

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten, Teil 3: Wechselwirkung zwischen Löschwassertropfen und Plastoberflächen, Einbringung von Wassertropfen in Kanäle verdeckter Brände und organische Schadstoffe bei Plastbränden

101

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten

Teil 3: Wechselwirkung zwischen Löschwassertropfen und
Plastoberflächen, Einbringung von Wassertropfen
in Kanäle verdeckter Brände und organische Schad-
stoffe bei Plastbränden

Forschungsbericht Nr. 101

Im Auftrag
der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Bearbeiter: Dr. rer. nat. Georg Pleß
Dipl.-Chem. Ursula Seliger
Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Heyrothsberge
Juli 1996

ISSN 0170-0060

1. BERICHTSNUMMER

Instituts-Bericht Nr. 348

2. TITEL DES BERICHTES (KURZ)

Brandbekämpfung Thermoplaste Teil 3

3. AUTOR(EN)

Brandoberrat Dr. Georg Pleß
Dipl.-Chem. Ursula Seliger
Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke

4. DURCHFÜHRENDE INSTITUTION (NAME/ANSCHRIFT)

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Biederitzer Straße 5
D-39175 Heyrothsberge
Direktor: Branddirektor
Prof. Dr. rer. nat. habil. Grabski

5. FÖRDERNDE INSTITUTION/AUFTRAGGEBER (NAME/ANSCHRIFT)

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Ausschuß „Feuerwehrangelegenheiten“

6. ABSCHLUßDATUM

Juli 1996

7. FÖRDER-/ AUFTRAGS-NR.

IMK 5 (1/94) H

8. SEITENZAHL

85

9. ABBILDUNGEN

40

10. TABELLEN/DIAGRAMME

14

11. LITERATURANGABEN

32

12. KURZFASSUNG

In der Arbeit wurden Versuche zur Klärung der Wechselwirkung unterschiedlicher Wassertropfen an heißen Plastoberflächen ausgeführt. Es wurde festgestellt, daß reines Wasser mit zunehmender Temperatur der Plastoberfläche zu Reaktionen führt, die den Ausgangsimpuls des auftreffenden Tropfens übersteigen. Zusätze von Tensiden vermindern diese Reaktion. Des weiteren wurde die Einbringung von Wasser in Kanäle untersucht und festgestellt, daß eine gezielte Aufbringung von Einzeltropfen an den Kanalwänden infolge der im Kanal herrschenden Strömung nicht möglich ist. Im dritten Teil wurden die im Rauchgas befindlichen organischen Schadstoffe analysiert.

13. SCHLAGWÖRTER

Thermoplaste, Polyethylen, Polypropylen,
Polymethylmethacrylat, Kautschuk,
Polystyrol, Brand, Brandbekämpfung
Abbrandgeschwindigkeit, Messung,
Löschmittel, Tropfenimpuls, Schaummittel,
Schadstoffe,

14. VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

Juli 1996

Inhaltsverzeichnis:

0.	Vorbemerkungen	6
1.	Betrachtungen zur Löschwirkung von Wasser	6
1.1	Energieverhältnisse im Brandfall	6
1.2	Löschen im Volumen	8
1.3	Löschen an der Oberfläche	9
1.3.1	Vergleich von Oberflächen- und Volumenlöschung	9
2.	Analyse von Bränden fester Stoffe aus der Sicht der Brandbekämpfung mit wäßrigen Löschmitteln	10
3.	Art der Aufbringung von Löschwasser bei Bränden fester Stoffe	11
3.1	Voll- und Sprühstrahlen	11
3.2	Verluste bei Löschvorgängen	12
3.3	Transport des Löschwassers an die Oberflächen der kondensierten Phasen	13
3.4	Wechselwirkung des Löschwassers mit den Brandstoffoberflächen	16
4.	Bedingungen für das Löschen verdeckter Brände	19
4.1	Anwendungsrate	19
4.2	Applikationsmöglichkeiten für Löschmittel	20
5.	Experimentelle Untersuchungen	21
5.1	Untersuchung der Wirkung von Einzeltropfen an geschmolzenen Oberflächen	21
5.1.1	Zielstellung	21
5.1.2	Allgemeine Beschreibung zum Versuchsaufbau	22
5.1.3	Temperaturmessung auf der Kunststoffoberfläche	23
5.1.4	Messung der Tropfenfallgeschwindigkeit mittels Bildverarbeitung	23
5.1.5	Tropfenimpuls-Messung	24
5.1.6	Auswertemöglichkeiten durch integrierte Software	24
5.1.7	Messungen mit dem Impulsmeßgerät	25
5.1.7.1	Bestimmung des Impulses der Messung	25
5.1.7.2	Tropfen-Aufprallgeschwindigkeit, Tropfenmasse und berechneter Impuls	26
5.1.7.3	Impulsübertragung durch Stoß	28
5.1.8	Beschreibung der Versuchsdurchführung	28
5.1.9	Auswertung der Versuche	28
5.1.10	Schlußfolgerungen	39
5.2	Applikation von Löschwasser bei verdeckten Brandflächen	39
5.2.1	Typische Oberflächen verdeckter Brände	39
5.2.2	Gezielter Einsatz von Löschmittelstrahlen	40
5.2.3	Versuche zur Bestimmung der Beaufschlagung senkrechter Flächen in Kanälen	41
5.2.3.1	Versuchsaufbau	41
5.2.3.2	Ergebnisse der Versuche	43
5.2.4	Anwendungsraten für Brände mit verdeckten Brandflächen	46

5.3	Organische Zwischenprodukte in Flammen	47
5.3.1	Zersetzung und Verbrennung von Thermoplasten	47
5.3.2	Kinetik der ablaufenden Reaktion	50
5.3.3	Probenahme bei Plastbränden	51
5.4.3	Ergebnisse der Analysen	52
5.3.5	Empfehlungen für die Bewertung organischer Schadstoffe bei Plastbränden	54
6.	Empfehlungen zur Brandbekämpfung von Feststoffbränden	55
6.1	Lageerkundung	55
6.2	Lageeinschätzung und Ableitung der Maßnahmen für die Brandbekämpfung	55
6.3	Durchführung der Brandbekämpfung	56
7.	Literatur	57
Anhang 1		60
Anhang 2		69

Danksagung

Für die Vorbereitung und Ausführung der experimentellen Arbeiten wollen die Autoren an dieser Stelle den Laborantinnen Frau Sakowski und Frau Semken, sowie den Forschungsfacharbeitern Herrn Hartmann und Herrn Kulawik danken.

Die Durchführung und Auswertung der GC-MS-Analysen übernahmen Frau Dr. Richter und Herr Merkes. Ihnen gilt es ebenfalls, Dank auszusprechen.

0. Vorbemerkungen

In diesem Bericht werden die Untersuchungen zur mobilen Brandbekämpfung von Thermoplasten abgeschlossen. Es werden noch notwendige Aussagen zum Verhalten der Wassertropfen an den heißen Plastoberflächen, zur Einbringung der Wassertropfen in Kanäle verdeckter Brände und zur Entstehung von organischen Schadstoffen bei Plastbränden getroffen. Zum Abschluß der Arbeit werden Empfehlungen zur Brandbekämpfung von Thermoplasten abgeleitet.

1. Betrachtungen zur Löschwirkung von Wasser

1.1 Energieverhältnisse im Brandfall

Die Verbrennung von Stoffen in Luft kann grundsätzlich als Gasphasenreaktion aufgefaßt werden. Sie ist bei brennbaren festen oder flüssigen Stoffen dadurch gekennzeichnet, daß sich eine gasförmige Flammenzone über der kondensierten Phase ausbildet, in der die Reaktion der brennbaren Gase oder Dämpfe mit der Umgebungsluft stattfindet.

Die Reaktion von Gas / Dampf / Luftgemischen besitzt im Bereich stöchiometrischer Gemische die höchste Geschwindigkeit. Damit ist zu erwarten, daß sich die Reaktionszone innerhalb eines eng begrenzten Volumenbereiches ausbildet, in dem die Reaktionsprodukte ihr stöchiometrisches Verhältnis von Brandstoff und Luft erreichen [1]. Kinetische Untersuchungen haben gezeigt [2], daß die Reaktion des Kohlenmonoxides zu Kohlendioxid eine geringere Geschwindigkeit besitzt und somit ein Teil des Kohlenmonoxides in der Reaktionszone nicht zu Kohlendioxid oxidiert. Es sollte jedoch für eine Abschätzung der in der Flamme produzierten Energie ausreichen, wenn von einer stöchiometrischen Zusammensetzung in der Reaktionszone ausgegangen wird.

Die gesamte durch die Reaktion pro Zeiteinheit im Reaktionsvolumen freigesetzte Energie (Leistung der Flamme) dient zunächst zur Aufheizung der entstandenen Gase.

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_{n=1}^j m_n \cdot c_{pn} \cdot (T_F - T_0) \quad (1)$$

Die freigesetzte Energie ist ausreichend, um nachfolgende Reaktionsgemische zu zünden. Ein wesentlicher Teil der Energie wird durch Konvektion abgeführt bzw. durch Wärmestrahlung abgegeben. Die Temperaturen im Reaktionsvolumen erreichen für Kohlenwasserstoffe Werte zwischen 1900 und 2400 K [3]. Die Wärmestrahlung garantiert, daß bei gasförmigen Brandstoffen eine Vorheizung bis zur Zündung und bei flüssigen und festen Brandstoffen in der kondensierten Phase Verdampfungs- bzw. Zersetzungsvorgänge initiiert werden, die gas- bzw. dampfförmige brennbare Stoffe produzieren. Die gas- bzw. dampfförmigen Stoffe werden bis zum Eintritt in die Flamme durch die Wärmestrahlung aufgeheizt. Damit wird ausreichend gasförmiger und thermisch vorbereiteter Brandstoff nachgeliefert, der die Reaktion aufrechterhält. Es stellt sich nach einer Entwicklungsphase im Normalfall ein Gleichgewicht der Verbrennungsreaktion unter der Bedingung ein, daß äußere Faktoren die Reaktion nicht beeinflussen. Der Abbrand über einen längeren Zeitraum ist dann durch einen konstanten Massestrom gekennzeichnet.

$$\dot{m}_{Br} = \text{const} \quad (2)$$

\dot{m}_{Br} Massestrom des Brandstoffes in kg/s

Bezieht man diesen Massestrom auf die projizierte Grundfläche des brennbaren festen oder flüssigen Stoffes und bei Gasen auf die Fläche des Gasstromes unmittelbar vor der Flamme, so kann man den Massestrom als flächenbezogene Abbrandrate bzw. Verbrennungsgeschwindigkeit definieren.

$$\frac{\dot{m}_{Br}}{A_{proj}} \equiv r_{ab} \quad (3)$$

A_{proj} projizierte Brandfläche in m²
 r_{ab} Abbrandrate in kg/m²·s

Die Abbrandrate gibt damit den auf die Grundfläche (Ausströmfläche) des brennbaren Stoffes bezogenen Massestrom brennbarer Gase und Dämpfe wieder. Nach der Mischung dieses gasförmigen aus der kondensierten (festen oder flüssigen) Phase austretenden Massestromes mit der erforderlichen Luftmenge findet die Verbrennungsreaktion statt. Dabei wird im definierten Gasvolumen die für die Verbrennungsreaktion mögliche Energie freigesetzt.

$$r_{ab} \Delta H_H = (\dot{m}_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + \dot{m}_{N_2} \cdot c_{pN_2})(T_F - T_0) \quad (4)$$

bzw.

$$r_{ab} \cdot \Delta H_H = \dot{\Psi}_{Br} \quad (5)$$

$\dot{\Psi}_{Br}$ Energieflußdichte der Brennzone in kW/m²
 ΔH_H Heizwert des Brennstoffes in kJ/mol

Aus Gleichung (5) kann die Temperatur des Gasvolumens errechnet werden. Die rechte Seite der Gleichung stellt die im Volumen produzierte jedoch auf die projizierte Fläche bezogene Dichte der Energie (Energieflußdichte des Brandes) dar.

Die Wärmestrahlung des Reaktionsvolumens ist verantwortlich dafür, daß eine Wärmeübertragung aus dem Reaktionsvolumen auf die kondensierte Phase des brennbaren Stoffes möglich wird. Neben der Wärmestrahlung kann auch im untergeordneten Maß bei starker Konvektion der Verbrennungsgase und bei Verbrennungen innerhalb umschlossener Behältnisse Energie durch Konvektion oder Wärmeleitung übertragen werden.

Die von der Flamme abgestrahlte Wärme kann grundsätzlich über das Boltzmannsche Strahlungsgesetz bestimmt werden. Da aber die Strahlung aus dem Reaktionsvolumen nicht direkt die Oberfläche der kondensierten Phase erreicht, sondern den Massestrom brennbarer Gase und Dämpfe passiert, werden Anteile des Energiestromes absorbiert. Über die Bewertung des Massestromes kann indirekt der auf der Oberfläche der kondensierten Phase auftreffende Energiestrom abgeschätzt werden.

Nach der Zündung trägt die auf die Oberfläche auftreffende Wärmestrahlung dazu bei, daß sich die Oberfläche der kondensierten Phase aufheizt und ein ausreichender Massestrom brennbarer Dämpfe gebildet wird. Im Gleichgewicht der Verbrennung besitzt die Oberfläche eine für den Stoff definierte Temperatur, die bei unzersetzt verdampfenden Stoffen der Siedetemperatur

und bei sich zersetzenden Stoffen der Zersetzungstemperatur entspricht. Die Zersetzungstemperatur kann sich mit zunehmender Branddauer verschieben, ebenso auch die Zusammensetzung und der Massestrom der Zersetzungsprodukte. Geht man aber davon aus, daß im Bereich der konstanten Abbrandgeschwindigkeit auch die Oberflächentemperaturen konstant sind, dann entspricht die auftreffende Energieflußdichte der Energie, die für die Verdampfung bzw. Zersetzung des brennbaren Stoffes benötigt wird.

$$\dot{\Psi}_O = r_{ab} \cdot \Delta H_{V(Z)} \quad (5a)$$

$\dot{\Psi}_O$ Energieflußdichte an der Oberfläche der kondensierten Phase in kW/m²
 $\Delta H_{V(Z)}$ Verdampfungs- bzw. Zersetzungsenthalpie des brennbaren Stoffes in kJ/kg

Die in der Grenzfläche der kondensierten Phase gespeicherte Energie bleibt über den Zeitraum der Vollbrandphase konstant. Diese Aussage trifft nur dann zu, wenn innerhalb der Brandfläche keine weitere Grenzfläche der kondensierten Phase in die Reaktion einbezogen wird.

1.2 Löschen im Volumen

Die Unterbrechung der Verbrennungsreaktion direkt im Reaktionsvolumen erfordert die Reaktionstemperaturen des Gasvolumens soweit abzukühlen, daß eine Zündung nachfolgender Gemische nicht mehr gegeben ist. Damit muß die vom Löschwasser mindestens aufzunehmende Energieflußdichte die Differenz zwischen der im Volumen produzierten Energie und der Energie der Reaktionsgase bei Zündtemperatur der Gase und Dämpfe erreichen.

$$\dot{\Psi}_W = \dot{\Psi}_{Br} - \dot{\Psi}_{Gas} \quad (6)$$

$$\dot{\Psi}_{gas} = \sum_{\alpha=1}^i \dot{m}_\alpha c_{p\alpha} (T_Z - T_0) \quad (6a)$$

$$\dot{\Psi}_W = \dot{m}_{WRV} \cdot [c_{pW} (T_{SW} - T_0) + \Delta H_{VW}] \quad (6b)$$

Nach Umstellen der Gleichungen erhält man für den Massestrom des Wassers (Anwendungsrate Volumenlöschung) nachfolgende Gleichung:

$$\dot{m}_{WV} = r_{VW} = \frac{\dot{\Psi}_{Br} - \dot{\Psi}_{Gas}}{c_{pW} (T_{SW} - T_0) + \Delta H_{VW}} \quad (7)$$

\dot{m}_{WV} Massestrom an Löschwasser in kg/m²·s

Der Massestrom an Löschwasser entspricht der Anwendungsrate. Es ist aber zu beachten, daß bei Gasen eine fiktive Fläche des Gasstromes unmittelbar vor Eintritt in die Flamme angenommen wurde. Das Löschwasser wäre theoretisch gleichmäßig in der Reaktionszone zu verteilen. Da die Reaktionszone im Flammenraum zeitlich und örtlich veränderlich angenommen werden muß, ist das Löschwasser im gesamten Flammenvolumen, welches sich über der Grundfläche von 1 m² befindet, gleichmäßig zu verteilen.

Wesentliche stoffliche Parameter für das Löschen im Volumen sind die Heizwerte der brennbaren Gase und Dämpfe, die spezifischen Wärmen der Reaktionsgase sowie die Temperaturverhältnisse im Volumen.

1.3 Löschen an der Oberfläche

Das Löschen an der Oberfläche ist zunächst an das Vorhandensein einer kondensierten Phase gebunden. Der Eingriff in die Verbrennungsreaktion findet dadurch statt, daß Entstehung und Transport der brennbaren Gase und Dämpfe unterbunden bzw. gemindert werden. Der Verbrennungsreaktion wird durch die Unterbrechung des Massestromes der brennbaren Gase und Dämpfe die Energiebasis entzogen, so daß die Verbrennung nur noch in dem bereits verdampften und mit Luft vermischten Volumen stattfinden kann.

Wesentlich ist, daß bei der Oberflächenlöschung an der gesamten Oberfläche der Energiestrom, der von der Flamme zur Verdampfung bzw. Zersetzung der brennbaren Materialien genutzt wird, durch das Löschwasser aufgenommen wird [4].

$$\dot{\Psi}_{Ob} = r_{ab} \cdot \Delta H_{V(Z)} \quad (8)$$

Aus Gleichung (8) ergibt sich als Volumenstrom für das Löschwasser

$$\dot{m}_{WRO} = \frac{v_{ab} \cdot \Delta H_{V(Z)}}{c_{pW} \cdot (T_{SW} - T_0) + \Delta H_{VW}} \quad (9)$$

Die Oberflächenlöschung wird damit vorzugsweise von der Verdampfungsenthalpie bzw. der Zersetzungsenthalpie des brennbaren Stoffes bestimmt.

1.3.1 Vergleich von Oberflächen- und Volumenlöschung

Bildet man das Verhältnis der theoretisch erforderlichen Volumenströme an Löschwasser zwischen Oberflächenlöschung und Volumenlöschung, so erhält man:

$$\frac{R_{VW}}{R_{OW}} = \frac{\dot{m}_{WV}}{\dot{m}_{WO}} = \frac{\dot{\Psi}_{Br} - \dot{\Psi}_{Gas}}{\dot{\Psi}_{Ob}} \quad (10)$$

Die begrenzenden Randbedingungen gestatten jeweils nur bestimmte Arten von Bränden vorzugsweise durch Volumen- oder Oberflächenlöschung zu bekämpfen (Tabelle 1.3.1):

Tabelle 1.3.1: Verwendung von Oberflächen- und Volumenlöschmethoden für verschiedene Brände

Art des Brandes	Volumenlöschung	Oberflächenlöschung
Gasbrand, Freistrahler	x	-
Gasbrand, Flüssiggaslache, Fläche bis 3 m ²	x	x
Gasbrand, Flüssiggaslache > 10m ²	-	x
Flüssigkeitsbrand, Freistrahler	x	-
Flüssigkeitsbrand, Fläche < 3m ²	x	x
Flüssigkeitsbrand, Fläche >10m ²	-	x
Feststoffbrand, Brandklasse B, < 3 m ²	x	x
Feststoffbrand, Brandklasse A, < 3m ²	-	x
Feststoffbrand, Brandklasse A,B Räume, >10m ²	(x)	x
Feststoffbrand, > 10 m ²	-	x

2. Analyse von Bränden fester Stoffe aus der Sicht der Brandbekämpfung mit wäßrigen Löschmitteln

Feststoffbrände entstehen nach thermischer Aufbereitung des Brandstoffes durch Zündung der entstandenen brennbaren Gase und Dämpfe in der Gasphase. Die Reaktionszone befindet sich räumlich und zeitlich in unterschiedlichen Abständen von der Mischungszone entfernt im unteren Teil der Flammenzone. Es ist nicht mehr möglich, einen exakten Reaktionsort zu definieren.

Infolge der dreidimensionalen Ausdehnung fester Stoffe, ihrer unterschiedlichen Anordnung bei Lagerung, dem Vorhandensein von Zwischen- und Hohlräumen ist die sich aufbauende Flammenzone stark strukturiert. Innerhalb der vom Brand erfaßten Brandfläche bilden sich Brandherde aus, die einen in sich abgeschlossenen Einzelbrand darstellen. Die Anzahl von in sich geschlossenen Einzelbränden innerhalb eines ausgedehnten Feststoffbrandes kann in weiten Grenzen variieren. Ebenso können die Brandintensität, Flammenhöhe, Brandstoffoberfläche und Luftzuführung für jeden Einzelbrand unterschiedlich sein. Einzelne Brände können durch Teile des brennbaren Stoffes oder durch nichtbrennbare Materialien soweit verdeckt sein, daß weder Flamme noch Oberfläche des brennbaren Stoffes durch Löschmittel direkt beeinflusst werden. Zusätzlich bildet sich an den Oberflächen nichtschmelzender Feststoffe Glut mit Oberflächentemperaturen von 300 bis 500 °C aus, die aus kohlenstoffreichen organischen Zersetzungsprodukten besteht und eine große poröse Oberfläche besitzt. An diesen heißen Oberflächen reagiert vorhandener Luftsauerstoff in heterogener Reaktion mit Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid, welches in die Flamme abgeführt wird. Die Gluttemperatur ist ausreichend, um bei einer Volumenlöschung die Pyrolyseprodukte neu zu zünden. Damit ist eine Volumenlöschung von Feststoffbränden, mit Ausnahme kleiner Brände schmelzender Feststoffe in der Anfangsphase vor Ausbildung verdeckter Brände, unmöglich [5].

Die Brandbekämpfung mit Löschmitteln, die eine Oberflächenlöschung gestatten, wird erschwert, durch

- geschlossene Einzelbrände innerhalb eines Großbrandes, deren Anzahl und Parameter nicht abgeschätzt werden können,
- veränderliche und in ihrer Lage nicht definierte Brandstoffoberflächen,
- die Ausbildung neuer Oberflächen während des Brandverlaufs,
- Flächen aus Brandstoff oder nichtbrennbaren Materialien, welche die heiße Oberfläche des reagierenden Brandstoffes verdecken.

Jeder Einzelfaktor verlangt aus der Sicht der Brandbekämpfung eine gesonderte Maßnahme bezüglich des Einsatzes der Löschtechnik und -mittel.

Da die Löschwirksamkeit von Oberflächenlöschmitteln in Verbindung mit der vorhandenen Löschtechnik an definierten Versuchsbränden hinreichend erprobt und eine Effizienz der Löschmittel nachgewiesen ist, die in realen Brandfällen objektiv nicht annähernd erreicht wird, besteht die wesentliche Schwierigkeit in der Beherrschung des strukturierten Brandobjektes mit seinen in sich geschlossenen Einzelbränden.

3. Art der Aufbringung von Löschwasser bei Bränden fester Stoffe

3.1 Voll- und Sprühstrahlen

Allgemein ist bekannt, daß Vollstrahlen größere Wurfweiten besitzen, dafür aber nur geringe Brandflächen beaufschlagt werden können. Sprühstrahlen dagegen besitzen eine geringere Wurfweite, können aber infolge der Zerteilung des Wasserstrahles in Einzeltropfen große Flächen beaufschlagen. Diese Aussagen sind zunächst einleuchtend, wenn man die beiden Strahlarten ohne Brandeinwirkung untersucht. Der Sprühkegel eines Sprühstrahles hüllt je nach Austrittswinkel des Wasserstrahls bereits nach kurzer Entfernung ein sehr großes Volumen ein, in dem die Einzeltropfen möglichst gleichmäßig verteilt sein sollten. Der Impuls des Löschwassers ist auf die Einzeltropfen verteilt. Der Einzelimpuls ist mit abnehmendem Tropfendurchmesser bei gleicher Geschwindigkeit geringer. Ein Ausgleich durch eine höhere Anfangsgeschwindigkeit der Wassertropfen ist möglich, jedoch sind hier Grenzen durch die Oberflächenspannung gesetzt, die bei sehr starker Beschleunigung die Zerteilung des Tropfens begünstigt. Nach Radusch und Krüger [6] ergibt sich die maximale Geschwindigkeit eines Tropfens zu

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma}{d \cdot \rho_w}} \quad (11)$$

Darin bedeuten:

v_{\max}	maximale Tropfengeschwindigkeit	in	m/s
σ	Oberflächenspannung des Wassers	in	N/m
ρ	Dichte des Wassers	in	kg/m ³
d	Durchmesser des Tropfens	in	m

Damit läßt sich auch der maximale Impuls eines Wassertropfens bestimmen

$$p_{\max} = m \cdot v_{\max} = \frac{\pi \cdot d^2}{3} \cdot \sqrt{2d \cdot \sigma \cdot \rho_w} \quad (12)$$

p_{\max}	maximaler Impuls eines Wassertropfens	in	Ns
m	Masse eines Wassertropfens	in	kg

Für den Vollstrahl ist infolge des kompakten Strahles der Impuls wesentlich größer. Erst bei Aufreißen des Strahles wird der noch vorhandene Impuls an die Einzeltropfen weitergegeben, die aber infolge geringerer Geschwindigkeiten in diesem Strahlbereich größere Tropfendurchmesser besitzen müssen. Damit sind selbst im Bereich der Auflösung des Vollstrahles noch größere Impulse der Einzeltropfen zu erwarten als bei Sprühstrahlen.

3.2 Verluste bei Löschvorgängen

Bei Löschvorgängen im Volumen gilt es, die Flamme vollständig einzuhüllen und eine löschfähige Konzentration an Löschwassertropfen zu erzeugen. Die Einzelimpulse der Wassertropfen sollten deshalb so groß sein, daß die in der Regel im rechten Winkel zur Strömungsrichtung der Flammenzone, im ungünstigsten Fall entgegen der Strömungsrichtung, eingebrachten Wassertropfen die Flammenzone völlig durchdringen. Im Ergebnis müssen beide Freistrahlen sich soweit vermischen, daß die Flammenreaktion zum Erliegen kommt. Der Löscherfolg wird erst erzielt, wenn in der Reaktionszone die erforderliche Löschkonzentration aufgebaut ist. Die eigentliche Löschezit ist eine kinetisch bedingte Größe, die im Vergleich zur Zeit des Aufbaus der erforderlichen Konzentrationsverhältnisse im Volumen sehr klein ist und damit bedeutungslos wird. Der Löscherfolg ist immer die Gesamtablöschung des Brandes. Teilerfolge sind nur solange möglich, wie die Löschkonzentration örtlich aufrechterhalten werden kann. Für die Volumenlöschung sind vor allem Sprühstrahlen mit ausreichenden Teilchenimpulsen aber auch Vollstrahlen bei genügender Verteilung auf der Brennstoffoberfläche geeignet. Das Löschen im Volumen ist an definierte Flammgeometrien (brennende Freistrahlen) gebunden und kann bei kleinen Freibränden kondensierter Brandstoffe ohne Glutbildung an der Phasengrenzfläche erfolgreich sein, wenn die gesamte Flamme durch den Löschmittelstrahl eingehüllt wird. Mit durch Hochdruck (40 bar) zerstäubtem Wasser als Volumenlöschmittel konnten Brandflächen brennbarer Flüssigkeiten bis maximal 3 m^2 gelöscht werden. Eine Volumenlöschung ist auch in geschlossenen Gebäuden möglich, wenn die löschfähige Konzentration durch den räumlichen Abschluß des Volumens aufgebaut werden kann. Es ist zu beachten, daß nur hohe Anwendungsraten kleiner Wassertropfen mit geringer Sinkgeschwindigkeit erfolgreich sind, weil die löschfähige Konzentration im Raum als zeitlich abhängige Größe aufgebaut werden muß. Die Löschwirkung ist dann vergleichbar mit derjenigen eines inerten Löschgases.

Verluste treten auf, wenn keine ausreichende Mischung zwischen Löschmittelstrahl und Flammenstrahl erfolgt. Die Ursachen können in zu geringem oder zu starkem Impuls des Löschmittelstrahles begründet sein. Infolge von Hindernissen im Raum können die Strömungsbedingungen soweit verändert werden, daß ein Löscherfolg unmöglich wird. Bei Sprühstrahlen können die notwendigen Abstände von der Flamme einen Aufbau löschfähiger Konzentrationen im Reaktionsvolumen von vornherein unmöglich machen. Beim Aufbau löschfähiger Konzentrationen in geschlossenen Räumen sind Verluste insbesondere durch große Tropfen mit hohen Sinkgeschwindigkeiten möglich. Den Löscherfolg verhindern können aber auch örtlich abgegrenzte Gebiete, die von der Strömung nicht erfaßt werden.

Die Oberflächenlöschung erfordert zur Abschreckung der kondensierten Phasengrenzfläche, daß das Löschwasser möglichst verlustlos an die Oberflächen der kondensierten Brandstoffe geführt wird und auf diesen gleichmäßig verteilt wird. Um die Oberflächen zu erreichen, müssen die Wassertropfen die Flammenzone bei Beaufschlagung entgegen der Strömungsrichtung der Flamme (Sprinkler, stationäre Löschdüsen) passieren. Bei mobiler Beaufschlagung erfolgt der Durchgang durch die Flammenzone nur teilweise. In der Flammenzone sind die Tropfen einer heißen Gasströmung ausgesetzt. Bei Simulationsversuchen mit Sprinklern hat Kunkelmann [7] festgestellt, daß Tropfen aus Sprinklern mit mittleren Durchmessern von $0,001 \text{ m}$ bei Bränden von 900 kW aus einer Höhe von 3 m die Oberfläche des Brandgutes erreichen. Tropfen mit Durchmessern von $0,0005 \text{ m}$ und darunter verdampfen in der Heißgasströmung. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch Heinzl [8] in einer Einschätzung des Masseverlustes von Wassertropfen in heißer Umgebung.

Die Verdampfung der Wassertropfen in der Heißgasströmung führt zu einer Verringerung der Temperaturen in Räumen, insbesondere in den Heißgasschichten unmittelbar im Deckenbereich. Dieser Effekt kann aber durch die zusätzliche Luftzuführung durch den Sprühstrahl aufgehoben bzw. umgekehrt werden. Bei Bränden im Freien erzielen Kühlvorgänge in der Gasphase, wenn sie nicht zum Löscherfolg führen, praktisch keine Wirkung. Die Flamme, verant-

wortlich für die Rückstrahlung der Energie auf die kondensierte Brandstoffoberfläche, wird nur unwesentlich beeinflusst. Damit ist das in der Flamme verdampfte Löschwasser für den eigentlichen Löschvorgang wirkungslos.

Weitere Schwierigkeiten treten auf, wenn bei Sprühstrahlen der Abstand zur Oberfläche des Brandstoffes zu groß wird und damit die erforderliche Anwendungsrate nicht mehr erreicht wird. Bei verdeckten Bränden können einzelne Oberflächen des Brandstoffes nicht direkt beaufschlagt werden, so daß an diesen Orten praktisch kein Löscherfolg erzielt werden kann.

3.3 Transport des Löschwassers an die Oberflächen der kondensierten Phasen

Wird die Oberflächenlöschung bei Bränden mit kondensierten Brandstoffen als bestimmender Schritt für den Löscherfolg angesehen, so muß die Löschtaktik auf ein verlustloses Aufbringen des gesamten Löschwassers auf die Oberflächen des brennbaren Stoffes ausgerichtet sein. Verluste durch die vorzeitige Verdampfung des Löschwassers in der Flammenzone und infolge Ablenkung durch die Heißgasströmungen müssen ausgeschlossen bzw. unterbunden werden. Die Applikation des Löschwassers auf die Oberflächen des brennbaren Stoffes muß so gestaltet werden, daß sowohl die erforderlichen Anwendungsraten als auch die gleichmäßige Verteilung garantiert sind.

Eine vorzeitige Verdampfung des Löschwassers kann weitgehend verhindert werden, wenn die Größe der Einzeltropfen so bemessen ist, daß beim Durchtritt durch die Flammenfront keine Verdampfung einsetzen kann. Deshalb sollten die Tropfengrößen der Sprühstrahlen, mit denen eine Applikation des Löschwassers auf die Oberfläche durch die Flammenfront hindurch realisiert werden soll, Mindestdurchmesser von 0,001 m besitzen [7].

Die Anwendung kleinerer Tropfen erfordert die Applikation des Löschwassers auf den Oberflächen unter Umgehung der Flammenzone. Hierfür bieten sich die natürlichen Strömungswege eines Brandes an. Löschwasser in feinsten Verteilung (Wasserdampfnebel, Hochdrucknebel) sollte vorzugsweise in den natürlichen Strom der vom Brand angesaugten Frischluft eingegeben werden. Die geringere Absetzgeschwindigkeit feiner Tropfen im Luftstrom begünstigt diese Einbringungsart.

Können die Eintrittsfenster für Frischluft bei einem entwickelten Brand nicht eindeutig erkundet bzw. durch äußere Bedingungen oder zu geringe Reichweiten der Löschmittelstrahlen nicht erreicht werden, dann verbietet sich der Einsatz von Tropfen in feinsten Verteilung.

Die Anwendungsrate muss garantieren, daß in der gewünschten Löschentfernung auf den Oberflächen ein Löscherfolg erreicht wird. Nach eigenen Auswertungen von Versuchsergebnissen und Großbränden, in denen mit Wasser gelöscht wurde [5], sollte die Anwendungsrate die nachfolgenden Werte nicht unterschreiten. In diesen Anwendungsrate ist ein Sicherheitsfaktor von $f = 1,5 - 2$ berücksichtigt.

Tabelle 3.3.1: Anwendungsraten für Wasser als Löschmittel

Brandstoff	Löschwasserapplikation	Zusätze	Anwendungsrate in $l/min \cdot m^2$
schmelzende Stoffe	Vollstrahl	ohne	8
	Sprühstrahl	ohne	6
	Sprühstrahl	Tensid (Mehrbereich/AFFF)	4
glutbildende Stoffe	Vollstrahl	ohne	10
	Sprühstrahl	ohne	8
	Sprühstrahl	Tensid (Mehrbereich/AFFF)	6

Die minimale Anwendungsrate als Grenzwert für das Ablöschen eines kompakten Holzblockes wurden von Abduragimov [9] mit $1,6 l/min \cdot m^2$ angegeben. Legt man die in Tabelle 3.3.1 fixierten Grenzwerte für die Anwendungsrate zugrunde, so kann man die Löscheinleistungen der in den Feuerwehren genutzten Strahlrohre abschätzen und bei Kenntnis der Ausbreitung des Sprühstrahls auch die optimale Löschentfernung bestimmen. In Abbildung 3.3.1 und 3.3.2 sind die optimalen Entfernungen für Löschdüsen mit Durchsätzen von 200 und 600 l/min bei Anwendung entgegen der Strömungsrichtung dargestellt.

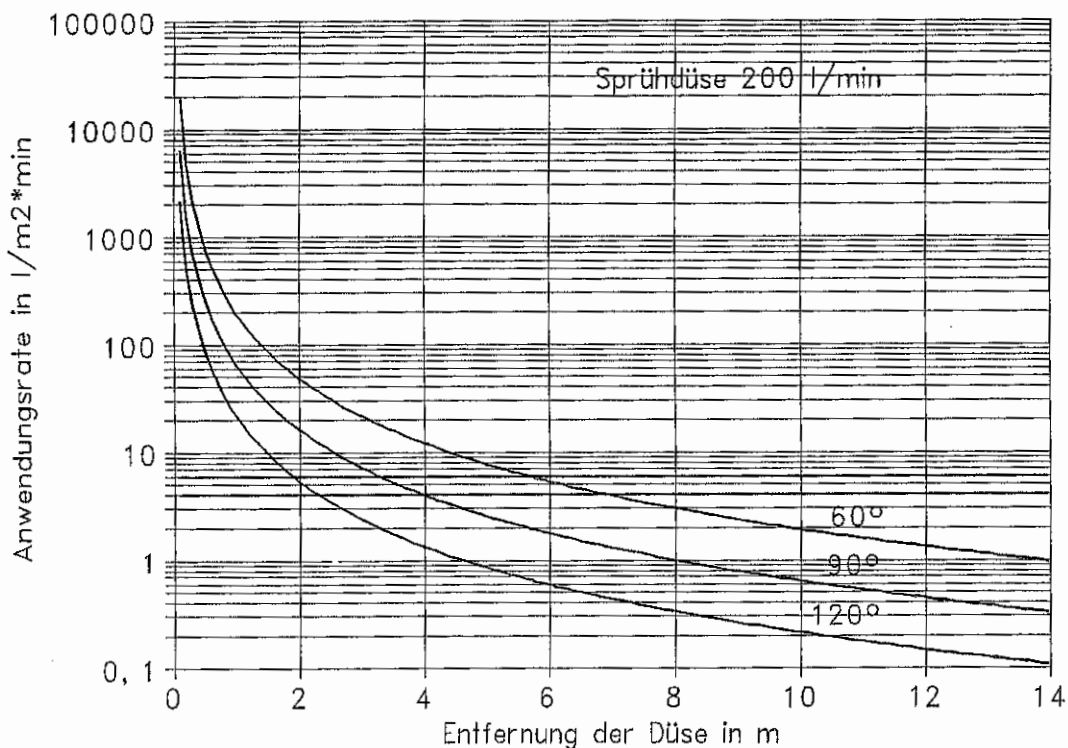


Abbildung 3.3.1: Strahlausbreitung bei Löschdüsen

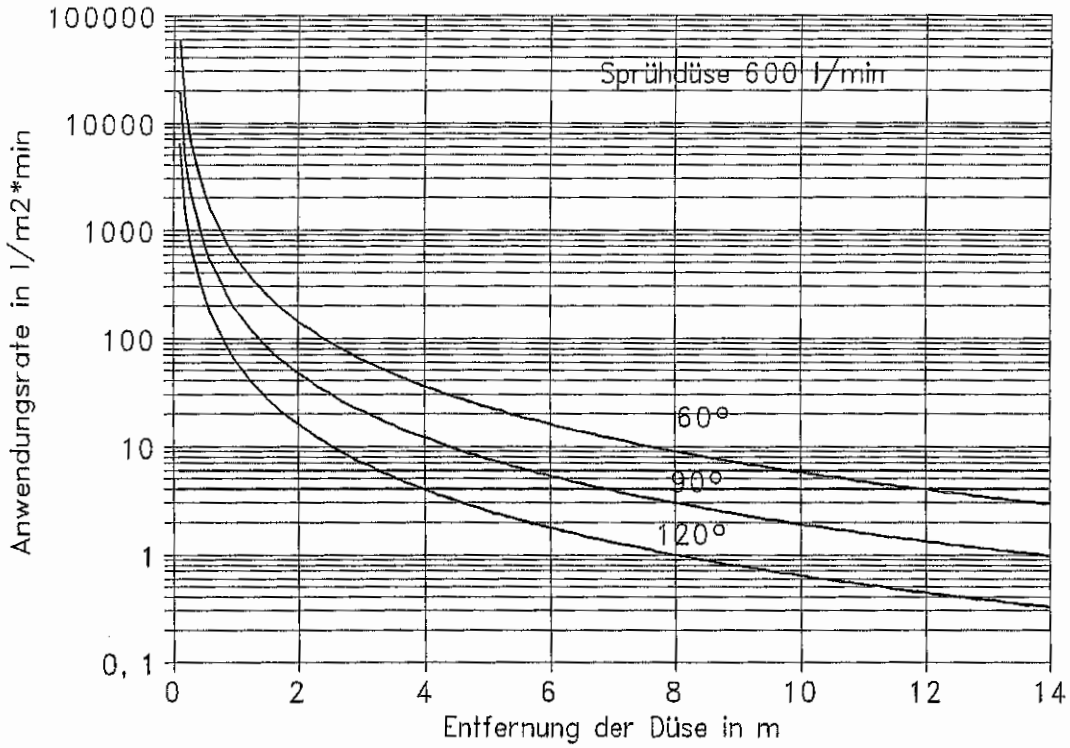


Abbildung 3.3.2: Strahlausbreitung bei Löschdüsen

Die eingezeichneten Grenzwerte zeigen die optimalen Löschweiten. Bei unterschiedlichen Anstellwinkeln werden nach Euteneuer [32] die in Abbildung 3.3.3 dargestellten Wurfweiten erzielt.

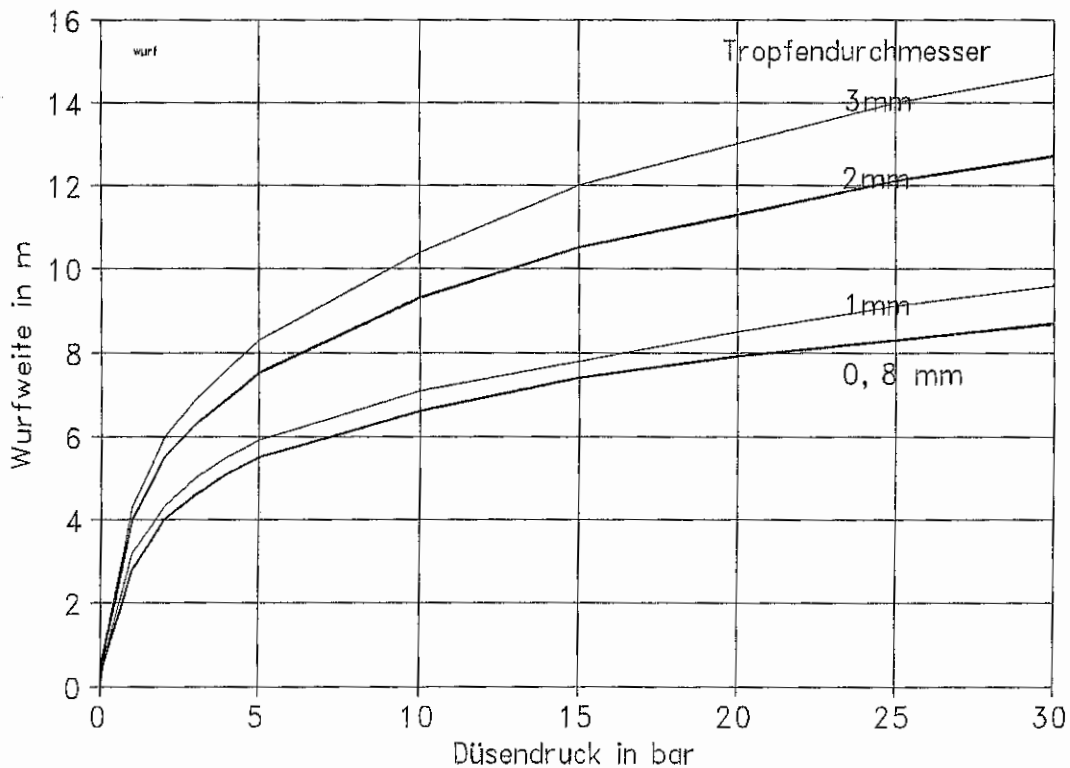


Abbildung 3.3.2: Wurfweiten von Strahlrohren in Abhängigkeit vom Druck am Strahlrohr nach Euteneuer

Optimale Löschwirkungen werden nur auf den Flächen erzielt, auf denen die Anwendungsrate erreicht wird. Auf Flächen mit wesentlicher Vergrößerung der Anwendungsrate wird ein Teil des Löschmittels ungenutzt abfließen. Für die Einsatzkäfte ist es deshalb wesentlich, daß die Reichweite des Sprühstrahls ausgenutzt und der Sprühstrahl im Bereich seiner optimalen Anwendungsrate auf die Brandfläche ausgerichtet ist.

3.4 Wechselwirkung des Löschwassers mit den Brandstoffoberflächen

Die Brandstoffoberflächen kondensierter Brandstoffe können flüssig (brennbare Flüssigkeiten), geschmolzen (Thermoplaste und feste Chemikalien mit definiertem Schmelzpunkt) oder fest und porös (Holz, Zellulosen, Naturstoffe, Duroplaste und kondensierbare Thermoplaste) sein.

Die Löschwirkung des Wassers bei Schmelzen ist in der Abkühlung der Oberflächenschicht und Ausbildung fester Grenzflächen mit Sperrschichtwirkung zu sehen [10]. Bei festen Oberflächen erfolgt die Ausbildung der Sperrschicht für Pyrolyseprodukte durch Benetzen der Oberfläche und Eindringen in die poröse Oberfläche. Reines Wasser muß zum Erreichen dieser Ziele eine ausreichende kinetische Energie mitführen, weil durch die große Oberflächenspannung des Löschwassers eine Benetzung der Plastoberflächen nicht möglich ist. Die Beurteilung der Berührungsfläche des festen Stoffes, ohne Vergrößerung durch kinetische Energie, kann über den Randwinkel erfolgen, welcher definiert ist als [11]

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} \quad (13)$$

Θ	Randwinkel	in	grad
σ_{sg}	Oberflächenspannung des Feststoffes	in	N/m
σ_{sl}	Grenzflächenspannung zwischen Feststoff und Flüssigkeit	in	N/m
σ_{lg}	Oberflächenspannung der Flüssigkeit	in	N/m

Der Randwinkel wird um so kleiner, je weniger die Oberflächenspannungen des Wassers und des Brandstoffes sich unterscheiden. Bei Thermoplasten mit geringen Oberflächenspannungen ist der Zusatz eines Tensides zur besseren Benetzung der Oberflächen des Brandstoffes angeraten.

Neben der Benetzungsfläche hängt auch die Eindringfläche von der kinetischen Energie ab, die der Tropfen beim Auftreffen besitzt, da die Oberflächenspannung als mechanische Arbeit zur Flächenvergrößerung definiert ist:

$$\sigma = \frac{dE}{dA} \quad (14)$$

E	Energie	in	Nm
A	Fläche	in	m ²

Beim Auftreffen von Wasser auf heiße Oberflächen mit geringer Benetzbarkeit (geringer Oberflächenspannung, wie Thermoplaste, Rußschichten, pyrolysierte Oberflächen mit öligen Verbindungen) bilden sich die Tropfen nach einer anfänglichen Verformung durch den Auftreffimpuls sehr schnell wieder aus, wobei eine Zerteilung des Tropfens an der Oberfläche nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Einzeltropfen nehmen Wärme auf und es bildet sich eine Dampfschicht zwischen Tropfen und heißer Oberfläche aus, die den weiteren Wärmeübergang wesentlich hemmt und zu Bewegungsimpulsen mit Eruption von Plastpartikeln führt. Dieser Vorgang wurde bei heißen Oberflächen der Thermoplaste näher untersucht. Die Ergebnisse sind in einem späteren Kapitel zusammengefaßt und ausgewertet.

Feste und geschmolzene Oberflächen von Brandstoffen müssen zumindest an der äußeren Schicht mit Wasser beaufschlagt sein. Um einen kompletten Wasserfilm zu erzeugen, ist es erforderlich, die Oberfläche bis auf 100 °C abzukühlen und, bei Verwendung von reinem Wasser, die Einzeltropfen gleichmäßig über die gesamte Fläche zu verteilen. Wird die Wasserbeaufschlagung zu hoch, fließt das überschüssige Wasser von der Oberfläche ungenutzt ab. Näherungsweise läßt sich die Schichtdicke als laminare Grenzschichtdicke einer angeströmten Platte auffassen. Unter der Voraussetzung, daß an allen Stellen der Strömung gleiche Geschwindigkeiten herrschen, kann die Lösung von Blasius herangezogen werden [12]:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (15)$$

$$\text{Re}_x = \frac{v_x \cdot x}{\nu} \quad (16)$$

$$\delta = 5 \cdot \sqrt{\frac{x \cdot \nu}{v_x}} \quad (17)$$

δ	laminare Grenzschichtdicke	in	m
x	Lauflänge	in	m
v_x	Geschwindigkeit	in	m/s
Re_x	Reynoldszahl		
ν	kinematische Viskosität	in	m ² /s

Abbildung 3.4.1 beinhaltet die Grenzschichtdicken bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Lauflänge.

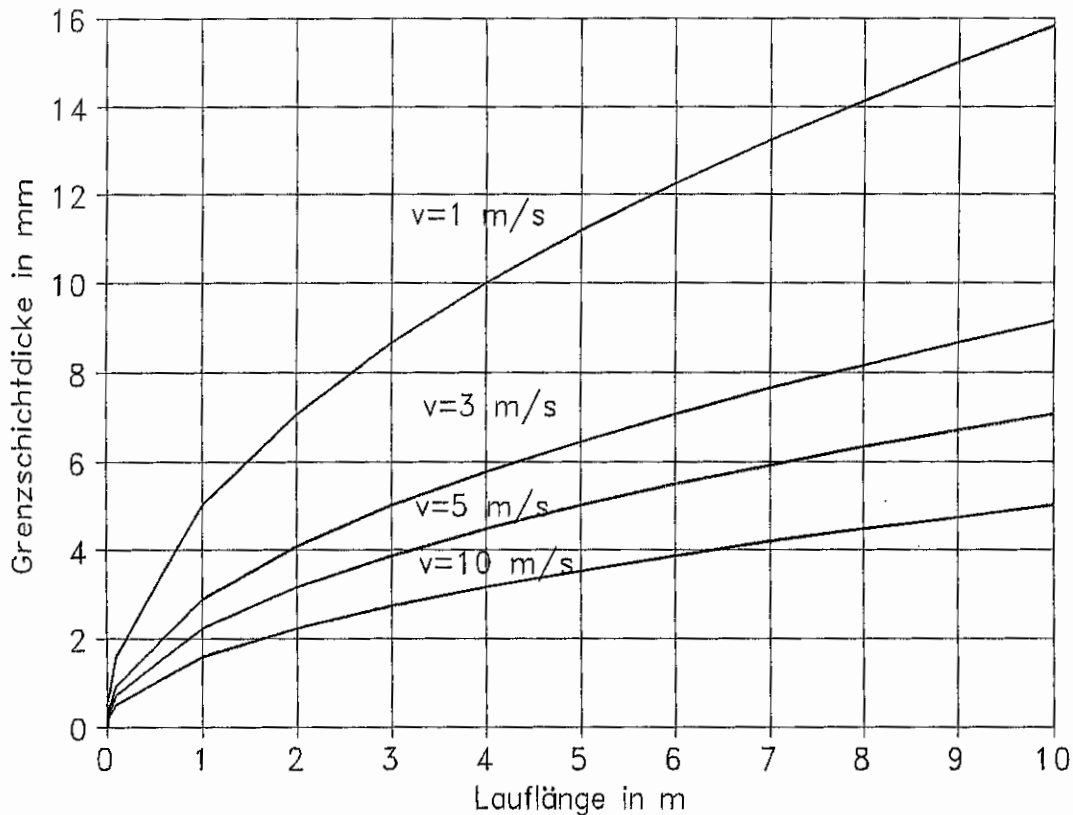


Abbildung 3.4.1: Laminare Grenzschichtdicken von Wasser bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Geht man davon aus, daß die Lauflängen beim Einsatz von Sprühstrahlen infolge der Verteilung der Tropfen innerhalb des Sprühkegels geringer als 0,1 m sind und die Tropfengeschwindigkeit nicht wesentlich von der Bewegungsgeschwindigkeit des Wassers auf der Oberfläche abweicht und mindestens 1 m/s erreicht, dann bauen sich Wasserschichten von ca. 1,5 mm Dicke auf. Legt man diesen Wert zugrunde, so kann man ohne Benetzung der Oberfläche eine Wassermenge von 1,5 l/m² sicher aufbringen. Liegen die Werte höher, muß bereits mit dem Abfließen des Wassers gerechnet werden

Unter Berücksichtigung dieser Kenntnisse ist eine kontinuierliche Beaufschlagung der Brandflächen mit ausreichender Anwendungsrate immer mit Verlusten durch abfließendes Wasser verbunden. Andererseits gefährdet die Verminderung der Anwendungsrate den Löscherfolg. Es muß eine Mindestanwendungsrate vorhanden sein, um an der Oberfläche einen Wasserfilm zu erzeugen. Ist der Wasserfilm aber aufgebaut, dann liegt die Anwendungsrate höher als die an der Oberfläche fixierbare Schicht.

Daraus ergeben sich Anforderungen an die Verteilung des Löschwassers während der Brandbekämpfung durch:

- Bewegen der Strahlrohre über die brennenden Oberflächen zum Aufbau intermittierender Beaufschlagungen am jeweiligen Löschorth,
- intermittierende Aufbringung,
- einmalige Beaufschlagung der Oberfläche mit hoher Anwendungsrate und günstiger Verteilung.

Diese Anforderungen gelten für Oberflächen mit leichter Zugänglichkeit, an denen mit normalen Strahlrohren die entsprechende Wassermenge als Tropfen gleichmäßig verteilt oder als

kompakte Masse mit entsprechendem Impuls zur Verteilung beim Auftreffen auf der Oberfläche aufgebracht werden kann.

Oberflächen verdeckter Brände können durch die Wasserstrahlen nicht oder nur teilweise erreicht werden. Als typische Oberflächen verdeckter Brände sind zu nennen:

- senkrechte und waagerechte Brandflächen in Kanälen zwischen mehreren Brandstoffmassen (Kanäle zwischen Palettenstapeln, Flächen zwischen Brandstoff und Wänden),
- Brandflächen innerhalb unterschiedlicher Lagermaterialien (Hohlräume zwischen sperrigen Formteilen, Hohlräume in Schüttungen, Brände innerhalb von Verpackungen, Zwischenräume innerhalb der Stapel),
- Brandflächen, die sich durch Abbrand ausbilden (durch Lagergut verdeckte Kanäle, Hohlräume infolge örtlichem Abbrand oder Ausschmelzen, Hohlräume durch Abdecken mit Bauteilen).

In den Bereichen verdeckter Brände bilden sich

- innere Oberflächen aus, deren Gase und Dämpfe vorzugsweise im Nahbereich der Oberflächen verbrennen und damit einen eigenen Reaktionskreislauf innerhalb des Brandobjektes ausbilden (verdeckter Brand),
- bevorzugte Strömungsrichtungen heißer Rauchgase aus, die das Eindringen des Löschmittels erschweren,
- thermisch aufbereitete brennbare Materialien, die eine Brandausbreitung begünstigen.

Für den Löschmitteleinsatz sind insbesondere die zusätzlichen Oberflächen, ihre Erreichbarkeit und die gerichtete Strömung der heißen Rauchgase zu beachten.

4. Bedingungen für das Löschen verdeckter Brände

4.1 Anwendungsrate

Verdeckte Brände besitzen einen eigenen geschlossenen Reaktionskreislauf mit kondensierter Oberfläche, Flamme und örtlicher Rückstrahlung. Sie sind deshalb innerhalb des Brandobjektes als eigener Brand mit definierten Randbedingungen zu sehen. Die für einen Löscherfolg notwendige Löschwasserbeaufschlagung entspricht der einer vergleichbaren freien Oberfläche. Das Löschmittel muß zur Brandbekämpfung ebenso, wie an den zugänglichen freien Oberflächen, direkt an die inneren Oberflächen gebracht werden. Zugänge zu verdeckten Bränden sind vor allem Kanäle und Spalten mit geringen Abmessungen. In diesen Kanälen werden die heißen Rauchgase abgeführt und es befinden sich Flammzonen darin. Die Geschwindigkeiten der abgeführten heißen Rauchgase betragen nach eigenen Messungen [13] 15 - 25 m/s.

Die Oberfläche verdeckter Brände kann sowohl waagerechte, geneigte oder senkrechte Flächen einschließen. Da sie sich im Inneren bzw. an verdeckter Stelle eines kompakten, gestapelten, geschichteten oder geschütteten Brandstoffes befindet, ist eine Schätzung schwierig. Es sollte immer davon ausgegangen werden, daß die gesamte Oberfläche des Hohlräumes in den verdeckten Brand einbezogen ist und mit Löschwasser beaufschlagt werden muß.

4.2. Applikationsmöglichkeiten für Löschmittel

Das Löschmittel kann bei verdeckten Bränden nur durch begrenzte senkrechte oder waagerechte Öffnungen an die Oberflächen des kondensierten Brandstoffes gelangen. An den oberen Öffnungen des verdeckten Brandes steht der Löschmittelbeaufschlagung die Heißgasströmung des verdeckten Brandes entgegen. Durch die unteren Öffnungen wird der Flamme des verdeckten Brandes aus der Umgebung Luft zugeführt. Infolge der sich ausbildenden Strömung zum Brandort behindern diese Luftströmungen die Applikation der Löschmittel nicht.

Der Einsatz von Schäumen kann insbesondere bei dichter Lagerung von Paletten die Luftzufuhr entscheidend verringern und Flächen verdeckter Brände können durch den Schaum erreicht werden. Da Einbauten und enge Durchflüsse den fließenden Schäumen hohe Widerstände entgegensetzen, werden meist nur die größeren Kanäle geschlossen. Es entstehen bevorzugte Fließrichtungen für den Schaum, die zum Fehlschlagen eines Schaumeinsatzes führen können. Weiterhin ist zu beachten, daß Schäume nur in den Bereichen wirken, in denen die Schaumschicht ansteht. Bei verdeckten Bränden werden die Bereiche der Zuluftführung über die Schaumschicht verlagert. Es sollte deshalb immer abgeschätzt werden, ob durch den Schaumeinsatz tatsächlich die Zuluftströmungen vermindert oder unterbunden werden und inwieweit verdeckte Flächen erfaßt werden können

Die Nutzung der Strömung für den Transport des Löschmittels Wasser ist an eine Überlagerung der vorhandenen Strömung durch den Sprühstrahl gebunden. Die Geschwindigkeit der durch den Brand angesaugten Luft kann für eine definierte Brandfläche unter Verwendung der Abbrandrate und der Reaktionsgleichung für eine vollständige Verbrennung abgeschätzt werden. Sie liegt für Polyethylen ($r_{ab} = 0,9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}$) bei ca. 0,2 m/s für die projizierte Eintrittsfläche. Diese Geschwindigkeit hat praktisch keinen Einfluß auf den Sprühstrahl. Der Sprühstrahl wird durch diese geringe Luftströmung im Ansaugbereich nicht beeinflusst. Die Applikation der Löschmittel auf die Flächen hängt damit ausschließlich von der Ausrichtung des Strahlrohres auf die zu beaufschlagenden Oberflächen durch die Einsatzkräfte ab.

Die Applikation von Löschmittel über die durch Heißgasströmungen beaufschlagten Kanäle führt zu nachfolgenden Überlegungen. Infolge der geringen Öffnungsflächen für den Löschmitteleintritt sind Sprühdüsen mit großen Öffnungswinkeln ungeeignet. Selbst beim Einsatz von Sprühdüsen mit geringem Öffnungswinkel muß der Abstand zur Öffnungsfläche des Kanals gering sein. Bei größeren Abständen sind nur noch kompakte Strahlen in der Lage, einen genügenden Löschwasseranteil an die Oberflächen der verdeckten Brände zu transportieren. Diese Strahlen könnten durch Ausbildung als Flachstrahlen ihre Eignung für die Beaufschlagung verdeckter Brände behalten und infolge der flächigen Verteilung effizienter werden [14].

In den Kapiteln, die die experimentellen Arbeiten behandeln, werden die Ergebnisse von Untersuchungen zum Erreichen typischer Oberflächen verdeckter Brände beschrieben und die Ergebnisse aus Kaltversuchen dargestellt.

5. Experimentelle Untersuchungen

5.1 Untersuchung der Wirkung von Einzeltröpfen an geschmolzenen Oberflächen

5.1.1 Zielstellung

Das Löschen von Kunststoffbränden wird an ebenen waagerechten Oberflächen und senkrecht zur Oberfläche auftreffender Wassertropfen von den Wechselwirkungen zwischen Wasser und der geschmolzenen heißen Oberfläche beeinflusst.

Wesentliche Parameter des Einzeltröpfens sind die Größe, Geschwindigkeit, der Impuls beim Auftreffen auf den Brandherd und die durch Wechselwirkung zwischen Wassertropfen und Kunststoffoberfläche auftretenden Impulse durch Verdampfung der Wassertropfen.

Der Versuchszplatz Tropfenimpulsmessung dient speziell der Untersuchung der physikalischen Effekte des Einzeltröpfens unter realen Bedingungen, wie festen, heißen plastischen oder flüssigen, sich zersetzenden Kunststoffoberflächen.

Im Blickpunkt des Interesses steht die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Tropfen und Kunststoffoberfläche bei unterschiedlicher Beschaffenheit des auftreffenden Wassertropfens. Der bei der Brandbekämpfung beobachtete Summeneffekt der Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit zu Beginn der Löschphase soll zeitlich und ursächlich einer Reaktionsfolge zugeordnet werden. Der Anteil des Auftreffimpulses bei der Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit ist abzuschätzen.

Die Arbeiten sollen eine Interpretation der Beobachtungen bei Löschversuchen ermöglichen und die abgeleiteten taktischen Maßnahmen bei der Bekämpfung von Kunststoffbränden sachlich unterlegen.

Die Gesamtansicht des Meßplatzes ist in Bild 5.1.1.1 dargestellt.

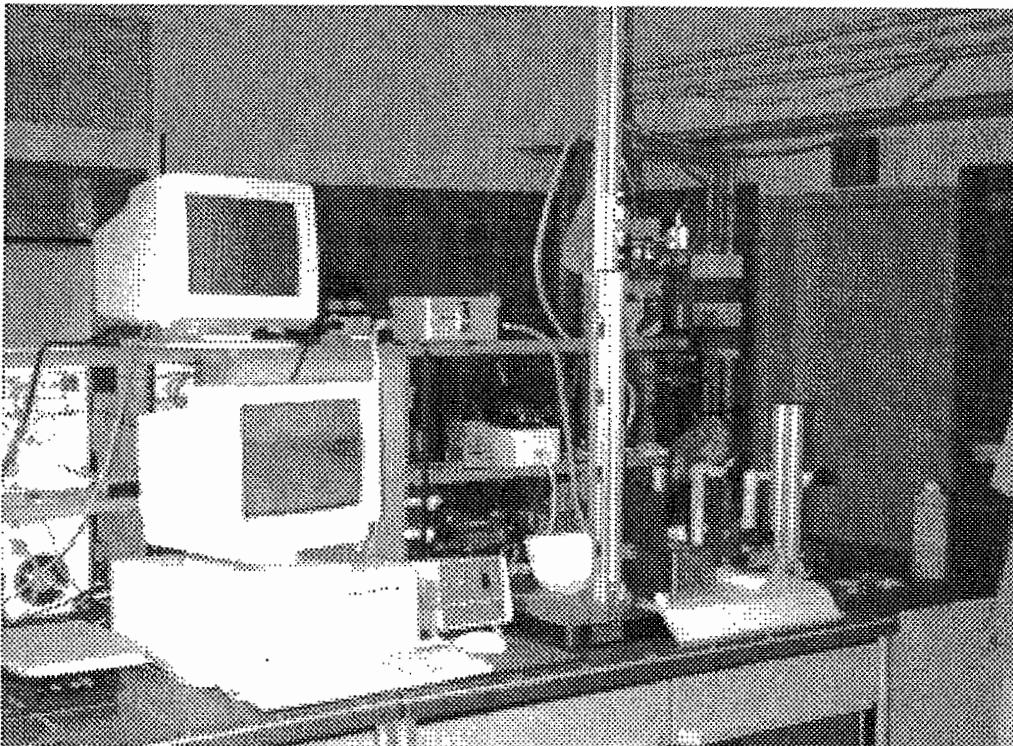


Bild 5.1.1.1: Versuchszplatz Tropfenimpulsmessung

5.1.2 Allgemeine Beschreibung zum Versuchsaufbau

Der Versuchsplatz Tropfenimpulsmessung ist in Abb. 5.1.2.1 dargestellt.

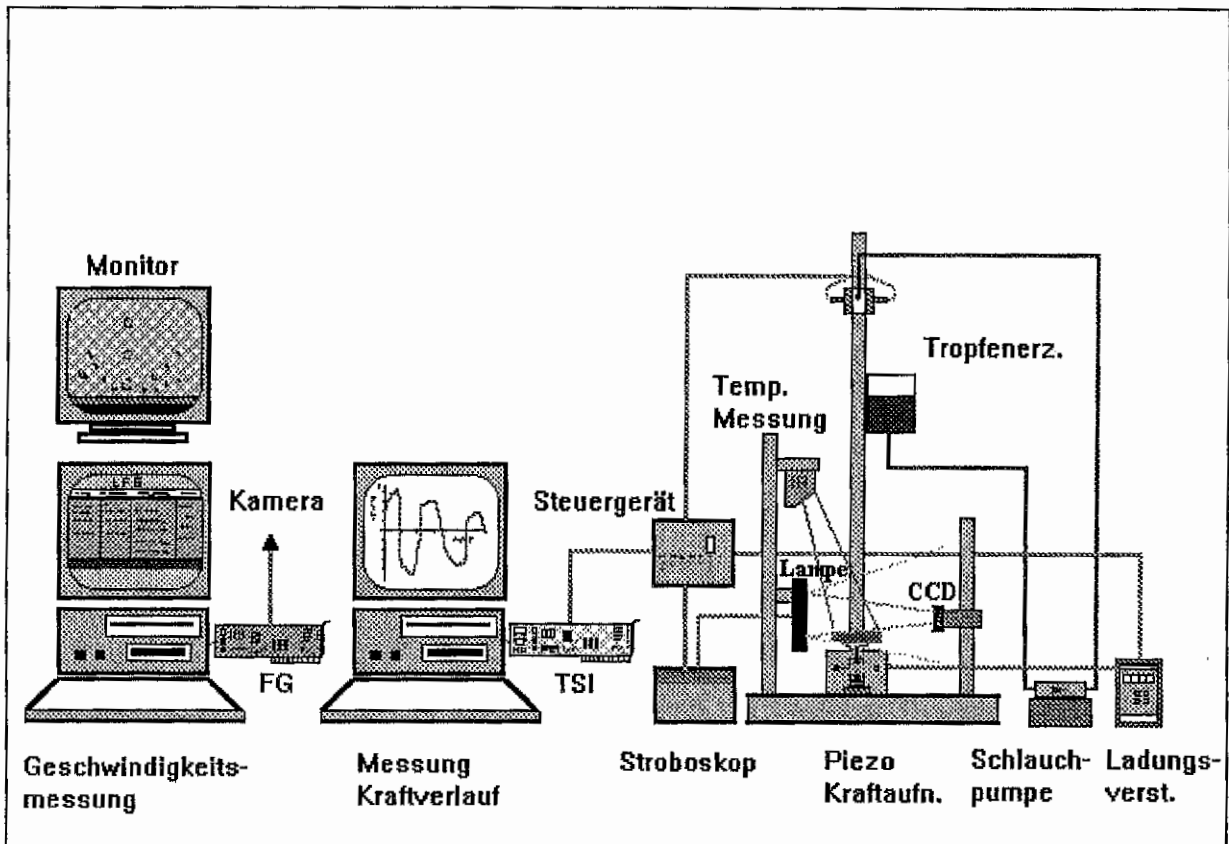


Abbildung 5.1.2.1: Tropfenimpuls- Meßplatz (schematischer Aufbau)

Der Meßplatz stellt ein Zwei-Rechner-System dar und wurde gemeinsam mit der Firma DEM [15] entwickelt und aufgebaut. Die Rechner können parallel oder einzeln betrieben werden. Rechner 1 ist zuständig für Tropfengeschwindigkeitsmessung und Bildaufzeichnung. Dazu ist er mit einer Bildverarbeitungs-Software und mit einem Framegrabber-Board zur Bilddigitalisierung ausgestattet. Die Aufnahme des fallenden Tropfens erfolgt mit einer CCD-Kamera und einer speziellen Stroboskop-Beleuchtung. Die Darstellung des Auftreff-Bildes und die Anzeige der berechneten mittleren Tropfenaufprallgeschwindigkeit ist auf einem zusätzlichen Monitor möglich. Über Rechner 2 erfolgt die Ermittlung des Kraftverlaufes, den ein auftreffender Tropfen auf der Kunststoffoberfläche erzeugt, und die Berechnung der Impulse. Das Kraftsignal wird mit einem Piezo-Quarz-Sensor registriert, der eine Aufnahmevorrichtung für die zu untersuchenden Kunststoffplatten trägt.

Die Meßwerterfassung und Weiterverarbeitung wird über eine mehrkanalige schnelle Meßwertverarbeitungskarte unter der Software DIA/DAGO [16] realisiert. Die Tropfengenerierung geschieht über Schlauchpumpe und austauschbare Kanülen, um verschiedene Tropfengrößen erzeugen zu können. Der Vorratsbehälter enthält das Löschmittel. Die Einstellung der Tropfengeschwindigkeit erfolgt über die Veränderung der Fallhöhe (Höhenverstellung der Kanüle). Durch die Höhenverstellung der Kanüle können theoretisch Tropfengeschwindigkeiten bis zu 4.5 m/s erreicht werden. Die Temperatur der Kunststoffoberflächen wird berührungslos mittels IR-Meßtechnik bestimmt und aufgezeichnet. Die Messung erfolgt automatisch über Steuer-ersoftware, deren Impulse einem Steuergerät zugeführt und durch den fallenden Tropfen über

Lichtschraken gestartet wird. Weiterführende technische Angaben sind in der Dokumentation und der Bedienungsanleitung enthalten.

5.1.3 Temperaturmessung auf der Kunststoffoberfläche

Um zusätzliche Schwingungen durch Thermoelemente zu vermeiden, wird die Oberflächentemperatur berührungslos mittels IR-Temperatursensor bestimmt. Dazu ist der Meßfleck eines IR-Meßkopfes auf die Oberfläche des zu untersuchenden Kunststoffes gerichtet.

Für genaue IR-Messungen muß der Emissionsfaktor ϵ der zu messenden Kunststoffoberfläche bekannt sein. Da sich aber der Emissionsfaktor temperaturabhängig und bei Übergängen des Aggregatzustandes ändert, wurde ein mittlerer Wert von $\epsilon = 0,9$ eingegeben. Kontrollmessungen mit Thermoelementen sind gegebenenfalls notwendig.

Die Temperaturmeßwerte werden mit einer niedrigeren Abtastfrequenz als die Kraftsignale über die Meßwerterfassungskarte und die Software DIA/DAGO erfaßt und abgespeichert.

5.1.4 Messung der Tropfen-Fallgeschwindigkeit mittels Bildverarbeitung

Da zur digitalen Bildabspeicherung das Bildverarbeitungssystem PROFESS [17] eingesetzt wird (CCD-Kameramodul, Framegrabber-Board, Bildbearbeitungssoftware) kann die Geschwindigkeit des Tropfens vor dem Auftreffen auf der Oberfläche mit Hilfe der Bildverarbeitung bestimmt werden.

Die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit erfolgt nach

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (18)$$

\bar{v}	Geschwindigkeit	in	m/s
s	Weg	in	m
t	Zeit	in	s

Mit Hilfe einer Stroboskop- Beleuchtungstechnik werden entsprechend einer bestimmten Frequenz Lichtblitze erzeugt, die den fallenden Tropfen 'im Takt' beleuchten und bei der gesteuerten Bildaufzeichnung ein stehendes Tropfenbild erzeugen. Das Meßprinzip ist in Abb. 5.1.4.1 dargestellt.

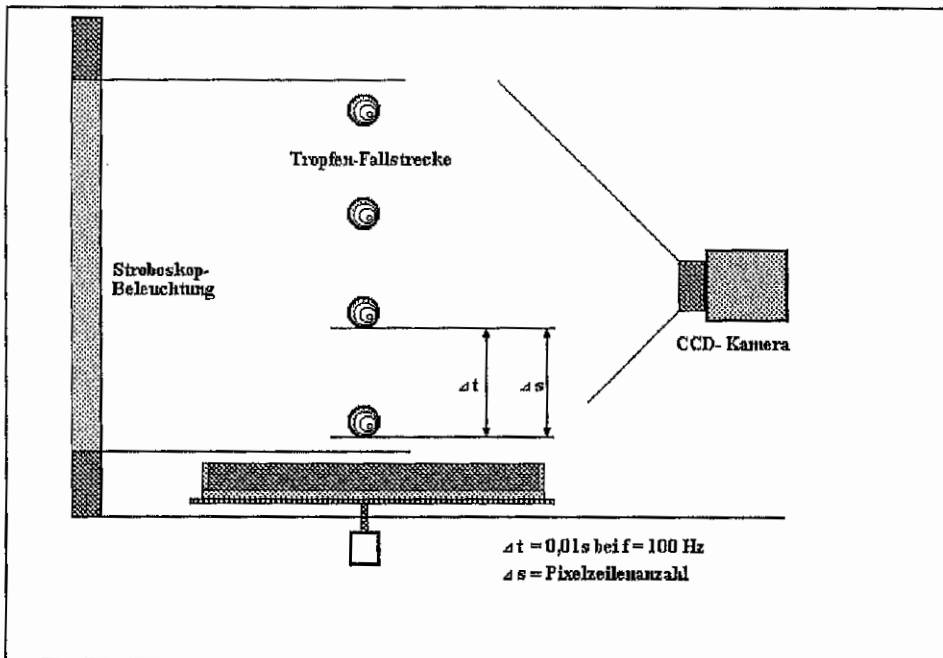


Abbildung 5.1.4.1: Prinzip der Geschwindigkeitsmessung

Das Bildverarbeitungssystem wurde durch eine spezielle Software ergänzt, welche die Auszählung der Pixelzeilen zwischen den im eingefrorenen Bild sichtbaren Tropfenabbildungen ermöglicht und somit die vom Tropfen zurückgelegte Strecke bestimmt. Aus der Stroboskop-Frequenz (z.B. 100 Hz) liegt die Zeitdifferenz zwischen zwei Tropfenabbildungen $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ fest. Die mittlere Geschwindigkeit wird nach Gl. (18) berechnet und auf dem Monitor angezeigt.

5.1.5 Tropfenimpuls-Messung

Mittels eines Kraftaufnehmers, der unter der Aufnahmevorrichtung für die Kunststoffplatten angebracht ist und die gesamte Masse trägt, werden der Kraftsignalverlauf für den auftreffenden Wassertropfen bis zum Abklingen der Schwingungen und die nachfolgenden Kraftsignalverläufe durch Reaktionen mit der Oberfläche gemessen und abgespeichert. Somit werden die Impulse nicht direkt gemessen, sondern müssen nachträglich durch Integration ermittelt werden. Zu technischen Einzelheiten der Kraftmessung und der Signalverarbeitung sei hier auf eine ausführliche Dokumentation verwiesen, die am IdF vorliegt.

5.1.6 Auswertemöglichkeiten durch integrierte Software

Die Basissoftware zur Steuerung des Meßablaufes, sowie zur Meßwernerfassung und Auswertung ist DIA/DAGO. Sie ermöglicht auch die mathematische Weiterverarbeitung der Meßdaten, sowie die Zusammenstellung der Meßergebnisse in beliebigen Datenblättern zur gemeinsamen mathematischen Bearbeitung und grafischen Darstellung. Die Abspeicherung der Meßdaten und die Verarbeitung erfolgt im DIA/DAGO-eigenen Format. Eine Konvertierung in beliebige ASCII-Formate und ein Export der Ergebnisse und Grafiken in andere Anwendungen ist leicht möglich.

Die Bestimmung der Impulse soll durch Integration des Kraft-Zeit-Signales in DIA/DAGO erfolgen.

Zur Beurteilung und Interpretation der gespeicherten Bilddaten vom Ereignis des Tropfenaufpralls kann die Software des Bildverarbeitungssystems PROFESS [17] genutzt werden. Hier liegen die Bilddaten in einem systemeigenen Format (*.PIC) vor. Mit dem Konverterprogramm LEUTOTIF.EXE kann eine Konvertierung in das bekannte TIF-Format erfolgen. Somit ist der Zugang zur Textverarbeitung offen und die Weiterverarbeitung im Video-Signal-Verarbeitungssystem des IdF möglich (Videoeinbindung, Ausdruck, Videoprint, usw.) [18].

5.1.7 Messungen mit dem Impulsmeßgerät

5.1.7.1 Bestimmung des Impulses aus der Messung

Mit der Meßanordnung wird zunächst der Kraftverlauf ermittelt, den ein auf eine definierte Fläche auftreffender Wassertropfen erzeugt. Zur Vereinfachung wird eine eindimensionale Betrachtungsweise in Fallrichtung angenommen. Ungefiltert ergeben sich Signalformen, die aus der Überlagerung der Vertikalkomponenten von Schwingungen und Wellen resultieren. Durch eine geeignete Filtertechnik konnten diese Komponenten herausgefiltert werden, ohne das eigentliche Meßsignal zu verfälschen.

Die Meßeinrichtung liefert nicht direkt den Impuls, sondern ein Kraft-Zeit-Signal in der typischen Form, wie sie in Abb. 5.1.7.1.1 dargestellt ist und als Kraftstoß bezeichnet wird.

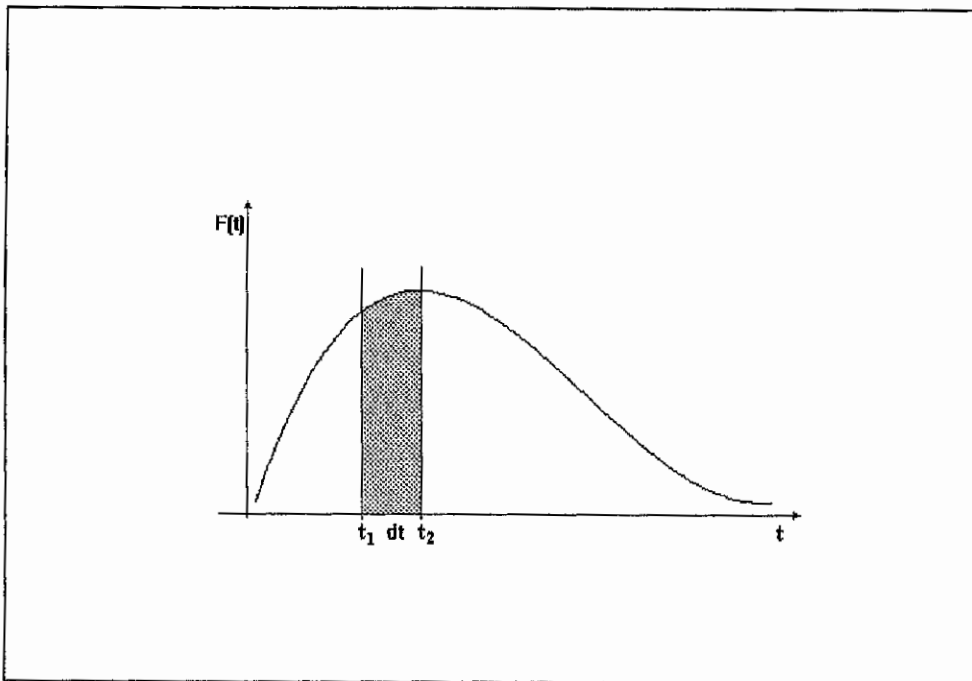


Abbildung 5.1.7.1.1: Kraft-Zeit-Diagramm

Der Zusammenhang des Kraft-Zeit-Verlaufes mit dem Impuls ist durch

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = \int_{t_1}^{t_2} d(m \cdot v) = m \cdot v_2 - m \cdot v_1 = \Delta p \quad (19)$$

gegeben.

Somit entspricht das Zeitintegral der Kraft $\int F dt$ der Fläche unter der Kurve und ist gleich der durch den Kraftstoß hervorgerufenen Änderung des Impulses Δp .

Der Kraftverlauf wird im DIA/DAGO eigenen Format abgespeichert . Der Impuls kann dann leicht mit dem vorhandenen Arithmetik-Paket durch Integration des Kraftverlaufs nach [16] ermittelt werden. Dazu sind die Integrationsgrenzen t_1 und t_2 festzulegen.

Treten im Verlauf der Messung weitere Kraftstöße auf, die aus der Reaktion zwischen Tropfen und Oberfläche herrühren, ist in analoger Weise zu verfahren.

5.1.7.2 Tropfen-Aufprallgeschwindigkeit, Tropfenmasse und berechneter Impuls

Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die Fallgeschwindigkeit wird bestimmt nach

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (20)$$

mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ und Tropfenfallhöhe h .

Die Fallgeschwindigkeit ist masseunabhängig und gilt für den idealen Fall im Vakuum. Für den freien Fall in Luft werden diese Werte aufgrund der Reibung nicht erreicht. Im Abb. 5.1.7.2.1 sind die im Labor mit der Tropfengeschwindigkeits - Meßeinrichtung bestimmten Fallgeschwindigkeiten für verschiedene Fallhöhen dargestellt und der berechneten Kurve nach Gl. (20) gegenübergestellt.

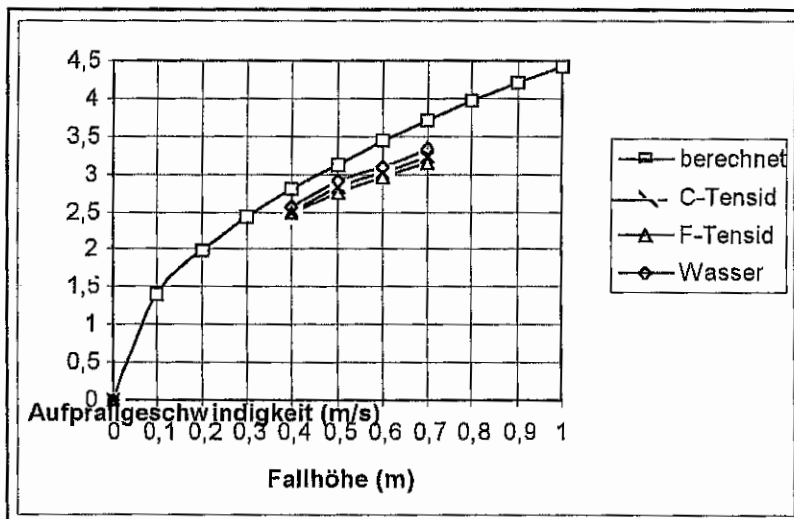


Abbildung 5.1.7.2.1: Geschwindigkeit-Weg-Diagramm (kleine Kanüle)

Die Fallgeschwindigkeiten wurden für Tropfen mit reinem Wasser und Tropfen mit Netzmittelzusätzen bestimmt und gemittelt. Aus den Tabellen 5.7.2.1 und 5.7.2.2 sind die wesentlichen Ergebnisse zu entnehmen..

Tabelle 5.1.7.2.1: Werte für Kanüle 1

Fallhöhe [m]	Fallgeschwindigkeit [m/s]	Tropfenmasse ·10 ⁻⁶ [kg]	Impuls ·10 ⁻⁶ [Ns]
Wasser			
0,40	2,58	8,2	21,16
0,50	2,91	8,2	23,86
0,60	3,10	8,2	25,42
0,70	3,34	8,2	27,39
Wasser mit Kohlenstoff-Tensid 3 vol %			
0,40	2,48	3,7	9,18
0,50	2,82	3,7	10,43
0,60	3,02	3,7	11,17
0,70	3,23	3,7	11,95
Wasser mit Fluor-Tensid 3 vol %			
0,40	2,49	2,0	4,98
0,50	2,75	2,0	5,50
0,60	2,97	2,0	5,94
0,70	3,16	2,0	6,32

Tabelle 5.1.7.2. 2: Werte für Kanüle 2

Fallhöhe [m]	Fallgeschwindigkeit [m/s]	Tropfenmasse ·10 ⁻⁶ [kg]	Impuls ·10 ⁻⁶ [Ns]
Wasser			
0,40	2,58	28,8	74,3
0,50	2,91	28,8	83,8
0,60	3,10	28,8	89,3
0,70	3,34	28,8	96,2
Wasser mit Kohlenstoff-Tensid 3 vol %			
0,40	2,56	13,5	34,6
0,50	2,88	13,5	38,9
0,60	3,15	13,5	42,5
0,70	3,39	13,5	45,8
Wasser mit Fluor-Tensid 3 vol %			
0,40	2,49	7,4	18,4
0,50	2,75	7,4	20,4
0,60	2,97	7,4	22,0
0,70	3,16	7,4	23,4

Die Tropfenmasse wurde durch Auffangen einer definierten Anzahl von Tropfen am Aufprallort gravimetrisch als Mittelwert bestimmt. Der Auftreffimpuls des Wassertropfens wird nach Gleichung (21) berechnet

$$p = m \cdot v \quad (21)$$

m Masse des Wassertropfens in kg
v Geschwindigkeit vor dem Aufprall in m/s

5.1.7.3 Impulsübertragung durch Stoß

Beim Auftreffen des Tropfens kommt es zur Impulsübertragung auf die Oberfläche, was im physikalischen Sinne als Stoß aufzufassen ist. Da Stoßrichtung und Kraftmessung in einer Linie erfolgen, gelten hier die Gesetze des geraden Stoßes. Nach dem Impulserhaltungssatz für den geraden Stoß gilt:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c_1 + m_2 c_2 \quad (22)$$

Hierbei sind zwei Grenzfälle

- unelastischer Stoß
- elastischer Stoß

aber auch Zwischenformen möglich.

5.1.8 Beschreibung der Versuchsdurchführung

Es wurden die Wechselwirkungen von Einzeltropfen aus Wasser, Wasser mit Kohlenstoff-Tensid (im weiteren C-Tensid genannt) und Wasser mit Fluor-Tensid (im weiteren F-Tensid genannt) mit geschmolzenem Polypropylen (im weiteren als PP bezeichnet) innerhalb der ersten Sekunde nach Auftreffen auf der Oberfläche untersucht. Zu diesem Zweck wurden für jede Meßreihe jeweils 10g PP-Granulat in einer Glasschale mit 0,06m Durchmesser im Muffelofen auf 350°C erwärmt und auf dem Kraftaufnehmer der Versuchsanordnung plaziert. Bei Start der Messung wurde der Tropfen generiert, die Temperatur an der PP-Oberfläche gemessen, sowie der Kraft-Verlauf innerhalb der ersten Sekunde aufgezeichnet. Nach Abklingen der Reaktion wurde der nächste Tropfen generiert und auf die gleiche PP-Probe getropft. So wurde fortgefahren, bis die PP-Probe auf etwa 150°C abgekühlt war. Dieser Zeitraum reichte aus, um 6 Einzeltropfen aufzugeben.

Außer PP wurden noch weitere Auffangmaterialien als Vergleichssubstanzen verwendet. Erwähnt werden sollen Versuche mit hochviskosem Silikonöl.

5.1.9 Auswertung der Versuche

Da die Tropfengröße je nach Kanüle und Oberflächenspannung der Lösung variierte, nahm der Tropfenimpuls verschiedene Werte an. Für diese Auswertung wurden die Meßreihen ausgewählt, bei denen der Tropfenimpuls vergleichbar war.

Visuell waren die gleichen Effekte wie bei früher durchgeführten Lösungsversuchen an PP zu beobachten. Bei Auftreffen von Wassertropfen auf die Plastschmelze setzte heftiges Verspritzen von PP-Material und Wassertropfen ein. Bei Zugabe von C-Tensid war eine merkliche Verringerung der Reaktion zu verzeichnen, während bei Zugabe von F-Tensid kein Verspritzen zu sehen war.

Typische Kraft-Zeit-Kurven von Wassertropfen auf PP-Schmelze bei etwa 300°C Oberflächentemperatur der Schmelze zeigt Abb. 5.1.9.1.

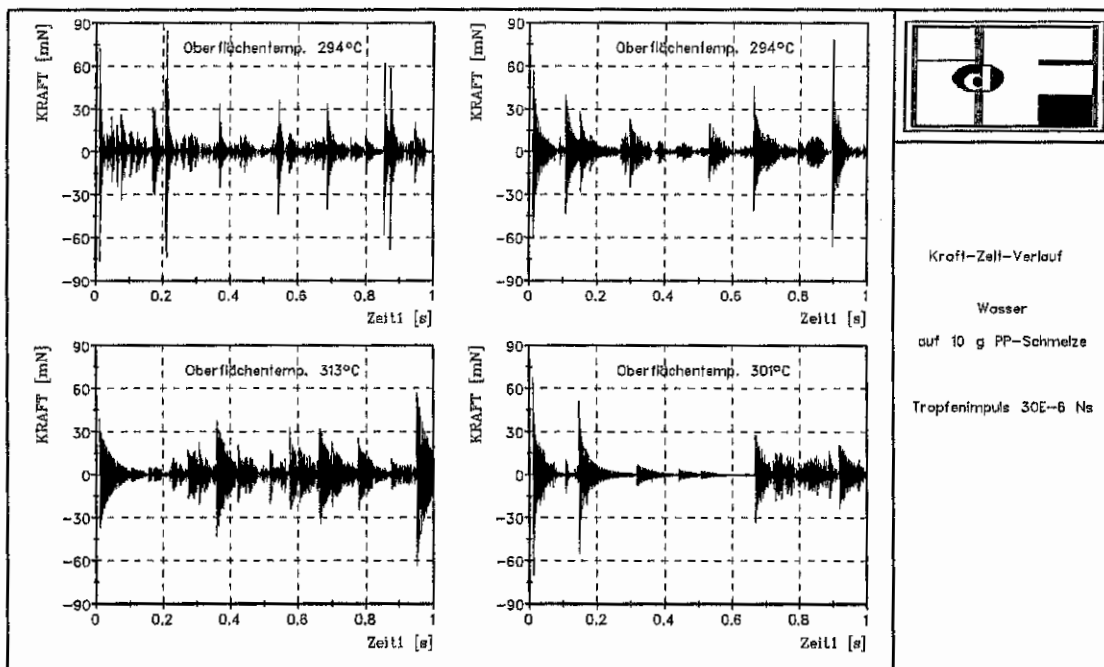


Abbildung 5.1.9.1: Kraft-Zeit-Kurven von Wassertropfen auf PP-Schmelze

Charakteristisch ist die nach Auftreffen des Tropfens einsetzende heftige Reaktion durch die Wechselwirkung mit der Oberfläche der Schmelze. Diese Reaktion setzte in fast allen Fällen nach etwa 0,1s ein. Innerhalb dieser 0,1s ist deutlich das Abklingen des Auftreffimpulses des Tropfens zu erkennen. Die nachfolgenden Impulse, bedingt durch das Filmsieden des Tropfens, übersteigen den Auftreffimpuls meistens.

Weniger heftig fällt die Reaktion von Tropfen mit C-Tensid aus. In Abb. 5.1.9.2 werden Messungen der Kraft-Zeit-Verläufe bei Temperaturen der Schmelzoberfläche etwas unterhalb 300°C gezeigt.

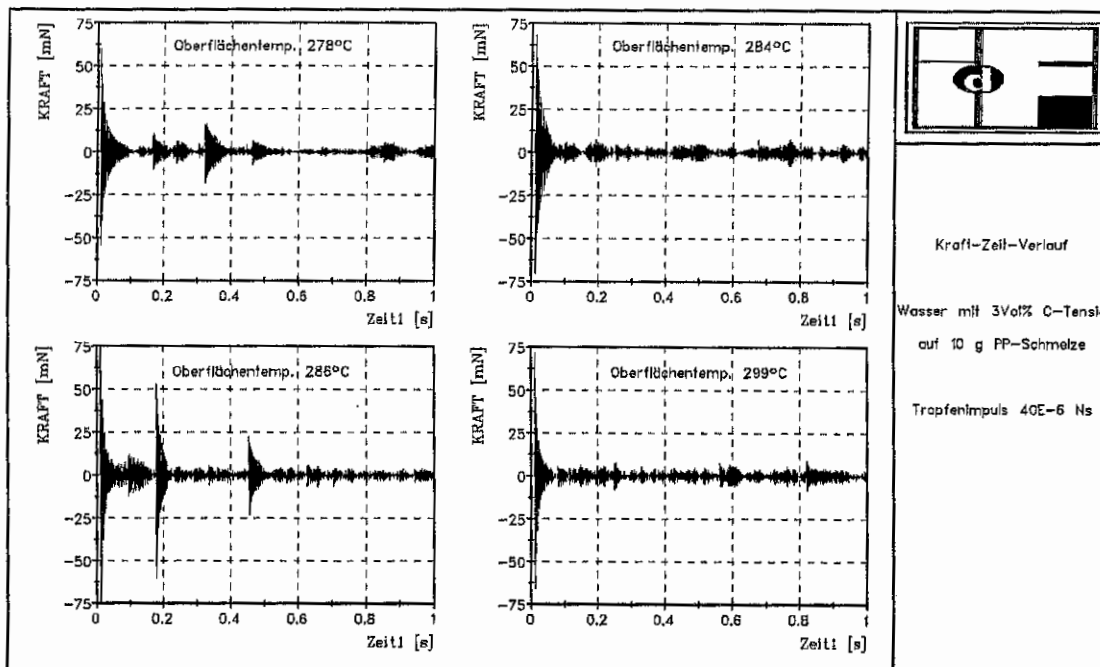


Abbildung 5.1.9.2 : Kraft-Zeit-Verläufe von Wassertropfen mit C-Tensid auf PP

Auch bei diesen Versuchen ist deutlich ein Abklingen des Auftreffimpulses innerhalb von 0,1s zu erkennen. Die danach auftretenden Impulse sind deutlich geringer als bei Wassertropfen und charakterisieren ein besseres Benetzungsvermögen der Schmelze. Heftige Spritzer sind nicht auszuschließen. Die Amplituden werden aber nicht so groß wie beim Auftreffen des Tropfens.

Bei Wassertropfen mit F-Tensid fällt die Reaktion dagegen ruhig aus, wie in Abb. 5.1.9.3 zu sehen ist. Hier tritt durch die gute Benetzung der Oberfläche kein Filmsieden ein.

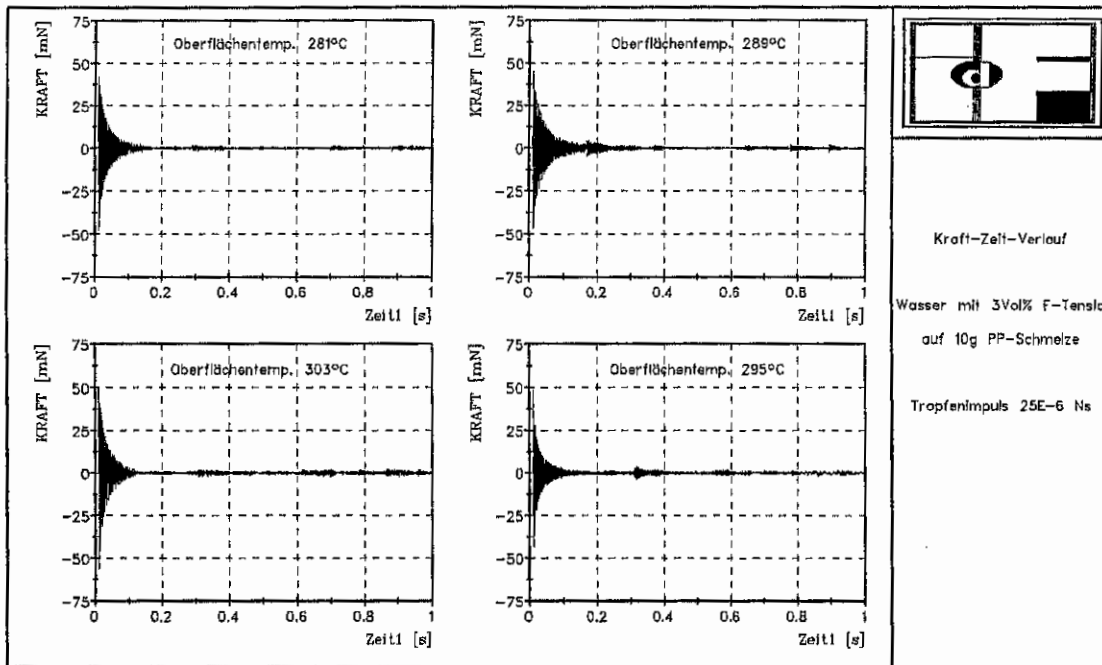


Abbildung 5.1.9.3: Kraft-Zeit-Verläufe bei Wassertropfen mit F-Tensid auf PP

Jeder Kraft-Zeit-Verlauf eines Versuches wurde mit 10 000 Meßwerten registriert. Um eine Bewertung der recht unterschiedlichen Reaktionsverläufe vornehmen zu können, wurden diese Meßwerte einer Klassierung zur Bildung von empirischen Häufigkeiten unterzogen. Es wurde das einparametrische Stichprobenverfahren nach DIN 45667 durchgeführt, wobei alle Signale zwischen +/-75 mN in 60 Klassen mit einer Klassenbreite von 2,5 mN erfaßt wurden.

Die ermittelten Häufigkeiten stellen Mittelwerte aus mehreren Messungen von einer Tropfenflüssigkeit dar, die je nach Temperatur der Plastoberfläche zusammengefaßt wurden.

Es ist klar, daß die Häufigkeit der kleinen Meßsignale mit Abstand die größten Werte einnimmt, da unabhängig von der Größe der Amplitude mindestens ein kleiner Meßwert jeweils im auf- und absteigenden Kurventeil auftritt.

In Abb. 5.1.9.4 sind die Ergebnisse der Klassierung vollständig dargestellt, während in Abb. 5.1.9.5 der untere Bereich mit den mittleren und großen Meßwerten zu sehen ist, die außer im Auftreffimpuls bei heftiger Bewegung des Tropfens auf der Oberfläche auftreten.

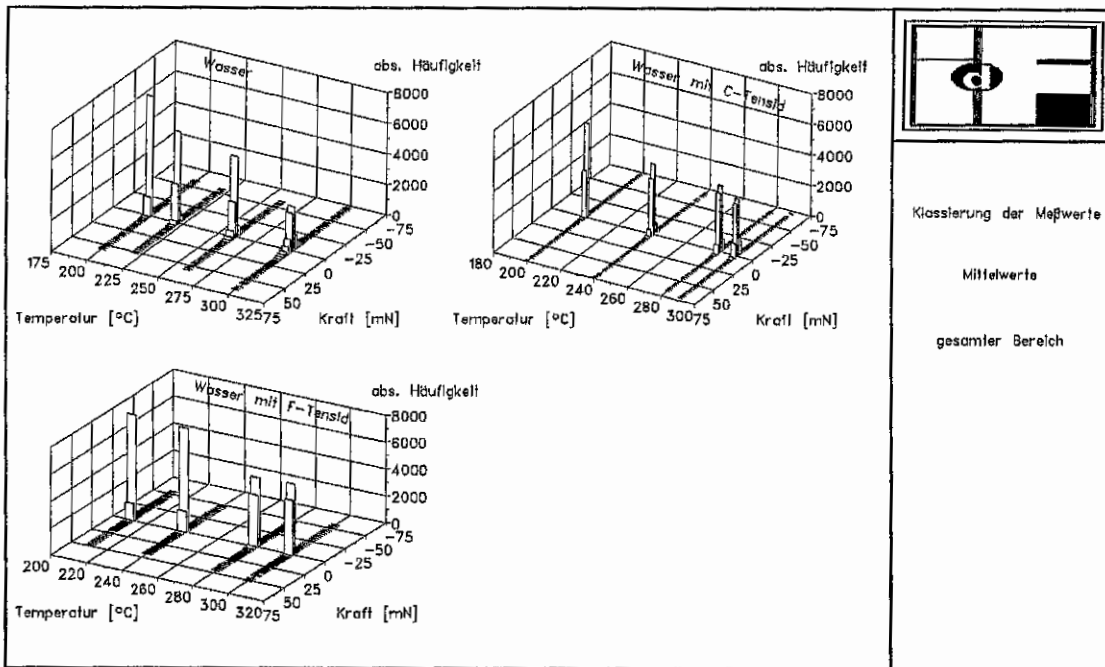


Abbildung 5.1.9.4: Vollständige Darstellung der Klassierung

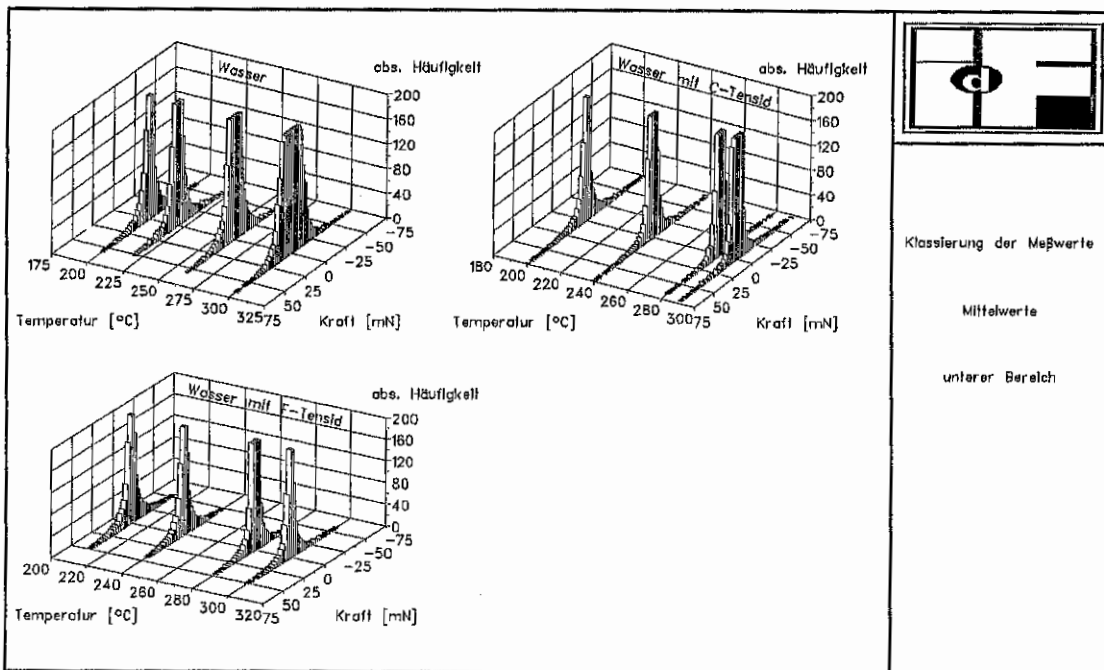


Abbildung 5.1.9.5: Darstellung der Klassen mittlerer und hoher Werte

Es ist zu erkennen, daß die Häufigkeit der großen Amplituden bei Wassertropfen am größten ist und sich zu niedrigeren Temperaturen langsam verringert. Bei Tropfen mit C-Tensid ist die Häufigkeit großer Amplituden geringer als bei Wassertropfen und geht mit Temperaturabfall ebenfalls zurück.

Die Häufigkeiten der Meßwerte in den einzelnen Klassen ist bei Anwendung von Tropfen mit F-Tensid über den Temperaturbereich fast gleichbleibend, was charakteristisch ist für eine gute Benetzung der Oberfläche.

Bei etwa 200°C sehen die Häufigkeiten der Werte bei allen Tropfen ähnlich aus. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der Tatsache, daß bei dieser Temperatur PP zu schmelzen beginnt.

Aussagekräftiger ist die Ermittlung der Summe der Impulse, die durch die Tropfenbewegung erzeugt werden. Man erhält sie, wie schon zuvor ausgeführt, durch Integration der Kraft-Zeit-Kurve.

Für diese Auswertung wurden nur die positiven Amplituden verwendet, da das Integral sonst einen Wert nahe bei Null einnimmt. Der Auftreffimpuls des Tropfens wurde in den Gesamtimpuls einbezogen, da bei einigen Messungen mit Wassertropfen und Wasser mit C-Tensid schon Reaktionen innerhalb der 0,1s auftraten.

Die Mittelwerte aus mehreren Messungen wurden approximiert. Die Integrale sind mit der Approximationsfunktion in Abb. 5.1.9.6 dargestellt.

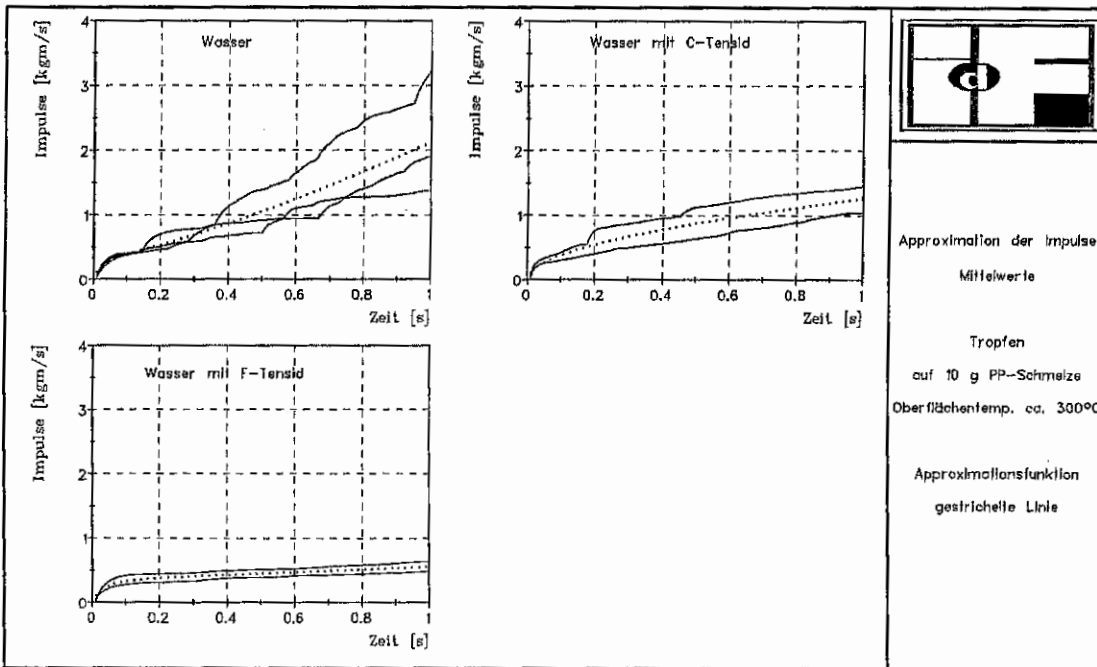


Abbildung 5.1.9.6: Summe der Impulse der Tropfenbewegungen

Auch aus Abb. 5.1.9.6 wird deutlich, daß Wassertropfen auf der Plastschmelze die heftigsten Reaktionen hervorrufen, während Zusätze wie C- oder F-Tensid die Tropfenaktivität mindern. Diese Auswertung wurde für mehrere Temperaturen durchgeführt. Waren bei 300°C Oberflächentemperatur der Schmelze noch sehr heftige Impulse vom Wassertropfen meßbar, so ist festzustellen, daß mit sinkender Temperatur die Tropfenaktivität zurückging. Bei einer Temperatur von 200°C zeigten Wassertropfen und solche mit Tensidgehalt innerhalb der ersten Sekunde des Kontaktes außer Auftreffimpuls keine weiteren wesentlichen Impulse. Der Verlauf der entsprechenden Integrale ist aus Abb. 5.1.9.7 ersichtlich.

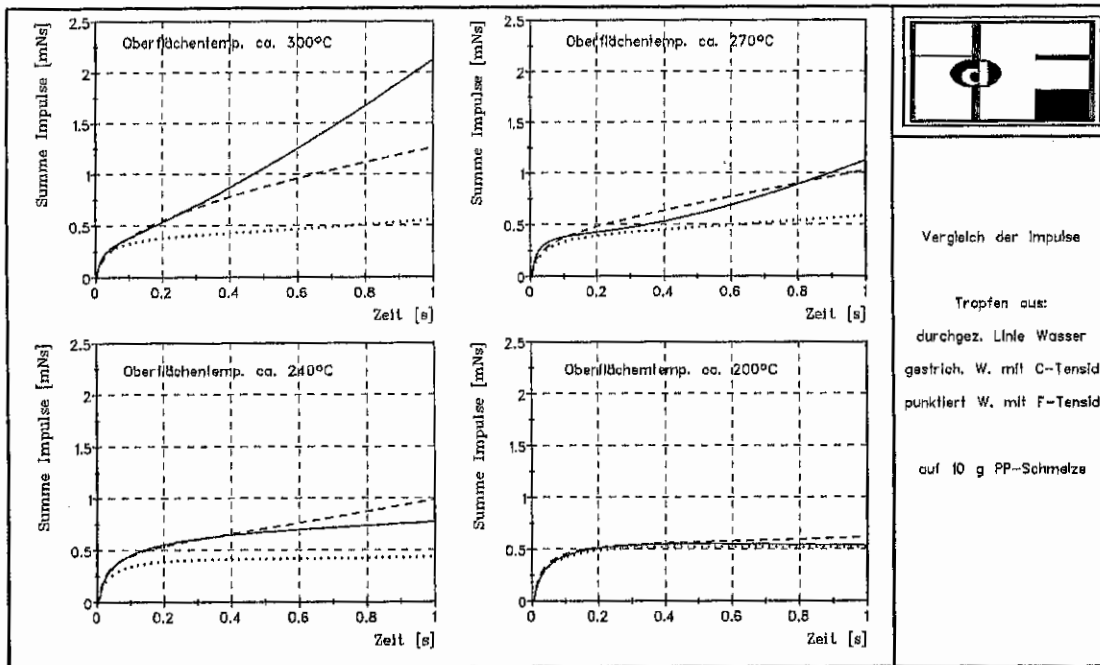


Abbildung 5.1.9.7 Summe der Impulse von Tropfen bei verschiedenen Temperaturen

Verschiedene Autoren [29][30][31], die sich mit der Wechselwirkung von auf Heizflächen fallende Tropfen beschäftigten, beobachteten u. a. die Verformung und Zerteilung der Tropfen, stellten die Größe der dabei benetzten Fläche und die Wärmeübergangsparameter bei der Tropfenverdampfung fest. Charakteristisch war für Wassertropfen das Auftreten des Leidenfrost-Phänomens als Ursache für das Hüpfen und Zerteilen des Tropfens auf der heißen Oberfläche.

Die Oberflächen waren aber in jedem Fall aus festem Material wie Metall oder Spezialglas. Als charakteristischer Einflußfaktor für das Tropfenverhalten wurde die Weber-Zahl diskutiert:

$$We = \frac{d_{Tr} v_{Tr}^2 \rho}{\sigma} \quad (23)$$

d_{Tr}	Tropfendurchmesser	in	m
v_{Tr}	Tropfengeschwindigkeit	in	m/s
ρ	Dichte der Flüssigkeit	in	kg/m ³
σ	Oberflächenspannung der Flüssigkeit	in	N/m ²

Auch die in den Abb. 5.1.9.1 - 5.1.9.3 gezeigten Kraftstöße resultieren aus den heftigen Bewegungen des Wassertropfens auf der Oberfläche der Plastschmelze, der plötzlichen Zerteilung und der daraus resultierenden Beaufschlagung der Oberfläche mit Tropfenfragmenten und Plastteilchen. Da es sich bei diesen Versuchen aber nicht um feste Oberflächen handelt, gilt es zu klären, welche Parameter die Wechselwirkung des Tropfens mit der Schmelze beeinflussen.

Die in Abb. 5.1.9.6 und 5.1.9.7 gezeigten Ergebnisse stammen aus Versuchen, bei denen die Tropfenausgangsparameter, die in die Weber-Zahl eingehen, bis auf eine Variable alle annähernd gleich waren. Die Variable war die Oberflächenspannung der Tropfenflüssigkeit. Die Werte sind in Tab. 5.1.9.1 zusammengefaßt.

Tabelle 5.1.9.1: Parameter der Tropfen mit unterschiedlichen Zusätzen

Tropfenflüssigkeit	d $\cdot 10^3$ [m]	v [m/s]	ρ kg/m ³	σ $\cdot 10^{-3}$ [N/m]
Wasser	2,54	3,4	1	72,4
Wasser mit 3Vol% C-Tensid	2,92	3,4	1	33,4
Wasser mit 3Vol% F-Tensid	2,43	3,4	1	24

Aus den Werten ist ersichtlich, daß auch die nach Gleichung (21) berechneten Tropfenauffrefimpulse annähernd gleich waren für die verschiedenen Tropfenflüssigkeiten. Die Abhängigkeit der Impulssumme von der Oberflächenspannung und der Temperatur sind in Abb. 5.1.9.8 zusammengefaßt dargestellt.

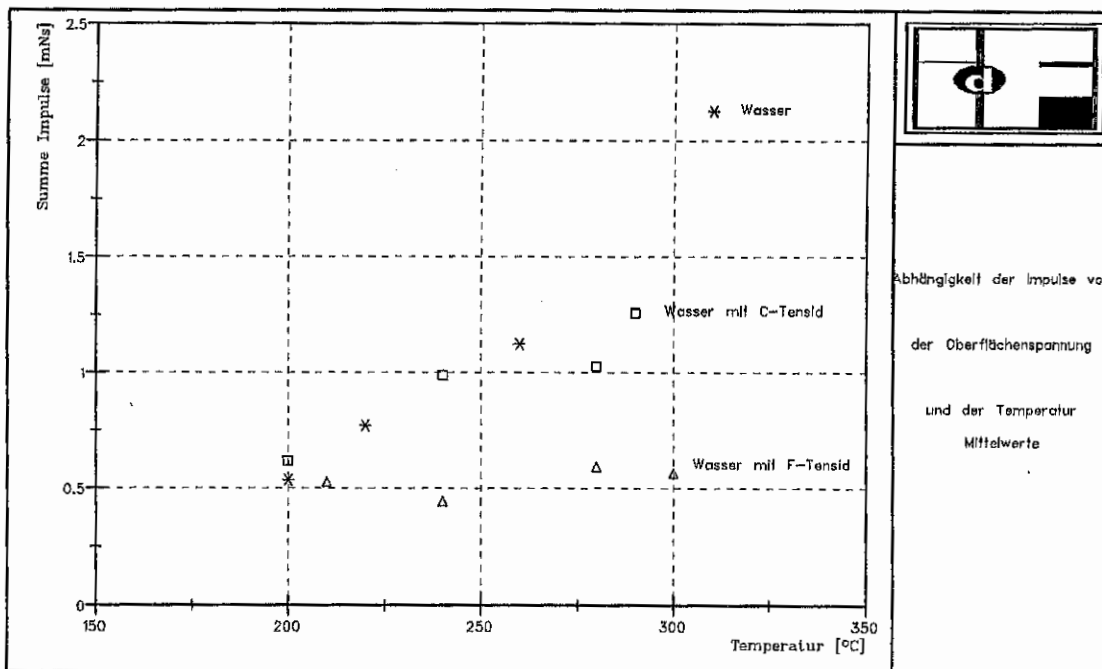


Abbildung 5.1.9.8: Abhängigkeit der Impulssumme von der Oberflächenspannung und der Temperatur

Da die Impulse der Wassertropfen auf der Schmelzoberfläche durch regellose und überlagerte Schwingungen gekennzeichnet sind, wurde zur Bewertung des unterschiedlichen Tropfenverhaltens die Phase des Auftreffens des Tropfens auf der Oberfläche genauer ausgewertet. Oberflächlich betrachtet sehen die Kraft-Zeit-Verläufe während 0,1s gleich aus. In diesem Zeitraum finden simultan die Aufheizung und die je nach Oberflächenspannung unterschiedliche Verformung des Tropfens zu einem benetzenden Film oder einem Tropfen in Wasserdampföhle (Leidenfrost-Phänomen) statt. In den energetischen Vorgängen innerhalb dieses Zeitraumes muß das unterschiedliche Tropfenverhalten seinen Ursprung haben.

Die Kraft-Zeit-Kurven des Auftreffimpulses zeigen mit wenigen Ausnahmen das typische Bild einer freien gedämpften Schwingung (Abb. 5.1.9.9)

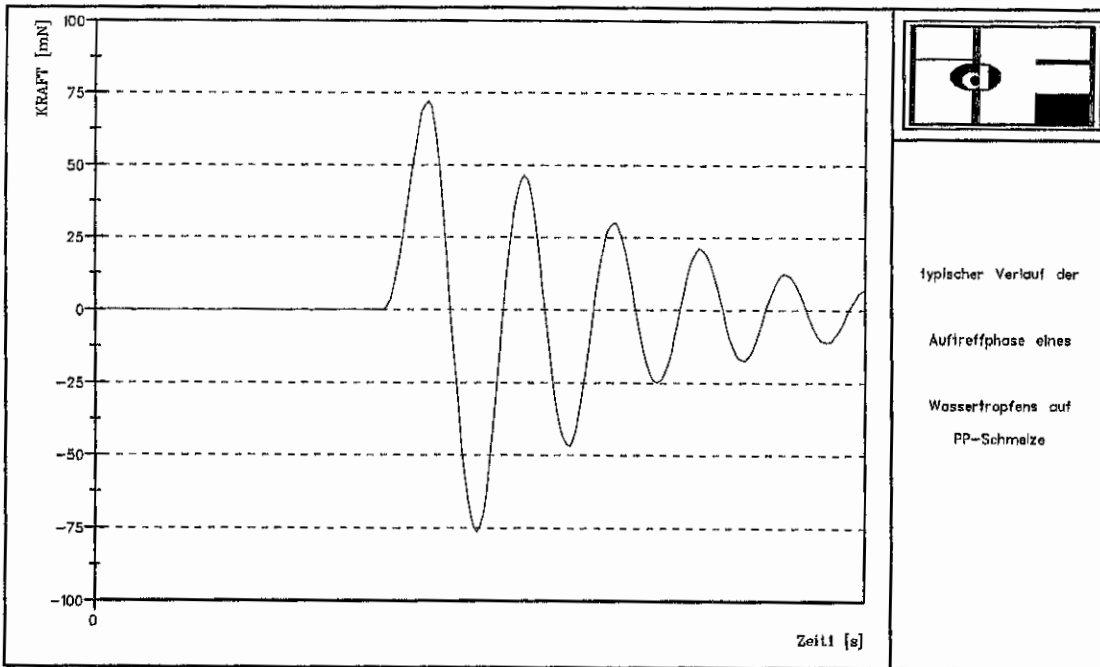


Abbildung 5.1.9.9: Kraft-Zeit-Kurve des Auftreffimpulses

Als Bewegungsgleichung für die freie gedämpfte Schwingung unter Berücksichtigung von Reibungskraft und rücktreibender Federkraft erhält man [28]

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + \beta \frac{du}{dt} + ku = 0 \quad (24)$$

Die allgemeine Lösung ist

$$u(t) = u_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (25)$$

mit $\delta = \beta/(2m)$ als Dämpfungskonstante und unter Berücksichtigung der Eigenkreisfrequenz der ungedämpften Schwingung $\omega_0 = \sqrt{k/m}$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{T} \quad (26)$$

als Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung. Energieverluste führen also zu einer Verringerung der Frequenz bzw. zu einer Zunahme der Periodendauer.

Diese Energieverluste sind Bestandteil der Wechselwirkungen Tropfen-Schmelze und müssen die Ursache für das unterschiedliche Tropfenverhalten der hier zur Diskussion stehenden Versuche sein.

Ein anschauliches Maß für die Dämpfung eines Oszillators ist der natürliche Logarithmus aus zwei aufeinanderfolgenden phasengleichen Schwingungszuständen (z. B. Amplituden):

$$\ln \frac{u_n}{u_{n+1}} = \delta T = A \quad (27)$$

Er wird als logarithmisches Dekrement bezeichnet und ist experimentell zugänglich. Für alle ausgewerteten Versuche wurden deshalb aus den ersten beiden Amplituden die logarithmischen Dekremente bestimmt und die Dämpfungskonstanten berechnet.

Die Werte sind in der Abb. 5.1.9.10 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Dämpfungskonstanten für Tropfen aus Wasser mit F-Tensid die niedrigsten Werte aufweisen, Wasser mit C-Tensid mittlere Werte zeigt, während Wasser die höchsten Dämpfungskonstanten hervorruft. Die Energieverluste der Schwingung des Auftreffimpulses eines Tropfens sind also bei Wassertropfen am größten.

Laut Gleichung (14) ist für die Vergrößerung der Oberfläche einer Flüssigkeit Energie aufzuwenden. Für die Deformation eines auftreffenden Wassertropfens auf der Schmelze wird entsprechend der Oberflächenspannung die meiste Energie verbraucht.

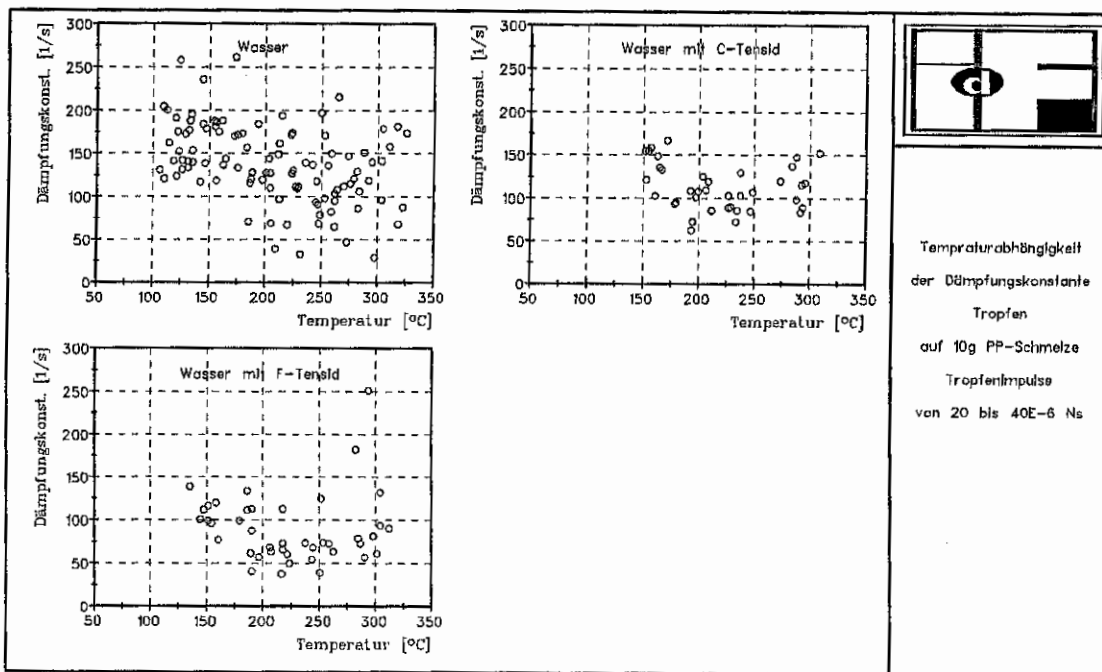


Abbildung 5.1.9.10: Temperaturabhängigkeit der Dämpfungskonstante

Bei allen drei Flüssigkeiten ist die Tendenz zu niedrigsten Werten bei ungefähr 200°C erkennbar, was wie schon früher erwähnt, mit der Schmelztemperatur von PP übereinstimmt. Der Impulsstoß des Tropfens auf das Auffangmaterial ändert hier, wie in Abschnitt 5.1.7.3 erläutert, seinen Charakter.

Da die Schmelze auch eine Flüssigkeit ist, deren Oberflächenspannung sich mit der Temperatur verändert, wird dieser Effekt anteilig durch die veränderte Grenzflächenspannung hervorgerufen.

In Punkt 3.4 wurde die Problematik der Benetzung von Oberflächen bereits erläutert. Es wurde herausgearbeitet, daß die Benetzung um so besser wird, je geringer die Differenz der Oberflächenspannungen von Tropfenflüssigkeit und zu benetzender Oberfläche ist.

Die beim Auftreffen des Tropfens zu leistende mechanische Arbeit zur Flächenvergrößerung (Gleichung 14) bei der Tropfendehnung und der Dehnung der auffangenden Oberfläche stellt einen Energieverlust bei der Schwingung dar, der sich in der Dämpfungskonstante widerspiegeln muß. Die Dämpfungskonstante ist dem Energieverlust direkt proportional.

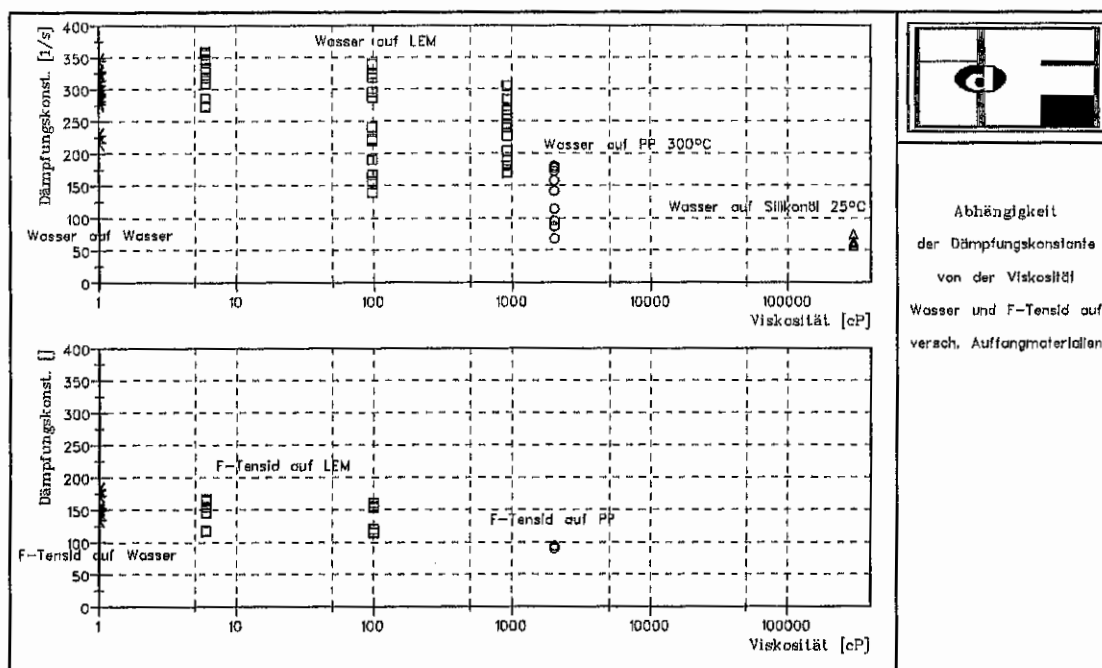
Die in den Versuchen ermittelten Dämpfungskonstanten liegen für PP-Schmelze mit einer Oberflächentemperatur von etwa 300°C

- für Wasser zwischen 50 und 200 s⁻¹
- für Wasser mit C-Tensid zwischen 75 und 150 s⁻¹ und
- für Wasser mit F-Tensid zwischen 50 und 75 s⁻¹.

Für Wassertropfen ist im Gegensatz zu Tropfen mit Tensidgehalt die aufzuwendende Energie zur Oberflächenvergrößerung höher. Die beim Impulsstoß in die Schmelze übertragene Energie äußert sich auch in einer Oberflächenvergrößerung der Plastschmelze. Dabei wird der mit seiner Wasserdampfhülle in die Schmelze eindringende Tropfen, welcher pulsierende Bewegungen zur Wiedererlangung der Kugelform ausführt, hochgeschleudert und eventuell auch zerteilt. Zurückfallende Fragmente des Tropfens und der Schmelze erzeugen immer wieder neue Eruptionen.

Der im Gegensatz dazu mit sehr kleiner Grenzflächenspannung auftreffende Tropfen aus Wasser mit F-Tensid breitet sich gleich auf der Schmelze aus, dringt damit praktisch nicht in die Schmelze ein und besitzt keine Möglichkeit, Eruptionen von geschmolzenem Plastmaterial hervorzurufen. Die beim Impulsstoß übertragene Energie ist nicht so groß. Das System schwingt mit geringerer Dämpfung weiter.

Die Energieübertragung beim Impulsstoß hängt aber auch von der Viskosität des Auffangmaterials ab. In Abb. 5.1.9.11 sind Versuche mit Wassertropfen und Wassertropfen mit F-Tensid auf verschiedenen viskosen Auffangmaterialien dargestellt. Es ist erkennbar, daß die Dämpfungskonstante indirekt proportional zur Viskosität ist. Je besser sich die kinetische Energie in Scherkräfte des Auffangmaterials übertragen läßt, desto größer ist die Dämpfungskonstante. Bei Wassertropfen mit hoher Oberflächenspannung ist die Abhängigkeit deutlicher ausgeprägt als bei tensidhaltigen Tropfen mit geringer Oberflächenspannung.



Abhängigkeit der Dämpfungskonstante von der Viskosität Wasser und F-Tensid auf versch. Auffangmaterialien

Abbildung 5.1.9.11: Abhängigkeit der Dämpfungskonstante von der Viskosität

5.1.10 Schlußfolgerungen

Als Ergebnis der Untersuchung des Tropfenverhaltens an Oberflächen von Plastschmelzen kann festgestellt werden, daß die beim Löschprozeß auf die Schmelze auftreffenden Tropfen ihren Bewegungsimpuls in Abhängigkeit der Parameter Temperatur, Oberflächenspannung der Tropfenflüssigkeit (Löschmittel) und Viskosität der Schmelze übertragen können. Um ein Verspritzen von Löschmittel und Plastschmelze zu verhindern, sollte das Wasser mit Tensid, bevorzugt F-Tensid, versetzt werden.

5.2 Applikation von Löschwasser bei verdeckten Brandflächen

5.2.1 Typische Oberflächen verdeckter Brände

Das Entstehen verdeckter Brände innerhalb geometrischer Objekte wurde bereits erläutert. Allen verdeckten Bränden ist gemeinsam, daß die für die Brandstofflieferung in die Flamme verantwortliche geschmolzene Oberfläche dem Löschmittel nicht direkt zugänglich ist und sich innerhalb des verdeckten Brandes ein geschlossenes Regime zwischen Luft- bzw. Brandstoffzuführung zur Flamme und Energierückführung von der Flamme zur Oberfläche ausgebildet hat. Die Lage der geschmolzenen Plastoberflächen kann sich in verschiedenen Höhen innerhalb des Brandobjektes befinden und kann bis zu 90° geneigt sein. Innerhalb der meist deutlich ausgebrannten, nach oben verdeckten Hohlräume stellen sich gerichtete Strömungen ein, deren Geschwindigkeiten von 5 bis 20 m/s variieren können. Die Strömungen sind turbulent und werden durch die Flammen in den Hohlräumen ständig beeinflusst.

Damit ergeben sich für einen gezielten Löschmitteleinsatz folgende Schwerpunkte:

- Einsatz von Vollstrahlen oder Sprühstrahlen mit ausreichend großen Tropfen und geringem Öffnungswinkel des Strahls
- Aufbringen ausreichender Löschmittelraten durch kleine Eindringöffnungen auf die gesamte innere Oberfläche des verdeckten Brandes bei unterschiedlicher Lage und Neigung der Oberflächen
- Überwinden der Heißgasströmung innerhalb des verdeckten Brandes

5.2.2 Gezielter Einsatz von Löschmittelstrahlen

Bei ausgedehnten Brandflächen wird zunächst nur die äußere Oberfläche des brennbaren Stoffes gezielt mit Löschwasser beaufschlagt, was oberhalb einer kritischen Anwendungsrate zu einem örtlichen Löscherfolg führt. Ein Teil des auf der Oberfläche ankommenden Löschwassers wird am diskreten Ort nicht mehr benötigt und wird deshalb als sogenanntes Schadwasser abfließen. Ungenutztes Wasser gelangt beim Abfließen in den Reaktionsbereich der verdeckten Brände und trägt hier nur zu einem geringen Teil am Löscherfolg bei. Das Abfließen verläuft unkontrolliert. Es bilden sich bevorzugte Rinnsale, die den Hauptanteil des Löschwassers ungenutzt an den verdeckten Bränden vorbei- bzw. durch sie hindurchführen. Der Löscherfolg wird erst erreicht, wenn bei Nachlassen der Brandintensität die Strahlrohre näher an den Brandherd geführt werden können und einzelne Eindringöffnungen der verdeckten Brände erkannt werden.

Erfolgt dann ein gezielter Einsatz, so wird deutlich, daß die für die günstigste Flächenbelegung effektiven Sprühstrahlen bereits aus kurzer Distanz für verdeckte Brände uneffektiv werden. Es ist praktisch nicht möglich, mit einem Sprühstrahl aus der Distanz heraus den erforderlichen Massestrom an Wasser durch die Eindringöffnung zu bringen. Das nachfolgende Diagramm verdeutlicht diese Aussage am Beispiel eines nach unten gerichteten Vollkegelstrahls.

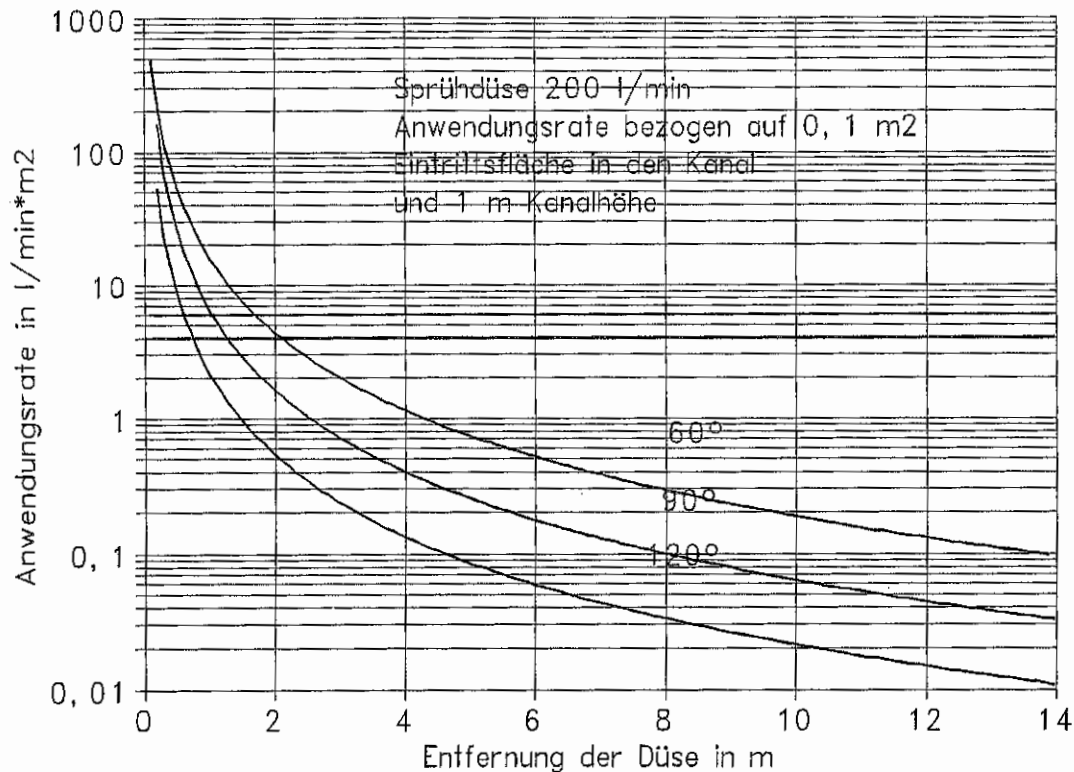


Abbildung 5.2.2.1: Löschwasserverteilung in Abhängigkeit von der Entfernung

Untersucht man die in die Eindringöffnung gelangenden Wassertropfen, so muß man feststellen, daß infolge der Überlagerung der Strömung innerhalb des verdeckten Brandes und der Strömung innerhalb des Wasserstrahls, mit der erhebliche Luftvolumina mitgeführt werden, Kräfte auftreten, welche die Verteilung der Wassertropfen entscheidend beeinflussen. Durch die Heißgasströmung werden die Tropfen teilweise mitgerissen und teilweise verdampft. Hinzu kommt, daß durch die Heißgasströmung eine Rotation des Tropfens mit nachfolgender Veränderung der Flugbahn induziert wird (Magnus-Kraft). Bei kleinen Teilchen, die dem mittleren Strömungsfeld besser folgen, werden die anfänglichen Eigenbewegungen schnell gedämpft und es ergeben sich Geschwindigkeiten, die der Geschwindigkeit der Gasphase entsprechen [19]. Damit erfolgt im Inneren des verdeckten Brandes eine Veränderung der Flugbahn der Tropfen, die um so größer ist, je kleiner die Tropfenmasse ist. Es ist praktisch damit nur noch bei großen Tropfen und Strahlen möglich, die Flugbahn vom Strahlrohr aus zu beeinflussen.

5.2.3 Versuche zur Bestimmung der Beaufschlagung senkrechter Flächen in Kanälen

5.2.3.1 Versuchsaufbau

Zur Bewertung der tatsächlichen Beaufschlagung von senkrechten Kanalfächen wurden Versuche mit einer Sprühdüse Typ Lechler 460 608 mit einem Sprühwinkel von 120° an einem Kanal mit einer Öffnungsfläche von $0,2 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$ durchgeführt. Abbildung 5.2.3.1.1 zeigt den schematischen Versuchsaufbau.

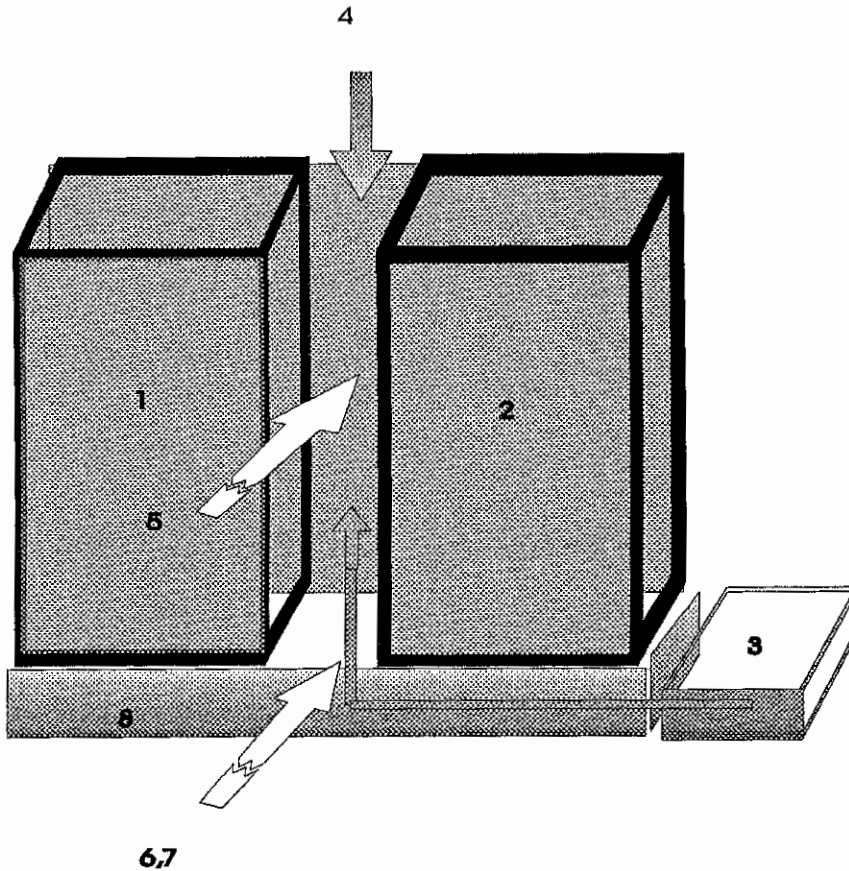


Abbildung 5.2.3.1.1:

Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

- 1,2 geometrische Körper aus PE-Plast, Kanaltiefe 1 m, Kanalbreite 0,2 m
- 3 Querstromlüfter, Lufterströmung in den Kanal
- 4 Düsenanordnung senkrecht über dem Kanal
- 5 Düsenanordnung waagrecht in den Kanal
- 6,7 Düsenanordnung senkrecht von unten und im Winkel von 45 ° in den Kanal
- 8 Holzpalette

Gemessen wurden ausschließlich die auf der senkrechten Wand auftreffenden Tropfen und deren Verteilung. Dazu wurden die an der Kanalwand ablaufenden Volumenströme in Abständen von jeweils 10 cm über die Kanaltiefe von 1m ermittelt. Das Wasser wurde über Trichter in Meßzylinder aufgefangen.

Die Sprühdüse wurde in verschiedenen Abständen vom Kanal angeordnet. Folgende Versuchsreihen wurden ausgeführt:

- Anordnung der Düse über der Kanalmitte mit senkrecht nach unten gerichtetem Strahl (Versuchsreihe I)
- Anordnung der Düse in der Mitte vor der offenen Kanalseite mit waagrechttem Strahl (Versuchsreihe II)
- Anordnung der Düse seitlich von unten vor der offenen Kanalseite mit einem Strahlwinkel von 45° nach oben (Versuchsreihe III)
- Anordnung der Düse seitlich von unten vor der offenen Kanalseite mit einem Strahlwinkel von 90° nach oben (Versuchsreihe IV).

5.2.3.2 Ergebnisse der Versuche

Auf der Grundlage der Literaturlauswertung konnte erwartet werden, daß der Anteil des Löschwasserstromes, welcher die Wände des Kanals benetzt, geringer sein würde als die Beaufschlagung der Teilfläche durch die Sprühdüse. Gleichzeitig war zu erwarten, daß nur schwer eine gleichmäßige Beaufschlagung der senkrechten Kanalfläche möglich sein würde. Ausgewählte Ergebnisse dieser Versuche sind in Anlage 1 dargestellt.

Es konnte zunächst festgestellt werden, daß bei nahezu allen Varianten der Düsenausrichtung sich nur ein entsprechender Anteil des in die Kanalöffnung einströmenden Wassers an den senkrechten Wänden des Kanals absetzt. Die nachfolgenden Tabellen 5.2.3.2.1 bis 5.2.3.2.3 geben die Anteile des aus dem Sprühstrahl an den Wänden des Kanals abgesetzten Wassers wieder.

Tabelle 5.2.3.2.1: Volumenstrom des an den Kanalwänden abgesetzten Wassers bei Düsenanordnung über dem Kanal (Sprührichtung senkrecht nach unten)

Zeit in min	Volumenstrom an den Kanalwänden in ml/min					
	Abstand 0,3 m	Abstand 0,3 m /Luft	Abstand 0,5 m	Abstand 0,3 m /Luft	Abstand 1,0 m	Abstand 1,0 m /Luft
1	461	147	166		77	15
2	559	205	223	44	103	21
3	528	150	234	59	100	25
4	547	201	250	48	95	34
5	567	169	286	53	91	28
Mittelwert ohne An- fangswert	550	181	248	51	97	27
Gesamtstrom in ml/min bei Eintritt	870	870	320	320	96	96
% Anteil	63	21	78	16	100	28

Tabelle 5.2.3.2.2: Volumenstrom des an den Kanalwänden abgesetzten Wasser bei Düsenanordnung seitlich zur Kanalöffnung (Sprührichtung waagrecht)

Zeit in min	Volumenstrom an den Kanalwänden in ml/min					
	Düse von der Seitenmitte					
	Abstand 0,3 m	Abstand 0,3 m Luft	Abstand 0,5 m	Abstand 0,3 m Luft	Abstand 1,0 m	Abstand 1,0 m Luft
1	331	429	97	76	3,5	11
2	348	441	97	135	14	16
3	374	385	136	113	20	35
4	330	426	136	149	25	45
5	275	393	125	118	25	41
Mittelwert ohne An- fangswert	332	411	123	129	21	34
Gesamtstrom in ml/min bei Eintritt	870	870	320	320	96	96
% Anteil	38	47	39	40	22	36

Tabelle 5.2.3.2.3: Volumenstrom des an den Kanalwänden abgesetzten Wassers bei Düsenanordnung unten an der Kanalöffnung (Sprührichtung im Winkel von 45 ° und senkrecht nach oben)

Zeit in min	Volumenstrom an den Kanalwänden in ml/min					
	Abstand 0,3 m					
	Düse von der Seiten- mitte	Düse von der Seiten- mitte/Luft	Düse von unten 45°	Düse von unten 45° / Luft	Düse von unten 90°	Düse von unten 90° / Luft
1	331	429	165	194	145	191
2	348	441	191	232	200	237
3	374	385	196	266	249	260
4	330	426	184	279	269	274
5	275	392	198	284	283	290
Mittelwert ohne An- fangswert	332	411	193	265	250	265
Gesamtstrom in ml/min bei Eintritt	870	870	870	870	870	870
% Anteil	38	47	22	30	29	30

Aus den Tabellen geht hervor, daß bei Beaufschlagung mit Wasser von oben ohne zusätzliche Luftströmung im Kanal mit zunehmender Entfernung der Düse der Anteil des sich absetzenden Wassers ansteigt. Ursachen sind vor allem in der geringeren Luftbewegung bei größerem Abstand zu sehen.

Herrscht im Kanal eine der Wasserbeaufschlagung entgegengerichtete Luftströmung, dann verringerten die sich an den Wänden absetzenden Wasserströme auf ¼ der Wasserströme, die bei Versuchen ohne zusätzliche Luftströmung ermittelt wurden.

Dabei wurden nicht nur Wasseranteile mit dem Luftstrom abgeführt, sondern auch die Bewegungsrichtung der Wassertropfen verändert. Die Verteilung des an der Kanalwand abgeflossenen Wassers ist den Abbildungen des Anhangs 1 zu entnehmen.

Aus den Versuchen mit Anordnung der Düse senkrecht von oben wurde deutlich, daß innerhalb eines Bereiches, der seitlich versetzt zur Achse des Sprühstrahles in Richtung Kanalende verläuft, der Hauptstrom des Wassers abregnete. Geringe Ströme waren am Kanal Anfang und am Kanalende zu verzeichnen.

Bei der seitlichen Einführung des Sprühstrahls in die Kanalöffnung wurde ein wesentlich geringerer Anteil des Wassers als abgesetzter Wasserstrom ermittelt. Die Entfernung der Düse bezüglich des Kanalendes war so gewählt, daß der Bereich der Beeinflussung der Wassertropfen durch die Schwerkraft außerhalb des Meßbereiches lag. Es wird hier deutlich, daß die Luftströmung im Kanal eine Steigerung des abgesetzten Wasserstromes bewirkt. Die gemessene Verteilung des abgesetzten Wassers zeigt, daß die Wassertropfen nicht in den Kanal eindringen konnten. Der Hauptanteil des Wassers setzt sich bereits im Bereich von Kanalöffnung und einer Eindringtiefe von 0,3 m an den Wänden ab. Im hinteren Kanalteil werden die senkrechten Kanalwände praktisch nicht mehr mit Wasser beaufschlagt.

Die Versuche zeigen wesentliche Verhaltensweisen von Sprühstrahlen beim Eintritt in offene Kanäle mit und ohne Strömung, wobei das Auftreten dieser Kanäle typisch ist für Lager fester Stoffe. Es wird sichtbar, daß Sprühstrahlen beim Eintritt in den Kanal immer beeinflußt werden. Es werden sowohl die Flugwege der Tropfen im Kanal verringert als auch deren Richtung verändert.

Da der Sprühstrahleinsatz für die Bekämpfung verdeckter Brände bereits bei geringen Entfernungen zum Brandobjekt durch die Verteilung des eingesetzten Wassers auf der Oberfläche an die untere Grenze der erforderlichen Anwendungsrate des Wassers für einen Löschersfolg gelangt, sollten alternative Möglichkeiten der Löschmittelapplikation überprüft werden.

Für eine ausreichende Wasserzuführung in den Bereich verdeckter Brände könnten

- geschlossene Strahlen eingesetzt werden, die durch die Strömung in den Kanälen praktisch nicht beeinflußt werden und die nur geringe Mengen an Frischluft an die brennenden Oberflächen heranführen.
- Flachstrahlen eingesetzt werden, mit denen auch in schmale Eindringöffnungen die erforderlichen Wasserströme eingebracht werden. Der durch die Flachstrahlen mitgeführte geringere Luftstrom und die größeren in einer Ebene verteilten Tropfen bieten bessere Voraussetzungen für ausreichende Anwendungsrate bei größeren Eindringtiefen.
- Wassernebel mit Tropfengrößen $< 10^{-7}$ m eingesetzt werden, die den vom verdeckten Brand angesaugten Luftstrom überlagern und damit an die verdeckten Oberflächen geführt werden. Neben der ausreichenden Anwendungsrate müssen dann aber auch effiziente Möglichkeiten zur Beeinflussung der Strömungsrichtungen und des Niederschlagens der in der Strömung mitgeführten feinsten Tropfen an den Oberflächen gefunden werden. Da aber gerade kleine Tropfen sich den Bedingungen der Grundströmung sehr leicht anpassen und im Nahbereich der zu beaufschlagenden Oberfläche die Strömung durch Verbrennungsreaktionen erheblich beschleunigt wird, kann nur bei großen Tropfendichten mit entsprechenden Erfolgen gerechnet werden.

Der Einsatz von Vollstrahlen erfordert eine optimale Verteilung des auftreffenden Wassers auf der Brandstoffoberfläche. Geht man davon aus, daß die Brandstoffoberfläche Temperaturen zwischen 400 und 600 °C besitzt, so kann der Wärmeübergang von der Brandstoffoberfläche zum Löschwasser nur über eine Filmverdampfung führen.

Für Heizflächen kann der Beginn der Filmverdampfung durch die kritische Heizflächenbelastung bestimmt werden, die nach Adolphi für Wasser $1,45 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ beträgt. Die kritische Temperaturdifferenz zwischen Heizfläche und Wasser wird mit 25 K bestimmt [20], so daß im Fall des Löschens bereits oberhalb einer Oberflächentemperatur von 125 °C die Filmverdampfung für den Wärmeübergang verantwortlich ist. Die Grenzschichtabschätzung im Abschnitt 3.4 zeigt, daß nur ein geringer Teil des Löschwassers für den Wärmübergang genutzt werden kann. Vollstrahlen werden damit nur effektiv, wenn es gelingt, das Wasser auf den Oberflächen zu verteilen. Die örtliche Beaufschlagung sollte an den Oberflächen nicht wesentlich über die Grenzschichtdicke hinausgehen. Erst nach der Verdampfung dieser Wasserschicht ist es sinnvoll, erneut Wasser auf der Fläche zu verteilen. Damit muß der Vollstrahl in Abhängigkeit vom Durchsatz des Strahlrohres über die Oberfläche bewegt werden, um eine optimale Verteilung des Wassers zu erreichen. Diese Varianten können gegenwärtig mit der manuell bewegten Technik nicht realisiert werden.

Strahlrohre mit Flachstrahlen bewegen außerdem nur geringe Volumenströme an Luft. Infolge ihrer flächigen Auffächerung ist die Beaufschlagung von verdeckten Bränden möglich, wie auch die gezielte Ausbringung des Wassers auf senkrechten und waagerechten Flächen. Eine manuelle Bewegung und damit Erzeugung von definierten, durchsatzabhängigen Schichtdicken ist denkbar. Durch die gezielte Bewegung kann eine intermittierende Löschmittelbeaufschlagung erreicht werden.

Wasserdampf mit sehr kleinen Tropfengrößen, hoher Teilchendichte und geringen mittleren Teilchengeschwindigkeiten können wie Löschgase auch als Volumenlöschmittel eingesetzt werden. Dazu sind alle Räume mit der im Abschnitt 2.1 genannten Rate von 0,46 kg feinverteiltem Löschwasser je m^3 freies Raumvolumen zu befüllen. Entgegen den Eigenschaften eines Gases, welches sich mit Luft vermischt, wird Wasserdampf in der Raumluft suspendiert und verbleibt je nach Teilchengröße einen bestimmten Zeitraum in dieser. Der Transport des Wasserdampfs ist an die Luftbewegung gebunden. Um die Flammen bzw. die Brandstoffoberflächen zu erreichen, muß die im Vergleich zur Rauchgasgeschwindigkeit geringe Geschwindigkeit der angesaugten Frischluft überlagert werden. Der Wasserdampf ist demnach an der Stelle des Frischluftbereiches einzubringen, an der so geringe Luftgeschwindigkeiten herrschen, daß sich bereits eine große Anzahl der Wassertropfen absetzen könnte.

Die Untersuchungen zu den genannten Applikationsmöglichkeiten konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgeführt werden. Diese Überlegungen sollten Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen sein.

5.2.4 Anwendungsraten für Brände mit verdeckten Brandflächen

Alle bereits in früheren Untersuchungen an Brandobjekten, in denen verdeckte Brände integriert waren, ermittelten, auf die Grundfläche des Brandes bezogenen Anwendungsraten mit eingerechneten Sicherheitsfaktoren, zeigten, daß Löscherfolge erzielt werden können. Voraussetzung dafür ist, daß die Oberflächen aller am Brand beteiligten Brandstoffe durch das Löschmittel erreicht werden. Diese Anwendungsraten sind in Abschnitt 3.3 aufgeführt. Der Schwerpunkt der effizienten Anwendung der Löschmittel bei der Brandbekämpfung liegt damit in der Strategie der Löschmittelapplikation. Sie ist ausschlaggebend für die Dauer der Brandbekämpfung und den Gesamtverbrauch an Löschmittel.

Die äußere Oberfläche kann durch eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Löschmittels als Sprühstrahlen am günstigsten erreicht werden. Die Sprühstrahlen werden durch folgende Faktoren in ihrer Wirkung gemindert:

- Die Wärmestrahlung und die Temperatur der Flamme und der Abgase können kleinere Tropfen bereits vor dem Erreichen der Brandstoffoberfläche verdampfen. Nach Kunkelmann [7] und Heinzel [8] sind Tropfen < 1 mm Durchmesser besonders betroffen.
- Die infolge des Verbrennungsvorganges in den Flammen entstehende Strömung heißer Gase überlagert die Zweiphasenströmung des Sprühstrahls, so daß ein Teil des mitgeführten Wassers mit dem Gasstrom die Reaktionszone verläßt und deshalb die Oberfläche nicht erreicht.
- Die Minderung der Sichtverhältnisse in Räumen durch starke Rußbildung verhindert den gezielten Einsatz der Wasserstrahlen.

Die Temperatur der Flamme und der Abgase ist sehr stark von der Ventilation des Brandes abhängig. Bei guter Ventilation wird der wesentliche Teil der produzierten Energie an die Umgebung abgeführt [21]. Insbesondere bei Bränden in Gebäuden kann durch Rauch- und Wärmeabzüge für geringere Belastungen des Gebäudes durch die Verbrennungsenergie gesorgt werden.

Die negativen Einflüsse geringer Sichtweiten auf die Brandbekämpfung in Räumen können durch gute Ventilation aber auch durch gezielte Beregnung des Rußes mit Sprühstrahlen gemindert werden.

Insgesamt wird deutlich, daß Sprühstrahlen vor allem bei größeren Entfernungen einige Nachteile besitzen. Das betrifft vor allem die Ausführung als Vollkegelstrahl, der je nach Öffnungswinkel bereits nach kürzester Entfernung ein verlustloses Einbringen der Wassertropfen in den Bereich zwischen Phasengrenze und Flammenzone nicht mehr gewährleisten. Es sollten optimale Strahlformen gesucht werden, die ein Minimum an Umgebungsluft mitführen, eine gute Verteilung ermöglichen und auch bei größeren Entfernungen gezielt zur Beaufschlagung der Phasengrenzfläche des Brandstoffes eingesetzt werden können.

Die Brandstoffoberflächen verdeckter Brände verlangen die gleiche Löschmittelbeaufschlagung wie die übrigen Oberflächen. Da aber die Oberflächen verdeckter Brände meist nur über kleine Öffnungsflächen zugänglich sind, wird eine auf den jeweiligen verdeckten Brand abgestimmte Strategie erforderlich.

Im Brandfall müssen zunächst das Ausmaß des verdeckten Brandes und seine Zuluft- bzw. Abgasführung erkannt werden. Je nach Standort und Entfernung ist die günstigste Strahlform für das Löschmittel zu wählen. Der Angriff sollte durch intermittierende Beaufschlagung des Löschmittels über die gesamte erreichbare Fläche vorgenommen werden.

5.3 Organische Zwischenprodukte in Flammen

5.3.1 Zersetzung und Verbrennung von Thermoplasten

Die Verbrennung von Kunststoffen erfolgt ausschließlich in der Gasphase als Diffusionsverbrennung mit Flammenbildung. Eine Ausbildung von Glut ist bei Kunststoffen nicht bzw. nur im fortgeschrittenen Stadium der Verbrennung möglich, wenn sich durch Kondensationsreaktionen bzw. durch Stripping feste kohleartige Produkte gebildet haben. Der Verbrennung ist stets eine Phase der Aufbereitung, Verdampfung bzw. Zersetzung des festen Brandstoffes vorgelagert. Die notwendige Energie wird durch die Rückstrahlung aus den Flammen geliefert. Thermoplaste müssen geschmolzen und zersetzt werden, um die notwendigen gas- bzw. dampfförmigen Zersetzungsprodukte für die Verbrennung zu liefern.

Der Mechanismus der Pyrolyse wurde bereits im ersten Teil dieser Arbeit behandelt [10]. Die bei den verschiedenen Kunststoffen entstehenden Pyrolyseprodukte sind stoffspezifisch. So können vorzugsweise

- durch Depolymerisation die Ausgangssubstanzen der Polymeren (PS, PMMA),
- durch Depolymerisation Kettenbruchstücke verschiedener Kettenlängen in statistischer Verteilung (PE, PP, PIB),
- durch Stripping kurzkettige, meist gasförmige Verbindungen (PVC, PAN, PVA),
- durch Abspaltung kurzkettiger Verbindungen und Vernetzung des Polymeren kohleartige Produkte

entstehen.

Bei der Verbrennung von Thermoplasten sind nachfolgende Reaktionen mit unterschiedlichen Ergebnissen möglich:

- Die Zersetzung der Thermoplaste liefert bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen verschiedene Zersetzungsprodukte. Mit zunehmender Oberflächentemperatur der Thermoplaste steigt die Zersetzung an (Zulieferung von längerkettigen Verbindungen), gleichzeitig verändert sich die chemische Beschaffenheit der Schmelze (Kettenlänge, Vernetzungsgrad).
- Bei wechselndem Energiestrom von der Flamme zur Brandstoffoberfläche werden unterschiedliche Zersetzungsprodukte gebildet. Ursachen sind sowohl unterschiedliche Verdampfungsenthalpien der flüssigen Zersetzungsprodukte als auch unterschiedliche Zersetzungsenergien der Verbindungen in der Schmelze.
- Die Aufbereitung des dampfförmigen Brandstoffes in der Vormischzone ist von der Temperatur, der Zeit und der Konzentration des Oxidationsmittels abhängig. Die Dämpfe absorbieren je nach Molekülgröße die Wärmestrahlung unterschiedlich. Größere Moleküle und ungesättigte Verbindungen benötigen weniger Energie, um sich weiter zu zersetzen. Die Zeit des Transportes der Dämpfe von der Oberfläche der Schmelze bis zu ihrer Zündung ist für jedes Molekül unterschiedlich. Ebenso ist die Konzentration des durch Diffusion in die Vormischzone eintretenden Sauerstoffes unterschiedlich. Es können hier bereits Oxidationsprodukte gebildet werden. Während der Aufheizphase erfolgt eine weitere Zersetzung des Brandstoffes mit Bildung reaktiver Zentren.
- Die Verbrennung selbst läuft dann über verzweigte Kettenmechanismen ab. Es können Radikale, Peroxide, ungesättigte Verbindungen und Ionen als Reaktionsträger auftreten [22] [23] [24]. Jeder mögliche Einzelschritt besitzt eine konzentrations- und temperaturabhängige Reaktionsgeschwindigkeit.

Bereits bei einfachen Brenngasen wie Methan konnten 51 unterschiedliche Reaktionen nachgewiesen werden [25], die schließlich zu den Reaktionsprodukten Wasser und Kohlendioxid führten.

Konzentrationsunterschiede der an der Reaktion teilnehmenden Komponenten und deren Reaktionstemperatur entscheiden darüber, welche der möglichen Reaktionen begünstigt sind und damit ablaufen oder auch darüber, ob die Reaktionen unterbrochen werden. Wird eine Reaktion unterbrochen, so besteht die Möglichkeit, daß dieses Zwischenprodukt den Reaktionsraum verläßt und in kälteren Zonen nicht mehr reagieren kann.

Es kann deshalb erwartet werden, daß selbst bei einfachen Brandstoffen alle denkbaren Zwischenprodukte der Verbrennungsreaktion als organischer Anteil in den Rauchgasen bzw. an Ruß oder Flugaschen gebunden auftreten können. Eine Reihe dieser Zwischenprodukte ist sehr reaktiv, setzt sich spontan um bzw. reagiert schon bei geringen Aktivierungsenergien und kann deshalb die Reaktionszonen nur in geringen Konzentrationen verlassen.

In Spuren oder unter besonderen Bedingungen, wie der Entnahme aus Flammen oder der Isolation durch Abfangreaktionen sind aber auch solche Stoffe nachweisbar [26]. Zu diesen reaktionsfähigen Zwischenprodukten gehören:

- freie Radikale,
- Ionen,
- Peroxide.

Reaktionsfähige Verbindungen lassen sich in der Nähe der Reaktionszone, in den Flammen oder unmittelbar nach dem Ablöschen des Brandes (über der Oberfläche des Brandgutes) nachweisen. Zu diesen Verbindungen gehören:

- Epoxide,
- Verbindungen mit kumulierten Doppel- und Dreifachbindungen,
- einfache Alkine und Alkene,
- Alkohole, Aldehyde und Ketone.

Weniger reaktive Stoffe, die in ihrer Bildung energetisch begünstigt sind und durch ihre hohen Aktivierungsenergien die Reaktionszonen mit höherer Wahrscheinlichkeit verlassen, können als organischer Anteil bei Bränden in Erscheinung treten. Solche Verbindungen sind:

- Alkane,
- Aromaten (Benzol, Toluol, Inden, Biphenyl, Naphthalin, kondensierte Aromaten),
- Cycloalkane (Cyclopropan, -pentan, -hexan, ...-dodecan),

Bei Bränden sind grundsätzlich Oxidationsprodukte der genannten Verbindungen zu erwarten. Das sind vor allem Aldehyde, Ketone, Säuren, Epoxide und Oxoverbindungen, Heterocyclen mit Sauerstoff im Molekül. Je nach chemischer Struktur der brennenden Thermoplaste können einzelne dieser Stoffgruppen besonders hervortreten. So werden bei den Polyolefinen besonders Alkane und beim Polystyrol vorzugsweise Aromaten gebildet, wobei aber die anderen genannten Verbindungen ebenfalls entstehen.

Heteroatome im Molekül erweitern die Palette der möglichen Verbindungen innerhalb der genannten Stoffgruppen:

- Halogene bedingen die gesamte Palette der aliphatischen, aromatischen, cyclischen und polykondensierten Halogenkohlenwasserstoffe.
- Stickstoff fördert die Bildung organischer Stickstoffverbindungen wie
 - aliphatische und aromatische Amine, Nitrile und Amide,
 - heterocyclische Pyrrole, Pyridine, Indole, Pyrazole oder Triazole.
- Schwefel ermöglicht die Bildung von
 - aliphatischen Sulfon- und Thioverbindungen,
 - heterocyclischen Thiazolen.

Das Auftreten von einfachen Reaktionsprodukten der Heteroatome, wie

- Halogenkohlenwasserstoffe bei chlor- oder bromhaltigen Stoffen,
- Schwefeldioxid bei schwefelhaltigen Stoffen und
- Blausäure bei stickstoffhaltigen Stoffen

ist ein direkter Hinweis auf die Gesamtpalette der möglichen organischen Verbindungen mit diesen Heteroatomen.

5.3.2 Kinetik der ablaufenden Reaktionen

In den verschiedenen Entwicklungsstadien eines Brandes bis hin zur Brandbekämpfung verändern sich die Reaktionsbedingungen. In der Entstehungsphase des Brandes ist genügend Oxidationsmittel vorhanden. Es herrschen laminare Strömungsbedingungen in der Flammenzone, so daß der Brandstoff nahezu vollständig in die entsprechenden Oxide der im Molekül vorhandenen Elemente umgesetzt werden kann. Die hohen Verbrennungstemperaturen verschieben das Gleichgewicht der Reaktion im wesentlichen zu den Produkten der vollständigen Verbrennung.

Bei voller Brandentwicklung stellen sich in der Flamme turbulente Strömungsverhältnisse ein, welche die Vollständigkeit der Verbrennung örtlich unterschiedlich gestalten. In Zonen mit hohen Temperaturen und damit starker Reaktion (hot spots) verbrennt die Mehrzahl der Dämpfe, während in kalten Zonen die Reaktionen langsam ablaufen und z. T. auch unterbrochen werden können. Der örtliche Mangel an Oxidationsmittel führt über Zwischenstufen vor allem zur Bildung von Ruß, welcher bei Flammentemperaturen eine Schichtgitterstruktur mit C-Sechsringen aufbaut, welche im Gegensatz zum Graphitgitter unregelmäßig gegeneinander verschoben sind. Zwischen den Schichten können sich hydrophobe Verbindungen wie Alkane, Aromaten und Cycloalkane durch Brückenbindungen anlagern.

In diesen Bereichen entsteht auch das wichtigste Produkt unvollständiger Verbrennung - das Kohlenmonoxid. Da die Oxidation des Kohlenmonoxides zum Kohlendioxid mit geringer Geschwindigkeit verläuft, besitzt das Kohlenmonoxid auch bei höheren Temperaturen eine ausreichende Lebensdauer. Es kann unverbrannt die Rauchgase erreichen und hohe Konzentrationen annehmen.

Mit fortschreitendem Ablöschen eines Brandes werden Teile der heißen Brandstoffoberfläche ihre Pyrolyseprodukte direkt an die Umgebung abgeben. Diese Verbindungen treten nicht mehr in die Kettenreaktion der Verbrennung ein. Es bestehen aber trotzdem noch Möglichkeiten der Umsetzung besonders reaktionsfähiger Verbindungen. Die im Brandstoff gespeicherte Energie sorgt in einem längeren Zeitraum für den Austritt weiterer Verbindungen. Erst nach Absinken der Temperaturen läßt die Produktion organischer Verbindungen nach.

Auch in erkalteten Brandstellen können leichtflüchtige organische Verbindungen wie niedere Aromaten, die an Ruß und Aschen adsorbiert wurden, über einen sehr langen Zeitraum aus dem Brandschutt an die Umgebung abgegeben werden. Deshalb sollte beim Vorhandensein großer Rußmengen die Belastung der Luft durch flüchtige organische Verbindungen auch in kalten Brandstätten überprüft werden, wenn Begehungen oder Arbeiten im Bereich der Brandstätte erforderlich sind.

Die Reaktionsfähigkeit der verschiedenen Elemente in organischen Molekülen mit Sauerstoff ist unterschiedlich. Infolge der Reaktionsfähigkeit werden die Oxidationsschritte nach einem bestimmten bevorzugten Schema ablaufen. Der Temperaturbereich von Verbrennungsprozessen garantiert, daß die Reaktionen ausschließlich über radikalische Zwischenstufen verlaufen. Die Theorie der Kettenreaktion der Verbrennung wurde von Semenov 1934 entwickelt. Als Maß für die Reaktionsfähigkeit der Elemente in organischen Verbindungen kann die Dissoziationsenergie der einzelnen Bindung herangezogen werden. Je geringer aber der Aufwand für die Dissoziation einer Bindung ist, desto leichter kann an dieser Stelle die Reaktion erfolgen. In Tabelle 5.3.2.1 sind einige Dissoziationsenergien zusammengefaßt

Tabelle 5.3.2.1: Dissoziationsenergien organischer Stoffe bei 25 °C [27]

Reaktion	Dissoziationsenergie in kJ/mol
$\text{HO—H} \rightarrow \text{HO}^* + \text{H}^*$	502
$\text{H}_2 \rightarrow \text{H}^* + \text{H}^*$	435
$\text{Cl}_2 \rightarrow \text{Cl}^* + \text{Cl}^*$	243
$\text{Br}_2 \rightarrow \text{Br}^* + \text{Br}^*$	193
$\text{H}_3\text{C—CH}_3 \rightarrow \text{CH}_3^* + \text{CH}_3^*$	352
$\text{CH}_3\text{—H} \rightarrow \text{CH}_3^* + \text{H}^*$	427
$\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—H} \rightarrow \text{CH}_3\text{—CH}_2^* + \text{H}^*$	410
$(\text{CH}_3)_3\text{—C—H} \rightarrow (\text{CH}_3)_3\text{—C}^* + \text{H}^*$	393
$\text{C}_6\text{H}_5\text{—H} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5^* + \text{H}^*$	427
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{—H} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2^* + \text{H}^*$	314
$(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{C—C}(\text{C}_6\text{H}_5)_3 \rightarrow (\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{C}^* + (\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{C}^*$	46

Durch den radikalischen Reaktionsablauf werden sowohl die Kohlenstoffketten aufgespalten als auch der Wasserstoff der organischen Verbindung oxidiert.

Im ersten Fall entstehen über Doppel- und Dreifachbindungen enthaltende Zwischenprodukte unterschiedliche Alkane, aromatische Verbindungen und daraus kondensierte Strukturen bis hin zur Bildung von Ruß, der aus nahezu reinem Kohlenstoff besteht.

Im zweiten Fall verläuft die Oxidationskette über Alkohole, Aldehyde, Säuren, Ketone, Ether, Epoxid- und Oxoverbindungen bis hin zu den Endprodukten Kohlendioxid und Wasser.

Aus beiden Reihen findet man bei Bränden eine Vielzahl von Verbindungen mit unterschiedlichen Kettenlängen, Substituenten oder unterschiedlicher Lage der Doppel- bzw. Dreifachbindungen in den organischen Bestandteilen. Diese Verbindungen sind zunächst in den heißen Rauchgasen enthalten und werden bei Abkühlung derselben im wesentlichen am Ruß oder an Flugaschen adsorbiert.

Zur Bestätigung dieser Zusammenhänge wurden Gasproben der verschiedenen Thermoplastbrände mit einem Gaschromatograph-Massenspektrometer Typ EM 650 im Massenbereich von 15 - 400 g/mol untersucht und qualitativ ausgewertet.

5.3.3 Probenahme bei Plastbränden

Zur Bewertung der Palette der organischen Verbindungen von Kunststoffbränden wurde folgender Versuchsaufbau gewählt. Auf einer Brandfläche von 8 cm · 8 cm wurde eine Masse von ca. 30 g des zu untersuchenden Kunststoffes gleichmäßig verteilt. Die notwendige Verdampfungsenergie wurde der Probe extern über einen Bunsenbrenner zugeführt. Nach dem Aufschmelzen des gesamten Materials wurde die Fläche gezündet und bis zum Erreichen einer stabilen Flamme weiter extern beheizt. Die geschmolzene Brandstoffschicht erreichte damit die in einem Flächenbrand an der Oberfläche des Brandstoffes herrschenden Reaktionsbedingungen. Die Temperaturen der Schmelzen wurden durch die externe Beheizung so eingestellt, daß die Oberfläche kontinuierlich Zersetzungsprodukte abgeben konnte.

Über ein Metallrohr wurde kontinuierlich aus Höhen von 4 cm; 10 cm; 20 cm; 30 cm über der Mitte der Brandfläche Gas abgesaugt. Eine zusätzliche Probe wurde nach dem Löschen der Brandfläche in 4 cm Höhe genommen. Aus diesem Gasstrom wurden nach dem Abscheiden von Ruß mittels Papierfilter und Abkühlen auf 40 °C die organischen Verbindungen an Thenax adsorbiert. Damit wurden nur die in den abgekühlten Gasen vorhandenen organischen Verbindungen analysiert. Zur Bewertung des an Ruß gebundenen Anteils organischer Verbindungen müssen gesonderte Untersuchungen ausgeführt werden.

Aufgrund der geringen Brandfläche bestanden günstige Bedingungen für die Verschiebung des Verbrennungsgleichgewichtes in Richtung einer vollständigen Verbrennung. Trotzdem zeigten die Auswertungen der Proben aus dem Bereich der Vormischzone und oberhalb der abgelöschten Brandstoffoberfläche alle möglichen Variationen der verschiedensten homologen-, isomeren- bzw. telomeren Verbindungen.

5.3.4 Ergebnisse der Analysen

Die in den GC-MS-Analysen durch die verwendete Auswertesoftware vorgeschlagenen Verbindungen wurden entsprechend ihrer Erkennungswahrscheinlichkeit gruppiert. Verbindungen, die nur mit sehr geringer Erkennungswahrscheinlichkeit vorgeschlagen wurden, wurden nicht aufgenommen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Anhang 3, Tabellen 5.3.4.1 bis 5.3.4.5 nach Verbindungsklassen geordnet dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse der Doppeluntersuchung so eingetragen, daß das erste Zeichen einen Abstand von 4 cm, das zweite Zeichen den Abstand von 10 cm, das dritte Zeichen den Abstand von 20 cm, das vierte Zeichen den Abstand von 30 cm der Probeentnahmestelle oberhalb der Brandstofffläche charakterisiert und das fünfte Zeichen die Beprobung über der gelöschten Oberfläche im Abstand von 4 cm verkörpert.

Die Ergebnisse entsprachen zunächst den erwarteten Verhältnissen. Die durch die Software identifizierten Verbindungen lassen sich in 5 wichtige Verbindungsklassen einordnen:

- Verbindungsklasse 1
lineare und verzweigte Kohlenwasserstoffe (Tabelle 5.3.4.1 mit Alkanen, Alkenen, Alkinen und ungesättigten Kohlenwasserstoffen, die mehr als eine Mehrfachbindung enthalten)
- Verbindungsklasse 2
Aromatische Kohlenwasserstoffe (Tabelle 5.3.4.2 mit einfachen Aromaten, Aromaten mit ungesättigten Seitenketten, kondensierten Aromaten, Biphenylen und teilweise gesättigten Ringverbindungen)
- Verbindungsklasse 3
Cyclische Verbindungen (Tabelle 5.3.4.3 mit 3 bis 12 C-Atomen im Ring und unterschiedlicher Anzahl an Mehrfachbindungen)
- Verbindungsklasse 4
Verbindungen mit Heteroatomen (Tabelle 5.3.4.4 mit heterocyclischen Sauerstoff, Stickstoff- und Schwefelverbindungen, Amine, Nitrile, Cyanide, Sulfonate, Carbamate und Nitroverbindungen)
- Verbindungsklasse 5
Oxidationsprodukte (Tabelle 5.3.4.5 mit Alkoholen, Ketonen, Aldehyden, Säuren, Ethern, Estern, Oxoverbindungen und Epoxiden)

Die Anzahl der Verbindungen, die sich durch Kettenlänge, -verzweigung und Lage von Doppelbindungen innerhalb der einzelnen Verbindungsklassen unterscheiden, ist sehr hoch. Es wird aber deutlich, daß die meisten organischen Verbindungen im Bereich der Vormischzone (entsprechend 4 cm Höhe der Probenahme) und über abgelöschten heißen Brandflächen gefunden wurden. Im Flammenbereich und in der Rauchgaszone wurden vorzugsweise Verbindungen identifiziert, die energetisch begünstigt sind. Hierzu zählen

- längerkettige Alkane und Alkene,
- einfache gesättigte und ungesättigte Aromaten,
- kondensierte Aromaten,

- Aldehyde, insbesondere Benzaldehyd,
- längerkettige Alkohole,
- Säuren und Ester,
- Furane, Pyridine, Indole und Nitrile.

Beim Kautschuk traten zusätzlich Schwefelverbindungen (Sulfone, Thiazole, Sulfonsäuren) auf.

Das Auftreten charakteristischer Verbrennungsprodukte je nach Polymer war nicht zu erkennen. Bereits am unterschiedlichen Auftreten einzelner homologer Verbindungen bei einem Brandstoff innerhalb der Verbrennung- und Rauchgaszone wird deutlich, daß die Palette der möglichen Reaktionen sehr groß ist. Eine halbquantitative Auswertung der Massenspektrogramme, die hier nicht vorgenommen wurde, jedoch über die Bewertung der Peakhöhen bei Vorhandensein eines inneren Standards möglich ist, würde die stoffbezogene Aussage zusätzlich aus der Sicht der produzierten Verbindungsanteile untermauern. Die Abbildungen 5.3.4.1 und 5.3.4.2 zeigen die Gaschromatogramme einer Doppelbestimmung bei der Brandstoff und Probenahmehöhe konstant gehalten wurden. Trotzdem sind deutlich Unterschiede zu erkennen.

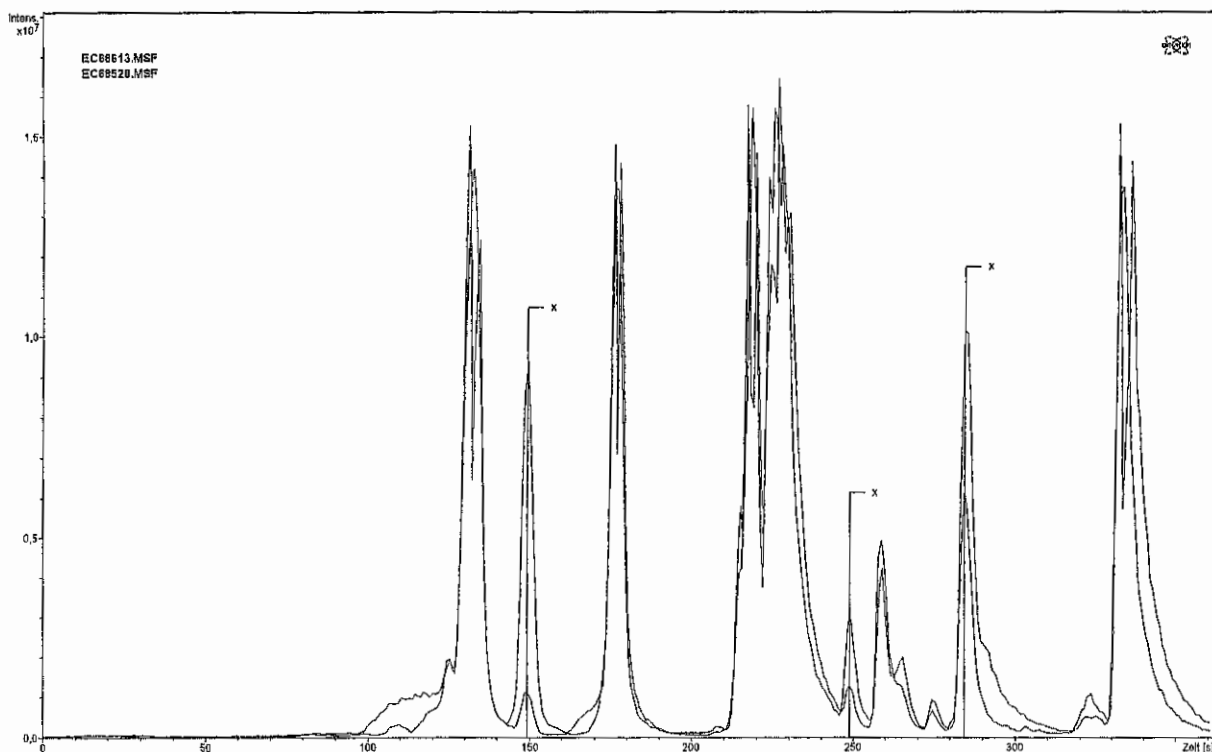


Abbildung 5.3.4.1: Gaschromatogramme einer Doppelbestimmung bei einem PMMA-Brand Probenahme in 20 cm Höhe über der Brandstoffoberfläche

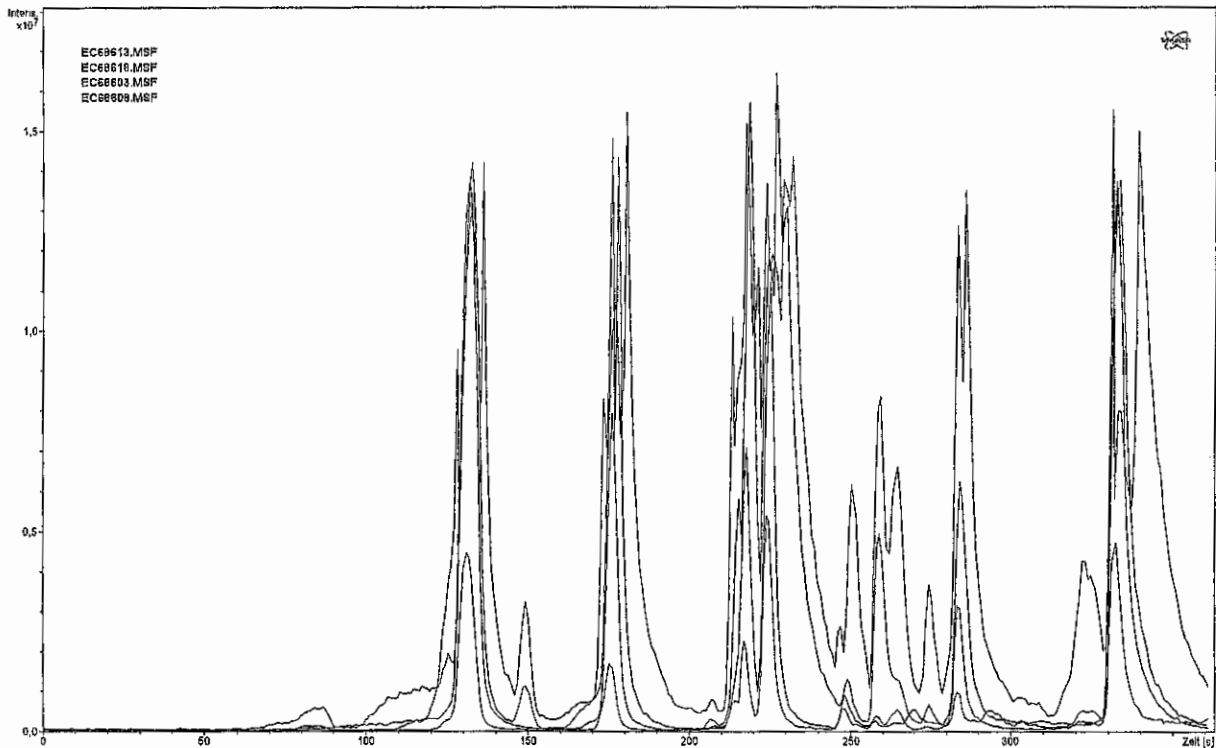


Abbildung 5.3.4.2: Gaschromatogramme aller Proben bei einem PMMA-Brand
Probenahme in verschiedenen Höhen

Die genannten wesentlichen Verbindungen sind bei allen Proben aufgetreten, wobei in der Vorheizzone und über der gelöschten Brandstoffoberfläche die größte Palette der verschiedenen Homologen gebildet wurde.

5.3.5 Empfehlungen für die Bewertung organischer Schadstoffe bei Plastbränden

Die Analysen zeigten, daß bei der Verbrennung von Kunststoffen typische Gruppen organischer Verbindungen immer entstehen. Im unmittelbaren Brandbereich und der Rauchgaszone muß deshalb mit deren Schadwirkungen gerechnet werden.

- Bei der Bekämpfung von Kunststoffbränden ist deshalb grundsätzlich Atemschutz zu tragen.
- Die Anreicherung vieler Schadstoffe an Brandruß erfordert einen umfassenden Körperschutz, der eine Kontamination der Haut mit Rußpartikel und dessen an den Oberflächen adsorbierten Schadstoffen nicht zuläßt.
- Je unvollständiger die Verbrennung abläuft, desto größer ist die Palette der entstehenden organischen Verbindungen und der Anteil toxischer Produkte. Das trifft für die Vormischungen innerhalb der Flammen, kalten Zonen in turbulenten Flammen und auf Anreicherungen gasförmiger Zersetzungsprodukte zu, die aus Sauerstoffmangel nicht abbrennen. Gleiche Verhältnisse entstehen beim Löschen und bleiben nach dem Löschvorgang über einen längeren Zeitraum erhalten. Deshalb muß Atemschutz auch beim Begehen abgelöschter Brandräume und -flächen angelegt werden.
- Enthalten die Ausgangsverbindungen Heteroatome, so ist damit zu rechnen, daß die bei der Verbrennung entstehenden organischen Verbindungen Heteroatome enthalten. Das trifft vor allem für Stickstoff, Halogene und Schwefel zu. Dabei entstehen vorzugsweise Nitrile aus dem Stickstoff, Chloraromaten und Dioxine aus Halogenen sowie Thiazole und Sulfonylverbindungen aus dem Schwefel der organischen Brandstoffe.

- Nachweisbar sind die Heteroatome über einfache Reaktionsprodukte in den Rauchgasen, insbesondere Cyanwasserstoff für Stickstoff-, Halogenwasserstoff für Halogen- und Schwefeldioxid für Schwefelverbindungen. Befinden sich diese Verbindungen in den Rauchgasen, sind die Maßnahmen zum persönlichen Schutz (Atem- und Körperschutz) nochmals zu überprüfen, um körperliche Schäden auszuschließen. Da die Rauchgase auch korrosiv wirken, sind die Fahrzeuge und Geräte außerhalb der Rauchgaswolke zu stationieren.
- Bei Nachweis von Halogenwasserstoff sollte grundsätzlich davon ausgegangen werden, daß Dioxine und andere Chlorverbindungen entstehen. Nach Überprüfung der im Brandstoff vorhandenen Massen an chlorhaltigen Ausgangsstoffen sollte in Verbindung mit den Umweltämtern die Notwendigkeit weitergehender Untersuchungen geprüft werden.

6. Empfehlungen zur Brandbekämpfung von Feststoffbränden

6.1 Lageerkundung

Im Rahmen der Lageerkundung ist das vorgefundene Brandobjekt nach wesentlichen Schwerpunkten für die Einschätzung der Brandentwicklung und die Festlegung der Löschmaßnahmen zu analysieren. Dazu gehören:

- Art des Brandstoffes (schmelzende / glutbildende Feststoffe),
- Art der Verpackung (brennbare / nichtbrennbare Behälter, Verpackungsmaterial)
- Art des Gebäudes, der Umgebung, Einbauten usw.
- Lagerform des Brandstoffes (Höhe des Brandstoffes, Einzellagerung, Stapelung, Palettenlagerung usw.)
- mögliche Lage und Anzahl verdeckter Brände (Lagerabstände zwischen den Brandstoffen, Abdeckung durch unbrennbare Materialien)
- Be- und Entlüftung des Brandobjektes (Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen, Lage der Zuluftöffnungen, Eingänge und sonstige Luftströmungen wie Klimaanlage u.ä.)
- Ausdehnung des Brandes einschließlich Rußbildung und Anteil von Pyrolysegasen durch Zersetzung noch nicht von den Flammen erfaßter Brandstofffläche
- Gefahren durch die Brandausbreitung

6.2 Lageeinschätzung und Ableitung der Maßnahmen für die Brandbekämpfung

Die Einschätzung der Lage muß sich sowohl auf die möglichen Brandausbreitungsrichtungen und die Maßnahmen zur Verhinderung derselben als auch auf das vom Brand erfaßte Objekt beziehen. Schwerpunkt für die Einleitung der Bekämpfungsmaßnahmen ist die Feststellung der strömungstechnischen Bedingungen, die sich durch den Brand in Abhängigkeit von der Umgebung und der Struktur des Brandstoffes eingestellt haben.

Die Beurteilung der Rauchgasströme ist neben der Bewertung der Wärmestrahlung der Flamme und möglicher Wärmeübertragung durch Wärmeleitung ein wesentlicher Faktor für die Auswahl der notwendigen Schutzmaßnahmen zur Verhinderung

- der Brandausbreitung,
- der Aufheizung und Zersetzung von Stoffen
- der Zündung bisher nicht vom Brand erfaßter Stoffe,
- der Erwärmung und Zerstörung von Brandwänden, Decken und Mauern.

Eine rechtzeitige und gezielte Beeinflussung der Strömung, insbesondere

- durch Rauchabzüge,
- Öffnen von Fenstern und Türen

verringert die Ausbreitung der Brandes, mindert die Aufbereitung des Brandstoffes und reduziert die Belastung des Gebäudes [21]. Sie bietet aber auch die Voraussetzung für einen effizienten Einsatz der Löschmittel.

Das Löschmittel muß so appliziert werden, daß es die Oberflächen der Brandstoffe möglichst verlustlos erreicht:

- Es sind vor allem Standorte zu wählen, die eine Einbringung des Löschwassers im Bereich zwischen Phasengrenze des Brandstoffes und der Flamme gestatten.
- Verdeckte Brände sind gesondert zu berücksichtigen und die Auswahl der Strahlform den gegebenen Bedingungen anzupassen.

Bei verdeckten Bränden können auch durch Veränderung der Strömungsverhältnisse Löscherfolge erzielt werden. Das betrifft:

- die Nutzung von Schäumen zur Bodenbeschäumung mit dem Ziel der Verringerung der Zuluftöffnungen,
- die Nutzung von Schaum für die Oberflächenlöschung des Brandes mit der Ausfüllung der Abluftöffnungen.

6.3 Durchführung der Brandbekämpfung

- Der Ablauf der Maßnahmen muß so gestaltet sein, daß erst mit Verfügbarkeit der für die Grundfläche des Brandobjektes erforderlichen Anwendungsrate der Löschangriff beginnt. Es können durchaus unterschiedliche Löschverfahren nebeneinander verwendet werden (z. B. Wasser in verschiedenen Strahlformen und Schäume).
- Die erforderlichen Löschmittelströme sind zunächst konzentriert innerhalb eines Bereiches einzusetzen. Dabei sind bautechnische Voraussetzungen wie Brandwände oder Öffnungen zu berücksichtigen. Kriterium für die richtige Auswahl der Löscheräte und des Standortes ist das Erreichen der Oberfläche des Brandstoffes durch das Löschmittel. Ist das nicht der Fall, muß der Angriff unterbrochen, der Standort gewechselt, ein Strahlrohr mit größerem Durchsatz verwendet oder der Gesamtangriff noch weiter konzentriert werden. Strahlrohre, deren Löschmittel die Flammen nicht sichtbar durchdringen, bzw. bei denen nicht sicher erkannt werden kann ob das Löschmittel die Oberfläche erreicht, sind uneffektiv. Sie sollten zurückgenommen und an anderer Stelle eingesetzt werden.
- Beim Aufbringen des Löschmittels auf die Oberfläche des Brandstoffes ist zu beachten, daß die Löschmittel intermittierend eingesetzt werden und erst nach Beendigung des möglichen Wärmeüberganges an den Wasserfilm erneut Löschmittel appliziert wird.
- Sobald ein Teil des Brandes abgelöscht ist, müssen die Strahlrohre versetzt und in der Tiefe des Objektes weitere Abschnitte abgelöscht werden. Da der berechnete Anfangsvolumenstrom an Löschmittel für die noch verbleibende Brandfläche nunmehr zu hoch ist, können in diesem Stadium einzelne Strahlrohre für die gezielte Bekämpfung von verdeckten Bränden eingesetzt werden. Diese Strahlrohre dienen nach Ablöschen der verdeckten Brände als Schutz für evtl. Rückzündungen infolge von Glut oder kleiner unerkannter Flammen.

7. Literatur:

- [1] Penner, S.
Mullins, B. Explosions, Detonations, Flammability and Ignition
Pergamon Press, London, New York, Paris,
Los Angeles 1959
- [2] Macek, A. Flammability limits-A re examination
Comb. Sci. And Techn. 21 (1979) S.43 - 52
- [3] Lewis, B.
von Elbe, G. Combustion, flames and explosions of Gases
Academic press, New York, 1961, 2. Auflage
- [4] Radusch, R. Der Wasserstrahl und seine Löschkraft
Brandschutz, Stuttgart (1954) 5 S.103
- [5] Pleß, G.
Seliger, U. Brennbarkeits- und Löscheigenschaften von Kautschuk
IdF-Bericht Nr. 307, Heyrothsberge 1990
- [6] Krüger, A.
Radusch, R. Wasserzerstäubung im Strahlrohr, Forschungsbericht Nr. 329 des
Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen,
Westdeutscher Verlag Köln und Opladen 1956
- [7] Kunkelmann, J. Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in
lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 8: Simulation
der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer
Heißgasströmung, Brandschutzforschung der Bundesländer
Bericht Nr. 80, Karlsruhe 1991
- [8] Heinzl, H. Löschverfahren mit Wasserdampf
Literaturbericht für Minimax GmbH Bad Urach,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1994
- [9] Abduragimov, I.N.
Porsov, M. I. Ocenka effektivnosti plamjagazitelej
Problemy gorenija i tusenija, Moskva VNIPO 1974 S.70 - 82
- [10] Pleß, G.
Seliger, U. Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten, Teil 1:
Beurteilung der Phasengrenzfläche und Löschversuche an ebenen
Flächen, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Bericht Nr. 316,
Heyrothsberge 1994
- [11] Dörfler, H.-D. Grenzflächen- und Kolloidchemie
VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1994
- [12] Autorenkollektiv Technische Strömungslehre, Reihe Verfahrenstechnik, Lehr- und
Lernmaterialien für die Aus- und Weiterbildung, Deutscher
Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1975, S. 189 ff
- [13] Pleß, G.
Seliger, U. Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten, Teil 2:
Bewertung der Löschwirkung bei unterschiedlichen Thermoplas-
ten an ebenen Flächen und geometrischen Körpern, Institut der
Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Bericht Nr.322, Heyrothsberge 1994

- [14] Rybar, P. Voda jano hasivo vodnich hasicich zarizenich
Zpravodaj Poz. Ochrany, Praha 21 (1988)1 S.19-30
- [15] DEM-Digital-Elektronik-Magdeburg GmbH, Magdeburg
- [16] Produkt der Fa. GFS - Gesellschaft für Strukturanalyse, Aachen
- [17] Produkt der Firma Leutron Vision, München, 1989
- [18] Wienecke, F.: Neue High-Tech Meßtechnik in der Brandforschung des IdF,
Jahresbericht, 1994
- [19] Sommerfeld, M. Teilchentransport in turbulenten Zweiphasenströmungen:
Optimierung des numerischen Berechnungsverfahrens
Abschlußbericht, LSTM Erlangen, Lehrstuhl für Strömungs-
mechanik, Universität Erlangen, Sept. 1989
- [20] Adolphi, G. Grundzüge der Verfahrenstechnik, VEB Deutscher Verlag für
Adolphi, H.V. Grundstoffindustrie, Leipzig 1970
- [21] Harmathy, T.Z. Overview of impact of energy conservation on firesafety
Fire technol. Quincy 19(1983)1 S 31 - 56
- [22] Demidov, P. G. Die Verbrennung
VEB Verlag Technik Berlin 1956
- [23] Baulch, D. L. et al. Evaluated Kinetic Data for Combustion Modelling
J.Phys. Chem. Ref. Data Vol. 21 No. 3 1992
- [24] Kondratjew, W. N. Kinetika chiceskich reakzii,
Nikitin, E. E. Verlag Nauka, Moskau 1974, 3.Auflage
- [25] Friström, R. M. Flame Structure and Processes
JHU/APL Series in Science and Engineering
Oxford University Press 1995
- [26] Hausmann, M. Radikale in Flammen - Nachweis durch Abfangreaktion mit Di-
methyldisulfid, Dissertation Technische Hochschule Aachen,
Verlag Shaker, 1993
- [27] Autorenkollektiv Organikum - Organisch chemisches Grundpraktikum
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften,
5.Auflage, Berlin 1965
- [28] Stroppe, H. Physik
VEB Fachbuchverlag Leipzig, 8.Auflage 1990
- [29] Senda, J. The Heat-Transfer Characteristics of a Small Droplet Impinging
Yamada, K. upon a Hot Surface
Fujimoto, H. JSME International Journal, Series II, Vol.31, No.1, pp 105-
Miki, H. 111,1988

- [30] Zapalowicz, Z. Analysis of the process of wetting a horizontal heated surface area by a single water droplet
Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.22, No.5, pp.713-720, 1995
- [31] Nigmatulin, B. I. Interaction between liquid droplets and heated surface
Vasiliev, N. I. Wärme- und Stoffübertragung 28, 313-319, 1993
Guguchkin, V. V.
- [32] Euteneuer, G. A. Druckabhängigkeit von Wurfweite und Tropfengröße bei
Sprühstrahlen, VFDB 6 (1957), S.124-128

**Anhang 1 Ausgewählte Ergebnisse zur Wasserbeaufschlagung senkrechter Flächen
in Kanälen (Material der senkrechten Fläche Polypropylen)**

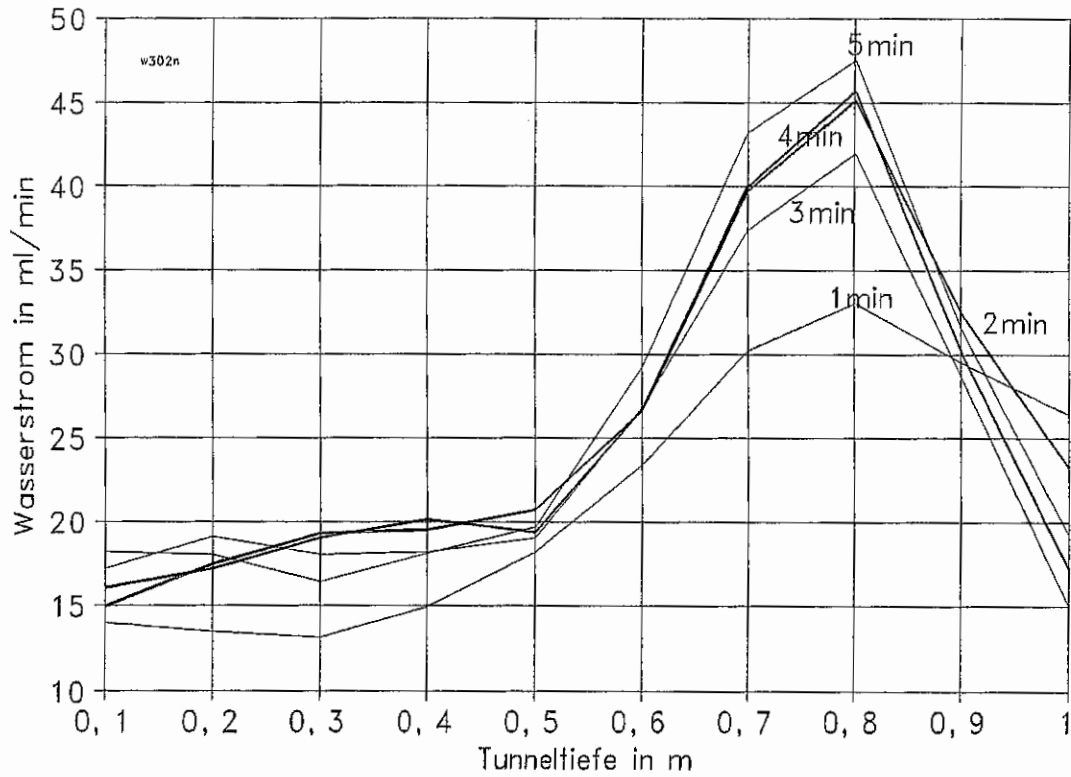


Abbildung 5.2.3.2.1: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse über dem Kanal senkrecht nach unten gerichtet

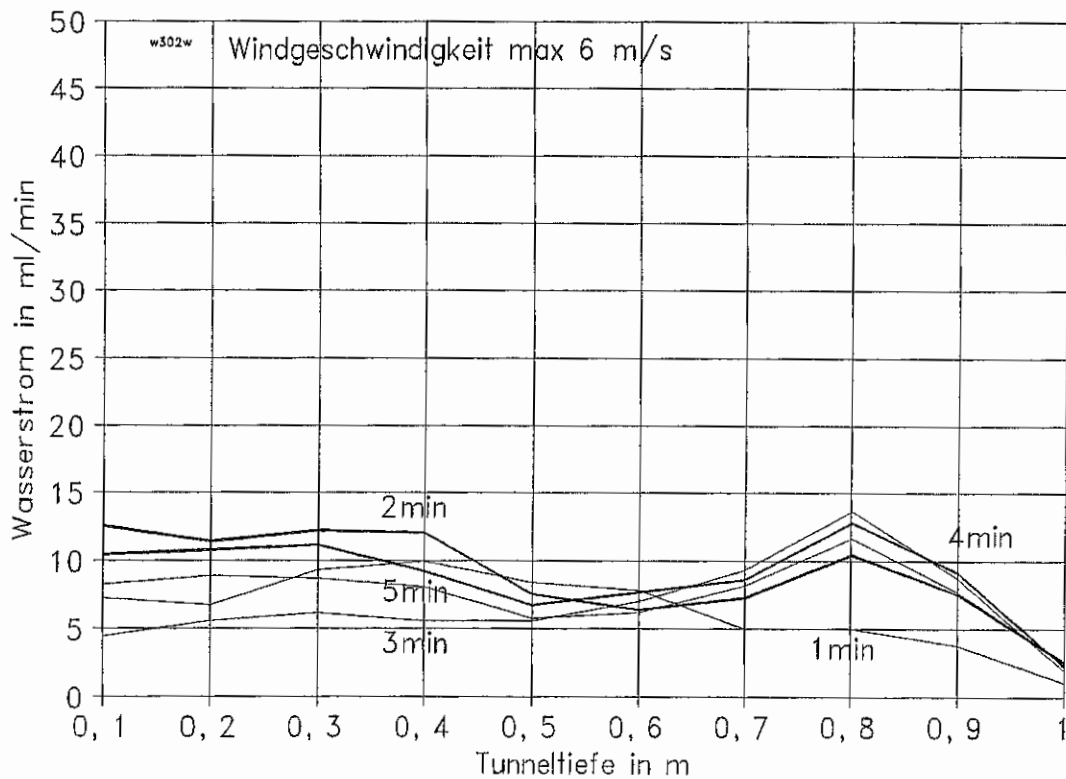


Abbildung 5.2.3.2.2: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse über dem Kanal senkrecht nach unten gerichtet,
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

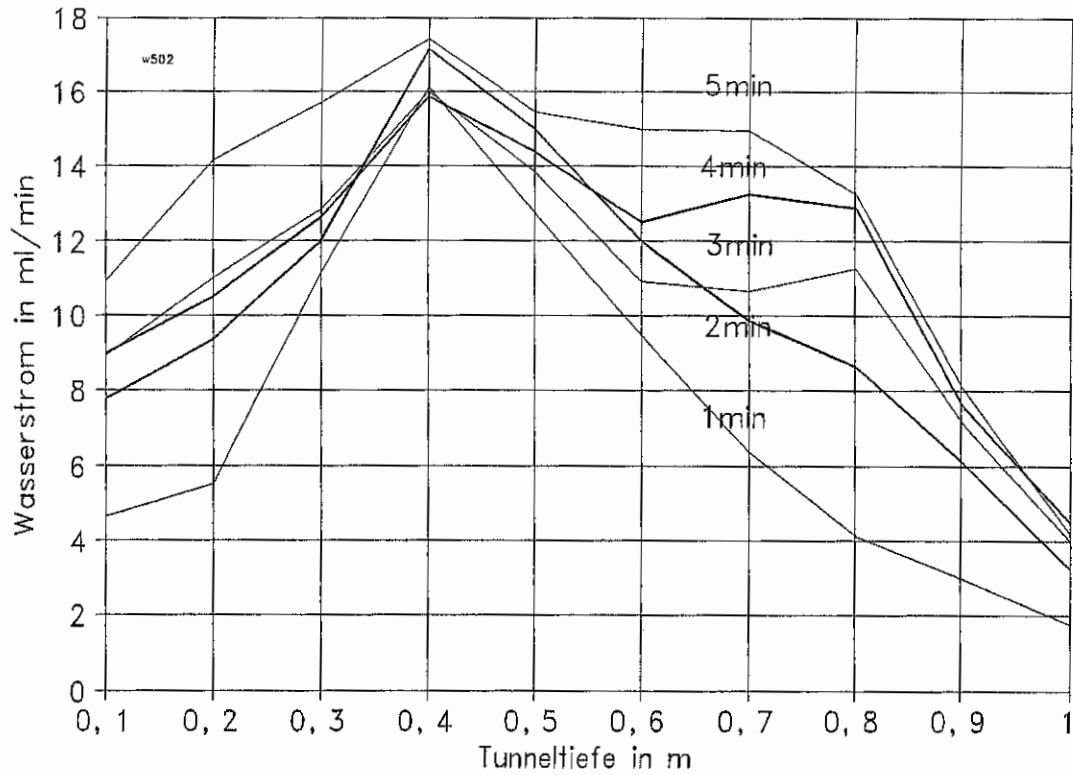


Abbildung 5.2.3.2.3: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 50 cm
Düse über dem Kanal senkrecht nach unten gerichtet

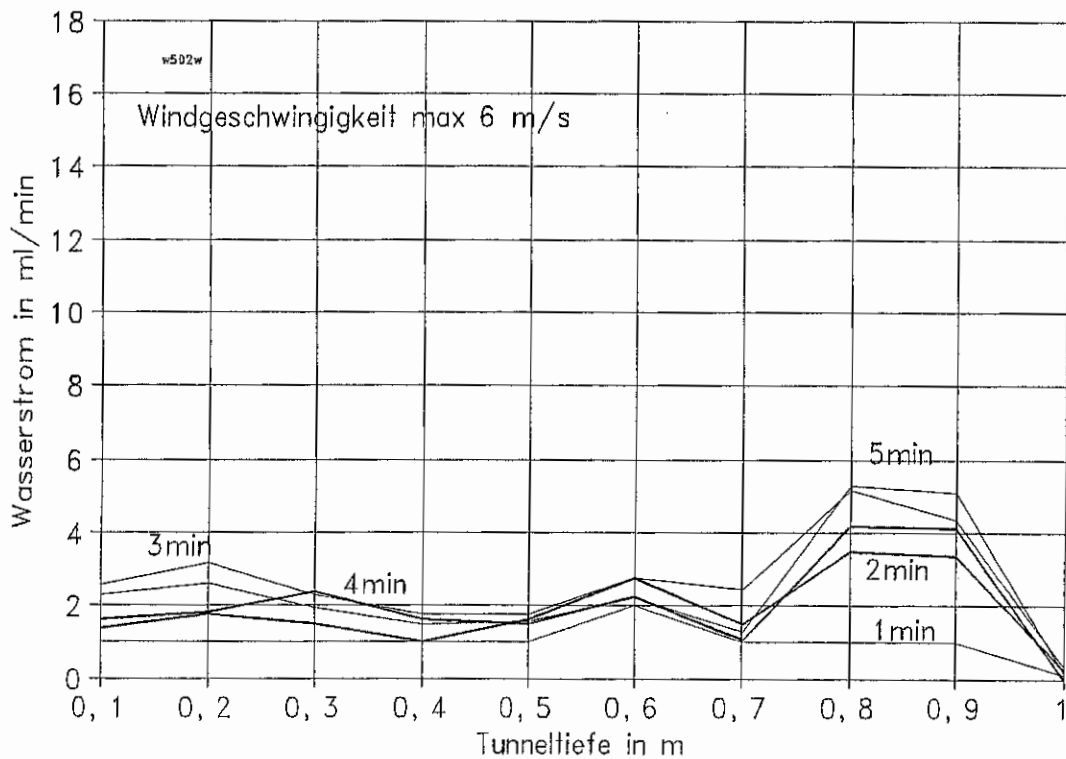


Abbildung 5.2.3.2.4: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 50 cm
Düse über dem Kanal senkrecht nach unten gerichtet,
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

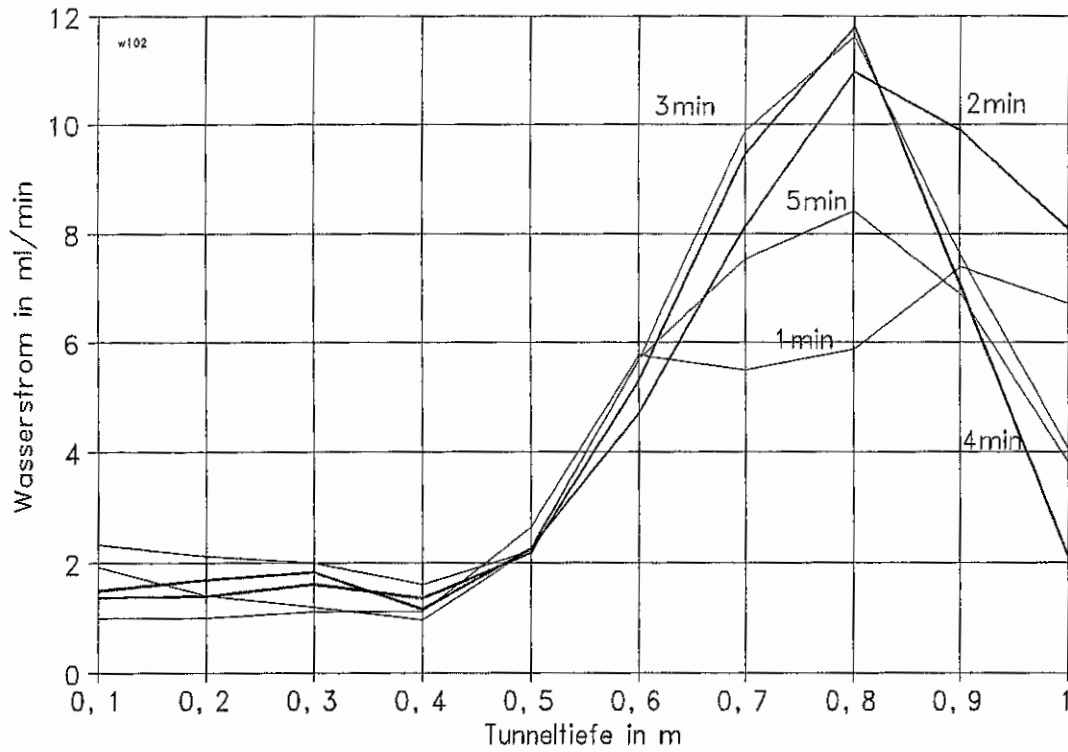


Abbildung 5.2.3.2.5: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 100 cm
Düse über dem Kanal senkrecht nach unten gerichtet

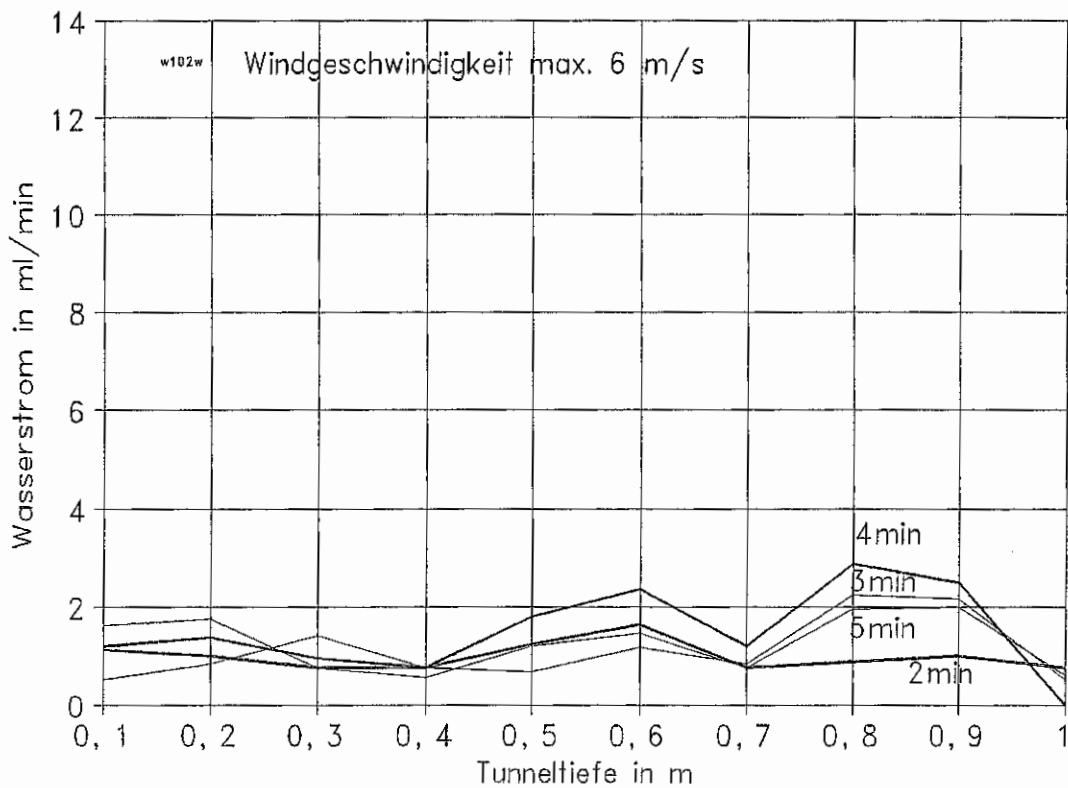


Abbildung 5.2.3.2.6: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 100 cm
Düse über dem Kanal senkrecht nach unten gerichtet,
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

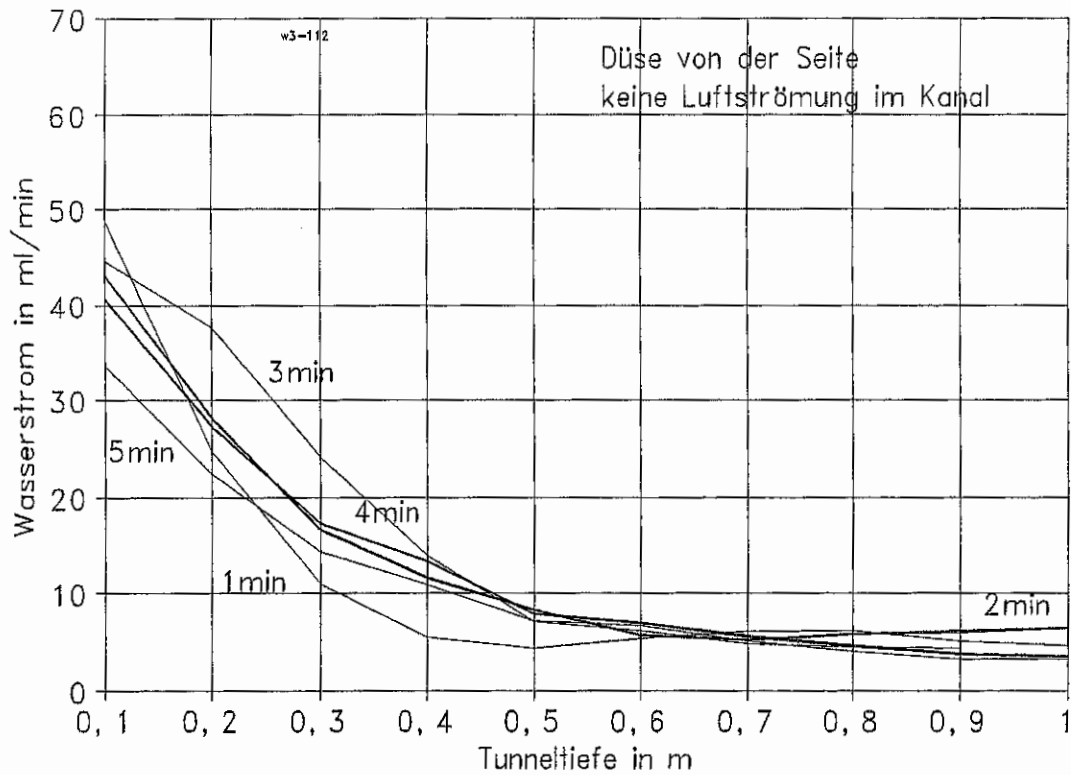


Abbildung 5.2.3.2.7: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse seitlich waagrecht zur Kanalöffnung gerichtet

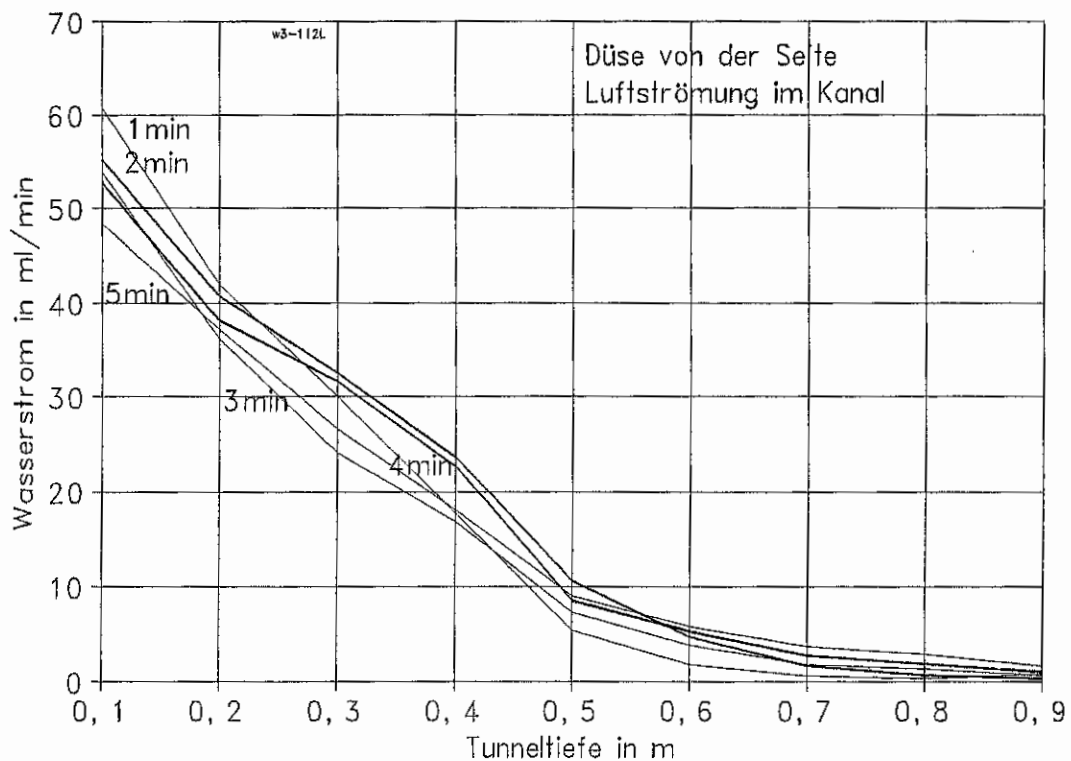


Abbildung 5.2.3.2.8: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse seitlich waagrecht zur Kanalöffnung gerichtet,
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

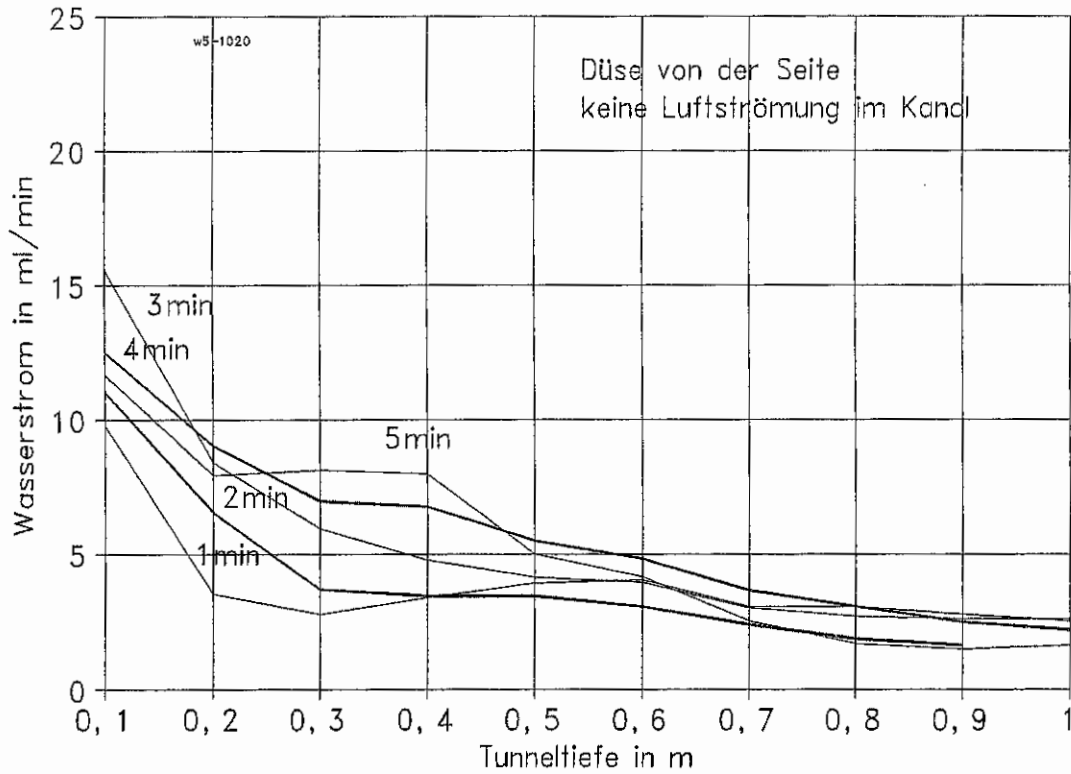


Abbildung 5.2.3.2.9: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 50 cm
Düse seitlich waagrecht zur Kanalöffnung gerichtet

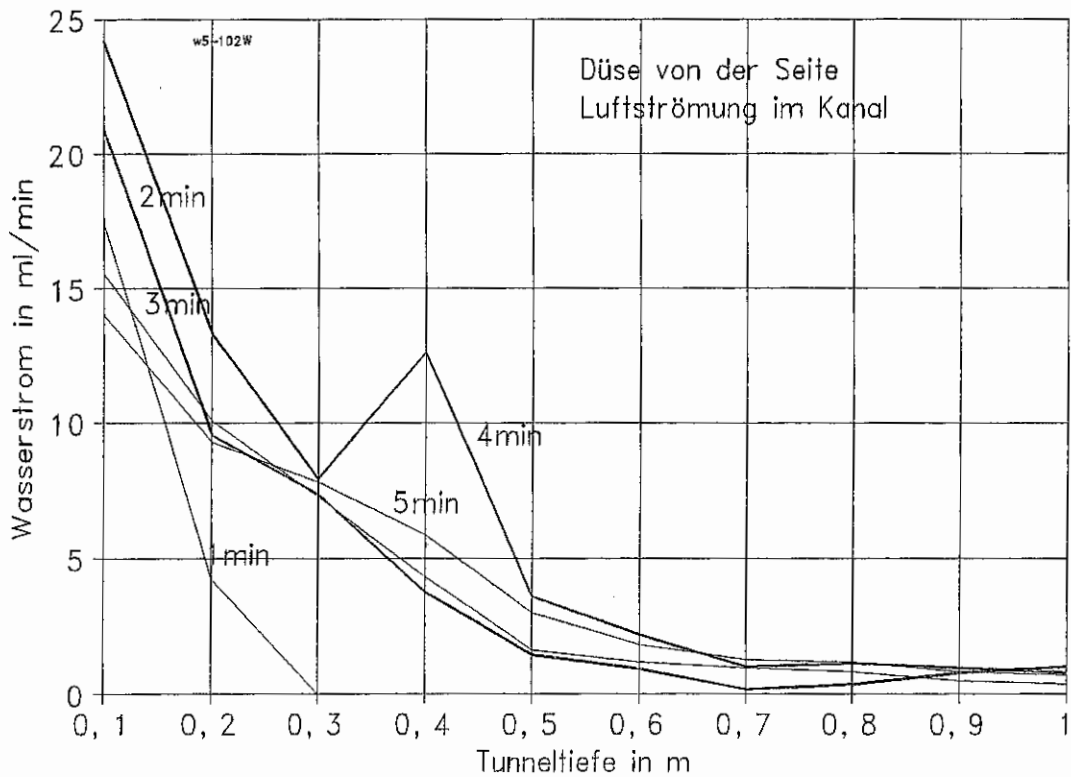


Abbildung 5.2.3.2.10: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 50 cm
Düse seitlich waagrecht zur Kanalöffnung gerichtet,
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

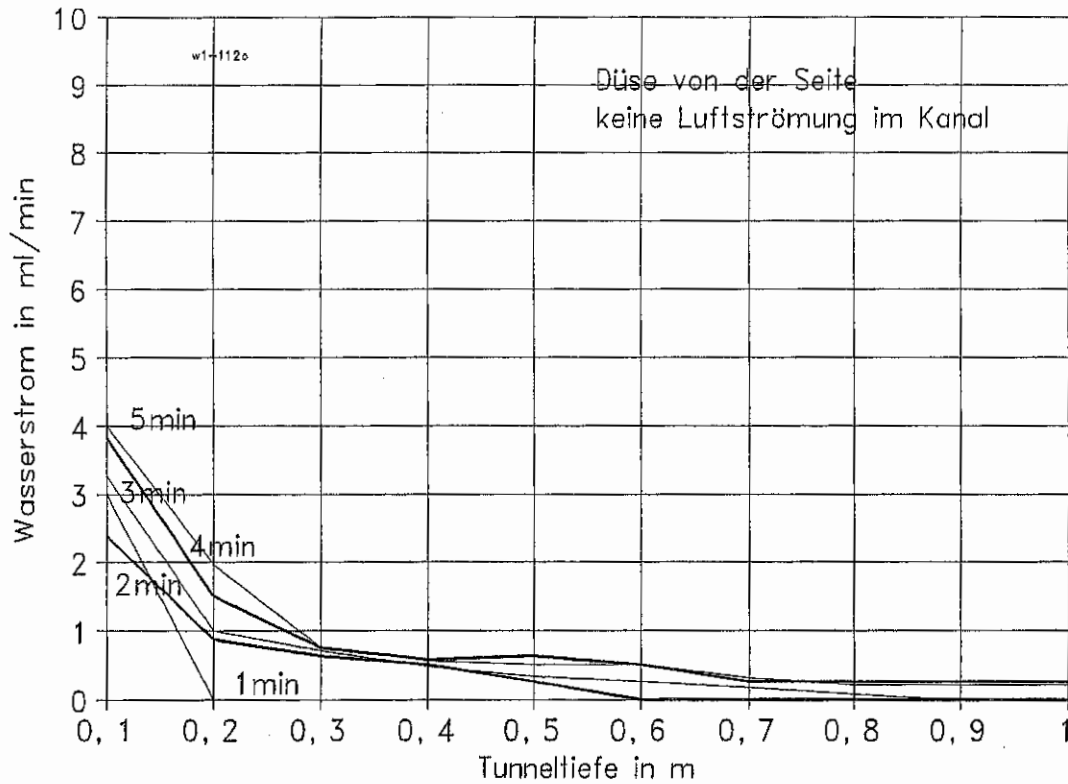


Abbildung 5.2.3.2.11: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 100 cm
Düse seitlich waagrecht zur Kanalöffnung gerichtet

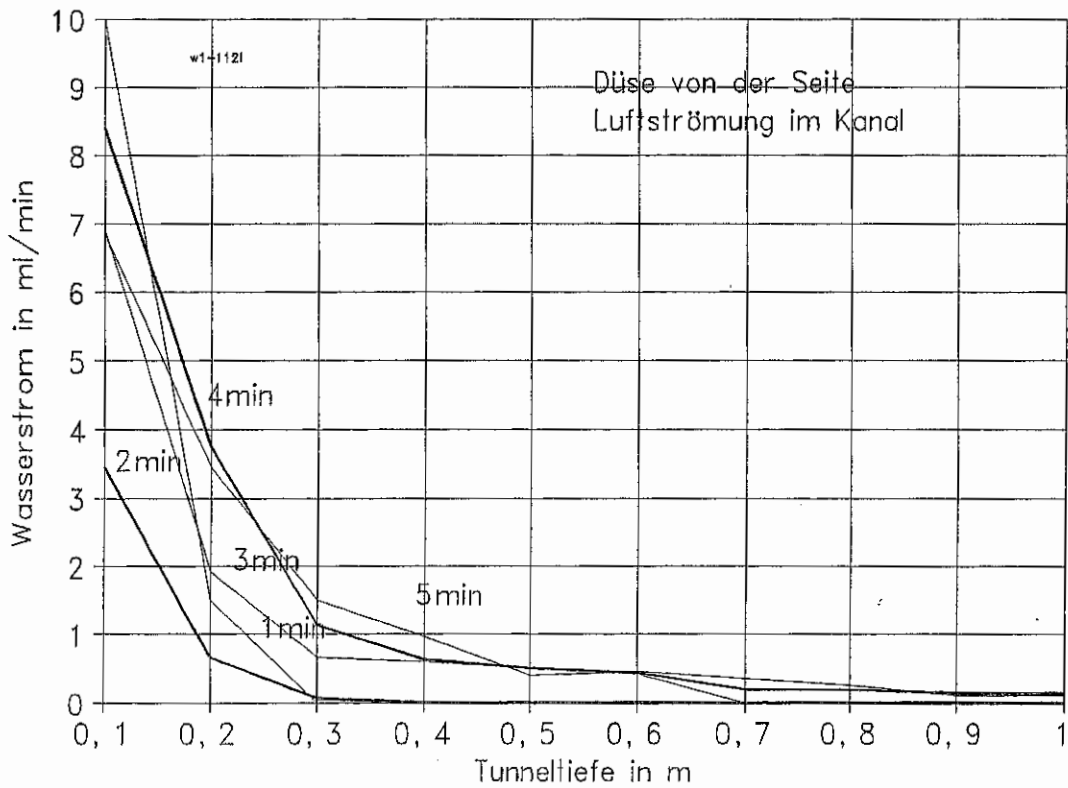


Abbildung 5.2.3.2.12: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 100 cm
Düse seitlich waagrecht zur Kanalöffnung gerichtet,
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

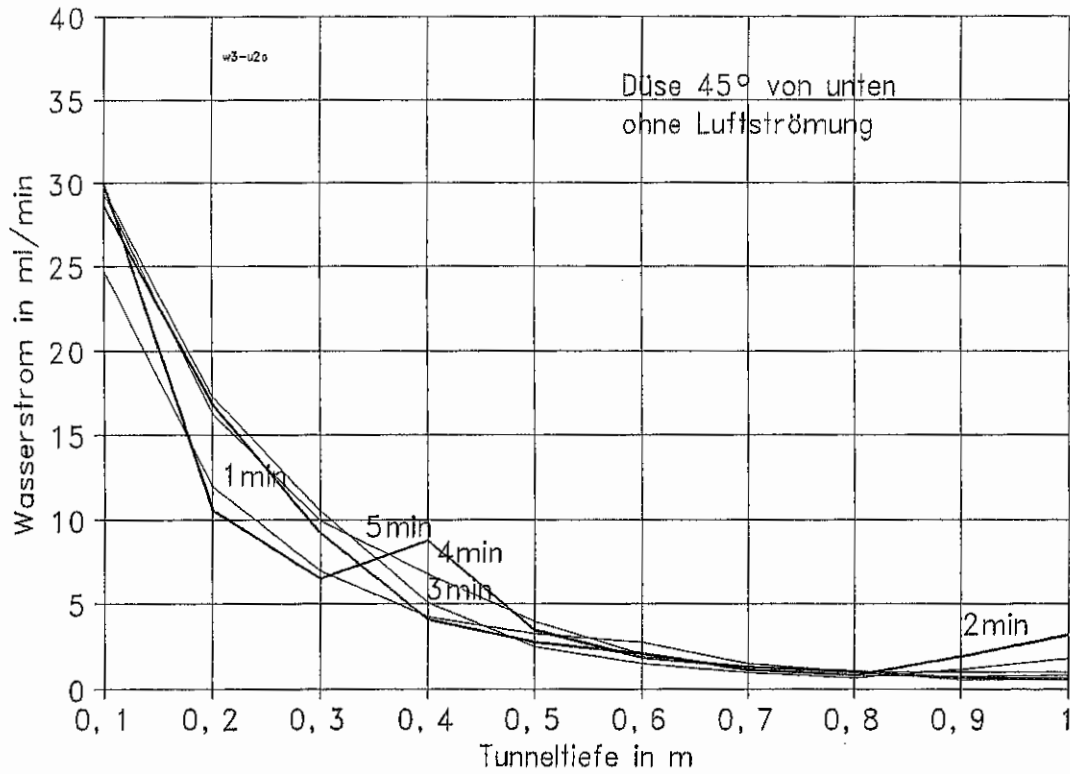


Abbildung 5.2.3.2.13: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse unten im Winkel von 45° zur Kanalöffnung gerichtet

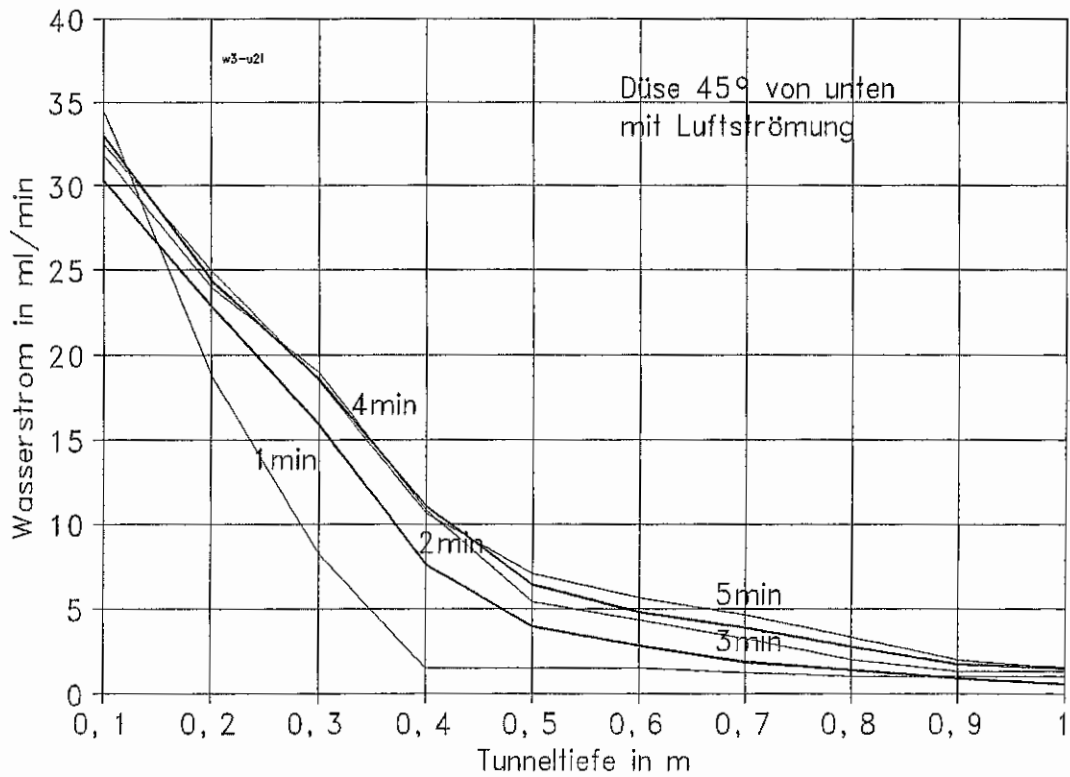


Abbildung 5.2.3.2.14: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse unten im Winkel von 45° zur Kanalöffnung gerichtet,
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

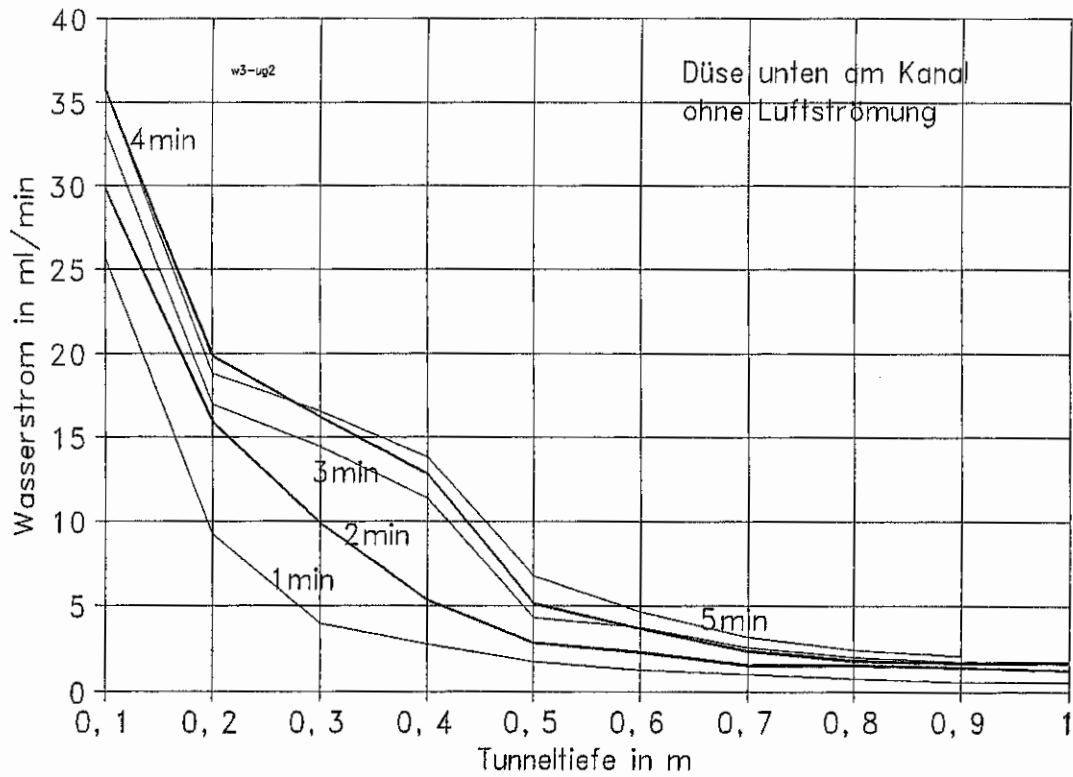


Abbildung 5.2.3.2.15: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse unten an der Kanalöffnung senkrecht nach oben gerichtet

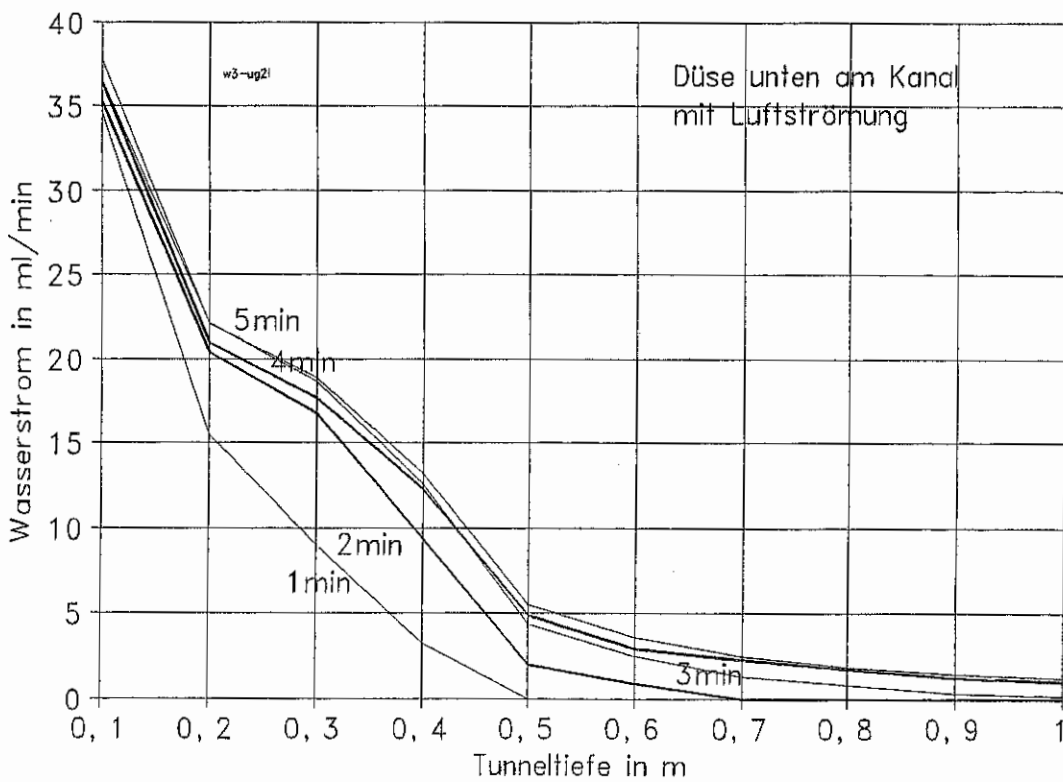


Abbildung 5.2.3.2.16: Wasserbeaufschlagung bei einem Düsenabstand von 30 cm
Düse unten an der Kanalöffnung senkrecht nach oben gerichtet
Luftströmung im Kanal max. 6m/s

Anhang 2 Ergebnisse der GC-MS-Analysen

Erläuterungen zu den Tabellen:

Die Zeichen für die qualitative Analyse unter den jeweiligen Spalten für Thermoplaste charakterisieren:

- 1. Spalte Probenahme in 4 cm Höhe
- 2. Spalte Probenahme in 10 cm Höhe
- 3. Spalte Probenahme in 20 cm Höhe
- 4. Spalte Probenahme in 30 cm Höhe
- 5. Spalte Probenahme in 4 cm Höhe bei gelöschtem Objekt

- ♦ Erkennungswahrscheinlichkeit von 500 bis 550
- ♥ Erkennungswahrscheinlichkeit von 550 bis 650
- ♠ Erkennungswahrscheinlichkeit von 650 bis 700
- ♣ Erkennungswahrscheinlichkeit von 700 bis 800
- + Erkennungswahrscheinlichkeit > 800

Substanzen mit der geringsten Erkennungswahrscheinlichkeit wurden nur aufgenommen, wenn sie mehrfach vorgeschlagen wurden.

Tabelle 5.3.4.1:

Rauchgasanalyse von Plasten (Alkane, Alkene und Alkine)

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
1,2-Dichlorethan		◆,+			
1-Chlor-3-methylbutan		,, , ,▲			
1-Brom-3-methylbutan	▲,				
Chlorbuten				+	
1-Chlor-2-methylpropan		,, , ,+			
1-Chlorpentan	,♣	,, , ,♣			
2-Brompentan	,♣				
1-Chloroctan		,▲,			
3-Chloroctan		,, , ,♣	,, , ,♣		
1-Bromoctan				,, , ,♣	
1-Chlononan			,▲,		
1-Chlordecan	, ,▲,	,▲,▲,			
1-Chlordodekan	,◆		,▲,		
1-Chlortetradecan					,, , ,♣
1-Chlorhexadecan	,◆				,, , ,♣
Butan		,, , ,▲			
Pentan	,+	,, , ,▲			
2-Methylpentan,	▲,				
2,2,4-Trimethylpentan	,♣				
2,2,3,4 Tetramethylpentan	,▲, , ,♣				
Hexan		♣,			,, , ,▲
2,4-Dimethylhexan	+				
2,2,4-Trimethylhexan	,♣	, ,▲,			
2,2,5-Trimethylhexan	,♣				
3-Ethyl-2-methyl-hexan	♣,				
Heptan	▲,	◆,+ , ,◆,	,, , ,▲,		
3,3,5-Trimethylheptan	,♣	, ,+ ,			
3-Ethyl-3-methylheptan	,+	,+			
Octan		+,+ , ,+,+			+
2,3-Dimethyloctan	◆, , ,+				
3,3-Dimethyloctan	,♣	,▲, ,+ ,		, ,+ ,	
2,3,6-Trimethyloctan	,♣	,+,+ ,		,+ ,	
2,4,6-Trimethyloctan	,▲,▲,+	◆, + ,		,+ ,+ ,	
2,6,6-Trimethyloctan		♣,+,+,+ ,		, ,+ ,	
3,3,5-Trimethyldecan		♣,			
2,7,7-Trimethyldecan		♣, , ,+ ,			
6-Ethyl-2-methyloctan			,, , ,+ ,		
Nonan	+,▲,♣,▲,	+,▲,▲,+,+ ,	,, , ,+ ,		+
2-Methylnonan		,, , ,♣			
4-Methyl-5-propylnonan	,▲				
2,2-Dimethylnonan			,, , ,+ ,		

noch Tabelle 5.3.4.1

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
Decan	+, ♣, ♣, ♣, ♣	, , ♣, ♣, +	♣, , , , +	, , , , +	+
4-Methyldecan	, ♣				
3,3,6-Trimethyldecan	+	♣, , , +		, , +	
Undecan	+, ♣, ♣, ♣, ♣, ♦	, , ♣, ♣, +	♣, , , , +		+
3,3-Dimethylundecan		♣,	, , , , +		
3,8-Dimethylundecan	+				
4,6-Dimethylundecan	+	, , , +			
5,6-Dimethylundecan		, , , , ♣			
2,4,6,8-Tetramethylundecan	♣,				
Dodecan	+, -, ♣, -, ♦	, , , ♣, +	♣, , , , +	, , , , +	+
4,6-Dimethyldodecan	+			, +	
Tridecan	, ♦	, +, , ♣, +	♣	, , , , +	+
Tetradecan	, ♦	, , , , +		, , , , +	
Pentadecan	, ♦			, , , , +	
1-Buten			♣		
3-Methyl-1-buten	♥,	, , , , ♣		, +, +	, ♣, , , ♣
2-Penten	+				, , , , ♣
2-Methyl-1-penten	+, , , , ♣				, +
3-Ethyl-4-methylpenten	-, +				
Hexen					, , , , ♣
3,4-Dimethyl-1-hexen				, +	
3-Methyl-1-hepten		+, , , , +			
5-Methyl-1-hepten	+, +	+, +, +, +	, +, +, +	, +, +, +	
2,4-Dimethyl-1-hepten	+	+, +, +, +	, , +		
1-Octen		+, , +		, , +	
3,7-Dimethylocten	-, ♣,			, , , +	
3,7-Dimethyl-1-octen		+, , +			
1-Nonen			, , ♣		
3-Methyl-4-nonen	♣,				
5-Ethyl-1-nonen	+, -, -, -, ♣	, +, +			
2,3,3-Trimethylnonen	, ♣				
2,4,6-Trimethyl-1-nonen		, , , , ♣			

noch **Tabelle 5.3.4.1**

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
1-Decen		, , , , ♣			
2-Methyl-1-decen	, ♣				
8-Methyl-1-decen	+,	+, +, , +			
2,4-Dimethyldecen	♣	, +, +, +,		, +, , +,	
3,4-Dimethyldecen	, ♣				
2-Methyl-1-undecen	, ♣	♣,			
5-Methylenundecen	, ♣	, , , , ♣		, ♣, , ♣,	
5-Methyl-2-undecen	, ♣				
4-Methyl-5-undecen			, , +,		
8-Methylen-1-undecen	, ♣				
8-Methylen-2-undecen	, ♣			, , +, +,	
2-Dodecen			, , ♣, ♣		
8-Methyldodecen			, , , +,		
3,7,11,15-Tetramethyl-2-hexadecen	, ♣				

noch **Tabelle 5.3.4.1**

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
1,2-Butadien		+			+,+
1,3-Butadien		♣,		+	+,+
2-Methylbutadien (1.3)					, ♣,
2,3-Dimethyl-1,3-butadien,	+, -, -, +				
1,2-Pentadien		, , , , ♥			, +,
1,3-Pentadien		, , , , ♥			, , , , ♥
2-Methyl-1,3-pentadien,	+, -, -, +				, , , , ♥
2-Methyl-1,2-pentadien,	+				
3-Methyl-1,3-pentadien	-, -, -, +				
4-Methyl-1,3-pentadien	-, -, -, +				
1,3-Hexadien	+, -, -, +				
3-Ethylhexadien					, , , , ♣
2-Methyl-1,5-heptadien					, , , , ♣
2,2,5-Trimethyl-1,6-heptadien	♠,	, , ♠,			
3,3,6-Trimethyl-1,4-heptadiene		, , ♥			
2,7-Dimethyl-3,5-octadien	, ♦	, , ♠,			
1,4-Octadien					, , , , ♣
1,3-Nonadien		, , , , ♣			
4,8-Dimethyl-1,7-nonadien		, , ♥, ♥,			
1,3-Decadien		, , , , ♣			
1,3-Dodecadien		, , , , ♣			
[4.2.2]Propella-2,4,7,9-tetraen				+, +, , , +	+
1-Butin		+			+, +,
2-Methyl-1-buten-3-in,		, , +,	, , , +,		, +,
1,5-Hexadien-3-in			♠, , +,		, +, +, +, +
1-Buten-3-in		, ♥		+	+
1-Pentin		, , , , ♥			, +,
3-Penten-1-in		+, +,	+, +, +, +	+	+, +, +, , +
1-Penten-3-in		+, ♠,	+, +, +, +	+, +,	+, +, +, , +
3-Hexin	, +				
Hexen-4-in					, +,
2-Methyl-2-hexen-4-in				, +,	
2-Methyl-1-hexen-3-in				, +,	
1-Hepten-3-in				, +,	
1,3-Butadiin			♣	+	
1,5-Hexadiin		♠, ♠, ♠,	+, +, +,	, +, +,	, , +, +,
1,5-Hexadien-3-in			, , , ♠,	, +,	, , +, +,
1,7-Octadiin					, ♠,
1-Octin	, ♠				
1,3,7-Octatrien-5-in	, +	+		, , , ♠,	, ♠
1,7,13-Tetradecatriin					, ♠
7-Tetradecin	, ♠				
Trans/Cis-3-Undecen-1,5-diin			, , , ♠, +		

Tabelle 5.3.4.2:

Rauchgasanalyse von Plasten (Aromaten)

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
Benzol	+,+,+,+,♠	+,+,+,+,+	♠,♠, , ,+	+,+,+,+,+	, ♠,+,+,+
Toluol	+, -, +, +,	+,+,+,+,+	+,+,+,+,+	+,+,+,+,+	+,+,+,+,+
Ethylbenzol	♣, -, -, +, ♠	♠, , +, +, ♠	, , +, , +	+,+,+,+,+	♣, , +, +,
Butylbenzol					, , , ♠
Cyclopropylbenzol	, +		, , , , ♠	, +, , +,	, +,
3-Methylcyclopentylbenzol					♠, ♠,
Xylol	+,+,+,+,♠	♠,+,+,+,♠	,+,+,+,+	+,+,+,+,+	,+,+,+,.
1,3,5-Trimethylbenzol	♠, , ♠	, , ♠,			+,+,+,+,+
1-Methylethylbenzol	♠, , ♠	, , ♠		+,	+, ,+,+,+
1-Ethyl-4-methylbenzol	♠, , ♠	, , , ♠			+, ,+, ,+
Styrol	+,♣,-,+,♠	+,+,+,+,+	♠,♠,♠,♠,+,	,+,+,+,+,+	+, , ,+,+
α.-Methylstyrol			+,♣,,♠,♠	+,+,+,+,+	,+,+,+,+,+
1-Ethenyl-2-methylbenzol	, ♦	♥,♠,♠,♠	♣,+,+,+,+	+,+,+,+,+	+,+,+,+,+
1-Ethenyl-3-methylbenzol	, ♦	♥,♠,♠,	♣,♣,♣,+,+	+,+,+,+,+	+,+,+,+,+,+
1-Ethenyl-4-methylbenzol	, ♦	♥,♠,♠, , ♠	♣,+,+,+,+	+,+,+,+,+	+,+,+,+,+,+
1,3-Diethenylbenzol			♣,+,+,+,+	+,+, , +, +,	,+, ,+,
1-Propenylbenzol	+,	+,♣	♠, , +, +, +	+,+, , +,	+, ,+, , +
2-Propenylbenzol	, ♦	, ♣,	♣, , +,	+,+, , +,	,+,+,+,,
1-Methylen-2-propenylbenzol		, , , ♠	+,		,+,+,,
1-Butenylbenzol					,+,
Methylencyclopropylbenzol			+,+,+, , +	+, , , +,	,+, ,+,+,
1-Methyl-2-cyclopropen-1-ylbenzol		, , ♠, ♠,	, , , ♠, +	+, , , +,	+, ,+,
1-Cyclobuten-1-yl-benzol			+,+, , , +	+, , , +,	, , +,+,+,
Phenylhepten					, ,+,
Phenylethin		♠, ,+, ,+, +	,+,+, , +	,+,+,+,+,+	, ,+,+,,
Phenylpropin	, ♥,	+, ♠,+,+,	, , +, , +	+,+ , , +,	,+,
Phenylbutin		♥,+,+, , ♠	, ♣, ,+,+	+,+,+,+,+,+	+, ,+,+,+
Methylpropinylbenzol				, , , , +,	
Propoxymethylbenzol	♥,♠,♠,	♥,♠,♣,	,+, , ♣, +	,+,	+,+,+,,
Butoxymethylbenzol	♥,♠,♠,	♥,♣,♠,	,♠, , ♠, +	+,	♣,+,

noch **Tabelle 5.3.4.2**

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
Naphthalin	+ , ♣ , -, + , ♣	♣ , + , + , + , +	♣ , + , + , + , +	+ , + , + , + , +	+ , + , + , + , +
Acenaphthen		+ , + , + , +	, , ♣ , + ,	, , , +	
Acenaphthylen		♣ , ♣ ,		+ , ♣ , ♣ , ♣ ,	, , , ♣ ,
2-Ethenyl-Naphthalin		+ ,			
Dihydroxynaphthalin				, , , ♣ ,	+ ,
1,4-Dihydro-1,4-ethenonaphthalin		+ ,	, , , +		
1,2,3,4-Tetrahydro-1,4-methylnaphthalin-9-on			+ ,	+ , , + ,	
Indan	, ♣	♥ , , ♣ , ♣ , ♣	, ♣ , ♣	, ♣ , + , +	+ , + , + ,
Acetoindan			, , ♣ ,		
Inden	, ♥	♣ , ♣ , + , + , +	♣ , + , + , + , +	+ , + , + , +	+ , + , + ,
1-Methyleninden	♣ , -, -, ♥ , ♣	♣ , + , ♣ , ♣ ,	, + , + , +	+ , , + , +	+ , + , + ,
3-Methyleninden		+ ,		, , , +	+ , , , +
1-Chlor-2,3-dihydro-1H-inden		+ , + , + ,			, , , +
1,1a,6,6a-Tetrahydrocycloprop[a]inden		, , ♣ , ♣ ,	+ , ♣ ,	+ ,	+ ,
Diphenylmethan		+ ,	, + , + ,		
Biphenylen		♣ , , + ,	, , ♣ , ♣ ,	, , + ,	, , , ♣ ,
Biphenyl		+ , , + ,		+ , + , +	, , , ♣ ,
4-Methyl-1,1'-biphenyl		♥ ,			

Tabelle 5.3.4.3:

Rauchgasanalyse von Plasten (Cycloverbindungen)

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
1,3-Dichlorcyclopentan					, , , , +
1-Methylethenyl-cyclopropan	+				
1-Hexyl-3-methylcyclopentan			, , , , +		
1-Ethyl-2-heptylcyclopropan			, , , , +	+	
1-Butyl-2-ethyl-cyclopropene		, , , ♣,			
Pentylcyclopropan				, , , , +	
1-Methyl-2-(3-methylpentyl)cyclopropan		, , , ♣, ♣	, , , ♣	♣, +, +, +,	
Octylcyclopropan			, , , +, +	, , k , +,	
Nonylcyclopropan			, , , , +		
Isopropylcyclobutan		♦,	, , , , +		
1,2-Diethylcyclobutan		+ , , , ♣		, , +,	
1,2-Diethenylcyclobutan					, ♣, , +, +
Diphenylcyclobutan				, , , , +	
2-Propenylidenecyclobuten			+ , +,	+ , +,	
Cyclopentan	+	, , , , +			
Methylcyclopentan,	+			, , , , +	
Ethylcyclopenten					, , , , +
Butylcyclopentan		, , , , ♣			
Pentylcyclopentan		, , , , ♣		, , , , +	
Cyclopenten					, , , , +
1,1-Dimethyl-cyclopentan		♦,			, , , , +
1,2,4-Trimethylcyclopentan	- , ♣,		, , +, +,	, +, +, +,	
1-Butyl-2-propyl-cyclopentan		♣,			
1,3-Dimethyl-2-(1-methylethenyl)cyclopentan		, , ♦,			, , , , ♣
1,2-Dibutylcyclopentan		♣,			
Cyclopentadien		+ , +, +, , ♣	+ , +, +, +,	+ , +,	+ , , ♣, , +
5-(1-Methylethyliden)-1,3-cyclopentadien					, , ♣
1-Ethenyl-2-methylencyclopenten	♣, , ♣				, , , +,
3[(Z)-1-Butenyl-4-vinylcyclopenten	♦,				
1,1,3,4-Tetramethylcyclopentan				, , , , +	
Cyclohexan	+	, , , , ♣			, , , , +
Methylcyclohexan,	♦,	, , , ♦,		, +, , , +	
4-Methylcyclohexen,					, , , , +
1,2,3-Trimethylcyclohexan				, , , , ♣	
Cyclohexadien	+	, , , , ♣	, , ♣,	♣,	♣, +, , , +

noch **Tabelle 5.3.4.3**

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
1,2,4-Tris(methylen)-cyclohexan		, , ♠,			, +,
1,1'-Pentylidenebis-cyclohexan		♥,			♠, ♠, ♠, ♠,
4-Ethenylcyclohexen		, , ♥,			, , +,
4-Ethenyl-1,4-dimethyl-cyclohexen		, , ♠, ♠,			
1-Methyl-5-(1-methylethynyl)-cyclohexan	♣,	, , ♠, ♠,			, , , , ♣
Methylencyclohexan					
Chlorcyclohexan	♠,				
Cycloheptan		, , , , ♣	, , +,		
Methylcycloheptan			, , , , ♣		
1,3,5-Cycloheptatrien		, , , , ♣	, +,		, , ♣, , +
Methycyclooctan		, , , , ♠		, , , , ♠	
3-Ethenylcycloocten		, , , , ♠			, +,
1,4-Dimethylcyclooctan	+	+, , +, , ♠	, , , +, +	, , , , ♠	
Cycloocten					, , , , ♠
Cyclooctadien					, , , , ♣,
1,3,5-Cyclooctatrien			, ♠		
1,3,5,7-Cyclooctatetraen	+, +, , ♣	+, +,	, ♠, , ♠	, +, +, +, +	♣, , , +,
Tetracyclononan					, +,
Cyclodecan			, ♠, , ♠		
Methylethyl-cycloundecan				, , , ♣, ,	
6-Cyclohexyldodecan		♥, , , , +			
Bicyclo[3.2.0]-hepta-2.6-dien	, +,	+,	+, ♣, +, , +	+, +,	, +, +,
Bicyclo [4.2.0]-octa-1,3,5-trien		, ♠,	, , +, ♣	, , +,	
D-Limonen	♠,	, , ♠			
Azulen	♠,	, , ♠,		, +, , +, +	+,

Tabelle 5.3.4.4:

Rauchgasanalyse von Plasten (Heteroverbindungen)

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
2-Methylfuran	-, ♦,	, , , , ♠	, , +, , +		
2,3-Dihydrofuran		, , , +, ♣	, , , +, ♣		
2,5-Dimethylfuran	, ♠	, , , , ♠,			
Benzofuran			♠, +, +, +,	, +, +, , +	+ , , , +,
2,5-diphenyl-tetrahydrofuran		♦,			
Tetrahydro-5-methyl-2-furanmethanol, trans		, , , , ♣			
2-Furancarboxaldehyd		, , , ♣,			
2-Furanmethanamin		♦,			
1,3-Hexahydroisobenzofurandion	♠,				
Tetrahydro-5-methyl-furfuryl-alcohol, cis-		, , , , ♣			
2,2-Dimethyl-5-phenyl-3(2H)-furanon		♥, , ♠			
3,4-Dihydro-4-methylpyran	, ♣			, , , , +	
6-Methyl-3(2H)-pyridazinon			, , , , +		
2,5-Dimethylpyridin					+,
1,2,5,6-Tetrahydro-1,2-dimethylpyridin	♠		, , , , +		
5-Ethynyl-2-pyridinecarbonsäure		♠, ♠			
3-Pyridinecarbonitril			, , , ♠		
5-Phenylpyridinjodid	, ♠			, ♠,	♠, ♠, ♠, ♠
2-Nitro-Pyridine		, , ♠	, , ♠, ♠, ♠	, ♠, ♠	, , ♠, ♠,
Cetylpyridiniumchlorid					, , , , ♠
Indol			♠, ♠		
6-Methylindol			+,	+, +,	+, +, +,
3-Methylindol			+,	+, +, , +,	
6-Methylindolizin					, ♠,
2,3-Dihydro-1H-Isoindol					, ♠,
N,N-Diethyl-indol-3-methanamin			+,		
1,1a,6,6a-Tetrahydrocycloprop[a]indene,					, +, , +,

noch **Tabelle 5.3.4.4**

Stoff	Poly-propylen	Poly-ethylen	Poly-styrol	PMMA	Kautschuk
Dimethylsulfon					, , ♣,
2-(Methylthio)-thiophen				, ♣,	
5-(1-Hydroxy-2-chloroethyl)-4-methylthiazol		♦, ♦,	, , ♣	♣,	♣, ♣, , , ♣
2-Hydroxy-4-methyl-5. beta. -chloro-ethylthiazol		♥, ♥,		, ♣,	, , , ♣,
5-(1-Hydroxy-2-chloroethyl)-4-methylthiazole			♣, ♣	, , , ♣, ♣	, , +,
o-[(.α.-tolyl)sulfonyl]-phenol,					, , +
Benzylsulfonylchlorid					+ , + , , +,
Benzylmethansulfonylchlorid					, , , , ♣
1,5-Pentandiamin				, , , , +	
o-Pentylhydroxylamin,	♣,				
N-Propylbenzamin					+,
4-(2-Phenylethyl)-benzenamin					, ♣,
N,N-Dimethylbenzamin					, ♣,
N-Heptyl-1-heptanamin			♣, +, +,		
p-Aminotoluol					+,
2'-(4,6-Diamino-s-triazin-2-yl)-formanilid					♣, , ♣,
2-Methyl-N-phenyl-2-propenamid		, ♣,	, , , , +		
2-Methyl-N-phenyl-2-propenamid		, , , , ♥	, +,		
Dichlorfluoracetonitril					, , , ♣,
Propennitril		♣,	♣,	+,	
2,4-Pentadiennitril				♣,	
Benzonitril			, , +, , +		, +, , , +
1,2-Benzoldicarbonitril		♣, ♦,	+ , + , + , + , +	+ , + , , + , +	+ , + , + , + , +
.α.-Ethyl-benzolacetonitril			, ♣,	♣, , , , +	
2-Hydroxy-2-methylpropanitril		, , , ♥, +			
Methylenpropanitril					, , , ♣
2-Butendinitril					, , , ♣
3-(Phenylamino)-propanenitril					♣,
1-Methyl-2-nitrosobenzol					♣, , ♣
1-Isocyanatoctan				♣,	
1-Isocyanatheptan				♣,	

noch **Tabelle 5.3.4.4**

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
2-Methylbenzylcyanid					♣, +
Cyclohexanoethinylcarbammat		, , , ♠			, +
Phenylmethoxyharnstoff					, , ♠
1H-Benzimidazol			♠		
2'-(4,6-Diamino-s-triazin-2-yl)-formanilid			, , , ♠	♠	
2-Phenyl-2H-tetrazol-5-carboxylsäure				♠	
Methylhydrazin		♠			
Salpetersäurenonylester	♣				
2-Azido-1-methyl-3-nitrobenzol					, ♠, , ♠
1-Methyl-2-nitrosobenzol					, , , ♠, ♠
1,4-Dimethyl-2-nitrobenzol					, , , , ♠
2-Nitro-1-propenylbenzol					, , , , ♠
2-Methylbutyl-oxiran				, , , , ♠	
Decyloxiran		, , , , ♠			
Isochinolin				+	
Pyrrol					, , , , +
1-Methyl-1H-Pyrrol		, , ♥	♣, , , , +		
1,2 Dimethylpyrrolin	, ♠				
Pyrrolidin		, , ♠			
1,2,4-Trimethylpiperazin		♣			
Trifluoroacetyl-3,7-dimethyloctanol		, ♠, +, +			
Schwefeldioxid					♠, +

Tabelle 5.3.4.5:

Rauchgasanalyse von Plasten (Oxidationsprodukte)

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
1,2-Chlor-2-decen-1-ol	,♦		,, ,▲		
Trifluoroacetyl-3,7-dimethyloctanol		+	,, ,▲	,▲, ,▲	
Trifluoressigsäureoctylester				♣,	
Chlormethyloctylether		,, , ,▲			
2-Propensäure-2-chloroethylester				,, ,▲	
2-Methylpentanol				,, , ,▲	
2-Ethyl-1-pentanol,	♣,				
2-Ethyl-3-methylpentanol (1)				,, , ,▲	
2-Methyl-4-penten-1-ol,		,, , ,♥			,, , ,+
5-(2-Propinyloxy)-2-pentanol,				,, , ,▲	
5-Methyl-1-hexanol		+, ,+		,, , ,♣,	
1-Heptanol			,, ,▲	,♣,	,, , ,▲
2-Hexen-1-ol			,, , ,+		
5-Methyl-1-heptanol				+,	
Hepten-2-ol			,, , ,+		
Dimethyl-1-Octanol	+	+,♥,+,+	,, ,+,+	+,+, ,+	,, ,+,+
1-Methylcyclooctanol		,▲			
2-Butyl-1-octanol	♦, ,▲				
2-Hexyl-1-octanol	,▲				
1-Nonanol			,, ,▲	,, , ,▲	▲,
4,8-Dimethyl-1-nonanol		,, ,		,, ,▲,	
2-Tetradecyloxyethanol		▲,			
3-Nonen-2-ol,		,, , ,▲,	,, , ,+		
1-Decanol		,, , ,▲		,♣,	
Undecanol				,, , ,▲	
10-Undecyn-1-ol					,, , ,▲
1-Dodecanol		,, , ,▲			
Tridecanol		,, , ,♣,			
Benzylbutanol					,, , ,♣
Benzylpentanol					,, , ,♣
Phenol	,,♦	, ,▲,▲,	▲,+,	,▲	
1-Cyclobutylethanol		,, , ,♣			
2,4,6-Trimethylcyclohexylmethanol		,▲, ,▲,			
4-Ethylcyclohexanol		,, , ,♣			
2,4,6-Trimethylcyclohexylethanol	▲,				
Bicyclo[3.3.1]hept-2-en-2-ethanol	,▲				
Bicyclo[3.3.1]nonan-9-ol					,+,

noch **Tabelle 5.3.4.5**

Stoff	Poly-propylen	Poly-ethylen	Poly-styrol	PMMA	Kautschuk
Aceton	♣,	, , , ♠, +		♣,	, , , , ♠
2-Methyl-1-propen-1-on,	♠,				
2-Methoxy-1-phenyl-ethanon			, ♠		
Butanon					, , , , ♠
Methylisobutylketon	, ♠	, ♠			
3-Methyl-2-butanon,	♠,				
2-Methyl-3-pentanon		, ♠			
3-Penten-2-on	♣,				
2-Hexanon		, ♥, ♠, ♠,			
5-Methyl-2-hexanon		, ♠,			
5-Methyl-1-phenyl-1-hexanon				+,	
Dimethylhexanon			, , , +, +	, , , , +	
2-Heptanon	♠,	, , ♠, ♥,			
4-Methoxy-2-cyclopenten-1-on		♦,	, , , +		
2-Methyl-2-cyclopenten-1-on		, ♠,			
3-Methyl-2-cyclopenten-1-on,	+,				
2-Ethyl-2-propylcyclohexanon			, , ♠,		
4-Methyl-2-heptanon	, ♣				
Bicyclo[4.4.1]undeca-1,3,5,7,9-pentaen-11-on				+, +,	, , ♠, ♠

noch **Tabelle 5.3.4.5**

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
Formaldehyd		, , , ♣, +	♣,		
Propenal				♣,	+
2-Methyl- 2-propenal,	+,		, , , ♣,		
Butanal			, , , , +		
2-Butenal	♣,	, , , , ♣	, , , , ♣		
Pentanal			, , , , ♣		
Hexanal			, , , , ♣	, , , , ♣	
2-Methylpentanal,		, , , , ♣			
3,7-Dimethyl-2,6-Octadienal	♦, ♦,	, , , ♦,			
2-Decenal,		, , , , ♣	, , , , +		
2-Undecenal		, , , , ♣			
Trans-2-tridecenal		, , , , ♣			
Benzaldehyd	♣, ♣, , ♦, ♣	+, +, +, ♣, +	, ♣, ♣, +, +	+, +, +, +, +	+, +, +, , +
Acetophenon		, , , ♥,	, ♣, ♣, , +	, , , , +	
Dimethylether		♣, , ♣,			
Ethenyloxy-isooctan	♣,				
Ameisensäureoctylester				, , , , +	
3,7-Dimethyl-6-octen-1-olformiat		, ♣, , ♣,			
Essigsäure	♣,	, ♣,			
Essigsäurehexylester				, , , , +	
Essigsäureoctylester			, , ♣,	+, +,	
Essigsäurenonylester		, , , ♣,			
Essigsäuredecylester			, , ♣,		
Essigsäurecyclohexylester		♣,			, , , , +
Essigsäurephenylpropylester					, ♣, , , +
2-Propensäuremethylester				♣, +, +, +,	+, +, +, +
2-Propensäureoctylester		♥, , , , ♣			
2-Propensäurenonylester				, , , , +	
Ppropansäure-3-hexenylester					, ♣, , , +
2-Methyl-2-propensäure-1-methylpropyl ester				+,	
2-Methyl-2-propensäure-1-hydroxypropylpropyl ester				+,	+, , ♣,
2-Methyl-2-propensäure-1-methyl ester				+, +, +,	

noch **Tabelle 5.3.4.5**

Stoff	Polypropylen	Polyethylen	Polystyrol	PMMA	Kautschuk
Butansäureethylester		, , ♣,			
Butansäurepentylester		, , ♣,			
Butensäuremethylester				+,	, , , , +
2-Methenbutansäuremethylester				, , , , +	
Decylisobutyrat			, , , ♣,		
beta.-Phenylethylbutyrat			, , , ♣,		
Phenylbutandisäure					, +, , , +
2-Methenbutansäuremethylester				+, +,	
2-Pentensäuremethylester				♣,	
2-Pentensäureethylester				, ♣,	
Hexansäurephenylethylester			, , , , ♣		
5-Hydroxy-3,3,4-trimethylhexensäure	, ♣				
5-Hexinsäure				+,	
Octansäureethylester	+, -, ♣,				
Octansäurephenylethylester			, , , , ♣		
1,1-dimethylethyl)-cyclohexancarboxylsäure		♦,	, +,	, , , , ♣	♣
1-(1,1-Dimethylethyl)-cyclohexanecarbonsäure			♣, +, +,	+,	, , ♣, ♣,
4-Phenylvaleriansäure	♥,				
2-Carboxybenzoesäure			, , ♣, +,		
Di-2-benzylmaleinsäure			♣, ♣, ♣, ♣, +	♣, +,	♣, +, +,
2-Carboxybenzylessigsäure					♣,
2,2-Dimethyl-1-propanolcarbonat				, , , ♣	
Ethylenoxid		, , , ♣,	♣,		
Cis/Trans-3,4-epoxyoctan				+, , , , +	
1,2-Epoxyundecan		, , , , ♣			
5-Methoxy-4-methyl-1-hepten		, , , , ♣			