erst bei höheren Konzentrationen auf und dürfte deshalb keinen deutlichen Einfluss besitzen.

### **Methode von [Hadjisophocleous und Richardson 2005]**

#### Offensive Löschtaktik

Die entwickelte Methode betrachtet sowohl taktische Prinzipien als auch den Einsatz von Wasser für den Schutz von Gebäuden. Für die taktische Variante des offensiven Einsatzes direkt am Brandherd (Innenangriff) wird ein Ansatz formuliert, welchem die Energiefreisetzungsrate eines Brandes (Heat Release Rate HRR) zugrunde liegt. Die Energiefreisetzungsrate wird in den folgenden Ausführungen immer mit HRR bezeichnet. Das Wasser wird bei der Brandbekämpfung genutzt, um die innerhalb einer Grundfläche durch einen Brand produzierte Energie teilweise zu binden.

Die Gesamtenergie eines Brandes ist bestimmt durch die Gleichung

$$Q_{Ges} = B_{Brd} \cdot A_{Brd} \quad (16)$$

$B_{Brd}$  ist die Brandbelastung in  $\text{kJ/m}^2$

$A_{Brd}$  ist die Brandfläche

Die Löschzeit wurde von [Särdqvist 1999] über eine Korrelation aus der Wurzel der Brandfläche bestimmt:

$$t_{L\ddot{o}sch} = 3,3 \cdot \sqrt{A_{Brd}} \quad (17)$$

Unter Annahme, dass bei einem Brand nur maximal 50 % der verfügbaren Energie des brennbaren Stoffes freigesetzt werden, erhält man aus der Gesamtenergie des Brandes die Gleichung

$$HRR = 0,5 \frac{Q_{Brd}}{60 t_{L\ddot{o}sch}} \quad (18).$$

Durch Substitution aus den Gleichungen (16) und (17) erhält man schließlich die Gleichung (19).

$$HRR = \frac{0,5 \cdot B_{Brd} \cdot A_{Brd}}{3,3 \cdot 60 \cdot \sqrt{A_{Brd}}} = 0,0025 \cdot B_{Brd} \cdot \sqrt{A_{Brd}} \quad (19)$$

Die HRR ist direkt proportional der Massenstrom für das Löschwasser bei offensiver

Löschtaktik.

$$r_{off} = \frac{60 \cdot HRR}{2,6 \cdot f_{off}} \quad (20)$$

Durch Substitution der HRR aus Gl.(19) erhält man schließlich die Gleichung (21)

$$r_{off} = 0,058 \cdot \frac{B_{Brd}}{f_{off}} \cdot \sqrt{A_{Brd}} \quad (21)$$

$f_{off}$  stellt den Faktor für die Effizienz des Löschwassers bei offensiver Löschtaktik dar.

### Defensive Löschtaktik

Zunächst wird angenommen, dass die defensive Löschtaktik vor allem für den Schutz von Gebäuden oder Gebäudeteilen vor Wärmestrahlung von der Brandfläche angewandt wird. In den meisten ingenieur-technischen Ansätzen wird davon ausgegangen, dass 35 % der Energie einer Verbrennung als Wärmestrahlung wirksam werden können. Damit kann die auf einem Gebäude oder Objekt auftreffende Gesamtstrahlungsleistung durch folgende Gleichung dargestellt werden:

$$Q_{Str} = \frac{0,35 HRR}{4(b h)} \quad (22)$$

In dieser Gleichung sind b und h die Breite und die Höhe der bestrahlten Flächen. Da nicht alle Flächen parallel zum Brandherd ausgerichtet sind, muss ein Sichtfaktor  $F_{asp}$  einbezogen werden, der berechnet werden kann.

Für den Massenstrom an Löschwasser bei defensiver Löschtaktik erhält man somit folgende Gleichung.

$$r_{def} = \frac{Q_{Str} F_{asp} (b h) 60}{2,6 f_{def}} \quad (23)$$

Durch Substitution der Gleichungen (17) und (14) erhält man schließlich die Massenstrom für Löschwasser bei defensiver Anwendung für eine Fläche, die der Wärmestrahlung ausgesetzt ist.

$$r_{def} = \frac{0,35 \cdot 0,058 \cdot 60 \cdot F_{asp} \cdot B_{Brd} \cdot \sqrt{A_{Brd}} \cdot (b \cdot h)}{4(b \cdot h) \cdot f_{def}} \quad (24)$$

$$r_{def} = \frac{F_{asp}}{f_{def}} (0,005 \cdot B_{Brd} \cdot \sqrt{A_{Brd}})$$

Der Aspektfaktor  $F_{asp}$  enthält die Stellung der bestrahlten Fläche zur Flammenfront, den

Abstand zwischen Flammenfront und Fläche sowie die Größenverhältnisse der Flächen.

$$F_{Asp} = \frac{2A_{ung}}{\Pi} \left[ \sqrt{\frac{C/S}{C/S}} \arctan \sqrt{\frac{CS}{C/S+4}} + \sqrt{\frac{CS}{CS+4}} \arctan \sqrt{\frac{C/S}{CS+4}} \right] \quad (25)$$

Darin bedeuten:

$$C = \frac{h \cdot b}{d^2} \quad \text{und} \quad S = \frac{h}{b} \quad \text{oder} \quad S = \frac{b}{h} \quad \text{wenn } b > h, \quad S > 1$$

h Höhe der bestrahlten Fläche

b Breite der bestrahlten Fläche

$A_{ung}$  Fläche der ungeschützten Öffnungen

d Abstand zwischen Strahlungsfläche und bestrahlter Fläche

### Gesamtmassenstrom bei offensiver und defensiver Löschtaktik

Da es in den seltensten Fällen ausreichend ist, nur eine Löschtaktik anzuwenden, weil immer auch Schutzrohre mit eingesetzt werden müssen, ist ein Gesamtmassenstrom für den Einsatz sinnvoll. Die defensiven Löschmittelraten sind dabei nicht nur für den Schutz entfernter Gebäude, sondern auch für den Schutz wichtiger Funktionsteile beim Innenangriff zu berücksichtigen. Diese könnten Flure oder Treppenhäuser sein. Die Massenströme bei offensiver und defensiver Anwendung können einfach addiert werden.

$$r_{Eins} = r_{off} + r_{def}$$

$$r_{Eins} = \left( \frac{0,058}{f_{off}} + \frac{0,005 F_{Asp}}{f_{def}} \right) \cdot B_{Brd} \cdot \sqrt{A_{Brd}} \quad (26)$$

Die Faktoren für die Effizienz der Löschmittel werden bei offensiver Löschtaktik mit  $f_{off} = 0,3$  und  $f_{def} = 0,1$  eingesetzt. Es können allerdings je nach Schwierigkeit des Löschvorganges auch andere Faktoren gewählt werden.

### Massenstrom nach [Fluom und Morgner 1965]

Der Ansatz von Floum und Morgner entspricht der Gesamtenergiebilanz für Brände und geht auf eine frühere Arbeit von Rashbash zurück. An Stelle der zu dieser Zeit nicht zugänglichen HRR wurde die auf eine Grundfläche bezogene Masseabbrandrate (Abbrandgeschwindigkeit) herangezogen, um die Leistung des Brandes zu bestimmen.

$$\dot{Q}_{Brd} = \dot{m}_{Brd} \Delta H_H \quad (27)$$

Das Löschwasser muss schließlich dies entstehende Brandleistung aufnehmen und binden.

$$\dot{Q}_W = \dot{m}_W (\Delta H_V + c_{p,W} \Delta T) \quad (28)$$

Bei vollständiger Aufnahme der Brandleistung durch das Löschwasser können beide Gleichungen gleichgesetzt werden.

$$\dot{m}_{Brd} \Delta H_H = \dot{m}_W (\Delta H_V + c_{p,W} \Delta T)$$

Durch Auflösen der Gleichung nach dem Massestrom an Wasser und dem Einführen von Korrekturfaktoren erhält man schließlich

$$\dot{m}_W \equiv r_{off} = \frac{f_{Abbr} \dot{m}_{Brd} \Delta H_H}{f_W (\Delta H_V + c_{p,W} \Delta T)} \quad (29)$$

Die Faktoren  $f_{Abbr}$  und  $f_W$  sind vergleichbar mit den Faktoren von Hadjisophocleous, allerdings wurden durch Fluom und Morgner andere Werte ( $f_{Abbr}=0,1$  und  $f_W=0,25$ ) vorgeschlagen. Da die Formel eine zeitliche Abhängigkeit besitzt, wurde schließlich zur Variation des Massenstroms die zu erzielende Löschzeit mit herangezogen, so dass bei geringer Anwendungsrate und damit unzureichender technischer Ausrüstung immer noch mit der Zielrichtung einer längeren Löschzeit ein Angriff möglich war. Dies führte schließlich zur Ablösung dieser Methode durch feste empirische Anwendungsdaten.

### **Methode nach Barnett**

Die Methode basiert auf der Energieabsorption von Wasser bei Bränden. Die Wärmefreisetzungsrate (HRR=Heat Release Rate) wird direkt der Absorptionsrate des Wassers gleichgesetzt.

$$r_{Barnett} = \frac{F \cdot HRR}{f_{eff} \cdot Q_W} \quad \text{in l/s} \quad (30)$$

Die Absorptionsrate des Wassers wird mit 2,6 MJ/kg eingesetzt und der Effizienzfaktor liegt zwischen 0,1 und 0,35. Für die HRR wird schließlich ein weiterer Faktor F eingeführt, der mit 50 % unverbranntem Material festgelegt wird.

Die Methode ist eingegangen in den NZFS (New Zealand Fire Code) [NZFS 2005]. Aus der Formel wurden tabellarisch für verschiedene abgeschlossene Brandflächen innerhalb der Gebäude (Fire Cells) die entsprechenden Massenströme aufgelistet.

**Tabelle 2.8:** Massenstrom für Brandflächen mit unterschiedlicher Gefährdung

Fire Load Energy Density	Fire Hazard Category	Maximum Firecell Size for Given Water Supply in l/s						
		10	25	50	100	150	200	400
400	1	250	625	1250	2500	3750	5000	10000
800	2	125	313	625	1250	1875	2500	5000
1200	3	83	208	417	833	1250	1667	3333
1600	4	63	156	313	625	938	1250	2500
2000	4	50	125	250	500	750	1000	2000
3000	4	33	83	167	333	500	667	1333
5000	4	20	50	100	200	300	400	800

Für den defensiven Einsatz bei umliegenden Gebäuden wurden die notwendigen Massenströme bei Strahlungsexposition festgelegt.

**Tabelle 2.9:** Massenstrom zur Wasserkühlung von Gebäuden mit Strahlungsbeaufschlagung

Water Flow: l/s	Fire Service Resources			Theoretical Cooling MW	Suppression Efficiency : $C_1$	Actual Cooling MW
	Hoses	Engines	Manpower			
10	1	1	4	26	0.32	8.3
25	2	1	4	65	0.32	20.8
50	3	1	4	130	0.32	41.6
100	7	2	8	260	0.32	83.2
150	10	3	12	390	0.32	48.0
200	14	4	16	521	0.32	166.7

### Fazit der bisherigen Methoden zur Bestimmung der Massenströme

Ausgangspunkt nahezu aller Methoden zur Bestimmung der Massenströme an Löschwasser ist die Verbrennungsreaktion. Es wurden vor allem die leichter zugänglichen Gasphasenreaktionen bewertet und daraus Faktoren für die auf die Oberfläche der brennbaren Stoffe auftreffende Wärmestrahlung (10 bis 35 %) abgeleitet.

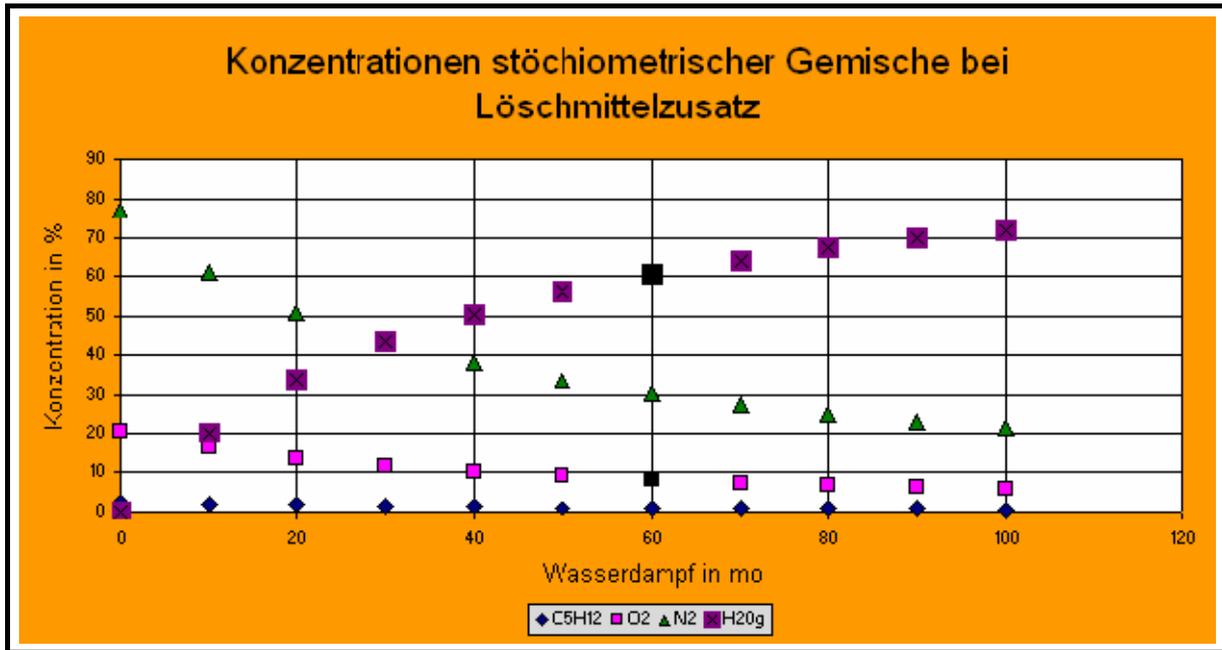
Für das Verhalten des Wassers im Brandraum wurden Effizienzfaktoren bestimmt, mit denen die Kühlwirkung des eingesetzten Wassers beurteilt werden konnte. Diese Faktoren lagen zwischen 0,1 und 0,4. Dabei konnte eine exakte Zuordnung des Wärmeüberganges zwischen den Wassertropfen bzw. -filmen und den festen Brennstoffoberflächen bzw. zwischen den Wassertropfen und der heißen Gasphase im Verbrennungsraum nicht festgestellt werden.

Die Wechselwirkung zwischen den gasförmigen Reaktanden der Verbrennungsreaktion und dem ebenfalls gasförmigen Löschwasser beruht vor allem auf Untersuchungen der Zündgrenzen, für vorgemischte Mehrstoffsysteme brennbarer Stoffe im stöchiometrischen Verhältnis mit Luft und dem inerten Stoff Wasserdampf. In diesen Gemischen kann sich nur innerhalb bestimmter Konzentrationen an inertem Stoff eine Flamme durch das gesamt brennbare System fortpflanzen. Auch hier wurde eine Verallgemeinerung der Grenzkonzentration des inertes Stoffes vorgenommen, die in der Regel in einem ideal brennenden Luft/Brennstoffgemisch so hoch sein muss, das der Sauerstoffgehalt in diesem Gemisch auf 8 Vol.-% absinkt.

In keinem dieser Ansätze wurde die direkte Reaktion des brennbaren Stoffes weder in der Gasphase bei dessen Umsetzung mit Luft noch in der kondensierten Phase bei dessen direktem Phasenübergang unter Berücksichtigung möglicher heterogener Verbrennungsreaktionen betrachtet.

#### **2.2.6 Theoretische Ansätze zum Löschen in der Gasphase**

Der einfachste Ansatz für das Löschen in der Gasphase geht von den Grenzwerten für die Inertisierung von brennbaren Gasgemischen mit inertes Gasen aus, zu denen auch der gasförmige Wasserdampf bei Temperaturen  $> 100\text{ °C}$  gehört. Allgemein wird angegeben, dass ein Gemisch aus brennbarem Stoff im stöchiometrischen Verhältnis mit Luft dann nicht mehr brennen kann, wenn die Sauerstoffkonzentration durch Hinzufügen eines inertes Gases bis auf 8 Vol.-% verringert wird. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Konzentrationsverhältnisse für ein Gemisch aus Pentan/Luft im stöchiometrischen Verhältnis, dem schrittweise Wasserdampf zugemischt wird.



**Abbildung 2.8:** Konzentration der Komponenten in einem Mehrstoffgemisch

Entsprechend der allgemeinen Aussage, dass in Gemischen mit stöchiometrischer Konzentration von Brennstoff und Luft die Konzentration von inertem Löschgas soweit ansteigen muss, dass die Sauerstoffkonzentration maximal 8 Vol.-% erreicht, wird bei dem gewählten Beispiel eine Löschkonzentration von 60 Vol.-% erforderlich. Nach Umrechnen der Löschkonzentration, die für Wasserdampf bei 100 °C gültig ist, auf Normbedingungen ergibt sich eine massebezogene Löschkonzentration von 353 g/m<sup>3</sup>. Legt man diese Konzentrationsangabe für die Bestimmung der Gesamtmasse an Löschmittel für einen Raum von 100 m<sup>2</sup> Grundfläche und 2,5 m Höhe zugrunde, würde eine Gesamtmasse an Löschwasser von 88,25 kg erforderlich sein.

Die Verbrennungsreaktion in Flammen findet vorzugsweise an den Stellen des Raumes statt, an denen die Konzentration der beiden Komponenten brennbare Verdampfungs- oder Pyrolyseprodukte und Luftsauerstoff ihr optimales Konzentrationsverhältnis erreichen. Das ist in der Regel in der Nähe des stöchiometrischen Gemisches. Aufgrund der Turbulenzen innerhalb des Raumes sind die optimalen Konzentrationsverhältnisse weder örtlich noch zeitlich konstant, so dass sich die Verbrennungszone praktisch im gesamten Raum ausbilden kann. Für die Brandbekämpfung in der Gasphase muss das Löschmittel deshalb an allen Stellen des Raums löschwirksam werden. Dies bedeutet, dass im gesamten Raum eine löschwirksame Konzentration aufgebaut wird und über einen bestimmten Zeitraum erhalten bleiben muss. Ist dies nicht der Fall, kann sich aus einer noch vorhandenen Reaktionskette die

Verbrennung erneut über das gesamte verfügbare brennbare gasförmige Material ausbreiten. Die Zeit der Erhaltung der löschwirksamen Konzentration ist allerdings nicht ausschließlich an die in der Gasphase stattfindenden Verbrennungsprozesse gebunden. Die Zeit ist auch notwendig, um eventuelle Rückzündungen der gasförmigen Stoffe an heißen Flächen zu verhindern. Löschen in der Gasphase ist deshalb insbesondere in der Anfangsphase der Verbrennung effektiv. Der Einsatz von feinen Wassertröpfchen als Löschmittel verbindet eine mögliche Inertisierung der Verbrennungsreaktion durch den Wasserdampf mit der Kühlung des Reaktionssystems durch die Verdampfung des Wassers. Sowohl die Kühlung der Flamme, die als Summe heißer Oxidationsprodukte, inerten Stickstoff und reagierender brennbarer Gase und Dämpfe mit Luftsauerstoff angesehen werden muss, als auch die Inertisierung, die nicht nur in der tatsächlichen, zeitlich und räumlich veränderlichen Reaktionszone erreicht werden muss, liefern ihren Anteil am Löschvorgang. In beiden Vorgängen hört die Reaktion erst ab einem definierten Grenzwert auf, der für die Inertisierung eine definierte Konzentration an Wasserdampf und für die Flammenkühlung eine Grenztemperatur ist. Vor Erreichen der Grenze ist nur eine geringe Auswirkung auf die Reaktion sowohl im Hinblick auf die Flammentemperatur als auch auf die HRR zu erwarten.

Allgemein könnte folgender Ansatz für das Löschen in Flammen formuliert werden.

1. Inertisierung :

$$HRR = \dot{m}_{Br} \cdot \Delta H_H = \frac{\dot{m}_{Br}}{M_{Br}} \Delta H_H \quad (31)$$

$$\gamma_{O_2Gr} = \frac{\dot{m}_{O_2Gr}}{\dot{m}_{O_2Gr} + \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{Br} + \dot{m}_{H_2O}}$$

Durch Einsetzen des Grenzmolenbruches für Sauerstoff erhält man schließlich das Grenzkriterium, bei dem die HRR den Wert 0 annimmt.

$$HRR_{Gr} = 0 = \frac{\left( \frac{\dot{m}_{O_2Gr}}{\gamma_{O_2Gr}} - \dot{m}_{O_2Gr} - \dot{m}_{N_2} - \dot{m}_{H_2O} \right) \Delta H_H}{M_{Br}} \quad (32)$$

2. Kühlung:

$$HRR = \dot{m}_{Br} \cdot \Delta H_H = \sum_1^i \dot{m}_i \cdot c_{p,i} (\Delta T) \quad (33)$$

Wenn die Temperatur auf den Temperaturgrenzwert der Zündung gesenkt werden kann, d. h.  $\Delta T = T_{Gr} - T_0$  ist, kommt die Reaktion zum Erliegen.

$$HRR = 0 = \left[ \sum_1^i \dot{m}_i \cdot c_{p,i} + \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} \right] \cdot (T_{Gr} - T_0) - \dot{m}_{H_2O} \Delta H_V \quad (34)$$

Durch Gleichsetzen beider Gleichungen erhält man einen theoretischen Ansatz für das Löschen im Volumen.

$$\frac{\left( \frac{\dot{n}_{O_2Gr}}{\gamma_{O_2Gr}} - \dot{n}_{O_2Gr} - \dot{n}_{N_2} - \dot{n}_{H_2O} \right) \Delta H_H}{M_{Br}} = \left[ \sum_1^i \dot{m}_i \cdot c_{p,i} + \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} \right] \cdot (T_{Gr} - T_0) - \dot{Q}_{H_2O} \quad (35)$$

Darin ist die vom Wasser aufgenommene Wärme maximal dem Grenzwert von etwa 2,6 MJ, jedoch abhängig vom Wärmeübergang, der beim Blasensieden durch nachfolgende Gleichung definiert ist.

$$\dot{Q}_{H_2O} = \alpha \cdot (T_S - T_0) \quad (36)$$

Durch diese Gleichung ist dann auch gleichzeitig der Massestrom an gasförmigen Wasserdampf und die Molzahl an Wasser bestimmt.

$$\frac{\dot{Q}_{H_2O}}{\Delta H_V} = \dot{m}_{H_2O} \quad (37)$$

$$\frac{\dot{m}_{H_2O}}{M_{H_2O}} = \dot{n}_{H_2O}$$

Aus obiger Gleichung folgt damit:

$$\frac{\left( \frac{\dot{n}_{O_2Gr}}{\gamma_{O_2Gr}} - \dot{n}_{O_2Gr} - \dot{n}_{N_2} - \frac{\alpha(T_S - T_0)M_{H_2O}}{\Delta H_V} \right) \cdot \Delta H_H}{M_{Br}} \quad (38)$$

$$= \left[ \sum_1^i \dot{m}_i \cdot c_{p,i} + \frac{\alpha(T_S - T_0) \cdot M_{H_2O}}{\Delta H_V} \cdot c_{p,H_2O} \right] \cdot (T_{Gr} - T_0) - \alpha(T_S - T_0)$$

Dieser Ansatz zeigt, dass beim Löschen in der Gasphase neben den momentanen Konzentrationsverhältnissen der Einzelkomponenten, die spezifischen Wärmekapazitäten, die Anfangs- und Grenztemperaturen der flüssigen Phase und der Gasphase, Molekülmassen und die Wärmeübergangszahlen am Einzeltropfen zu beachten sind. In jedem Fall wird der Löscherfolg oberhalb der Grenztemperatur für das Verlöschen an den Explosionsgrenzen und unterhalb der Grenzkonzentration an Wasserdampf eintreten, weil sowohl die kühlende Wirkung des Wassers und des Wasserdampfes als auch die inertisierende Wirkung des Wasserdampfes wirksam wird.

## **2.2.7 Theoretische Ansätze zum Löschen an Oberflächen der kondensierten Phase**

### **Bestimmung der stofflichen, örtlichen und räumlichen Gegebenheiten**

Bei Bränden von Flüssigkeiten und festen Stoffen ist eine kondensierte Phase während des gesamten Verbrennungsprozesses vorhanden, die verantwortlich für die kontinuierliche Bildung gas- oder dampfförmiger brennbarer Stoffe ist. Diese brennbaren Gase bzw. Dämpfe verbrennen in der Gasphase an den Stellen optimaler Verbrennungsbedingungen.

Die Bildung der Gase und Dämpfe an der kondensierten Phase erfordert, bis auf wenige Ausnahmen, Energie. Die Energie zur Verdampfung brennbarer Flüssigkeiten, zum Schmelzen fester Stoffe oder zur Zersetzung fester Stoffe infolge Pyrolyse wird durch Rückstrahlung aus der Flamme geliefert.

Bereits durch [Rashbash 1986] wurde experimentell festgestellt, dass etwa 30 bis 35 % der freigesetzten Energie abgeführt werden müssen, um einen Brand zu löschen. Der wesentliche Anteil der in der Flamme entstehenden Energie wird in der Plume mit den heißen Rauchgasen abgeführt. Nach [Rashbash 1986] wird etwa 30 % der in der Flamme erzeugten Energie in Wärmestrahlung umgewandelt und nach allen Seiten gleichmäßig abgegeben. Ungefähr 12 % der Wärmestrahlung erreicht die Brennstoffoberfläche. [Stolp 1976] ermittelte die Wassermengen, die beim Löschen von Bränden kleiner Holzkrippen verdampfen. Sie erreichten nur etwa 2% der Gesamtenergie des Brandes. In seiner Auswertung, insbesondere durch den Vergleich mit anderen Untersuchungen zeigte sich der Einfluss des Raums auf die erforderliche Wassermenge, so dass schließlich ein Verhältnis zwischen der Energie zur Verdampfung des Wassers und der HRR von 0,08 bis 0,1 angenommen wurde. Für die Verdampfung bzw. Pyrolyse der Dämpfe und Gase des brennbaren flüssigen oder festen Stoffes stehen demnach etwa 10 % der durch die Verbrennung frei werdenden Wärmeenergie zur Verfügung. Demgegenüber ist in der Verbrennungszone der Gasphase die gesamte produzierte Energie vorhanden, die im Fall der ausschließlichen Kühlung bis auf die Verbrennungsgrenztemperatur abgesenkt werden muss.

Trotz dieser relativ geringen Energiemengen erweist sich das Löschen an der Oberfläche einer kondensierten Phase als schwierig. Um die tatsächlichen Verhältnisse besser zu verstehen, wird zunächst von einer ebenen Brandfläche (brennbare Flüssigkeit) ausgegangen. Im Brandfall heizt sich die Flüssigkeitsoberfläche sehr schnell bis auf Siedetemperatur auf. Die Flüssigkeit beginnt zu Sieden und es stellt sich eine konstante Geschwindigkeit der Verdampfung ein. Der die Oberfläche verlassende Massestrom ist ein Maß für die

eingestrahelte Energie, weil leicht siedende brennbare Flüssigkeiten sich praktisch nicht durchwärmen. Der aus der Flüssigkeitsoberfläche in die Gasphase eintretende Stoffstrom ergibt bei vollständiger Verbrennung die HRR. Andererseits kann aus dem Stoffstrom über die Verdampfungsenthalpie die Verdampfungsleistung ermittelt werden. Ermittelt man schließlich die prozentualen Anteile der Verdampfungsleistung an der HRR, so ergeben sich bei willkürlich ausgewählten Flüssigkeiten Werte zwischen 1 und 5 % der HRR. Da offensichtlich die HRR der mit stark rußender Flamme brennbaren Aromaten niedriger liegen dürfte als der maximal errechnete Wert, werden sich auch hier die Werte bei > 1 % einpegeln.

**Tabelle 2.10:** Anteil der Verdampfungsleistung brennender Flüssigkeiten an der HRR

Stoff	Abbrand- rate in kg/m <sup>2</sup>	Heiz- wert in kJ/kg	Flächen- bezogene HRR in kW/m <sup>2</sup>	Verdampfungs- enthalpie in kJ/kg	Verdampfungs- rate H <sub>v</sub> in kW/m <sup>2</sup>	(H <sub>v</sub> /HRR)*10 0%
Aceton	0,0438	28700	1258,02	523,35	22,94	1,82
Amylalkohol	0,0175	34700	607,25	502,416	8,79	1,45
Ethylalkohol	0,0155	26900	416,95	858,294	13,30	3,19
Butylalkohol	0,0145	30700	445,15	502,416	7,28	1,64
Methylalkohol	0,0158	19900	315,08	1117,8756	17,69	5,62
Benzol	0,0383	40060	1535,63	309,8232	11,87	0,77
Diethylether	0,06	33900	2034	376,812	22,60	1,11
Toloul	0,038	41030	1572,81	360,0648	13,80	0,88
Xylol	0,0288	41200	1187,93	343,3176	9,90	0,84

Die kondensierte Phase fester Stoffe, auch der zur Brandklasse B gerechneten schmelzenden Stoffe macht den Löschvorgang deutlich komplizierter. Feste Stoffe sind mit Ausnahme von Schüttungen meist dreidimensionale Objekte, bei denen die Lage ihrer Oberflächen im Raum beliebig sein kann. Bei derartigen Flächen können sich Teile der kondensierten Phase direkt im Flammenbereich befinden, so dass auch von den Verbrennungsgasen durch Konvektion Wärme übertragen werden kann. Dies wird deutlich, wenn man die Verbrennung in Holzkrippen als Beispiel betrachtet.



**Abbildung 2.9:** Holzkrippenbrand mit Wärmeübertragung durch Konvektion und verschiedenen Lagen der Brandstoffoberflächen

Für die verschiedenen Oberflächen werden natürlich auch unterschiedliche Stoffströme, je nach eingetragener Energie aus den Flammen, erwartet. Der Löschvorgang für dreidimensionale Brandobjekte muss vor allem die Energieübertragung an senkrechten und direkt mit den Flammen in Berührung stehenden Flächen unterbrechen. Es ist nicht zu vermeiden, dass auch Flammen mit dem Löschmittel in Berührung kommen und Energie abgeben. Ein weiterer Unterschied fester und schmelzender Stoffe ist die starke Aufheizung im Brandfall. Die Schmelz- bzw. Zersetzungstemperaturen liegen deutlich oberhalb der Siedetemperaturen der brennbaren Flüssigkeiten. Infolge des hohen Temperaturgradienten zwischen Oberfläche und Stoffinneren kommt es zu einer Erwärmung des Inneren des Stoffes. Der Aufheizung lässt bei schmelzenden Stoffen geschmolzene Schichten von 1 bis 2 cm Dicke entstehen. Diese Schichten besitzen einen deutlich größeren Energieinhalt als brennende Flüssigkeitsflächen. Das Löschmittel wird deshalb auch aus diesen Flächen mehr Energie aufnehmen und teilweise verdampfen. Bei nicht schmelzenden Stoffen wird mit zunehmender Temperatur im Brandstoff, die Pyrolyse der tieferen Schichten eingeleitet, was bei Erhalt der wesentlichen Struktur des Brandstoffes zur Vergrößerung der Oberflächen und zur Ausbildung von Hohlräumen führt. Bei fortgeschrittener Pyrolyse beginnt der an der Oberfläche verbleibende reaktive Kohlenstoff heterogen mit Luftsauerstoff zu reagieren. Es entsteht Energie unmittelbar an der Oberfläche, die durch direkte Wärmeleitung im Material sich verteilen kann. Der Kohlenstoff wird dabei zu Kohlenmonoxid oxidiert und an die Flammenzone abgegeben. Aus diesen Gründen ist die Energiebilanz kondensierter Flächen nicht sicher zu definieren. Da neben den am Verbrennungsprozess beteiligten Oberflächen

auch jene inerten Oberflächen mit berücksichtigt werden müssen, die potentiell als Zündquelle fungieren können, werden die Verhältnisse noch undurchsichtiger.

Wesentliche Einflussfaktoren für das Löschen an den Oberflächen der kondensierten Phasen sind:

1. Lage der Oberflächen im Raum,
1. Kontakt der Oberflächen mit den Flammen,
2. Ausbildung von geschmolzenen Schichten größerer Dicke bei schmelzenden Stoffen,
3. Ausbildung poröser innerer Oberflächen bei nicht schmelzenden Stoffen,
4. Verkohlung und Glimmen an den Oberflächen,
5. hohe Pyrolyse- und Gluttemperaturen,
6. Verformung des Materials,
7. Aschebildung an den Oberflächen,
8. Ausbildung von unbrennbaren festen Rückständen, die Löschmittel ableiten können,
9. Lage von Wänden, nichtbrennbaren Einbauten, Abdeckungen u. a. hinsichtlich möglicher Rückzündung und der Ableitung von Löschmittel.

Der Löschvorgang an der Oberfläche des brennbaren Stoffes erfordert zwar theoretisch deutlich weniger Löschmittel für den Kühlprozess, besitzt aber aufgrund der räumlichen und stofflichen Eigenschaften der kondensierten Phase deutlich mehr Einflussfaktoren, die seine Effizienz mindert. Es kann deshalb nicht verwundern, dass für das Löschen an den Oberflächen der kondensierten Phase durch [Rashbash 1986] eine Energieaufnahme zwischen 30 und 35 % der Gesamtenergie der Verbrennung bei experimentellen Untersuchungen festgestellt wurden. Trotzdem bleibt das Oberflächenlöschen für brennbare feste Stoffe und Flüssigkeiten sowohl in Bereich der stationären Anlagen als auch für die operative Brandbekämpfung unentbehrlich, weil entweder nur Teilbereiche einer deutlich größeren Brandfläche mit Löschmittel beaufschlagt werden können (Sprinkler- oder Sprühwasseranlagen) oder zum Zeitpunkt der Aufnahme der Brandbekämpfung durch die

Feuerwehren die Brandentwicklung soweit fortgeschritten ist, dass die Bedingungen für ein Volumenlöschen durch zerstörte Fenster, offene Türen und sonstige Luftführungen im Raum das Erreichen löscherfähiger Konzentrationen nicht mehr gegeben sind. Ein Löscherfolg erfordert in diesen Fällen das Löschen an der Oberfläche der an Brand beteiligten Stoffe. Die gegenwärtigen Ansätze zur Bestimmung der Massenströme für das Oberflächenlöschen berücksichtigen die innere Struktur der am Brand beteiligten Oberflächen und die tatsächlichen Gegebenheiten an den Oberflächen nicht. Sie gehen in der Regel entweder von einer Brandfläche aus, die der Grundfläche des Brandes entspricht und legen die erforderlichen Massenströme fest oder von einer zu bindenden HRR für die definierte Brandfläche, die vom Wasser aufgenommen werden muss.

### **Abhängigkeit der Effizienz des Löschwassers von den Oberflächentemperaturen**

Wird Löschwasser auf heiße Oberflächen gebracht, sollte eine direkte Wärmeleitung zwischen beiden Oberflächen stattfinden, die von den Bedingungen des Wärmeübergangs abhängig sind. Tatsächlich wurde bei hohen Temperaturen der Phasengrenzflächen (bis 800 °C) durch [Frick 1985] ein Wert von  $2 \cdot 10^6$  W/m<sup>2</sup> für einen kurzzeitigen Wärmeübergang angegeben. Dieser Vorgang dauert aber nur kurzzeitig an, weil sich an der Phasengrenze ein Film aus Wasserdampf ausbildet. Die Ausbildung des Dampffilms bei Wasser geschieht oberhalb der sogenannten Leidenfrost-Temperatur immer. Die Leidenfrost-Temperatur für Wasser kann nach Gleichung 39 abgeschätzt werden:

$$T_L = \frac{27 \cdot T_{krit}}{32} \quad \text{gültig für Systemdrücke} \quad p_r = \frac{p_s}{p_c} < 0,1 \quad (39)$$

Aus dieser Gleichung kann für Wasser die Leidenfrost-Temperatur mit  $T_{krit} = 647$  K und  $p_{krit} = 220,6$  bar [VDI-Wärmeatlas 1997] bei Normaldruck abgeleitet werden. Die Leidenfrost-Temperatur hat den Wert von  $T_L = 546$  K bzw. 272 °C.

Beide Phänomene erfordern, dass bei hohen Temperaturen der Oberflächen des brennbaren Stoffes die Ausbildung des Dampffilms ständig unterbrochen und der gebildete Wasserdampf abgeführt werden muss. Geschieht dies nicht, wird das im Kern kalt bleibende Wasser ungenutzt abfließen. Möglichkeiten der Abführung des Wasserdampfes bestehen durch hohe Geschwindigkeiten des Wassers bzw. durch hohe Turbulenz an den der Grenzfläche. Die Ausbildung von Dampfschichten zwischen den Oberflächen eines zu kühlenden Stoffes und dem Wasser oberhalb der Siedetemperatur beginnt bereits bei Temperaturunterschieden  $> 25$  K. In diesen Fällen werden durch den Wärmeübergang im Wasser Dampfblasen gebildet. Das Stadium des Blasensiedens ist erreicht. Der gebildete Dampf verschlechtert den

Wärmeübergang. Da sich auch unterhalb der Leidenfrosttemperatur Dampf mit isolierenden Eigenschaften auftritt, ist die Abführung des Wasserdampfes durch das neu zu zuführende Löschwasser eine Grundbedingung für den Löscherfolg.

Es ist zu beachten, dass sich die Verhältnisse des Wärmeübergangs zwischen dem Löschwasser und der heißen Brandstoffoberfläche zusätzlich temperaturabhängig verändern.

**Abhängigkeit der Massenströme bei unterschiedlichen Oberflächen**

Für die Prüfung der Löschwirkung von Löschwasser Handfeuerlöschern (Oberflächenlöschen) werden Holzkrippen verwendet, deren innere Oberflächen ( $O_{Inn}$ ) im Verhältnis zur Grundfläche ( $A_{Obj}$ ) nahezu konstant sind.

**Tabelle 2.11:** Brandobjekte nach DIN EN 3 für feste Stoffe

Brandobjekt	Grundfläche in m <sup>2</sup> $A_{Obj}$	Gesamtoberfläche m <sup>2</sup> $O_{Inn}$	Dimensionslose Oberfläche $f = O_{Inn}/A_{Obj}$
5A	0,25	4,53	18,31
8A	0,4	7,187	17,97
13A	0,65	11,61	17,86
21A	1,05	18,69	17,80
27A	1,35	23,99	17,77
34A	1,7	30,18	17,75
43A	2,15	38,05	17,70
55A	2,75	48,75	17,73

Löschversuche mit Handfeuerlöschern zeigen, dass mit 3; 6 und 9 kg Löschmittel die Brandobjekte 5A, 8A und 13A sicher beherrscht werden können. Das ergeben sich Massenstrom an Löschmittel bezogen auf die Grundfläche bzw. die Gesamtoberfläche wie in Tabelle 11 dargestellt.

**Tabelle 2.12:** Massenströme bei Handfeuerlöschprüfungen

Brandobjekt	Grundfläche in m <sup>2</sup> $A_{Obj}$	Gesamtoberfläche m <sup>2</sup> $O_{Inn}$	Massenstrom l/m <sup>2</sup> $r = m_W/A_{Obj}$	Massenstrom l/m <sup>2</sup> $r = m_W/O_{Inn}$
5A	0,25	4,53	12	0,66
8A	0,4	7,187	15	0,83
13A	0,65	11,61	13,9	0,7

Nach [Harvie, Kent 1998/99] wurden für einen Löscherfolg durch Tamanini bei kleinen vertikalen Holzteilen 0,132 kg/m<sup>2</sup>min und durch Unoki bei gepackten Holzstäben 0,18 kg/m<sup>2</sup>min benötigt. Harvie selbst erreichte bei seinen Versuchen Wasserbeaufschlagungen für einen Löscherfolg mit Sprinklern zwischen 0,6 und 1 l/min. In einer Übersichtsarbeit wurden durch [Grant, Brenton 2000] für verschiedene Anordnungen bei Holzbränden Anwendungsraten von 2,2 – 5,2 l/m<sup>2</sup>min und Beaufschlagungsraten von 5 l/m<sup>2</sup> angegeben. Für Plaste erreichten die Anwendungsraten nach [Grant, Brenton 2000] Werte von 0,19 – 0,45 l/m<sup>2</sup>min.

[Fuchs 1975] führte Löschversuche auf 12,8 m<sup>2</sup> Grundfläche durch. Auf der Grundfläche wurden Holzstäbe aus Kiefernholz (a = b = 0,02 m, l = 0,42 m) zu Holzkrippen aufgebaut. Die Brandstoffmenge betrug 380 kg und die Abstände zwischen den Hölzern entsprachen den Standardforderungen. Als Gesamtoberfläche aller Krippen wurde 112 m<sup>2</sup> ermittelt.

**Tabelle 2.13:** Ergebnisse der Löschversuche nach [Fuchs 1975]

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Masseabbrand kg/min	10,7	10,1	10,5
HRR (gesamt) kW	3402	3211	3329
Abbrandrate kg/min*m <sup>2</sup> Gesamtoberfläche	0,0955	0,0902	0,0938
HRR pro Gesamtoberfläche kW/m <sup>2</sup>	30,7	28,7	29,8
Abbrandrate kg/min*m <sup>2</sup> Grundfläche	0,821	0,789	0,82
HRR pro Grundfläche kW/m <sup>2</sup>	261	251	261
Löschzeit s	102	98,4	91,8
Löschmittel	Wasser	Wasser	Wasser
Gesamtverbrauch Löschmittel in kg	170	164	153
Wasserbeaufschlagung kg/m <sup>2</sup> bezogen auf Gesamtoberfläche	1,51(0,88)*	1,46 (0,9)*	1,37 (0,87)*
Wasserabfluss (Schadenswasser) l	71	63	57
Anwendungsrate kg/m <sup>2</sup> *min Gesamtoberfläche	0,89 (0,52)*	0,89 (0,55)*	0,90 (0,56)*
Energieaufnahme Wasser kW/m <sup>2</sup> Gesamtoberfläche	38,6	38,6	39
Effizienzfaktor $f = \text{HRR}_{\text{GesO}} / Q_{\text{W,GesO}}$	0,8	0,75	0,76
Anwendungsrate kg/m <sup>2</sup> *min Grundfläche	7,8	7,8	7,8

\* Schadenswasser wurde von Gesamtverbrauch abgezogen

Offensichtlich erreicht bei kleinen Brandobjekten der Effizienzfaktor für Löschwasser relativ hohe Werte, wenn man das ungenutzt abfließende Wasser berücksichtigt.

[Fuchs 1977] untersuchte die Löscheffizienz von Wasser an Möbeln. Der Raum, in dem diese Versuche ausgeführt wurden, hatte eine Grundfläche von 12,8 m<sup>2</sup>. Es wurde eine auf die Grundfläche bezogene Abbrandrate von  $V_{ab} = 0,093 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}$  und ein durchschnittlicher Wasserverbrauch von 0,83 l/m<sup>2</sup> Gesamtoberfläche bei diesen Versuchen ermittelt werden. Aus diesen Werten ergibt sich eine oberflächenbezogene HRR von 29,54 kW/m<sup>2</sup> und eine ebenfalls oberflächenbezogene Energieaufnahme für das Wasser von  $Q_{WMöb} = 35,96 \text{ kW/m}^2$ , woraus sich ein Effizienzfaktor von 0,81 bestimmen lässt.

### **Wirkungen durch Formänderungen und Abdeckung von Oberflächen**

Bei der Brandbekämpfung muss das Löschmittel grundsätzlich aus größerer Entfernung auf die an der Verbrennung beteiligten Oberflächen aufgebracht werden. Je nach Standort der Düse bzw. des Strahlrohres gibt es bei dreidimensionalen Brandstoffen unterschiedlich erreichbare Oberflächen für das Löschmittel:

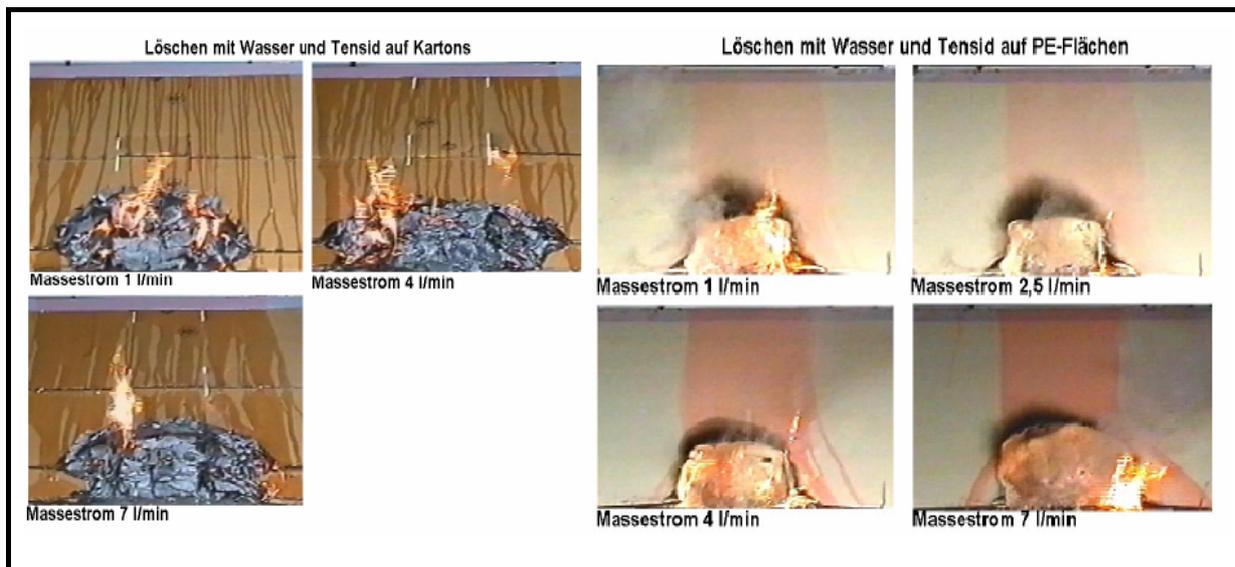
- Oberflächen, die direkt der Löschdüse gegenüber stehen und damit gleichmäßig mit dem Löschmittel beaufschlagt werden können.
- Flächen, die zwar sichtbar sind, denen jedoch andere Brandstoffflächen gegenüberstehen, so dass sich Kanäle ausbilden.
- Flächen, die von Standort der Löschmittelabgabe nicht einzusehen sind und an denen das Löschwasser sich nur während des Abfließens aus dem Bereich verteilen kann.
- Flächen, die sich in Hohlräumen ausbilden oder die durch unterschiedlichen Abbrand mit brennbarem Material überdacht werden.

Die direkt erreichbaren Flächen entsprechen dem einfachsten Fall. Das Löschmittel kann gut verteilt werden und es bildet sich eine Grenzschicht aus, die für einen guten Wärmeübergang sorgt. Natürlich gilt auch an dieser Grenzschicht, dass der Wasserdampf als mindernder Faktor für den Wärmeübergang abgeführt wird.

Kanäle sind durch versprühtes Wasser nur schwer erreichbar, weil zunächst der Öffnungswinkel des Sprühstrahls meist größer ist als die Kanalöffnung. Zusätzlich wirkt die im Kanal befindliche Luft als Strömungshindernis und zwingt das Löschwasser bereits zu Beginn der Kanalöffnung an die festen Oberflächen. Eigene Untersuchungen [Pleß et al.1994]

zeigten, dass in eine Kanalöffnung mit Luftströmung nur bei senkrecht von oben eingesetztem Wasser optimale Verhältnisse erreicht werden, die aber bei Luftströmung im Kanal rapide absinken. Seitlich eingebrachtes Wasser erzielt bei Luftströmung bessere Wirkungen, wobei aber die Verteilung ungleichmäßig ist. In jedem Fall erfordern Kanäle zwischen zwei parallelen Oberflächen brennbarer Stoffe einen höheren Aufwand an Löschmittel aufgrund ungleichmäßiger Verteilung und durch Verluste beim Eindringen in die Kanäle.

Oberflächen, die vom Düsenstandort nicht einsehbar sind, können nur indirekt mit Löschwasser beaufschlagt werden. Das Wasser wird somit von oben im Bereich der Oberflächen eingebracht. Es wird erwartet, dass das Wasser durch die Schwerkraft über diese Oberflächen fließt. Eigene Untersuchungen an geneigten Oberflächen mit einem Neigungswinkel von  $60^\circ$  zeigten allerdings, dass das abfließende Wasser durchaus nicht die gesamte Fläche benetzt, insbesondere heiße Stellen und brennende Bereiche werden regelrecht ausgespart, weil diese sowohl durch eine Wallbildung des brennenden Materials als auch durch die örtlich vorhandene Wärmeproduktion geschützt werden [Pleiß und Seliger 2000].



**Abbildung 2.10:** Freier Wasserfluss auf geneigten Flächen mit Bränden

Das frei fließende Wasser wird in diesen Fällen praktisch quantitativ um die brennende Stelle herumgeführt. Flammen können während der Verbrennung in innere Bereiche dreidimensionaler Brandstoffe vordringen und einen eigenen Brandherd ausbilden, der durch brennbare Stoffe nach einer oder mehreren Seiten abgedeckt wird. Diese Brände sind praktisch erst dann durch das Löschmittel erreichbar, wenn die schützenden Flächen beseitigt oder ebenfalls mit gezündet werden und abbrennen. Die genannten Beispiele zeigen, dass effizientes Löschen normalerweise nur an Flächen möglich ist, die direkt der Löschdüse

gegenüber stehen und bei denen eine effiziente Verteilung des Löschmittels über die gesamte Fläche möglich wird. Diese Anordnung war in der Mehrzahl aller Versuche gewählt, bei denen hohe Effizienzfaktoren für die Löschwirkung bestimmt wurden. Je mehr verdeckte Brände und schwer erreichbare Flächen die Brandbekämpfung bestimmen, desto geringer wird die Effizienz des Löschens. Am Beispiel eines Lagerstapels mit geringen Zwischenräumen, konnte nachgewiesen werden, dass nach Eindringen der Flammen in die Kartons in den inneren Kanälen selbst mit hohen Anwendungsraten der Brand nicht gelöscht werden konnte.

### 3 VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER LÖSCHINTENSITÄTEN

Die Brandunterdrückung bzw. Löschung ist folgerichtig der Prozess der Wechselwirkung der im Allgemeinen vier Systeme und deren Übergang in einen anderen Zustand. Um diese Prozesse zu erfassen, haben sich sowohl Experimente im Kleinmaßstab als auch im größeren Technikumsmaßstab bewährt. Klassisch wurden dabei Globale Verfahren benutzt, um die auf die Grundfläche oder "innere Oberfläche" bezogene Löschintensität zu ermitteln [Tamanini 76]. Dabei wurde das Löschmittel auf eine Holzkrippe oder Holzplatte aufgebracht und die notwendigen Größen wie Zeit, Masse des Brandstoffs, Fläche und Massenstrom an Löschmittel gemessen. Folgend der Auffassung, dass der Löschprozess in einen physikalischen und einen chemischen Anteil aufspalten lässt, der sowohl in der Flamme (Volumenlöschen) als auch an der kondensierten Phase abläuft, wurden in den letzten Jahren Methoden und Messapparaturen, die in der Verbrennungstechnik zur Untersuchung von Flammen eingesetzt werden, zur Untersuchung von Löschvorgängen in der Flamme übernommen und angepasst. Dies betrifft vor allem solche klassische Messapparaturen wie den Gegenstrom- und den Gleichstrombrenner. Neben diesen Brennerkonfigurationen werden auch so genannte Cup-Brenner oder poröse Brenner oder kleine Poolbrände im Labor eingesetzt [Weiser et al. 03], [Yang et al. 01], [Chang et al. 07]. Im Staupunktsapparat können die Löschvorgänge in der Flamme und im Brandstoff erforscht werden. Die Gleichstromapparatur ermöglicht die Beurteilung der Vorgänge in der Flamme, diese aber dafür sehr strukturiert. In diesen Apparaturen werden neben allgemeinen Ranking-Angaben vor allem Konzentrationsgrößen ermittelt, so dass diese als Grundlage für das Volumenlöschen dienen können. Eine Intensität lässt sich im Allgemeinen daraus nicht gewinnen. Infolge der bekannten Probleme bei der Übertragung von Versuchsergebnissen in die Realität, werden zur Beurteilung der Löschprozesse weiterhin Versuche im Technikums- und Großmaßstab eingesetzt. Unter Nutzung des AFF (Automatic Fire Fighters) wurden von [Starke et al. 96] Untersuchungen zum Löschen von Wassernebel und von [Madrzykowski and Stroup 98] Untersuchungen bezüglich der Löschmöglichkeiten für Reifenbrände im Technikumsmaßstab durchgeführt. Eine der wichtigsten Brandgrößen zur Einschätzung eines Brandes ist die Energiefreisetzungsrate. Dies führte, wie oben erwähnt, zur Forderung nach der Reduzierung dieser Größe bei Brandunterdrückung- bzw. Löschprozessen. [Arvindson 06] favorisiert deshalb eine Testmethode zur Einschätzung von Löschprozessen, die eine Kalorimetrimethode zur Bestimmung der Energiefreisetzungsrate auch während des

Wechselwirkungsprozesses mit dem Löchmittel nutzt. Die Theoretischen Grundlagen wurden für die Nutzung der Sauerstoffverbrauchskalorimetrie für Löschprozesse von [Dlugogorski et al . 94] angegeben. Die Methoden liefern nicht direkt die bisher von der Feuerwehr benutzten Löschintensitäten als Ergebnis. Dazu sind noch weitere Arbeiten notwendig.

## **4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN**

In der vorliegenden Literaturstudie wird ein Überblick über die im Feuerwehrwesen eingesetzten ingenieur-technischen Methoden zur Berechnung des zum Löschen mit Wasser benötigten Volumenstrom gegeben.

Es wird der Zusammenhang zur Modellierung einer Theorie der komplexen Brandbekämpfungsabläufe erörtert.

Die einzelnen Methoden zur Ermittlung der benötigten Löschintensitäten bzw. der Volumenströme wurden dargestellt und erläutert.

Experimentell werden Versuche zur Bestimmung der Löschintensitäten sowohl im Kleinmaßstab, Technikumsmaßstab als auch im Großmaßstab durchgeführt. Die Sauerstoffverbrauchskalorimetrie entwickelt sich zu einer Methode, die auch zur Beurteilung des Löschprozesses herangezogen wird.

Zur Schaffung von Grundlagen der ingenieur-technischen Methoden der Feuerwehr bildet die experimentelle Ermittlung der Löschintensitäten weiterhin eine wesentliche Grundlage.

Zukünftige Arbeiten müssen sowohl im Kleinmaßstab als auch im Großmaßstab durchgeführt werden. Dazu ist eine günstig die Sauerstoffverbrauchskalorimetrie einzusetzen. Dabei ist der Zusammenhang zu den bisherigen Messmethoden zu beachten.

## 5 LITERATUR

### **[Abduragimov et al. 79]**

Abduragimov, I., M.; Andronov, A., S., Rynkov, K., M.: Issledovanie zakonomernostej tušenija tverdyh gorucih materialov (Untersuchung der Gesetzmäßigkeiten beim Löschen fester brennbarer Materialien), Brandschutztechnik und Brandbekämpfung, Sammelband, Moskau: VNIPO, 1979, S. 164-175

### **[Arvidson 06]**

Magnus Arvidson: Pool fire tests to establish fire performance criteria in large machinery spaces, SP Report 2006:52, Borås, Sweden

### **[Atreya 93]**

Atreya, A.: Extinguishment of Combustible Porous Solids by Water Droplets, Report NIST-GCR-93-621, Gaithersburg, 1993

### **[Chang et al. 07]**

Chang, Jy-Ch.; Linb, Ch-M.; Huang, Sh-L.: Experimental study on the extinction of liquid pool fire by water droplet streams and sprays, Fire Safety Journal 42 (2007) 295–309

### **[Davis 00]**

Davis, S.: Fire Fighting Water: A Review of Fire Fighting Requirements. A New Zealand Perspective. Univers. of Canterbury, Christchurch, 2000

### **[Dlugogorski et al. 94]**

Dlugogorski, B., Z.; Mawhiney, J., R.; Duc, V.H.: The measurement of Heat Release Rates by Oxygen Consumption Calorimetry in Fires under Suppression, Proc. 4th Int. Symp. Fire Safety Scien., (1994), 877-888.

**[Ewing et al. 95]**

Ewing, C., T.; Faith, F., R.; Romans, J.B.; Siegman, Ch., W.; Oulette, R. J.; Hughes, J., Th. Carhart, W.H.: Extinguishing Class A Fires with Multipurpose Chemicals, Fire Technology, 3rd Quarter, p.195-211

**[Fuchs 76]**

Fuchs, P.: Brand und Löschversuche mit verschiedenen Löschmitteln in einem Versuchsraum natürlicher Größe. Internationales Brandschutzseminar, Stuttgart, 1976, S. 143-154

**[Fuchs and Seeger 81]**

Fuchs, P.; Seeger, P.G. : Ein mathematisches Modell zur Bestimmung der Löschwassermenge und Vergleich mit Experimenten. VFDB\_Zeitschrift (1981)1, S. 3-9

**[Fuchs 84]**

Fuchs, P.: On the Extinguishing Effect of Various Extinguishing Agents and Extinguishing Methods with Different Fuels. Fire Safety Journal. 7(1984), pp.165-175

**[Grant and Drysdale 96a]**

Grant, G. B.; Drysdale, D.: A Review of the Extinction Mechanisms of Diffusion Flame Fires, Home Office Fire Research and Development Group, FRDG Publication Number 6/96, London, 1996, Crown Copyright 1996

**[Grant and Drysdale 97]**

Grant, G.B.; Drysdale, D.: Estimating Heat Release Rates from Large-scale Tunnel Fires, Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Science, 1997 ,Melbourne, pp. 1213-1224

**[Grant et al. 00]**

Grant, G.; Brenton, J.; Drysdale, D.: Progress in Energy and Combustion Science, 26(2000) 79-130

**[Hirst 89]**

Hirst, R.: Underdown's Practical Fire Precautions, 3<sup>rd</sup> ed., Gower Technical, Aldershot, 1989

**[LIBS 06]**

Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb, 2006

**[Lode und Dettmar 56]**

Lode; Dettmar : Untersuchung über die Löschwassermenge bei einem Modellbrand, VFDB-Zeitschrift 5(1956)4, S. 141-142

**[Madrzykowski and Stroup 98]**

Madrzykowski, D; Stroup, D.: Chapter 5, Class A Fire Suppression Experiments, Report NISTR 6191, Gaithersburg, 1998

**[Muschik 90]**

Muschik, W.: "Six Lectures on Fundamentals and Methods Aspects of Non-Equilibrium Thermodynamics", Singapore etc., World Scientific, 1990

**[Novozhilov 02]**

Novozhilov, V.: Fundamentals and Applications of Fire Suppression Modelling Second NRIFD Symposium, 17-19.Juli 2002, 195-215

**[Novozhilov 07]**

Novozhilov, V.: Fire Suppression Studies, Thermal Science,11 (2007), 2, 161-180

**[Pietrzak and Patterson 79]**

Pietrzak, L., M.; Patterson, W. J.: Effect of Nozzels on Fires Studied in Terms of Flow Rate, Droplet Size, Fire Engineering, (1979) 12, pp. 28-33

**[Pietrzak and Dale 92]**

Pietrzak, L., M.; Dale, J., J.: User s Guide for the Fire Demand Model; A Physically Based Computer Simulation of the Suppression of Post-Flashover Compartment Fires, NIST-GCR-92-612, Santa Barbara, 1992

**[Pleß et al. 85]**

Pleß, G.; Kretzschmar, A.; Kohl, K.-J.: „Löschintensität, ihre Bedeutung und Berechnung“ und „Neue Berechnungsgrundlagen für das Wasserlöschverfahren“, Unser Brandschutz (1985) 11, S. 3- 8, Berlin, 1985.

**[Prasad et al. 02]**

Prasad, K.; Kailasanath, K.: Numerical Study on Water Mist Suppression of Large Scale Compartment Fires, Fire Safety Journal, 37(2002), pp. 569-589

**[Rashbash 86]**

Rashbash, D. J.: The Extinction of Fire with Plain Water, Proceedings of the First International Symposium Fire safety science, pp. 1145-1163, Hemisphere Pub. Corp., Washington, 1986.

**[Royer and Nelson 65]**

Royer, K., Nelson, F.W.: Water for Fire Fighting- Rate of Flow Formula, IOWA State University Bulletin 18, Ames, 1965

**[Särdqvist 96]**

Särdqvist, St.: Report 1014 Universität Lund, Lund, 1996

**[Särdqvist 00]**

Särdqvist, St.: Demand for Extinguishing Media in Manual Fire Fighting, PhD Thesis, Lund, 2000

**[Särdqvist and Holmstedt 01]**

Särdqvist, St.; Holmstedt, G.: Water for Manual fire Suppression, Journal off Fire Protection Engineering, 11(2001), 209-231

**[Schubert 79]**

Schubert, K.-H.: Problemanalyse zur Berechnung von Löschflächen unter der Berücksichtigung der im Industriebau vor allem bei eingeschossigen Hallen anzutreffenden Gegebenheiten in Abhängigkeit der Kräfte und Mittel der Feuerwehren, Dissertation, Berlin, 1979

**[Steinert 00]**

Steinert, C.: Experimentelle Untersuchungen zum Abbrand und Feuerübersprungsverhalten von Personenkraftwagen. vfdb-Zeitschrift, (2000)4, S.163-172

**[Svenson 02]**

Svenson, St.: The Operational Problem of Fire Control, Thesis, Report 1025 Universität Lund, Lund, 2002

**[Starke et al. 96]**

Starke, H., Wienecke, Fr.-W. , Grabski, R.: Fein verteiltes Wasser als Volumen- und Oberflächenlöschmittel, Institut der Feuerwehr, Bericht-Nr. 344, Heyrothsberge 1996

**[Tamanini 76]**

Tamanini, F.: The Application of Water Sprays to the Extinguishment of Crib Fires, Combust. Scien. Techn., 14(1976), p. 17-23

**[Weiser et al. 03]**

Weiser, V.; Kelzenberg, St.; Plitzko, Y.; Roth, E.: Einfluss unterschiedlicher Löschgase und Wassertropfen auf das Abbrand- und Löschverhalten von Brandflammen, Abschlußbericht zum Projekt Löschmechanismen, Projektnummer 007-107085, Fraunhofer-Institut Chemische Technologie, Pfinztal, Februar 2003

**[Yang et al. 01]**

Yang, J.,C.; Donnelly, M., K.; Prive, N., C.; Grosshandler, W., L.: An apparatus for screening fire suppression efficiency of dispersed liquid agents, Fire Safety Journal 36 (2001) 55-72