

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

DSD – Brandschutz und Brandbekämpfung
in Wertstofflagern

Teil 2: Zündung von Sprayflaschen, Selbst-
entzündung von Agglomerat aus der
Mischfraktion, Brandentwicklung und
Brandbekämpfung

123,1

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und zivile Verteidigung des Arbeitskreises V der
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

Forschungsbericht Nr. 123/1

DSD – Brandschutz und Brandbekämpfung in Wertstofflagern

Teil 2: Zündung von Sprayflaschen, Selbstentzündung von
Agglomerat aus der Mischfraktion,
Brandentwicklung und Brandbekämpfung

von
Dr. rer. nat. Georg Pleß
Dipl.-Chem. Ursula Seliger

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge
Februar 2001

FA-Nr. 27(1/99)H

ISSN 0170-0060

INSTITUTS-BERICHT NR. 389

BERICHTS-KENNBLETT

1. BERICHTSNUMMER

389

2. TITEL DES BERICHTES (KURZ)

Brandschutz und Brandbekämpfung in
Wertstofflagern

3. AUTOR(EN)

Brandoberrat Dr. Georg Pleß
Dipl.-Chem. Ursula Seliger

4. DURCHFÜHRENDE INSTITUTION (NAME/ANSCHRIFT)

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

5. FÖRDERNDE INSTITUTION/AUFTRAGGEBER (NAME/ANSCHRIFT)

Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung des
Arbeitskreises V der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

6. ABSCHLUßDATUM

30.05.00

7. FÖRDER-/ AUFTRAGS-NR.

IMK 27(1/99)H

8. SEITENZAHL

142

9. ABBILDUNGEN

140

10. TABELLEN/DIAGRAMME

6

11. LITERATURANGABEN

32

12. KURZFASSUNG

Die Gefahren bei der Aufbereitung von Sprayflaschen als Wertstoff des DSD werden untersucht. Es wird deutlich, dass auch leere Flaschen brennbare Gase enthalten, die für die Aufbereitungstechnologien Gefahren darstellen und bei der Brandbekämpfung beachtet werden müssen. Die im Rahmen der Verarbeitung von Kunststoffmischfraktionen anfallenden Agglomerate werden auf ihre Neigung zur Selbstentzündung untersucht. Die Ursachen der Selbstentzündung wurden eingegrenzt sowie Grenzwerte zur Verhinderung derselben empfohlen. Auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen werden die Anwendung von Tensiden als Netzwasser für die Brandbekämpfung und die Wirkung von Wasser als Löschmittel bei DSD – Materialien untersucht. Für die typischen Produkte in DSD – Betrieben werden taktische Empfehlungen für die Brandbekämpfung gegeben.

13. SCHLAGWÖRTER

DSD, Sprayflaschen, Agglomerat, Kunststoff, Brandbekämpfung, Selbstentzündung, Tenside, Kontaktwinkel, Tropfengrößen, Benetzung, verdeckter Brand

14. VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

07.02.01

Inhaltsverzeichnis:

1. Ausgangssituation	5
2. Sprayflaschen	6
2.1. Inhaltsstoffe	6
2.2. Brand- und Explosionsgefahren	6
2.3. Eigenschaften der Treibgase	9
2.4. Füllmengen in Sprayflaschen	12
2.4.1. Voraussetzungen	12
2.4.2. Versuche mit leeren Sprayflaschen	12
2.4.3. Versuche mit vollen Sprayflaschen	20
2.5. Schlussfolgerungen zur Verarbeitung von Sprayflaschen im Rahmen des DSD ...	25
3. Verarbeitung von DSD – Materialien	27
3.1. Stand der Technik	27
3.2. Agglomerate	28
3.2.1. Selbstentzündung von Agglomeraten	28
3.2.2. Warmlagerungsversuche	29
3.2.3. Adiabatisches Kalorimeter	32
3.2.4. Klärung der Ursachen für die Selbstentzündung	33
3.2.5. Schlußfolgerungen zur Selbstentzündung von Agglomeraten	34
4. Dreidimensionale Brandobjekte und Oberflächenlöschmittel	35
4.1. Brandentwicklung und Brandausbreitung	35
4.2. Abbrandraten	39
4.3. Benetzen von Oberflächen	40
4.3.1. Tropfengröße und Oberflächenspannung	43
4.3.2. Benetzen der Brandstoffoberflächen	44
4.4. Taktische Maßnahmen für das Oberflächenlöschen	48
4.4.1. Schwerpunkte in DSD- und weiterverarbeitenden Betrieben	48
4.4.2. Schüttgüter	48
4.4.3. Ballenlager	49
4.4.4. Agglomerate in Schüttgutbunkern	51
5. Literatur	53
Anlage 1	55
Anlage 2	73
Anlage 3	84
Anlage 4	118
Anlage 5	126

Die vorliegende Arbeit wurde im Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt durch ein Reihe von Mitarbeitern unterstützt, denen an dieser Stelle für ihre geleistete Arbeit gedankt werden soll. Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dipl.-Phys. F. Wienecke für seine Unterstützung bei der Erstellung der Messtechnik und der Thermobildaufnahmen. Herrn Dipl.-Phys. S. Wussow wird für die Arbeit mit der Hochgeschwindigkeitskamera gedankt.

Besonderer Dank gelten Frau K. Sakowski für die Durchführung der Laborarbeiten zur Selbstentzündung und für die Aufbereitung und Digitalisierung der Videoaufnahmen, sowie Frau C. Semken für die Untersuchungen am Kontaktwinkelmessgerät und der Mitarbeit bei Brandversuchen.

Für die technische Vorbereitung der Versuchsanlagen danken die Autoren den Herren W. Hartmann und E. Kulawik.

1. Ausgangssituation

Die vorliegende Studie „Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen - Konzepte für Wertstoff-Zwischenlager des Dualen Systems Deutschland (DSD) und für Reifenlager aus der Sicht der mobilen Brandbekämpfung und Ableitung von Löschrstrategien“ [Pleß, Seliger 1995] zeigt die Schwerpunkte für das Entstehen von Bränden im technologischen Verarbeitungsprozess der in den gelben Säcken gesammelten Wertstoffe auf.

Entsprechend der Studie entwickeln sich Brände in gesammelten, sortierten und aufbereiteten Wertstoffen insbesondere

- im Anlieferungsbereich der gelben Säcke durch Radlader oder andere Fördergeräte, die Sprayflaschen zerquetschen können. Die freigesetzten Gase werden nachfolgend gezündet.
- im Bereich der Ballenpressen beim Verpressen von Sprayflaschen. Auch hier werden Gase aus Sprayflaschen nachträglich gezündet.
- bei der Lagerung von Kunststoffagglomeraten, die durch mechanisches Aufbereiten von verschiedenen Mischkunststoffen entstehen.

Für diese Brandentstehungsursachen wurden Untersuchungen durchgeführt. Es wurden sowohl die Entwicklung der Brände als auch die Möglichkeit der weiteren Brandausbreitung untersucht.

Die sortierten und für die weitere Verarbeitung aufbereiteten Wertstoffe werden in Zwischenlagern aufbewahrt, die grundsätzlich als Blocklager ausgeführt sind. Kompakte Ballen mit möglichst hoher Dichte und Lagerhöhen der Ballen bis zu 4 m führen zu hohen Konzentrationen brennbarer Materialien auf geringer Lagerfläche. Es werden Brandlasten bis zu 10 GJ/m² erreicht. Bedingt durch die Beschickungstechnologie entstehen bei der Lagerung der gepressten Wertstoffe in Blocklagern Spalte zwischen den Einzelstapeln mit einer Breite von ca. 10 cm.

Gegenwärtig sind bei Lagern von Wertstoffen aus Kunststoffen in Gebäuden Brandabschnitte bis 5000 m² zulässig, wobei Brandabschnitte > 1600 m² (bzw. > 2000 m²) [Richtlinie VKE 1994], [Richtlinie ARGEBAU 1995], [VdS-Richtlinie 1996] mit stationären Löschanlagen und z. T. auch mit Rauch- und Wärmeabzugsanlagen ausgerüstet sein müssen. Für Brandabschnitte zwischen 800 m² und 1600 m² werden Brandmeldeanlagen und/oder Rauch- und Wärmeabzugsanlagen gefordert. Die Brandabschnitte sind in Lagerabschnitte einzuteilen, die eine Fläche von maximal 300 m² erreichen dürfen.

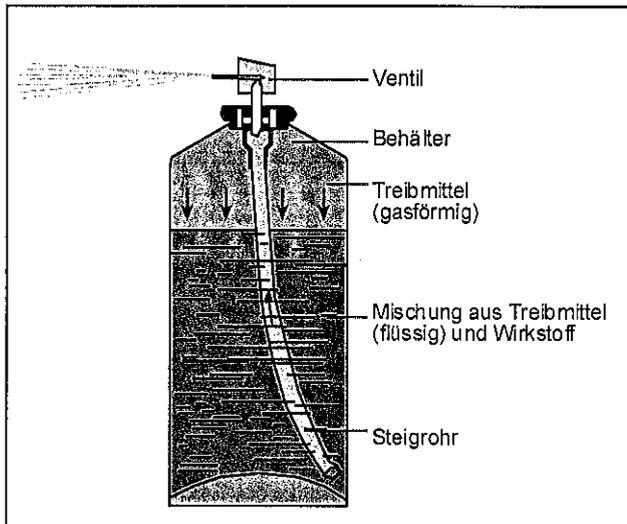
Bei der Lagerung im Freien werden die Brandabschnitte auf 2000 m² begrenzt, gleichzeitig ist eine Vergrößerung der Lagerabschnitte bis auf 400 m² zulässig.

Lager mit brennbaren Wertstoffen des DSD stellen durch die hohen Brandlasten und durch ihre Lagerform als Blocklager erhebliche Anforderungen an eine effiziente Brandbekämpfung. Zur Brandbekämpfung in Lagerbereichen des DSD und zur Wechselwirkung des Löschmittels mit dem brennbaren Stoff wurden Untersuchungen durchgeführt. Die Entwicklung von Bränden in senkrechten Spalten nach der Zündung mit einer offenen Flamme wurde experimentell an Hand eines einfachen Versuchsmodells nachgestellt. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für Simulationsrechnungen zur Brandentwicklung, die in einem gesonderten Berichtsteil [Kutz 2001] veröffentlicht werden. Die Wirkung unterschiedlicher Zusätze im Löschmittel Wasser beim Benetzen von Brandstoffoberflächen durch Tropfen und die weitere Ausbreitung des Löschwassers auf waagerechten und senkrechten Flächen des Brandstoffes wurden ebenfalls untersucht.

2. Sprayflaschen

2.1. Inhaltsstoffe

In Sprayflaschen werden heute eine unüberschaubare Palette von Körperpflegemitteln, Kosmetika, Düften, Reinigungsmitteln, Farben und Lacken, Pflegemitteln für Bekleidung und technischen Erzeugnissen, schäumenden Kunststoffen, Lebensmitteln u.a. angeboten.



Die Nutzung des Sprayflaschenprinzips (Abbildung 1 [RÖMPP 1995]) garantiert in der Mehrzahl aller Anwendungen eine feine Verteilung der meist flüssigen Inhaltsstoffe in der Luft nach dem Austritt aus einer Zerstäuberdüse. Das Ziel ist dabei entweder bereits die Verteilung in der Luft oder das gleichmäßige Aufbringen der Inhaltsstoffe auf Oberflächen fester Stoffe. In einigen Fällen werden nach dem Austreten aus einer Düse Schäume erzeugt, deren Funktion unterschiedlich ist. In jedem Fall wird für die Zerstäubung bzw. Schaumerzeugung Energie benötigt, die durch ein meist gasförmiges Treibmittel geliefert wird.

Abbildung 1: Schema einer Spraydose

Infolge des weltweiten Verbotes von unbrennbaren Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) im [Montrealer Protokoll 1987] mussten Alternativen für Treibgase in Sprayflaschen gefunden werden. Der heutige Stand zeigt drei wesentliche Trends des Einsatzes von Treibgasen in Sprayflaschen:

- Die Mehrzahl aller Sprayflaschen enthalten heute als Treibgas ein brennbares Gasgemisch aus Propan und Butan.
- Bei einer deutlich geringeren Anzahl von Sprayflaschen wird mit Pumpsystemen gearbeitet, bei denen für den Gebrauch Außenluft in die Sprayflasche gepumpt werden muss. Diese Systeme können eine gleichmäßige Verteilung des Sprays über einen längeren Zeitraum nicht gewährleisten.
- Für spezielle Anwendungen werden besondere Treibgase genutzt, wie z. B. Stickstoffdioxid für die Verschäumung von Sahne oder Kohlendioxid für die Erzeugung von Bierschaum.

2.2. Brand- und Explosionsgefahren

Aus der Sicht des Brandschutzes sind die brennbaren Treibgase eine nicht zu unterschätzende Gefahr. Das betrifft

- die Gefahr des Ausbildens brennbarer und explosibler Gas-Luftgemische bei Zerstörung der Sprayflasche,
- das schlagartige Freisetzen einer hohen Energie während des Abbrandes der Gase und
- die zusätzliche Energielieferung durch brennbare flüssige Inhaltsstoffe.

Im Fall einer Freisetzung von Aerosol während des normalen Gebrauchs ist die Gefahr der Zündung praktisch gering. Damit sich ein Brand entwickeln kann, ist eine Pilotflamme von der Größe eines Feuerzeugs erforderlich. Nach [Bern, Malmquist 1989] ist bei einem Heizwert der Flüssigkeit unter 10 MJ/kg nicht mit der Entwicklung eines Flammenbrandes zu rechnen. Da eine Vielzahl von Sprays einen höheren Heizwert haben, wird an späterer Stelle gezeigt, dass deren Zündung mit einer Flamme möglich war.

Die Brand- und Explosionsgefahren sind bei gefüllten Sprayflaschen als maximal anzusetzen, mit zunehmendem Entleeren wird die vorhandene Masse an brennbaren Stoffen geringer. In der Regel verbleiben aber in vermeintlich entleerten Sprayflaschen noch Reste von brennbaren Treibgasen, die bei Zerstörung freigesetzt werden können.

Eine Zerstörung von Sprayflaschen ist denkbar durch mechanische Krafteinwirkung auf die in der Regel dünnwandigen Behälter aus Aluminium oder Weißblech. In gleicher Weise können auch höhere Temperaturen zu einer Zerstörung der Sprayflaschen führen. Hersteller von Sprayflaschen, die brennbare Treibgase enthalten, geben eine Grenztemperatur von 55°C an, auf welche die Sprayflaschen maximal erhitzt werden dürfen. Bei dieser Temperatur kann der sich infolge der Erwärmung der Treibgase aufbauende Innendruck durch die Sprayflaschen noch problemlos gehalten werden, ohne dass wesentliche Leckverluste oder eine Zerstörung des Behälters eintreten. [Montfort, Johnson 1964] berechneten die Konzentrationen von Treibgas in Lagern bei normalem Luftaustausch mit der Annahme, dass die Ausströmrates bei Spraydosen unter normalen Lagerbedingungen 1g pro Tag beträgt. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass es unbedingt erforderlich ist, die Lager ausreichend zu belüften. Tatsächlich gemessene Leckraten von [Motz, Fischer 1983] an Sprayflaschen mit 150 ml und 350 ml Fassungsvermögen bei unterschiedlicher Temperaturbelastung ergaben z. B. bei 50°C je Flasche bereits 12 mg/d. Somit wird die angenommene Rate von [Montfort, Johnson 1964] bereits mit ca. 80 Sprayflaschen erreicht, wenn die Raumtemperatur 50°C beträgt. Bei einer Raumtemperatur von 30°C wird mit Ausströmrates von 2 bis 4 mg/d je Sprayflasche der angenommene Wert mit etwa 250 bis 500 Sprayflaschen erreicht.

Abbildung 2 gibt die Ergebnisse der Untersuchungen von [Motz, Fischer 1983] wieder. Nach diesen Ergebnissen wurden bei Temperaturen von 60°C Masseverlustraten von maximal 35 mg pro Tag und Flasche beobachtet.

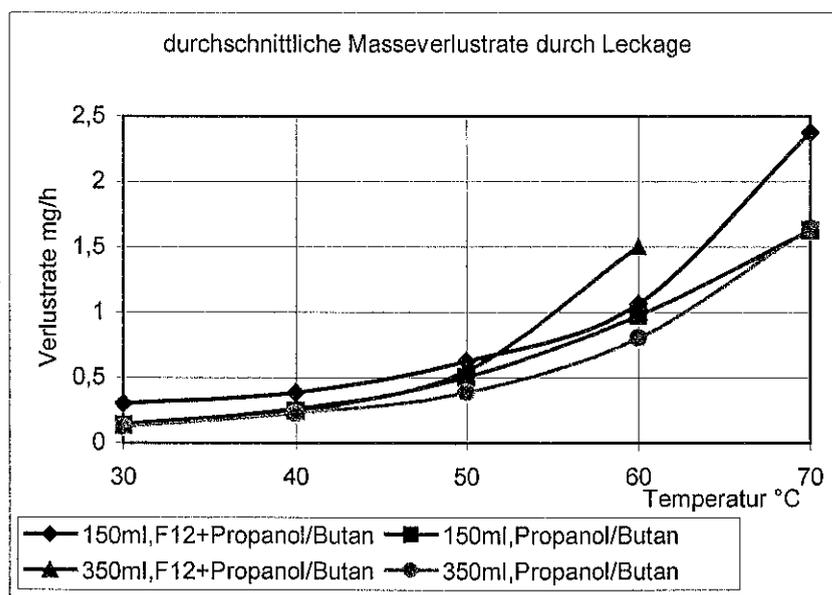


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit der Masseverlustrate durch Leckage nach [Motz, Fischer 1983]

Veränderungen an Sprayflaschen durch Druckanstieg infolge von Erwärmung wurden von den Autoren ebenfalls untersucht. Bei den Sprayflaschengrößen 150 ml und 350 ml war charakteristisch, dass bei einem Behälterinnendruck von

- 1,52 MPa (ab 65°C) der Ausbeuldruck bei langsamer Erwärmung,
- 1,92 MPa (ab 80°C) der Abblasdruck und
- 2,42 MPa (ab 90°C) der Absprengdruck

erreicht wurden. Es bedeuten:

Ausbeuldruck das Ausbeulen des konkaven Behälterbodens

Abblasdruck das rückstoßfreie schnelle Entleeren des Behälters über die Dichtung

Absprengdruck das plötzliche Absprengen des Ventilträgers vom Rollrand der Packung

Ein Bersten der Behälter wurde bei diesen Versuchen infolge des langsamen Aufheizens nicht beobachtet. Der Berstdruck bei langsamer Aufheizung, welcher durch die Hersteller der Sprayflaschen angegeben wurde, beträgt nach [Motz, Fischer 1983] 2,53 MPa.

Sprayflaschen bersten vor allem dann, wenn Sie einem Energiestrom direkt ausgesetzt werden. Das kann durch

- die direkte Berührung mit Gegenständen oder Stoffen mit hoher Temperatur, wie z. B. die Berührung mit heißen Flächen (Herdplatten), Glut oder Asche,
- das Erwärmen durch Flammen, wie z.B. bei Bränden, aber auch Zündflammen können örtlich ausreichende Energiequellen sein, oder
- die mechanische Zerstörung

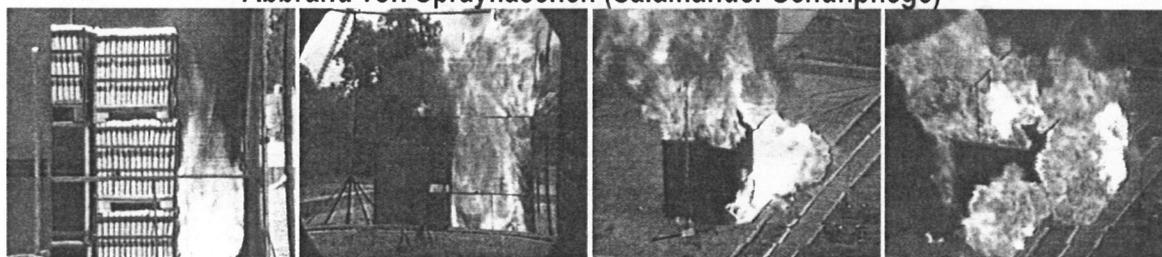
erfolgen

Die äußere metallische Hülle der Sprayflasche nimmt aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit den Energiestrom auf und leitet ihn nach Innen. Im Inneren der Sprayflasche wird sich zunächst die Gasphase erwärmen. Unter kontinuierlichem Druckanstieg erreicht das Treibgas in kurzer Zeit die kritische Temperatur. Oberhalb der kritischen Temperatur verhält sich das Gas wie eine inkompressible Flüssigkeit, so dass schon bei geringfügiger weiterer Temperaturerhöhung der Druck schlagartig ansteigt und zum Bersten des Behälters führt. Da die Gasphase aufgrund der geringen Masse des Gases sehr schnell erwärmt werden kann, ist die Zeit bis zum Bersten des Behälters bei direkter Beflammung gering.

Nach dem Bersten einer Sprayflasche wird der gesamte Inhalt freigesetzt. Der in der Flasche vorhandene Anteil an Flüssiggas verdampft schlagartig. Das entstehende Gasvolumen wird damit durch die gesamte Masse des vorhandenen Treibgases erzeugt. Ohne unmittelbare Zündung kann das Gas mit der Luft explosive Gemische bilden. Explosionen nach dem Zerknall einzelner Sprayflaschen sind bekannt [Güldenbog et al. 1995]. Beim Bersten der Sprayflasche muss der Inhaltsstoff ebenfalls austreten. Er wird in der Regel zu Tropfen verteilt, die, sofern sie brennbar sind, mit dem Treibgas verbrennen werden. In diesem Fall ist das zu betrachtende Gasvolumen noch um den Anteil des Inhaltsstoffes vergrößert. Damit kann bereits eine einzelne Sprayflasche nach dem Bersten erhebliche Zerstörungen hervorrufen und Ursache von Bränden sein. Nach [Aerosole in Lagerhäusern 1987] können Sprayflaschen je nach Brennbarkeit des Inhalts eine Gesamtenergie von 1000 bis 9000 kJ freisetzen.

Bei der Lagerung größerer Mengen Sprayflaschen in Paletten potenzieren sich die Gefahren sowohl unter dem Aspekt der Brandausbreitung als auch für die Brandbekämpfung. Nach einer Zündung beschleunigt sich die Reaktion von selbst, so dass bereits nach kurzer Zeit mehrere Sprayflaschen gleichzeitig bersten und deren Inhalt verbrennt. Bei Versuchsbränden legten einzelne Flaschen während des Abbrennens Wegstrecken bis zu 50 m zurück und konnten dabei andere Stoffe entzünden. Die Brandentwicklung kann schnell wieder unter Kontrolle gebracht werden, wenn die Sprayflaschen mittels Sprinkler- oder Sprühdüsen mit Wasser gekühlt werden. Durch die sehr gute Wärmeleitfähigkeit des Behältermaterials und die geringe Masse der Gasphase wird die Kühlung schnell erreicht und so das Bersten weiterer Behälter verhindert. Da der Inhalt einer einzelnen Sprayflasche in kurzer Zeit abrennt, kann die kurzzeitig entstehende Flamme eine mit Wasser gekühlte Sprayflasche nicht bis zum Bersten erhitzen. [Motz, Fischer 1983] untersuchten an mehreren Paletten Sprayflaschen die Brandentwicklung nach einer Zündung mit offener Flamme. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt die Brandentwicklung und die Wirkung des versprühten Wassers.

Abbrand von Sprayflaschen (Salamander Schuhpflege)



Kühlen brennender Sprayflaschen



Abbildung 3: Brandentwicklung in Palettenstapeln mit Sprayflaschen und Wirkung des versprühten Wassers

Ebenso schätzte auch [Obuchov 1971] ein, dass durch den Einsatz von Sprinkleranlagen eine ausreichende Kühlung der Sprayflaschen möglich ist. Als Grenzwert für die Installation einer Sprinkleranlage wurden durch ihn Lagermengen ab 15 000 Sprayflaschen angesetzt. Die Hauptgefahr beim Löschen der Sprayflaschen ist das Bersten der erhitzten Dosen, die beim gleichzeitigen Bersten von mehreren Dosen Energiefreisetzungen wie bei einem Flüssigkeitsbrand hervorbringen. Sprayflaschen können brennend umherfliegen und dabei größere Strecken zurücklegen. Im Einsatzfall können umherfliegende Flaschen Einsatzkräfte gefährden oder verletzen. Es besteht die Gefahr von Verbrennungen infolge der Berührung mit heißen Gasflammen aber auch Verletzungsgefahr durch die mechanische Wucht der Flaschen.

2.3. Eigenschaften der Treibgase

In Sprayflaschen liegen die verwendeten Gase Propan, Butan und Isobutan aufgrund des vorhandenen Innendruckes sowohl in der Flüssig- als auch der Gasphase nebeneinander vor. Bei Normaltemperatur bildet sich zwischen Flüssigphase und dem darüber befindlichen Gasraum ein Gleichgewicht aus, wobei ebenso viele Dampfmoleküle in die Flüssigphase einwandern wie Flüssigkeitsmoleküle in den Dampfraum übertreten. Erwärmt sich die Flüssigphase, wandern mehr Flüssigkeitsmoleküle in den Dampfraum als zurück. Als Folge steigt der Druck an, die Dichte des Dampfes steigt, während die Dichte der Flüssigphase abnimmt (Abbildung 3). Bei weiterer Erwärmung wird eine Temperatur erreicht, bei der zwischen Flüssig-

sigphase und Dampf kein Unterschied mehr besteht. Beide Phasen haben das gleiche Molvolumen. Diese Temperatur ist die kritische Temperatur, der dazugehörige Druck der kritische Druck. Oberhalb dieser Temperatur lässt sich ein Gas auch unter Anwendung stärkster Drücke nicht mehr verflüssigen. Es wird inkompressibel. Abbildung 4 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf der Dampfdrücke der Treibgase.

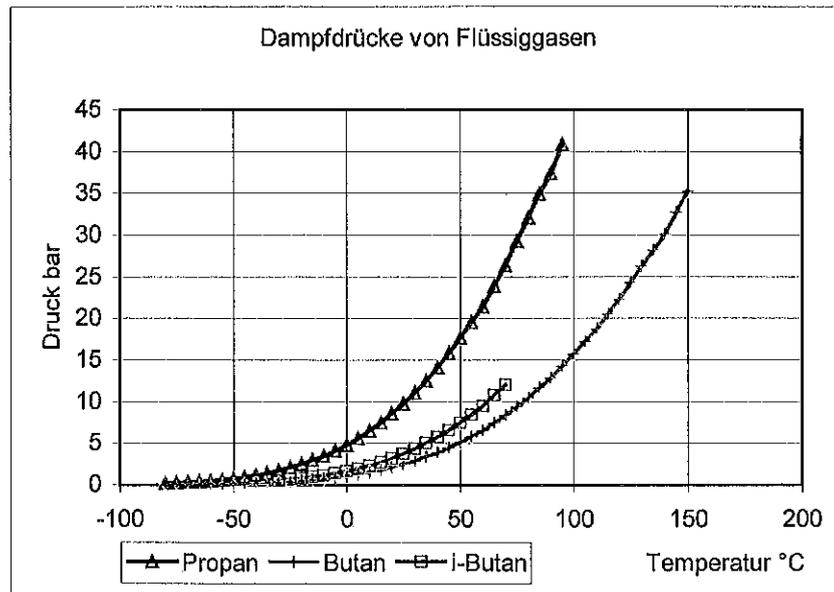


Abbildung 4: Dampfdrücke von Flüssiggasen [Berghoff 1968]

Die nachfolgende Tabelle 1 beinhaltet die kritischen Daten der Flüssiggase.

Tabelle 1: Kritische Daten der Flüssiggase [VDI-Wärmeatlas 1997]

Gas	krit. Temperatur K (°C)	krit. Druck bar	krit. Dichte 10^3 kg/m^3
Propan	369,8 (96,7)	42,4	0,217
Butan	425,2 (152,1)	38	0,228
i - Butan	408,1 (135)	36,5	0,221

Butan und Isobutan besitzen höhere kritische Temperaturen als Propan, wodurch eine höhere Sicherheit gegeben ist. Nachteilig wirkt sich aber der geringere Dampfdruck der Butanverbindungen aus, weil für ein feines Versprühen entsprechend hohe Drücke Voraussetzung sind. Aus diesen Gründen sind Gemische aus Butan und/oder Isobutan mit Propan als Treibgas gebräuchlich. Entsprechend der Anteile im Gemisch lässt sich jeder beliebige Druck aus dem Bereich der zwischen den Dampfdruckkurven liegt, in der Sprayflasche einstellen.

Zur Untersuchung der Frage, ob das in Sprayflaschen enthaltene Gas allein durch Kompression soweit erwärmt werden kann, dass es zur Zündung kommt, wird dieser Vorgang unter adiabatischen Bedingungen betrachtet. Dann ist die Änderung der inneren Energie gleich der geleisteten Arbeit:

$$dU = \delta A \quad (1)$$

mit

$$dU = nC_v dT \quad \delta A = -pdV \quad p = \frac{nRT}{V}$$

erhält man:

$$C_v \frac{dT}{T} = -R \frac{dV}{V} \quad (2)$$

Durch Integration zwischen T_1 und T_2 bzw. V_1 und V_2 erhält man:

$$C_v \ln \frac{T_2}{T_1} = -R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

Mit $R = C_p - C_v$ und Dividieren mit C_v lässt sich die Gleichung (3) umstellen zu

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right) \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (4)$$

Da das Verhältnis der Molwärmern bei idealen Gasen konstant ist

$$\frac{C_p}{C_v} = \chi$$

lässt sich Gleichung (4) vereinfachen und es ergibt sich eine der Poisson'schen Gleichungen der Adiabate (5):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\chi-1} \quad (5)$$

Rechnet man mit dieser Gleichung für die Gase Propan und Butan die mögliche Temperatur bei Erreichen des Berstdruckes durch adiabatische Kompression nach, so erhält man bei einer Kompressibilitätskonstante von $\chi_{\text{Propan}} = 1,2$ und $\chi_{\text{Butan}} = 1,3$ Werte von 228 bzw. 343°C. Die Zündtemperaturen der Gase ohne Fremdwirkung an heißen Flächen liegen bei 500°C für Propan und 425°C für Butan. Damit sollte es nicht möglich sein, die Treibgase allein durch adiabatische Kompression zu zünden. Für die Zündung nach dem Bersten der Sprayflasche muss deshalb immer eine Zündquelle vorhanden sein.

2.4. Füllmengen in Sprayflaschen

2.4.1. Voraussetzungen

Eine gefüllte Sprayflasche muss neben dem Inhaltsstoff soviel Treibgas enthalten, dass der Inhalt über den gesamten Zeitraum der Nutzung mit einem gleichmäßigen Sprühstrahl abgegeben werden kann. Das erfordert einen gleichmäßigen Druck in der Flasche, der unabhängig vom Füllstand des Inhaltsstoffes gehalten werden muss. Das ist aber nur dann zu erreichen, wenn neben dem gasförmigen Treibgas auch noch ein Anteil flüssiger Komponente des Treibgases vorliegt. Ist der Inhaltsstoff eine organische Verbindung, insbesondere ein Kohlenwasserstoff, muss davon ausgegangen werden, dass sich der flüssige Anteil des Treibgases vollständig mit dem Inhaltsstoff mischt. Bei Anwendung wird in diesem Fall der flüssige Inhaltsstoff und anteilig gelöstes flüssiges Treibgas als Spray freigesetzt. Damit ist zwangsläufig der Anteil des flüssigen Treibgases am Flascheninhalt höher anzusetzen als bei nicht mit dem Flüssiggas mischbaren Inhaltsstoffen, wie z.B. Wasser. Aber auch in diesen Fällen können sich durch Emulsionsbildung im flüssigen Inhaltsstoff Tropfen des Flüssiggases verteilen, die mit dem Inhaltsstoff als flüssiges Spray die Flasche verlassen. Wesentlich ist, dass die Ausgangsmenge an Treibgas je nach Produkt und Hersteller in einem weiten Bereich variieren kann.

Die tatsächliche Ausgangsmenge an Flüssiggas dürfte aus der Sicht des Brandschutzes praktisch kaum von Interesse sein, weil sich im Brandfall nach dem Bersten der Sprayflasche Treibgas und brennbarer Inhaltsstoff im Raum verteilen und schlagartig abbrennen. Dabei ist es wenig interessant, ob ein Teil des brennbaren Stoffes als Gas und ein anderer als Flüssigkeitstropfen verbrennen. Interessant sind der Gesamtenergiegehalt, die Abbrandzeit und der daraus resultierende obere Grenzwert für die Energiefreisetzung.

2.4.2. Versuche mit leeren Sprayflaschen

Vermeintlich leere Sprayflaschen aus der Wertstoffsartierung des DSD enthalten in der Mehrzahl der Fälle noch Anteile an Treibgas, obwohl der Inhaltsstoff vollständig verbraucht ist. Es wurde deshalb untersucht, welche Mengen an brennbaren Treibgasen in leeren Sprayflaschen noch enthalten sind. Dazu wurden die Flaschen nach einer äußerlichen Reinigung gewogen und schließlich so geöffnet, dass das Treibgas entweichen konnte. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Treibgas in Sprayflaschen

Sprayflasche Nr.	Volumen ml	Masse der Sprayflasche g		Differenz g	Masse / Volumen g/l
		mit Restgas	ohne Restgas		
1	250	87,41	87,18	0,23	0,92
2	200	50,25	49,25	1,00	5,00
3	150	35,30	34,52	0,78	5,20
6	250	79,64	79,56	0,08	0,32
7	250	67,35	65,22	2,13	8,52
8	500	87,93	85,90	1,97	3,94
9	250	75,72	73,84	1,88	7,52
10	250	82,48	82,04	0,44	1,76
11	250	83,51	83,21	0,30	1,20
12	250	64,25	64,24	0,01	0,04
13	400	97,63	94,68	2,95	7,375
14	250	64,90	63,82	1,08	4,32
15	250	66,77	64,94	1,83	7,32
16	300	84,90	83,06	1,84	6,13
17	600	126,26	123,75	2,51	4,18
18	500	113,85	113,80	0,05	0,10
19	250	73,18	72,87	0,31	1,24
20	100	26,19	25,70	0,49	4,90
21	500	123,22	121,85	1,37	2,74
22	300	80,79	78,83	1,98	6,60
23	400	100,92	97,78	3,13	7,825
24	750	140,50	138,22	2,28	3,04
25	100	29,40	29,28	0,12	1,20
26	250	86,30	78,53	7,77	31,08
27	250	68,02	68,02	0	0
28	400	88,32	87,05	1,27	3,175
29	250	66,13	64,68	1,45	5,80
31	300	95,87	94,95	0,92	3,07
32	200	95,63	94,50	1,13	5,65
33	600	134,43	133,29	1,14	1,90
34	200	46,49	46,45	0,04	0,20
35	250	67,28	67,19	0,09	0,36
36	300	97,44	94,60	2,84	9,47
37	250	66,13	64,80	1,33	5,32
40	200	49,84	49,03	0,79	3,95
41	250	78,50	77,00	1,50	6,00
42	250	66,23	64,72	1,51	6,04
43	300	54,67	48,88	5,79	19,30
44	200	59,20	58,78	0,42	2,10
45	200	37,78	35,70	2,08	10,40
46	150	30,76	29,97	0,79	5,27
47	250	69,65	68,70	0,95	3,80
48	150	56,13	53,35	2,78	18,53
49	250	133,47	132,41	1,06	4,24
51	300	75,20	73,31	1,89	6,30
52	250	69,05	66,31	2,74	10,96
53	250	67,61	65,91	1,70	6,80
54	300	81,02	81,01	0,01	0,03

Aus den Ergebnissen wurde für jede Sprayflaschengröße der Mittelwert der Restgasmengen gebildet und in Abbildung 5 dargestellt.

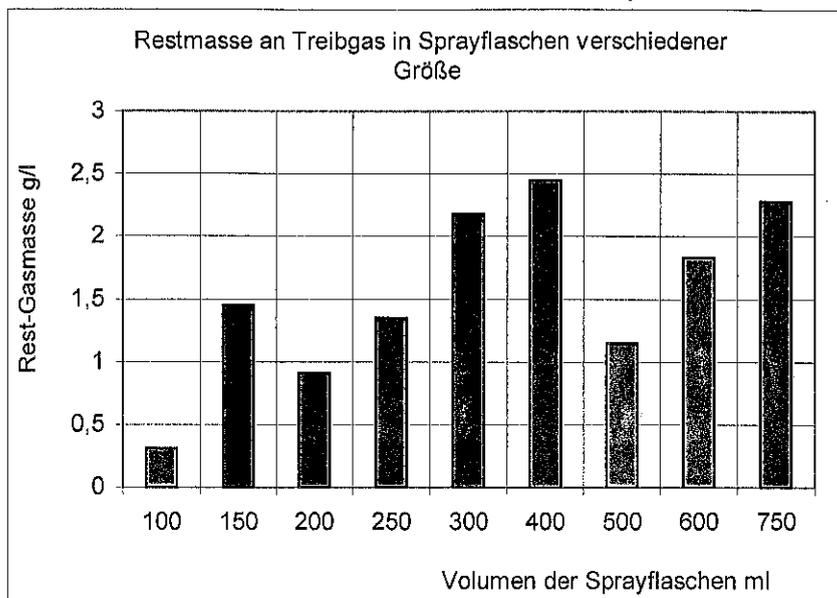


Abbildung 5: Mittelwerte der Restmassen an Treibgas in Sprayflaschen verschiedener Größe

Um die Ergebnisse untereinander vergleichbar zu machen, wurden die Mittelwerte der Restmengen jeweils einer Sprayflaschengröße auf ein Einheitsvolumen der Sprayflaschen von $V = 1$ l bezogen und aus diesen Werten ein Mittelwert gebildet. Die nachfolgende Abbildung 6 enthält die berechneten Werte.

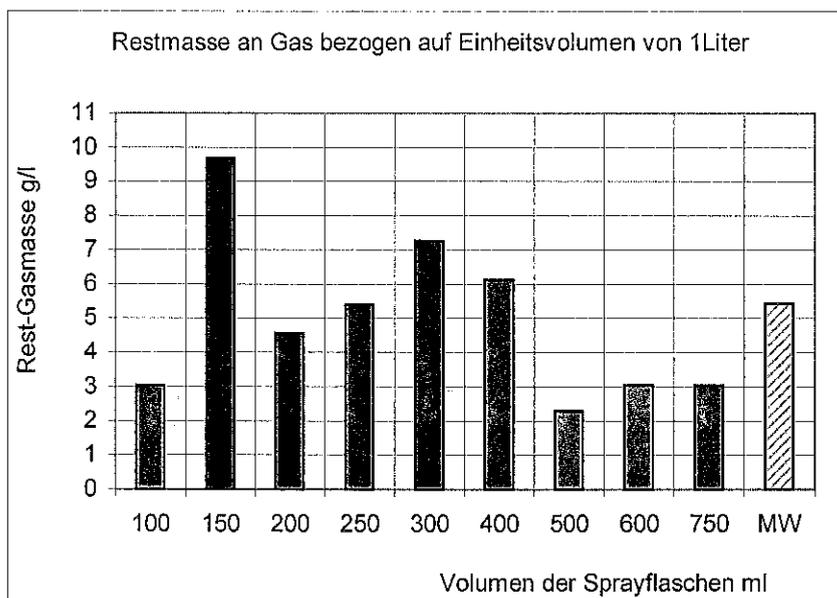


Abbildung 6: Restmasse des Gases in leeren Sprayflaschen bezogen auf ein Einheitsvolumen der Sprayflaschen von 1 Liter

Ausgehend von den in Abbildung 5 gezeigten Treibgasrestmassen besteht die Möglichkeit, das nach der Zerstörung einer Sprayflasche zu erwartende Volumen explosiblen Gemisches von Restgas mit Luft (Abbildung 7) und bei Zündung das daraus entstehende Rauchgasvolumen sowie die freiwerdende Energie zu berechnen.

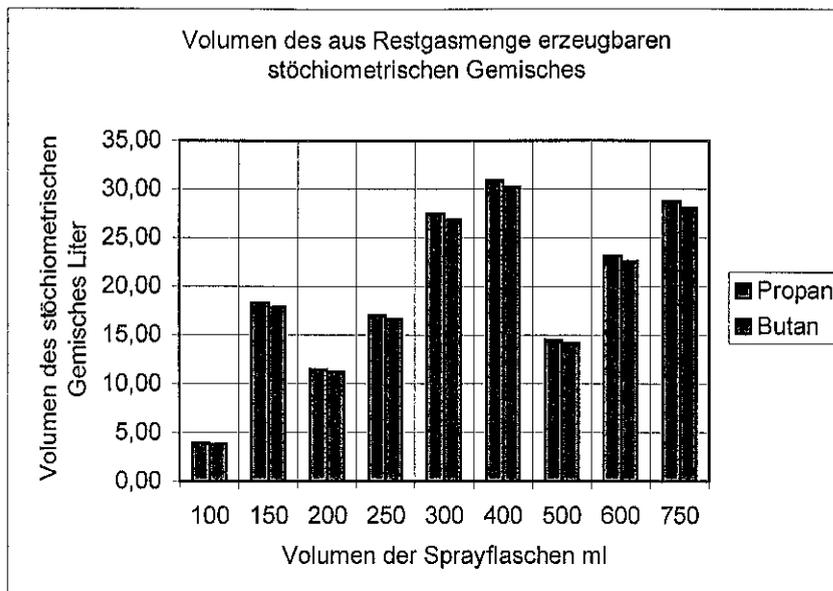


Abbildung 7: Volumen des aus der Restgasmenge mit Luft erzeugbaren stöchiometrischen Gemisches aus Sprayflaschen unterschiedlicher Größe

Die aus den Mittelwerten der auf ein Sprayflaschenvolumen von 1 Liter bezogenen Restgasmengen errechneten Volumina des sich jeweils mit Luft bildenden stöchiometrischen Gemisches ergeben im Mittel pro Liter Flaschenvolumen etwa 60 l explosives Gemisch (Abbildung 8).

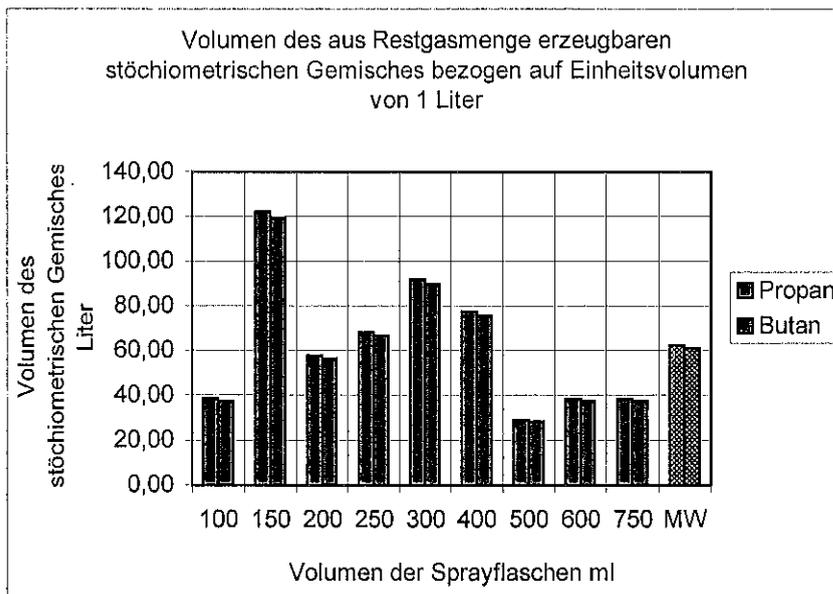


Abbildung 8: Volumen des aus der Restgasmenge mit Luft erzeugbaren stöchiometrischen Gemisches aus Sprayflaschen unterschiedlicher Größe bezogen auf ein Einheitsvolumen der Sprayflaschen von 1 Liter

Unter Zugrundelegen einer vollständigen Verbrennung der Gase und einer mittleren Rauchgastemperatur von 750°C kann das theoretisch mögliche Rauchgasvolumen berechnet werden (Abbildung 9). Bezogen auf 1 Liter Sprayflaschenvolumen beträgt der Mittelwert etwa 240 l (Abbildung 10). Da bei einer Verbrennung die beobachtete Flamme nicht durch den Ort der Verbrennung gebildet wird, sondern durch das Volumen der heißen leuchtenden Gase (Temperatur bis etwa 750°C) kann das zu erwartende Flammenvolumen mit dem berechne-

ten Rauchgasvolumen gleichgesetzt werden. Die Dynamik des Verbrennungsvorganges kann daraus nicht abgeschätzt werden.

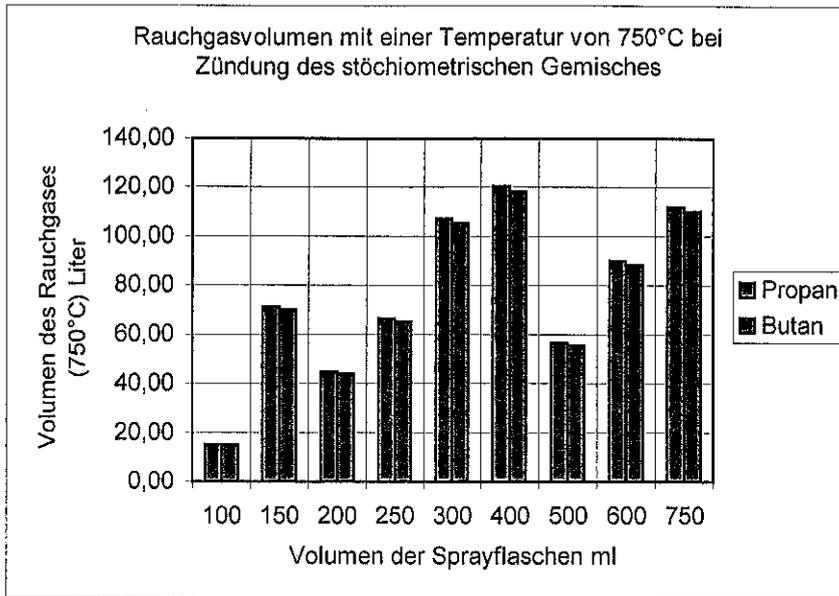


Abbildung 9: Mittelwert des zu erwartenden Rauchgasvolumens mit einer Temperatur von 750°C aus der jeweiligen Sprayflaschengröße

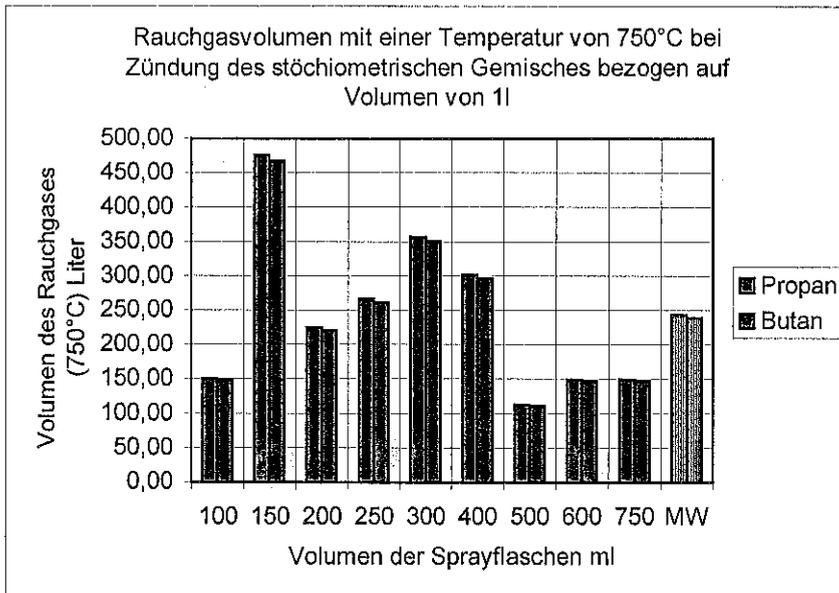


Abbildung 10: Mittelwert des zu erwartenden Rauchgasvolumen bei einer Temperatur von 750°C (Flammenvolumen) bezogen auf 1 Liter Flaschenvolumen

Schließlich zeigt Abbildung 11 die freiwerdende Energie bei vollständiger Verbrennung des stöchiometrischen Gemisches als Mittelwert der jeweiligen Sprayflaschengröße.

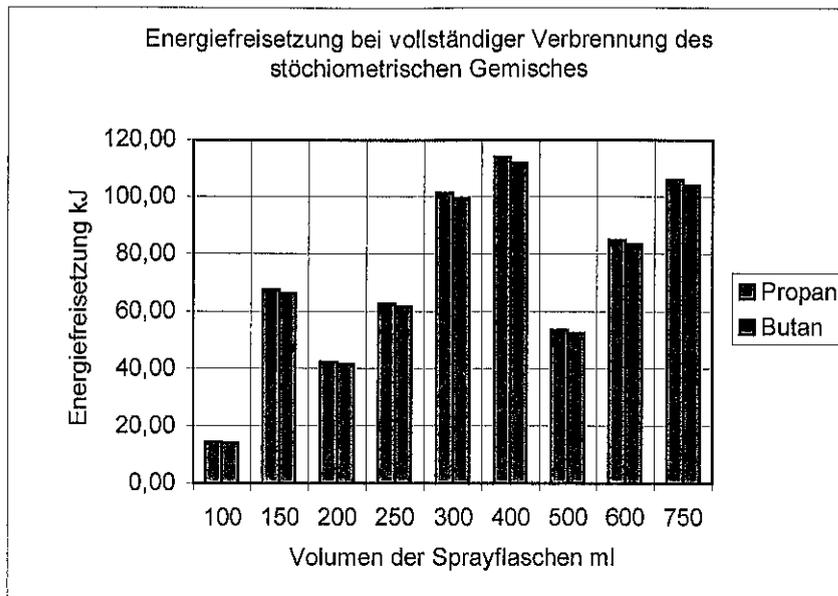


Abbildung 11: Mittelwerte der zu erwartenden Energiefreisetzung bei Verbrennung des stöchiometrischen Gemisches für das jeweilige Sprayflaschenvolumen

Werden diese Werte auf das Einheitsvolumen bezogen, muss bei Verbrennung des stöchiometrischen Gemisches pro Liter leeres Sprayflaschenvolumen im Mittel mit einer Energiefreisetzung von etwa 230 kJ gerechnet werden (Abbildung 12).

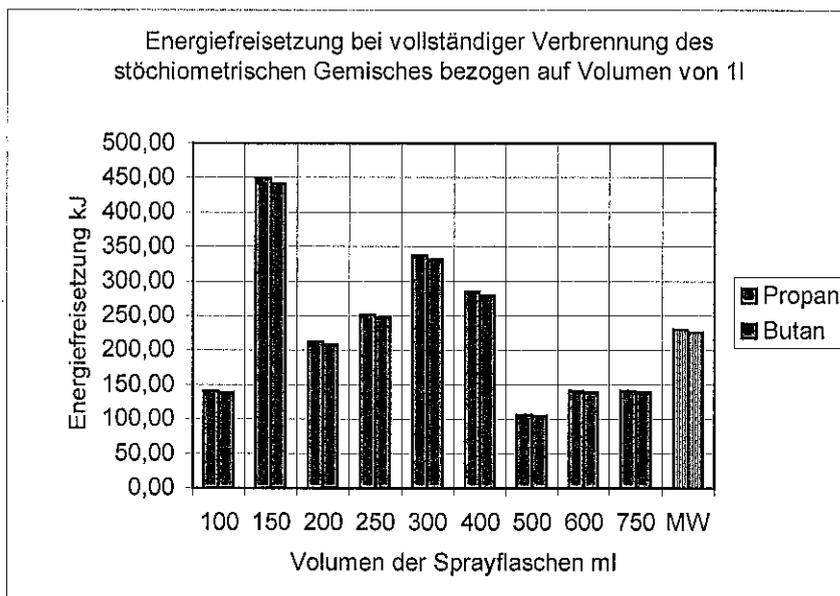


Abbildung 12: Mittelwerte der zu erwartenden Energiefreisetzung bei Verbrennung des stöchiometrischen Gemisches bezogen auf 1 Liter Sprayflaschenvolumen

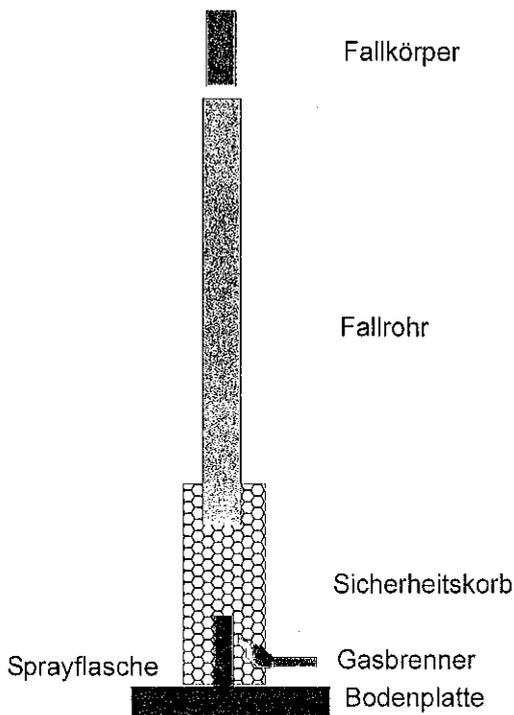


Abbildung 13: Versuchsanordnung

Zur Untersuchung des von entleerten Sprayflaschen ausgehenden Gefährdungspotentials wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Sprayflaschen durch mechanischen Einfluss zum Bersten gebracht wurden. Zielstellung der Versuche war

- der Ausschluss einer Selbstentzündung des ausströmenden Gases durch Kompressionswärme,
- der Nachweis, dass die Zündung des ausströmenden Gases erst durch eine Zündflamme möglich wird,
- die Bestätigung der Größenordnung der berechneten Volumina der heißen Rauchgase (Flammenvolumen) und
- die Bestimmung der Zeit der ablaufenden Verbrennungsreaktion, um die Energiefreisetzungsrate des Brandes abschätzen zu können.

Zur Durchführung der Versuche wurde ein Rohr mit einer Länge von 5 m und einem Durchmesser von 0,09 m senkrecht an einer Wand befestigt. Das Rohr endete ca. 0,8 m oberhalb einer auf dem Erdboden aufgelegten ausreichend dicken und damit nicht verformbaren Blechplatte. Auf diese Blechplatte wurde die jeweils zu untersuchende Sprayflasche gestellt und so ausgerichtet, dass sie im Mittelpunkt unterhalb des senkrechten Rohres stand. Durch das Rohr wurde im freien Fall ein Rundstahl mit einem Durchmesser von 0,08 m und einer Masse von 15 kg auf die Sprayflasche fallen gelassen. Die unter Vernachlässigung der Reibung auf die Sprayflasche einwirkende Kraft betrug somit 147 N. Diese Kraft war ausreichend, die Sprayflasche bei genauem Auftreffen in jedem Fall zum Bersten zu bringen. Zur Sicherheit wurde die Sprayflasche mit einem Korb aus Streckmetall umgeben, um ein Wegfliegen der gebersterten Flaschen zu verhindern. Die Zündung der Gaswolke wurde mit einer während des ganzen Versuches brennenden Flamme realisiert, deren Energiefreisetzung ca. 50 kW betrug und damit ausreichende Zündenergie für die freigesetzten Gaswolken lieferte. Die Abbildung 13 zeigt die Versuchseinrichtung. Die Versuche wurden mit einer Videokamera von einem fixierten Standort aus aufgenommen und anschließend in Einzelbilder digitalisiert. Aufgrund der bekannten Aufnahmegeschwindigkeit konnten die Ereignisse eines Versuches den Einzelbildern zeitlich zugeordnet werden, so dass für jeden Versuch ein Bilddiagramm erstellt werden konnte. Die Bilddiagramme markanter Versuche befinden sich in Anlage 1 des Berichtes.

Zur Bestimmung der Größe des Flammenvolumens erfolgte eine Abschätzung der Größenverhältnisse der auf den Einzelbildern erkennbaren Ausdehnung der Flamme zum Durchmesser des Sicherheitskorbes (0,2 m) und zur Breite der Bodenplatte (0,56 m). In Abbildung 14 sind die entsprechenden Maße zur Größenabschätzung der Flammen gekennzeichnet.

Insgesamt wurden mit 25 leeren Sprayflaschen aus der DSD-Sortierung Berstversuche durchgeführt. In nahezu allen Fällen konnte nach dem Bersten eine Treibgaswolke nachgewiesen werden, die jedoch nicht immer gezündet werden konnte.

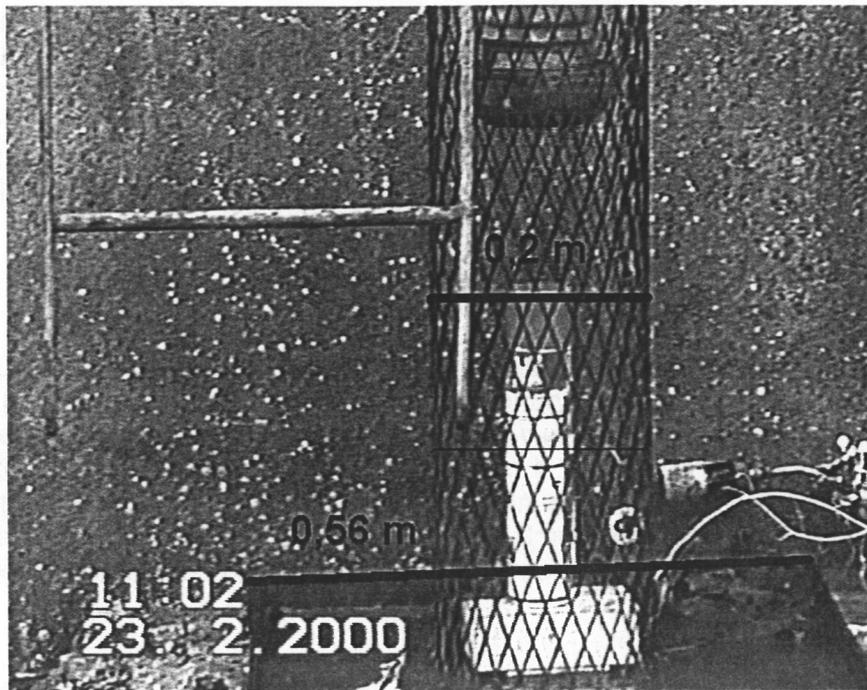


Abbildung 14: Vergleichsmaße für die Abschätzung der Größe des Flammenvolumens

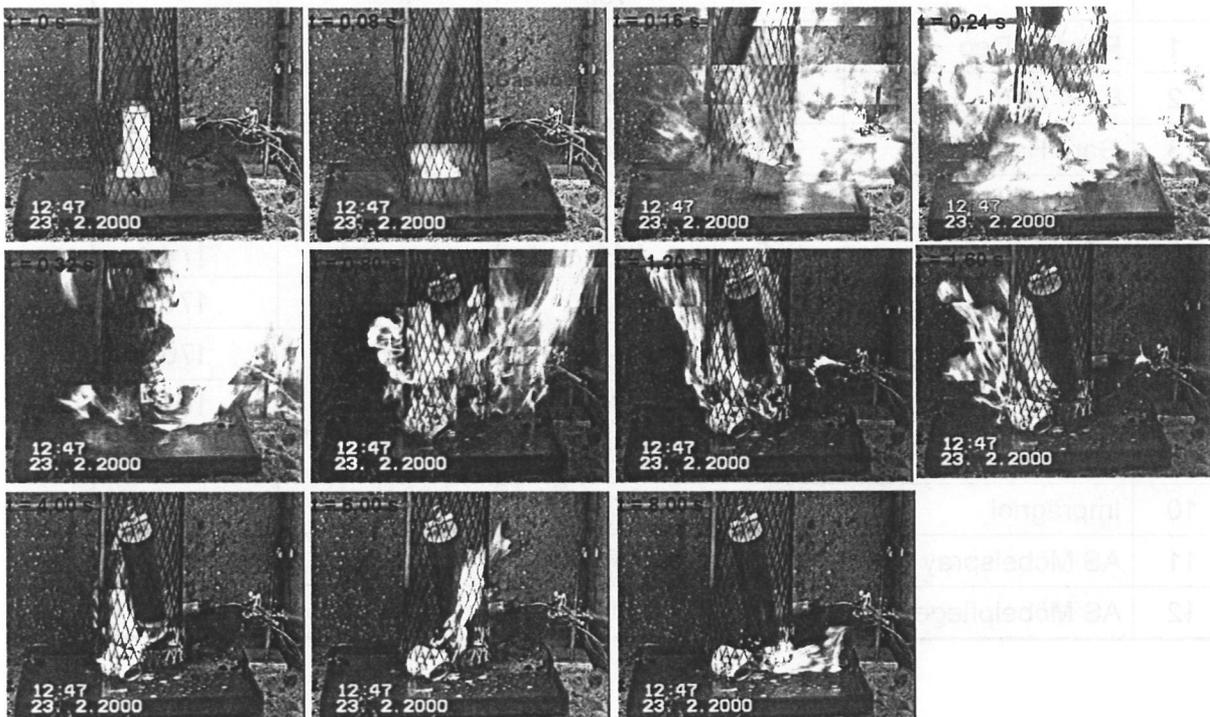


Abbildung 15: typischer Reaktionsablauf beim Berstversuch mit einer leeren Sprayflasche

In Abbildung 15 ist ein Bilddiagramm von einem Berstversuch mit einer leeren Sprayflasche dargestellt, welches für den Reaktionsablauf repräsentativ ist. In Bild 2 der Bildfolge ist die Gaswolke bereits in der Ausbreitungsphase zu erkennen, ohne dass eine Selbstentzündung erfolgte. Erst mit weiterer Ausbreitung in den Bereich des Gasbrenners wurde die Treibgaswolke gezündet. Die maximale Ausdehnung der Flamme erreichte bei dem in Abbildung 15 gezeigten Versuch ca. 0,8 m. Wird eine kugelförmige Ausdehnung der Flamme zugrunde gelegt, lässt sich ein Flammenvolumen von ca. 270 l berechnen, welches gut mit den aus den Restgasmengen berechneten Werten übereinstimmt.

Bezüglich der Branddauer war einzuschätzen, dass die Hauptmasse des Treibgases nach etwa 1 s verbrannt war und danach nur noch Reste der Inhaltsstoffe weiterbrannten. Die übrigen Untersuchungen mit Zündung der Gaswolke zeigten vergleichbare Ergebnisse. Daraus kann verallgemeinert werden, dass nach dem Bersten der Sprayflasche die gezündete Gaswolke ihre Energie in einer Zeit von ca. 1 s freisetzt. Damit entspricht die Energiefreisetzungsrate beim Brand der aus berstenden leeren Sprayflaschen entweichenden Restgase einer Leistung von ca. 230 kW (sehr gute Übereinstimmung).

2.4.3. Versuche mit vollen Sprayflaschen

Auf Sprayflaschen wird im Allgemeinen die darin enthaltene Masse angegeben. Um herauszufinden, ob in dieser Massenangabe nur der Inhaltsstoff oder die Gesamtfüllung (Inhaltsstoff + Treibgas) deklariert wird, wurden volle Sprayflaschen geöffnet und ihr Inhalt gewogen. Vor dem Öffnen wurden die Flaschen 24 h bei einer Temperatur von -30°C gekühlt und anschließend sofort geöffnet. Der flüssige Inhalt wurde aufgefangen und das flüssige Treibgas bei Normaltemperatur abgedampft. Durch Wägung konnten die Masseanteile bestimmt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Tabellen 3 und 4 zusammengefasst.

Tabelle 3: Füllvolumen und Masse des Gesamtinhaltes von vollen Sprayflaschen

Probe Nr.	Hersteller / Inhalt	Volumen ml	Gesamtmasse der Sprayflasche		Gesamteinhalt g
			voll g	leer g	
1	Rexona Deo	150	149,5	57,8	91,7
2	8 x 4 Deo	150	130,0	36,0	94,0
3	Gard Haarlack	250	245,7	68,8	176,9
4	Gard Haarlack	250	245,9	69,1	176,8
5	AS Haarspray	250	244,7	72,1	172,6
6	Wellaflex Haarspray	250	247,7	69,9	177,8
7	Soiree Haarspray	250	246,6	70,6	176,1
8	Nivea Haarlack	250	255,7	67,8	187,9
9	AS Frischluftspray	300	242,9	79,1	163,8
10	Imprägnol	400	353,0	92,9	260,1
11	AS Möbelspray	400	410,2	104,2	306,0
12	AS Möbelpflege	400	409,9	93,5	316,4

Tabelle 4: Masseanteile und Energieinhalte der Füllung von Sprayflaschen

Probe Nr.	Inhalt / Hersteller	Masseanteil g		Energieinhalt MJ		Gesamtenergie MJ
		Treibgas	Inhaltsstoff	Treibgas	Inhaltsstoff*	
1	Rexona Deo	71,8	19,9	3,3	0,5	3,8
2	8X4 Deo	65,0	29,0	3,0	0,8	3,8
3	Gard Haarlack	108,1	68,8	5,0	1,9	7,0
4	Gard Haarlack	98,6	78,2	4,6	2,2	6,7
5	AS Haarspray	76,7	96,0	3,6	2,7	6,3
6	Wellaflex Haarspray	56,8	121,0	2,6	3,3	5,9
7	Soiree Haarspray	72,5	103,6	3,4	2,7	6,1
8	Nivea Haarlack	83,0	105,0	3,9	2,8	6,7
9	AS Frischluftspray	162,3	1,5	7,5	0,0	7,5
10	Imprägnol	80,1	180,0	3,7	7,7	11,5
11	AS Möbelspray	95,0	211,0	4,4	0,0	4,4
12	AS Möbelpflege	122,3	194,1	5,7	0,0	5,7

*Der Heizwert des Inhaltsstoffes wurde experimentell bestimmt

In gleicher Weise wie bei den Berstversuchen mit leeren Sprayflaschen wurden Versuche mit gefüllten Sprayflaschen durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung 16 zeigt das Bilddiagramm eines Versuches, das aus der Videoaufzeichnung erstellt wurde. Im Bild 3 der Bildfolge ist die sich ausbreitende Gaswolke gut zu erkennen, die dann bei Erreichen des Gasbrenners gezündet wurde. Zusätzlich zu den normalen Videoaufnahmen wurden einzelne Versuche mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen, um den Nachweis der erst nachträglichen Zündung der sich ausbreitenden Gaswolke durch die Zündflamme mit weiterem Bildmaterial zu belegen.

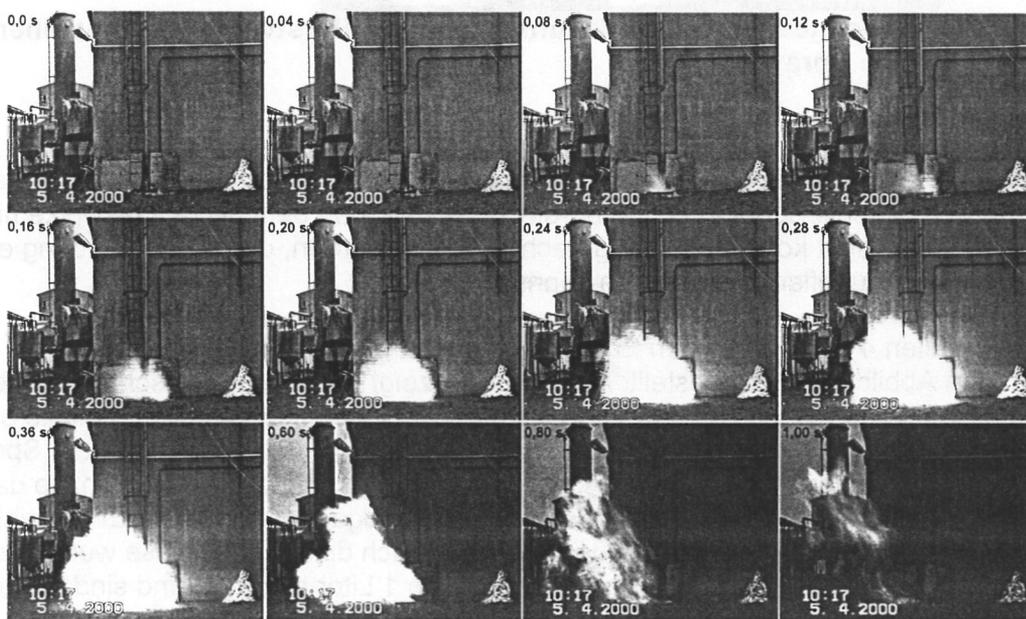


Abbildung 16: typischer Reaktionsablauf beim Berstversuch mit einer vollen Sprayflasche

Bei den Versuchen konnte bis auf eine Ausnahme in allen Fällen eine Zündung der Gaswolken beobachtet werden (Anlage 2). Bei einem Versuch wurde der Gasbrenner durch die sich ausbreitende Treibgaswolke ausgeblasen, ohne dass es zu deren Zündung kam.

Die bei Zündung der Gasgemische entstehende Flamme besaß eine hellgelbe bis gelbe Färbung, was auf sehr hohe Temperaturen (ca. 1200°C) schließen ließ. Die Flammen nahmen vorzugsweise die Form einer Kugel an, deren Durchmesser abgeschätzt werden konnte. Bei dem in Abbildung 16 gezeigten Versuch beispielsweise mit einer Haarsprayflasche, die 250 ml Inhalt hatte, ließ sich ein Durchmesser von ca. 2,5 m abschätzen. Daraus konnte ein Flammenvolumen von 8 m³ errechnet werden. In diesem Volumen verbrannten sowohl die Treibgase als auch die brennbaren flüssigen Inhaltsstoffe als Spray. Im Video ist eindeutig erkennbar, dass die Gaswolke sich bereits in der Ausbreitung befand, ehe deren Zündung durch den Gasbrenner erfolgte. Um die Zeit zwischen dem Bersten der Sprayflasche und dem Zünden der Gaswolke detaillierter erfassen zu können, wurden ein Teil der Versuche zusätzlich mit der Hochgeschwindigkeitskamera (250 Bilder je Sekunde) aufgenommen (Abbildung 17).



Abbildung 17: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Berstversuches mit einer vollen Sprayflasche

Diese Bildfolge belegt eindeutig, dass das Zünden im Bereich des Gasbrenners erfolgte und die Flamme sich anschließend durch die bereits in Ausbreitung befindliche Gaswolke hindurch fortpflanzte. Damit konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass eine Zündung erst durch eine externe Zündflamme eintreten konnte.

Die in den Tabellen 4 und 5 erfassten Ergebnisse wurden grafisch aufgearbeitet und in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 18 zeigt die im Sprayflaschenvolumen enthaltenen Anteile an Inhaltsstoff und Treibgas. Aus Abbildung 19 sind diese Anteile bezogen auf ein Flaschenvolumen von 1 Liter ersichtlich. Von den meisten untersuchten Sprayflaschen konnten die Inhaltsstoffe einer Heizwertbestimmung unterzogen werden, so dass in Abbildung 20 der aus den Anteilen an Inhaltsstoff und Treibgas resultierende Energieinhalt sowie die Gesamtenergie dargestellt werden konnten. Auch diese Ergebnisse wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf ein Flaschenvolumen von 1 Liter bezogen und sind in Abbildung 21 zu sehen.

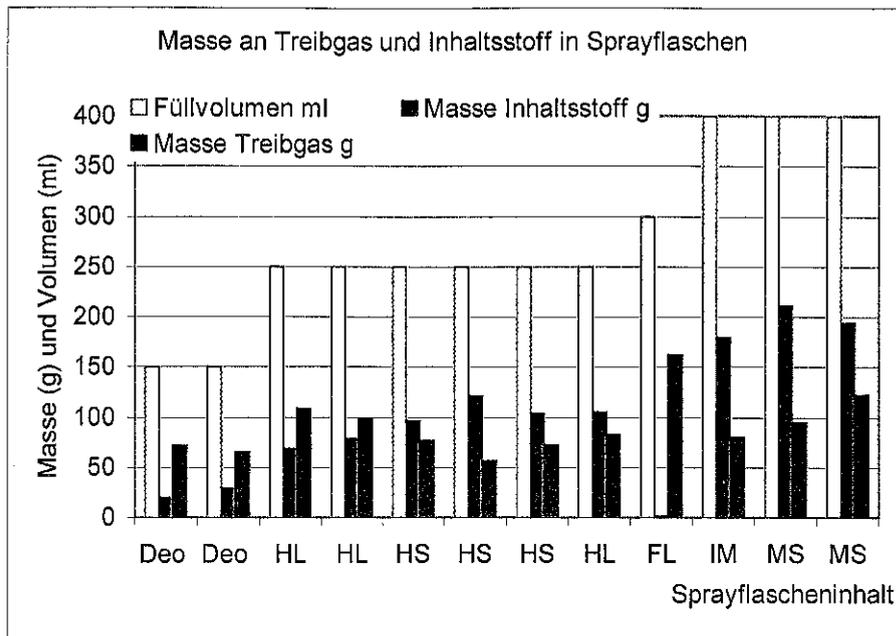


Abbildung 18: Masseanteile von Inhaltsstoff und Treibgas im realen Volumen voller Sprayflaschen

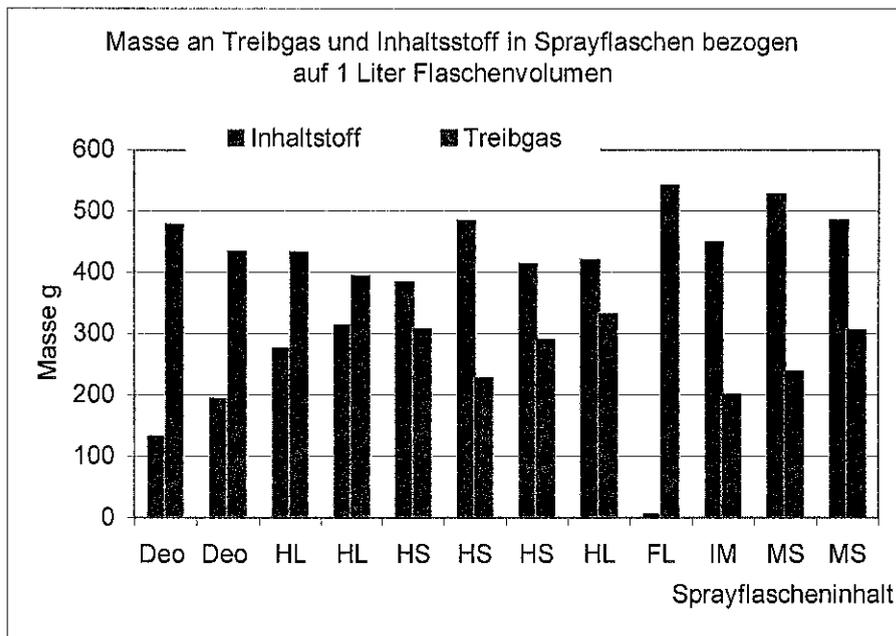


Abbildung 19: Masseanteile von Inhaltsstoff und Treibgas in vollen Sprayflaschen bezogen auf ein Flaschenvolumen von 1 Liter

Legende: Deo Deospray HL Haarlack HS Haarspray
 FL Frischluftspray IM Imprägnierspray MS Möbelspray

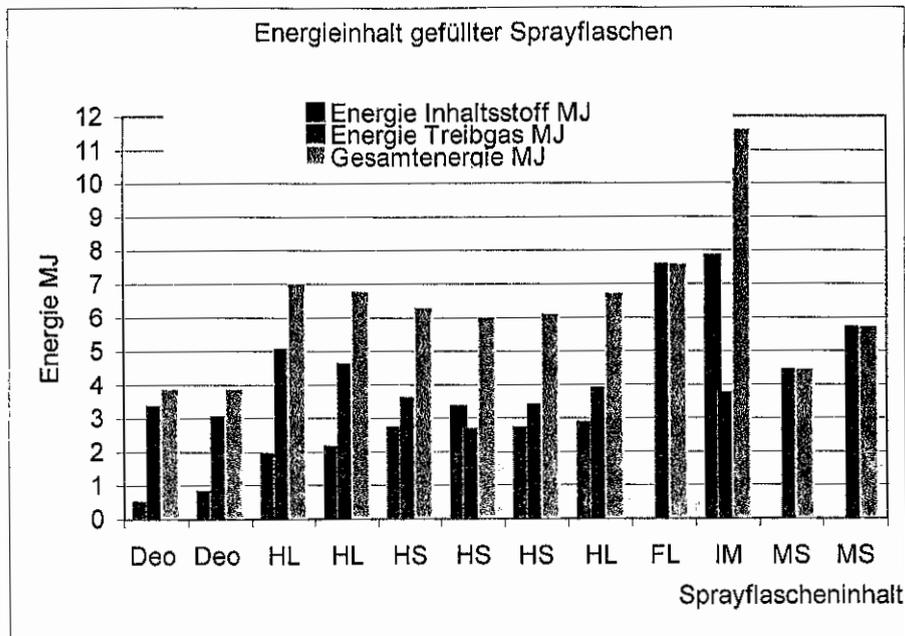


Abbildung 20: Verteilung des Energieinhaltes gefüllter Sprayflaschen

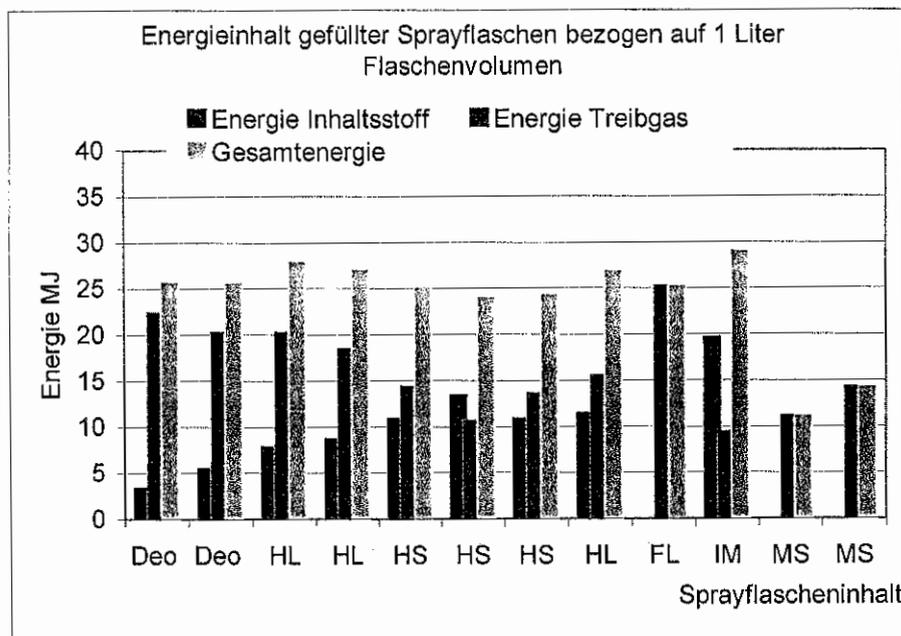


Abbildung 21: Verteilung des Energieinhaltes gefüllter Sprayflaschen bezogen auf ein Flaschenvolumen von 1 Liter

Bei einer Reihe von Sprayflaschen waren sowohl Inhaltsstoff als auch Treibgas brennbar. Der Energieinhalt dieser gefüllten Sprayflaschen erreichte im Mittel ca. 26 MJ pro Liter Flaschenvolumen. Da die Füllungen von Sprayflaschen vorwiegend organische Inhaltsstoffe mit einem organischen Treibmittel enthalten, gibt es eine vollständige Mischbarkeit zwischen beiden flüssigen Komponenten. Der Abbrand des Treibgases einschließlich der flüssigen Inhaltsstoffe erfolgte bei den Berstversuchen in Zeiträumen von etwa 1 Sekunde oder auch etwas schneller. Die Berechnungen wurden auf einen Zeitraum von 1 Sekunde bezogen. Daraus ergaben sich Energiefreisetzungsraten von 25 bis 30 MW pro Liter Flaschenvolumen. Wird zum Beispiel die aus 250 ml fassenden Haarsprayflaschen freigesetzte Energie auf das aus den Videoaufnahmen (Abbildung 16) abgeschätzte Flammenvolumen bezogen, lassen sich Leistungsdichten von ca. 1,6 MW/m³ ableiten.

In den Fällen der vollständigen Mischbarkeit von Inhaltsstoff und Treibgas werden beim Versprühen des Inhaltsstoffes in der Regel auch Teile des flüssigen Treibgases mit freigesetzt, welches bei Druckentlastung sofort verdampft und gleichzeitig für eine optimale Zerteilung des Inhaltsstoffes sorgt. Die entstehende Wolke ist durch die brennbaren Komponenten zündfähig, da ihr Energieinhalt deutlich über dem von [Bern und Malmquist 1989] festgestellten Grenzwert von 10 MJ/kg liegt. Ist dieser geringer, halten die Autoren eine Zündung für nicht mehr möglich. Bei Zündung können diese Gaswolken zu Gefährdungen führen. Ausreichend starke Zündquellen sind offene Flammen von der Größe einer Feuerzeugflamme oder energiereiche Funken wie Schweiß- oder Schneidfunken. Die Abbildung 22 zeigt die Zündung einer Spraywolke mit einem Laborbrenner nach ca. 5 s Sprühzeit, die dann vollständig bis zur Sprühdüse durchläuft.

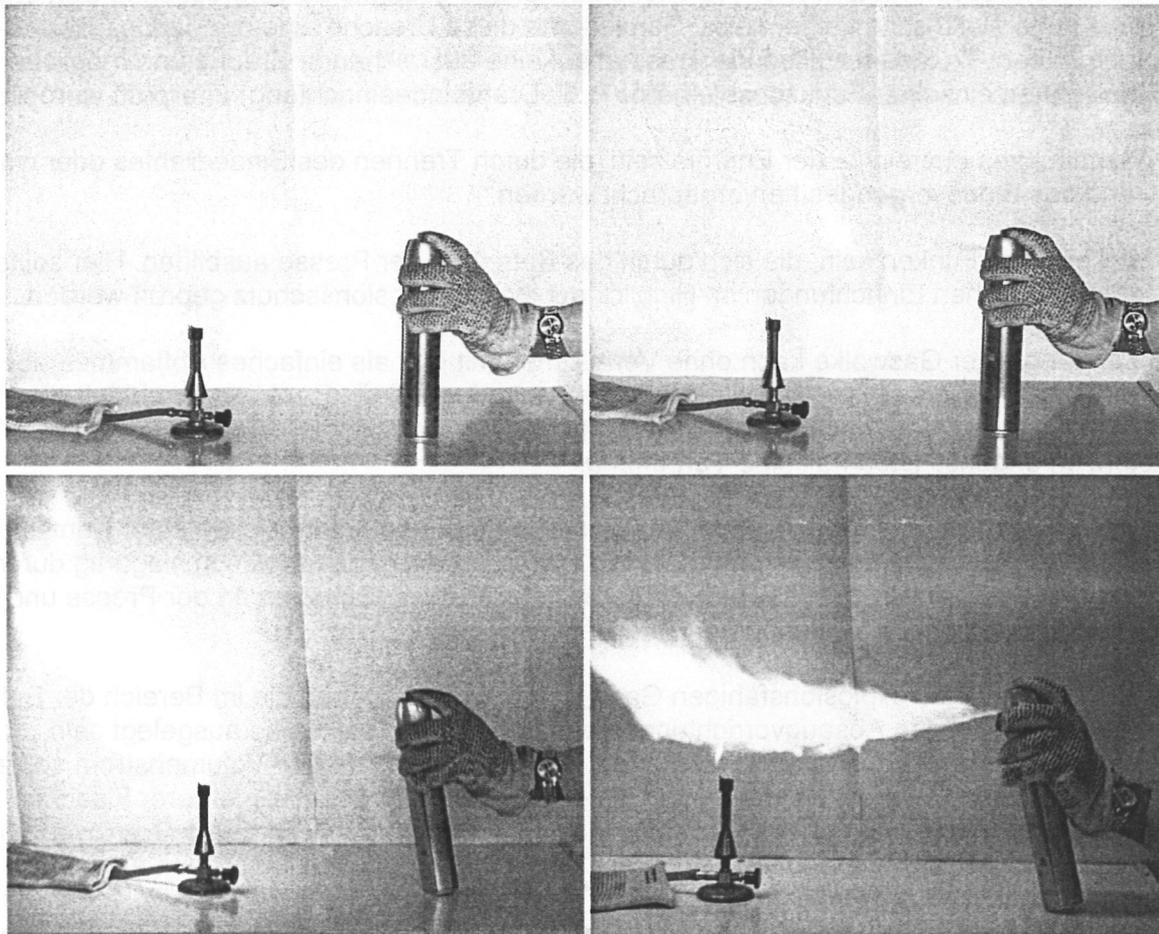


Abbildung 22: Zündung einer Spraywolke mittels Laborbrenner

2.5. Schlussfolgerungen für die Verarbeitung von Sprayflaschen im Rahmen des DSD

Sprayflaschen werden zusammen mit anderen metallischen Verpackungsmaterialien wie Büchsen und Dosen nach dem Sortiervorgang zu Ballen verdichtet. Der Anfall in den verschiedenen Sortiergruppen ist unterschiedlich. Deshalb werden in der Regel alle sortierten Wertstoffe mit einer Ballenpresse verdichtet. Die Häufigkeit der Verpressung zu Ballen hängt dabei vom Anfall des Sortiergutes in der jeweiligen Sortiergruppe ab. Der Verdichtungsprozess wird durch hydraulisch bewegte Stempel vorgenommen. Die gepressten Ballen werden mit Bindedraht oder Blechband an mehreren Stellen senkrecht und waagrecht zusammengeknüpft. Während des Verdichtungsprozesses werden die Sprayflaschen infolge der äußeren Kraftwirkung zunächst gequetscht. Je nach Verformung werden sie entweder an den Nahtstellen undicht oder die Ventile werden herausgedrückt. Das brennbare Restgas kann

aus den Flaschen entweichen und sich ausdehnen. Reste des noch vorhandenen verflüssigten Anteils verdampfen ebenfalls und breiten sich im Ballen aus. Im Ballen können sich diese Gase mit der darin vorhandenen Luft vermischen. Eine Zündung durch die eigene Kompressionswärme nach dem Bersten der Behälter kann, wie schon diskutiert, nicht erfolgen. Im Ballen befindet sich somit ein gasförmiger brennbarer Stoff, der durch die offenen Stellen der Ballenpresse in den angrenzenden Luftraum austreten wird. Zu welchem Zeitpunkt und an welchem Ort die Konzentration des Gas/Luft-Gemisches innerhalb der Ex-Grenzen liegt, kann nicht exakt vorausgesagt werden. Während des Pressvorganges einschließlich des nachfolgenden Verschnürens der Ballen auftretende Zündquellen sind in der Lage, die vorhandene Gaswolke zu zünden. Mögliche Zündquellen könnten

- elektrostatische Aufladungen sein, die sich während des Pressvorganges ausbilden. Beim Verpressen metallischer Wertstoffe besitzt das gesamte zu verpressende Sortiergut eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Somit dürfte diese Ursache eine nur geringe Bedeutung haben. Trotzdem sollten die Pressen auf eine ausreichende Erdung und mögliche Isolationen einzelner Funktionselemente (z.B. Drahtbindeeinrichtung) überprüft werden.
- Metallfunken ausreichender Energie sein, die durch Trennen des Bindedrahtes oder während des Bindevorganges hervorgebracht werden.
- elektrischen Funken sein, die sich durch das Betreiben der Presse ausbilden. Hier sollten alle elektrischen Einrichtungen im Hinblick auf ihren Explosionsschutz geprüft werden.

Die Zündung einer Gaswolke kann ohne Vormischen mit Luft als einfaches Abflammen ablaufen. Dabei wird die Gaswolke an einer Stelle gezündet und die Reaktion durchläuft die gesamte Gaswolke. Die Flammenausbreitung durch die Gaswolke ist relativ langsam, es entsteht im ungünstigsten Fall eine Verpuffung.

Im Fall des vollständigen Vermischens des Gases mit Luft und bei Erreichen einer Konzentration des Explosionsbereiches kann die dann explosionsfähige Gaswolke schlagartig durchzünden und damit örtlich zu erheblichem Druckanstieg führen. Schäden an der Presse und auch Gefährdungen des Bedienpersonals wären die Folge.

Dem Ausbilden eines explosionsfähigen Gas / Luftgemisches wirken die im Bereich der Ballenpressen installierten Absaugvorrichtungen entgegen. Diese sollten so ausgelegt sein, dass die sich bildenden Gase auch vollständig abgesaugt werden. Der Volumenstrom sollte so eingestellt sein, dass die Konzentration der beim Bersten einer oder mehrerer Flaschen freiwerdenden Gase bis unter die untere Explosionsgrenze verdünnt wird. Als Grenzwert für die freiwerdende Gasmenge sollte mindestens der Inhalt einer Sprayflasche mit einem Einheitsvolumen von 1 l zugrunde gelegt werden, welcher in einem Zeitraum von ca. 1 s in der Presse freigesetzt wird. Daraus würde sich ein Volumenstrom an Luft von ca. 0,25 m³/s bzw. 900 m³/h ergeben. Die Absaugvorrichtung im Bereich der Ballenpresse sollte ständig überwacht werden und bei Unterschreiten des festgelegten Grenzwertes den Pressvorgang unterbrechen.

3. Verarbeitung von DSD – Materialien

3.1. Stand der Technik

Für die Verwertung der in den gelben Säcken anfallenden Stoffe werden ständig neue Technologien entwickelt, die eine Rückführung der Verpackungsmaterialien als Roh- oder Wertstoffe in den technologischen Prozess zum Ziel haben. Vor dem Recycling müssen die unterschiedlichen Verpackungen getrennt werden. Das geschieht in halb- oder vollautomatischen Sortieranlagen. Zuerst werden die großvolumigen Teile und die Folien ausgesondert. Die Folien werden in Windsichtern von Störstoffen getrennt und zu Ballen gepresst. Die störstoff- und folienfreien Wertstoffe gelangen danach meist zu einem Magnetscheider, der eisenhaltige Metallverpackungen herauszieht. Anschließend trennt ein Wirbelstromscheider Aluminium und aluminiumhaltige Verbunde heraus. In vielen Anlagen werden Aggregate zur automatischen Identifizierung und Aussonderung von Getränkekartons verwendet. Durch Bestrahlung mit Nahinfrarotlicht wird ein Erkennen mittels Computer ermöglicht, der dann das Ausblasen der entsprechenden Teile mit Druckluft steuert. Wird dieses Gerät vor dem Wirbelstromscheider platziert, werden an der Stelle auch die aluminiumhaltigen Verbunde ausgeblasen. Für die Trennung der Kunststoffe gibt es verschiedene Verfahren auf physikalischer oder optoelektronischer Basis, die entweder nach der Dichte (Schwere) der Kunststoffe trennen oder bei den moderneren Verfahren unter Nutzung der Nahinfrarottechnik teilweise auch nach Farbe sortieren können. Für das Recycling ist es wichtig, dass die sortierten Wertstoffe eine gleichbleibende und ausreichend hohe Qualität aufweisen. Um das zu gewährleisten, fordert das Duale System von seinen Vertragspartnern für jede Sortierfraktion einheitliche Qualitätsstandards. In ihnen sind die maximal zulässigen Störstoffanteile festgelegt.

Etwa zwei Drittel der Kunststoffverpackungen, die in den Gelben Säcken und Gelben Tonnen gesammelt werden, sind unterschiedliche, zumeist kleinteilige und verschmutzte Altkunststoffe, deren sortenreine Trennung zu aufwendig und kostenintensiv ist. Dieser Anteil wird in den Sortieranlagen ohne weitere Auftrennung als Mischfraktion erfasst. Um dieses Gemisch verwerten zu können, muss es in ein homogenes und rieselfähiges Schüttgut verwandelt werden, das sich gut transportieren, lagern und rohstofflich oder werkstofflich weiterverarbeiten lässt. Hierfür gelten definierte Qualitätskriterien bezüglich der Schüttdichte, der Korngröße, des Chlor- und Staubanteils und der Restfeuchte.

Diese Eigenschaften werden in verschiedenen Aufbereitungsschritten bei der Agglomeration erreicht, die technisch eine Kette von Zerkleinerungs- und Trennprozessen mit anschließender Kompaktierung des Materials bis auf eine Dichte von ca. 300 kg/m^3 [Lühr 1998] darstellt.

Für das Verdichten werden hauptsächlich zwei verschiedene Agglomerationsverfahren, die Topf- und die Matrizenagglomeration eingesetzt. Bei beiden Verfahren wird das Schüttgut weiter zerkleinert und komprimiert. Bei der Topfagglomeration führt das Zerkleinern mit Walzen oder Messern infolge von Reibungswärme bis zum teilweisen Aufschmelzen der Kunststoffanteile. Durch den Einsatz von Wasser wird die Masse gekühlt und erstarrt schlagartig. Die rotierenden Messer zerschlagen die Kunststoffmasse zu kompakten Körnern. Bei der Ringmatrizenagglomeration wird die zerkleinerte Kunststoffmasse mittels Druck durch Bohrungen einer Ringmatritze gepresst und von Messern zu Agglomerat zerschnitten.

Das Agglomerat (Abbildung 23 [DS-Service]) wird in den Aufbereitungsanlagen und weiterverarbeitenden Betrieben sowohl gelagert als auch transportiert. Bei beiden Prozessen sind eine Reihe von Selbsterwärmungen im Agglomerat beobachtet worden, die in mehreren Fällen zu Selbstentzündungen geführt haben.



Abbildung 23: Agglomerat aus Mischfraktion

3.2. Agglomerate

Die Agglomerate bestehen aus

- einem hohen Kunststoffanteil verschiedener Polymere,
- Anteilen von Papier und Zellulose,
- Folien aus Aluminium und
- Farbstoffen ehemaliger Beschriftungen sowie Klebstoffen.

Den Hauptanteil der zu Agglomerat verarbeiteten Mischfraktion bilden Altkunststoffe. Besonders hohe Anteile entfallen auf die Polyolefine Polyethylen und Polypropylen. Im Gemisch sind auch Polystyrol, PVC, Polyester oder Polyurethane enthalten.

Papier und Zelluloseverbindungen bilden eine weitere, wenn auch geringere Komponente des Agglomerates, während Aluminiumfolien und Farb- sowie Klebstoffe nur zu geringen Anteilen beteiligt sind.

3.2.1. Selbstentzündung von Agglomeraten

In seiner Arbeit führte [Lühr 1998] eine Vielzahl von Versuchen mit Kunststoffagglomeraten durch, welche den Nachweis erbrachten, dass diese zur Selbstentzündung neigen. Die in der Arbeit zusammengefassten theoretischen Grundlagen geben einen Überblick über die Möglichkeiten der Selbsterwärmung von Stoffen. Es werden die wesentlichsten Stoffparameter, die für die Beurteilung von Selbstentzündungen relevant sind, dargestellt und ihre Einflüsse beschrieben. Die getroffenen Schlussfolgerungen enthalten wichtige Maßnahmen, die zur Überwachung des Lagergutes und bei erfolgter Selbsterwärmung zur Einleitung der Brandbekämpfung notwendig sind.

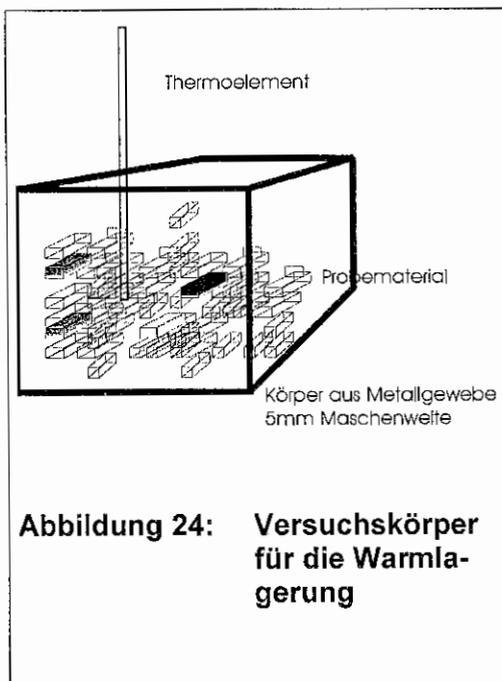
Die hier ausgeführten Arbeiten wurden auf die Untersuchungen von Agglomeraten der Firmen Rethmann GmbH & Co. KG, 44536 Lünen und LAUBAG, 03139 Schwarze Pumpe beschränkt. In beiden Betrieben waren in Lagerbunkern für Agglomerate durch Selbstentzündung Brände entstanden, die zu erheblichen Schäden führten. In beiden Fällen stellte die

Bekämpfung des Brandes im Schüttgut besondere Anforderungen an die Löschtaktik und das Löschmittel. Es wurde davon ausgegangen, dass auf eine Behandlung der Grundlagen zur Selbstentzündung in dieser Arbeit verzichtet werden kann, da auf die von [Lühr 1998] veröffentlichten Ergebnisse verwiesen wird.

Neben den Agglomeraten wurden auch eine Reihe weiterer Produkte in die Untersuchungen einbezogen. Es wurden Proben aus Getränkekartons aufbereitet und untersucht. Zusätzlich wurden Vergleichsuntersuchungen mit α -Zellulose und Aluminiumpulver durchgeführt.

Betrachtet man alle Komponenten, ist die Möglichkeit, dass die nichtschmelzende Zellstoff-faser die Matrix für Selbstentzündungsprozesse darstellt, am wahrscheinlichsten. Der Kunststoff Polyethylen dürfte an einer Selbstentzündung nicht beteiligt sein. Das Fehlen kohleartiger Produkte im Agglomerat lässt die Schlussfolgerung zu, dass bei dessen Aufbereitung die Temperaturen infolge Reibungswärme maximal 200°C erreichen können. Bei höheren Temperaturen würde sich der Zellstoffanteil zersetzen. Bei Temperaturen bis 200°C wird Polyethylen zwar geschmolzen, die Zersetzung beginnt aber erst bei Temperaturen > 360°C, bei denen die Zellulosefasern bereits umgesetzt wären. Für die Aluminiumfolie und die Farbpigmente dagegen lassen sich durchaus Reaktionsabläufe finden, die exotherm ablaufen und damit ihren Beitrag zur Selbstentzündung liefern können.

3.2.2. Warmlagerungsversuche



Die Warmlagerungsversuche wurden in einem Trockenschrank mit jeweils konstanter Temperatur über die Versuchszeit durchgeführt. Das Probematerial wurde in einen Drahtkorb eingebracht. So konnte die im Trockenschrank vorhandene Luft, welche nicht bewegt wurde, durch die Maschen des Drahtkorbes in das Probematerial diffundieren. Mit einem Thermoelement wurde die sich im Innern der Probe einstellende Temperatur gemessen. In Abhängigkeit von der vorgegebenen Raumtemperatur im Trockenschrank kam es bei einer bestimmten Temperatur in der Probe zur Selbsterwärmung. Am Beispiel der Warmlagerungsversuche mit Agglomeraten der Firma Rethmann wird die Reaktion der Proben bei unterschiedlichen Temperaturen verdeutlicht. In den Versuchen wurde je eine Probe als Trockenprobe eingesetzt. Die übrigen Proben wurden vor den Versuchen befeuchtet und mit ca. 30 % Feuchteanteil in die Probebehälter eingebracht.

Aus Abbildung 25 ist ersichtlich, dass bereits bei 120°C Raumtemperatur in der Probe eine exotherme Reaktion stattfand, die jedoch relativ schnell wieder abklang. Die Reaktion wurde nur bei feuchten Proben beobachtet. Die Temperatur der trockenen Probe wich nur geringfügig von der Ofentemperatur ab. In der Praxis kann eine derartige Temperatursteigerung in der Agglomeratschüttung aufgrund geringer Wärmeableitung bereits zur Zündung des Materials führen. Bei einer Lagertemperatur von 140°C (Abbildung 26) war die Zeit bis zum Erreichen des Temperaturmaximums der exothermen Reaktion deutlich geringer. Die thermische Überhöhung erreichte einen höheren Wert. Trotzdem kam die Reaktion langsam wieder zum Stillstand.

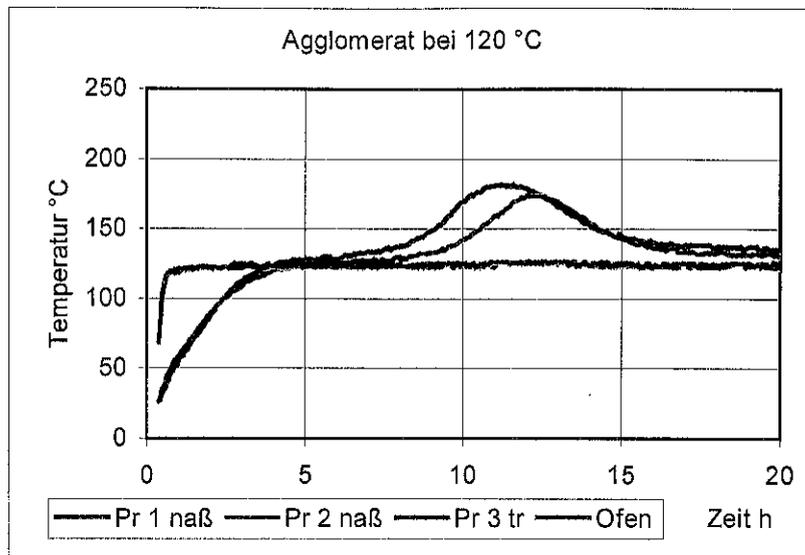


Abbildung 25: Warmlagerung von Agglomerat bei 120°C

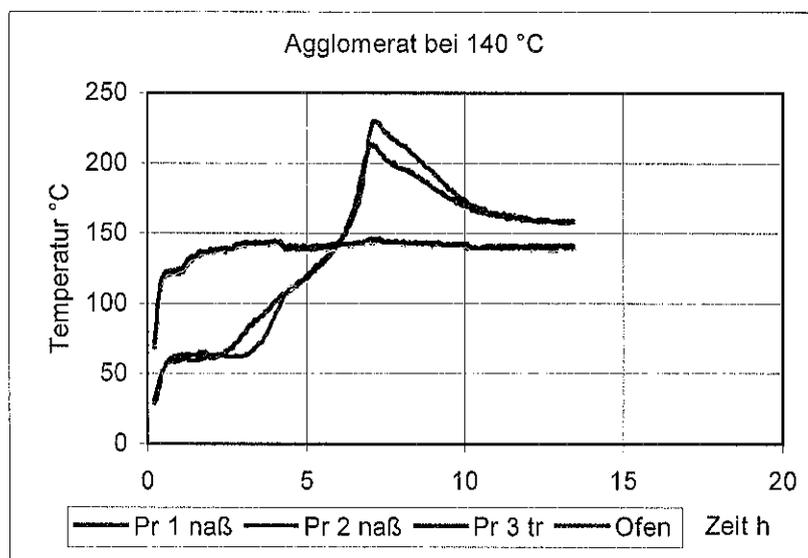


Abbildung 26: Warmlagerung von Agglomerat bei 140°C

In Fällen, in denen der tatsächliche Reaktionsablauf bekannt und als Einzelreaktion definiert ist, kann man durch Extrapolieren gegen eine unendliche Zeit die minimale Temperatur für die Selbstentzündung abschätzen. Dies ist nicht mehr möglich, wenn mehrere nacheinanderfolgende Reaktionen die Selbstentzündung bestimmen.

Aus Abbildung 27 ist ersichtlich, dass auch die Trockenprobe eine exotherme Reaktion aufwies, die jedoch wieder abklang. Die beiden feuchten Proben erreichten dagegen die Glimmtemperatur des Zellstoffes, weshalb die Warmlagerung infolge der Freisetzung von Pyrolyseprodukten abgebrochen werden musste. Offensichtlich wurde bei den feuchten Proben nach dem Verdampfen des Wassers die Adsorption von Gasen und Dämpfen an den Oberflächen möglich. Da diese Reaktion exotherm abläuft, könnte sie ein Grund für das Wärmeaufkommen im Temperaturbereich über 100°C sein. Gleichzeitig wird damit deutlich, dass mehrere bei bestimmten Temperaturen aufeinanderfolgende Reaktionen den Selbstentzündungsprozess charakterisieren und bei höheren Ausgangstemperaturen auch das trockene Material in den Reaktionsablauf einbezogen wird.

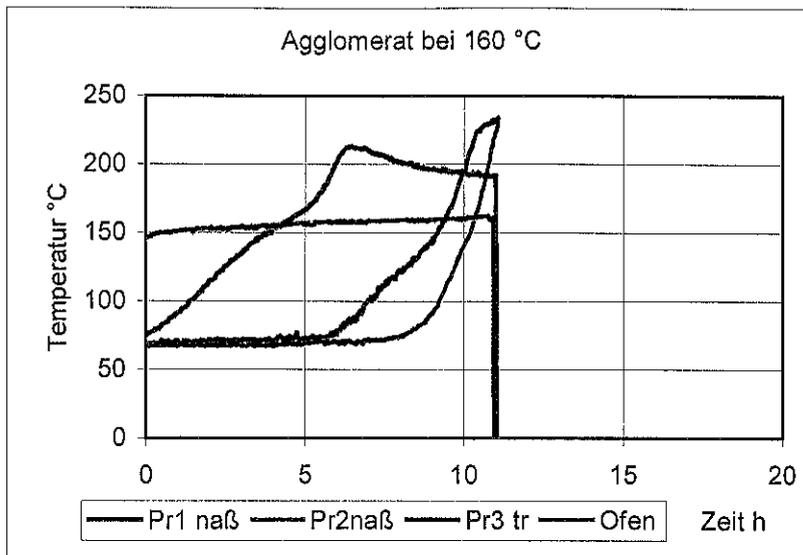


Abbildung 27: Warmlagerung von Agglomerat bei 160°C

Die Untersuchungen weisen den Beginn von exothermen Reaktionen in den Proben weit unterhalb der Temperatur nach, bei welcher ein Glimmbrand entstehen kann. Eine Temperaturerhöhung in der Probe ist nur durch das Ablaufen einer exothermen Reaktion denkbar. Die Entwicklung bis zu einem Glimmbrand ist davon abhängig, ob die Energieproduktion in der Probe den Energietransport aus dem System an die Umgebung übersteigt. Sowohl die Energieerzeugung durch exotherme Reaktion als auch der Wärmetransport aus der Probe sind durch eine Reihe von Randbedingungen bestimmt, deren fördernde bzw. behindernde Wirkungen schließlich zum Temperaturanstieg in der Probe führen.

Wesentliche Randbedingungen sind:

- für die Energieproduktion:
 - Temperatur des Materials
 - Reaktionsfähigkeit des Materials
 - Partialdruck des Sauerstoffes am Ort der Reaktion
 - Schüttdichte
- für den Energietransport:
 - Wärmeleitfähigkeit des Materials in seiner speziellen geometrischen Form
 - Strömungsverhältnisse der Luft im Material
 - Strömungsverhältnisse im Lagerraum
 - Probenvolumen
 - Umgebungstemperaturen
 - Feuchte des Materials
 - Porosität des Materials

Das Optimieren einzelner Bedingungen zum Festlegen der Temperatur, bei der eine Selbstentzündung in der Praxis weitestgehend ausgeschlossen werden kann, erfordert eine Vielzahl einzelner Untersuchungen. Einige Parameter bedingen und beeinflussen sich gegenseitig. Trotzdem wird es immer eines Sicherheitsfaktors bedürfen, um in Lagern eine Selbstentzündung auszuschließen.

In Lagerbunkern können sich bedingt durch die großen räumlichen Abmessungen durchaus Volumenelemente im Lagergut herausbilden, in denen näherungsweise adiabatische Verhältnisse mit ausreichendem Sauerstoffangebot auftreten. Somit ist der Beginn von exothermen Reaktionen bereits bei niedrigem Temperaturniveau denkbar. Für Untersuchungen sollten höhere Temperaturen und eine zeitliche Begrenzung ausreichen, um die Neigung der Proben zur Selbstentzündung zu beurteilen. Im vorliegenden Fall wurden alle Proben, die bei der Warmlagerung bei Temperaturen über 120°C durch einen Temperaturanstieg im Material eine thermische Reaktion erkennen ließen, als zur Selbstentzündung neigend eingestuft.

3.2.3. Adiabatisches Kalorimeter

Das adiabatische Kalorimeter der Firma Hazard Evaluation Laboratory Limited ermöglicht die Warmlagerung kleiner Proben unter nahezu adiabatischen Verhältnissen. Die zur Reaktion erforderliche Luft kann der Probe vorgeheizt und exakt dosiert zugeführt werden. Mit dieser Apparatur können Warmlagerungen bei einer konstanten Umgebungstemperatur (Einstufentest) oder mit zeitlich differenziertem Temperaturprogramm (Mehrstufentest) ausgeführt werden.

Zur Untersuchung im Einstufentest wird die Probe in einem Probegefäß mit einem Volumen von 125 cm³ bei konstanter Temperatur belassen. Die Temperaturkonstanz wird durch mehrere Heizungen unterschiedlicher Leistung und eine gute Isolation des Probebehälters garantiert. Zur Optimierung der Reaktionsbedingungen können Luft oder ein beliebiges anderes Gas mit variabler Geschwindigkeit in die Probe eingeführt werden. Das Gas wird vor dem Eintritt in das Probegefäß vorgeheizt, so dass bei Durchströmen der Probe praktisch kein Energieverlust auftritt. Die geringe Probemenge lässt die exotherme Reaktion erst bei höheren Temperaturen sichtbar werden. Im vorliegenden Fall konnten erst bei Lagerungstemperaturen von 160°C thermische Überhöhungen in den Proben nachgewiesen werden.

In Anlage 3 sind die grafischen Auswertungen der Versuche zusammengestellt. Die bei der Warmlagerung der Proben in Drahtkörben bereits festgestellte Neigung zur Selbstentzündung konnte durch die Versuche unter adiabatischen Bedingungen bestätigt werden. Die Feuchtigkeit in der Probe bewirkte in allen Fällen einen steileren Temperaturanstieg über die isotherme Temperatur des Versuchsraumes hinaus. Die Maximaltemperatur wurde höher und in kürzerer Zeit erreicht. Die nachfolgende Tabelle 5 beinhaltet die wesentlichen Ergebnisse der Versuche.

Tabelle 5: Kalorimeterversuche

Probe Nr.	Produkt	Selbstentzündungsneigung
1	Agglomerat Rethmann	ja
2*	Kunststoffkompaktat (Siloanlage)	ja
3*	Kunststoffkompaktat (Kompaktieranlage)	ja
4*	Kunststoffkompaktat Rollies	ja
5*	Brennstoff aus Müll (Pellets)	nein
6*	Schredderleichtgut	ja
7*	Staub Müllaufbereitung	nein
8	Getränkekarton	ja
9	α-Zellulose	nein

* Produkte der LAUBAG

3.2.4. Klärung der Ursachen für die Selbstentzündung

Zur Klärung der möglichen Ursachen für die Selbstentzündung der Agglomerate wurden die Versuchsbedingungen zunächst im Hinblick auf eine mögliche Reaktion des im Agglomerat enthaltenen geringen Aluminiumanteils orientiert. Da Aluminium im sauren und basischen Milieu reagiert, wurde ein Teil der feuchten Proben angesäuert bzw. alkalisch eingestellt. Ein anderer Teil der Proben wurde vor der Warmlagerung 2 h in 1n Salzsäurelösung gekocht, um das vorhandene Aluminium vollständig zu oxidieren. Die Proben zeigten unabhängig von der sauren oder basischen Reaktion bzw. der vorher bereits erfolgten Oxidation des Aluminiums keine Veränderungen in ihrer Neigung zur Selbstentzündung.

Um Aluminium als Ursache für die Neigung zur Selbstentzündung sicher auszuschließen, wurden weitere Untersuchungen mit reiner α -Zellulose als Material durchgeführt. In die Zelluloseproben wurde frisch gemahlene Aluminiumpulver eingebracht. Es wurden verschiedene Proben mit feuchtem Material bei pH-Werten von 4 und 11 untersucht. Bei keinem dieser Versuche war eine Neigung zur Selbstentzündung zu erkennen.

Aus diesen Gründen wurde ein verfügbares Material gesucht, welches in ausreichender Menge sowohl Anteile Aluminiumfolien als auch das Material, mit dem die Beschriftungen erfolgen, aufweist und bei dem diese Anteile voneinander trennbar waren. Es wurde vorausgesetzt, dass die Aluminiumfolien und Beschriftungen der Getränkekartons auf gleicher Basis hergestellt werden, wie bei den Mischkunststoffen der Agglomerate. Deshalb wurden als Ausgangsmaterial für weitere Untersuchungen Getränkekartons verwendet. Um hier weitere Ergebnisse zu bekommen, wurde das Material in eine

- Schicht aus PE-Folie mit Farbschicht und einem geringen Teil Zellstofffaser,
- Schicht aus Zellstofffaser,
- Schicht aus PE-Folie mit Aluminiumfolie, Kaschiermittel und einem geringen Teil Zellstofffaser getrennt.

Mit diesen Materialien wurden weitere Versuche vorgenommen.

Nach der Trennung der Mittelschicht von Ober- und Unterschicht (Außen- und Innenschicht), die erhaltene Probe bestand vorwiegend aus Zellulosefasern und ließ zumindest rein visuell keine anderen Bestandteile erkennen, wurde an dieser Probe keine Neigung zur Selbstentzündung festgestellt.

Zur weiteren Eingrenzung der Agglomeratbestandteile, die eine Selbstentzündung verursachen könnten, wurde von Ober- und Unterschicht der Getränkekartons zusätzlich noch die PE-Folie entfernt. Die Untersuchungen der Proben ohne PE-Folie zeigten folgendes Ergebnis: Die Oberschicht besaß ohne Folie eine sehr ausgeprägte Neigung zur Selbstentzündung. Die Unterschicht zeigte eine deutlich geringere Reaktionsfähigkeit. Die Neigung zur Selbstentzündung konnte aber auch hier nachgewiesen werden. Somit lässt sich schlussfolgern, dass offensichtlich die exothermen Reaktionen durch die Pigmentträger der verwendeten Farben oder durch die verwendeten Kaschiermittel in Verbindung mit der Zellstofffaser ausgelöst werden können. Aufgrund der ungenügenden Informationen zu den industriell verwendeten Produkten aus der Palette der Farb- und Kaschiermittel wurde die Untersuchungsreihe an dieser Stelle abgebrochen.

3.2.5. Schlussfolgerungen zur Selbstentzündung von Agglomeraten

- Die Untersuchungsergebnisse belegen mit hoher Wahrscheinlichkeit, dass Agglomerate zur Selbstentzündung neigen. Die Neigung zur Selbstentzündung wird durch Feuchtigkeitsanteile im Agglomerat gesteigert.
- Warmlagerungsversuche in offenen Behältern (Drahtkörbe) zeigten, dass eine Reaktion bereits bei 120°C einsetzen kann. Berücksichtigt man den Einfluss des Probevolumens auf die Anfangstemperatur der Reaktion, kann aus diesen Versuchen das Einsetzen exothermer Reaktionen bereits im Bereich von ca. 100°C nicht ausgeschlossen werden.
- Die Initiierung der Reaktion im Temperaturbereich unter 100°C wurde nicht untersucht, weil einerseits ausreichend biologisch abbaubares Material für exotherme Reaktionen aus Lebensprozessen von Mikroorganismen vorhanden ist und deren möglicher Anteil an Erwärmungen von Stoffen im Bereich bis 100°C durch Untersuchungen von [Lühr 1998] belegt ist. Das Entstehen von Wärme aus biologischen Prozessen ist unter den vorhandenen Bedingungen bis zur einer Temperatur von maximal 100°C möglich. Dieser Prozess ist direkt an das Vorhandensein von hohen Feuchtigkeitsanteilen gebunden, welche die Lebensfähigkeit der Bakterien und Pilze erst garantieren. Er kann durch das Einhalten von Grenzwerten für die Feuchtigkeit und die Temperatur im Material sicher ausgeschlossen werden.
- Eine andere Möglichkeit für die Initiierung der Reaktion im unteren Temperaturbereich kann die im Material gespeicherte Restwärme aus dem Agglomerationsprozess selbst sein, die infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit des Materials und ungenügender Wärmeaustauschmöglichkeiten im Material verbleibt. Da während des Verarbeitungsprozesses die Kunststoffanteile anschmelzen, liegen die örtlich erreichbaren Temperaturen deutlich über 100°C. Der Gehalt an Feuchte kann andererseits örtlich begrenzte Temperaturen über 100°C nicht ausschließen.
- Die Selbstentzündung von Agglomeraten bei Temperaturen über 100°C ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die im Agglomerat enthaltenen Farbanteile und Trägermaterialien zurückzuführen. Ein gesicherter Nachweis, welche Einzelkomponenten welche Reaktionen tragen, konnte aufgrund nicht ausreichender Informationen über verwendete Farbstoffe, Trägermaterialien u.ä. nicht geführt werden. Das würde auch den Rahmen der Aufgabenstellung deutlich überschreiten. Dieser Nachweis sollte im Bereich der Verpackungsmittelindustrie geführt werden.
- Für eine künftige Sicherung der Lagerbunker und der Transportmittel für Agglomerate vor Bränden aus Selbstentzündungsprozessen ist die Überwachung der Parameter Temperatur und Feuchtigkeit im Agglomerat unmittelbar nach seiner Herstellung und vor seiner Einlagerung in Transport- oder Lagerbehälter erforderlich. Die Grenzwerte sollten für die Temperatur bei 50°C und für die Feuchtigkeit bei 30 % rel. Feuchte liegen. Feldmessungen für die Temperatur sollten erfolgen.

4. Dreidimensionale Brandobjekte und Oberflächenlöschmittel

4.1. Brandentwicklung und Brandausbreitung

Der Großbrand von Miesbach 1996 [Kindler, Muhs 1996] verdeutlichte eindrucksvoll, dass den bisherigen Auffassungen zur Ausbreitung von Bränden sehr einfache Modellvorstellungen und auch Experimente zugrunde lagen. In der einschlägigen Literatur veröffentlichte Ausbreitungsgeschwindigkeiten für brennbare Stoffe stellen in der Regel Werte dar, die unter definierten Bedingungen aus Experimenten abgeleitet wurden. Diese Experimente wurden vorzugsweise im Freien oder in Räumen unter definierten Zu- und Abluftverhältnissen ausgeführt [Demidov 1970].

Die veröffentlichten Werte zur Brandausbreitung geben in der Mehrzahl einen mittleren Wert für die lineare Ausbreitung einer Flamme auf einem ebenen Brandstoff oder einer Anordnung des Brandstoffes in waagerechter Richtung an. Jede Änderung der Lage des Brandstoffes im Raum und jede Wechselwirkung mit anderen Brandflächen bedingt eine Veränderung der Werte für die Brandausbreitungsgeschwindigkeit. Senkrechte Brandflächen müssen aufgrund des zusätzlich vorhandenen Wärmeüberganges durch Konvektion bei freier Ausbildung der Strömungsrichtung für die Abgase und die Zuführung von Luftsauerstoff zwangsläufig die besten Voraussetzungen für die Brandausbreitung besitzen [Brein 1985].

Wird die Brandentwicklung an einer senkrechten Fläche durch eine gegenüberliegende Fläche beeinflusst, die ebenfalls an der Verbrennung beteiligt ist, die heißen Rauchgase können ungehindert abziehen und der Flamme wird innerhalb des Spaltes Luft in ausreichender Menge zugeführt, so erreicht die Verbrennung optimale Bedingungen. Die Flammenausbreitung verläuft dann nicht mehr linear, denn ihre Geschwindigkeit wird durch die Rückwirkung von Konvektion und Strahlung beeinflusst und beschleunigt. Im Extremfall könnte die Flammenausbreitung Geschwindigkeiten vorgemischter Gase erreichen. Damit kann die Brandausbreitungsgeschwindigkeit normale Werte, die bei waagerechter Anordnung gemessen wurden, um ein bis zwei Zehnerpotenzen übersteigen. Die nachfolgende Tabelle 6 ist ein Auszug aus den in Arbeitshinweisen Feuerwehr [Arbeitshinweise 1976] fixierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

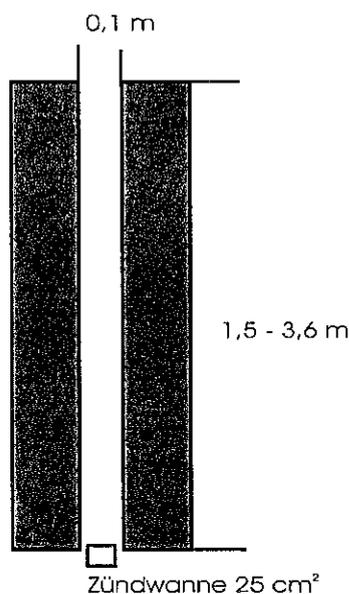
Tabelle 6: Lineare Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Brandgut	Brandlast kg/m ²	lineare Ausbreitungsgeschwindigkeit m/min
Holzstapel in Lager		0,35 – 0,7
Holzbretter (2 – 4 cm dick) gestapelt bei einer rel. Feuchte von		
8 – 12 %		4,0
16 – 18 %		2,3
18 – 20 %		1,6
20 – 30 %		1,2
Rundholzstapel, rel. Feuchte 30 %		0,03 - 0,7
Textilien in geschlossenen Lagern	bis 100	0,33
Papierrollen in geschlossenen Lagern	140	0,27
Kautschuk in geschlossenen Lagern	290	0,4
Grasbrand, dichte Decke, trockenes Wetter, starker Wind		400 - 500
Grasbrand, niedriger Bewuchs, Windstille		16 - 17
Dächer von Werkhallen		1,7 - 3,2
Gummierzeugnisse im Freien		1,1
Wohn- und Geschäftshäuser mit Möbeln		1 - 1,2
Kiefern- und Fichtenwald		max.14 bis 18

Experimentell ermittelte Werte der Brandausbreitungsgeschwindigkeit können nur bei Kenntnis der zugrunde liegenden Randbedingungen mit ausreichender Sicherheit genutzt werden.

Bei der Untersuchung einer Brandentstehungsursache an einem Kautschuktrockner wurden durch [Pleiß, Steinbach 1987] die Brandausbreitungsgeschwindigkeiten von lose gelagerten Rohkautschukteilchen in einem Versuchsobjekt ermittelt. In der ersten Untersuchung wurden die Rohkautschukteilchen auf einer Streckmetallunterlage gleichmäßig verteilt und mit einer Zündflamme gezündet. Die gemessene lineare Brandausbreitungsgeschwindigkeit über die waagerechte Fläche der Kautschukschüttung betrug im Freien 0,18 - 0,27 m/min. Im nachgebauten Modell des Trockners wurden am gleichen Material Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 0,35 - 0,5 m/min erreicht. Schließlich wurde auch noch die Luftführung im Modell den realen Verhältnissen angepasst. Mit einer Geschwindigkeit von ca. 8 m/s wurde die Luft von unten durch die Kautschukschüttung gedrückt und an beiden Seiten des Siebes in die Lüfter des Trockners zurückgeführt. Unter diesen Bedingungen wurde nach der Zündung des Kautschuks mit offener Flamme eine sich beschleunigende Brandausbreitung beobachtet, die auf der waagerechten Schüttung einen Maximalwert von 6,5 m/min erreichte.

Geht man davon aus, dass sich eine Flamme in einem stöchiometrischen Gemisch eines gasförmigen brennbaren Stoffes mit Luft mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 m/s ausbreiten kann [Lewis, v. Elbe 1961], dann wird deutlich, in welchen Grenzen die Brandausbreitungsgeschwindigkeiten an festen Oberflächen je nach Massestrom der aufbereiteten Gase und Dämpfe, welche die kondensierte Phase verlassen, zu sehen sind. Eine Prognose der Brandausbreitung an senkrechten Flächen gelagerter Feststoffe ist von allgemeinem Interesse und sollte auch im Hinblick auf die Ereignisse in Miesbach verbessert werden.



Es wurden deshalb Versuche mit zwei Stapeln brennbarer Materialien durchgeführt, zwischen denen ein langer senkrechter Spalt mit einer Breite von 0,1 m verlief, (Abbildung 28). Die Zündung erfolgte am Boden des Spalts mit offener Flamme. Die brennbaren Materialien bestanden aus Verpackungskarton, mit PE-Folie von 0,5 mm Stärke umhüllter Verpackungskarton und mit PE-Granulat gefüllter Verpackungskarton. Die drei Versuchsserien sollten Unterschiede in der Brandausbreitung durch stoffliche Einflüsse (Karton / PE) und durch die vorhandene Brandlast mit ihrer Auswirkung auf das Standvermögen des Versuchsaufbaus erfassen. Zur Ermittlung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit wurde der zeitliche Versuchsaufbau mit einer normalen Videokamera aufgenommen. Anschließend wurden die Einzelbilder des Videos digitalisiert.

Abbildung 28: Versuchsanordnung Brandausbreitung

An Hand der Einzelbilder konnte eine zeitliche Zuordnung der jeweiligen Flammenlängen erfolgen. Die sich im Spalt einstellenden Flammentemperaturen wurden mit Thermoelementen gemessen. An der Oberkante des Spalts wurde mit einem Staurohr die Gasgeschwindigkeit erfasst, deren Temperaturabhängigkeit rechnerisch mit der Temperatur am Staurohr korrigiert wurde. Die Ergebnisse der Temperatur- und Geschwindigkeitsmessungen sind in Anlage 3 enthalten. Die nachfolgenden Abbildungen 29-31 zeigen eine Brandentwicklung, die typisch ist für die Anordnung der Materialien dieser drei Versuchsreihen. Bildausschnitte der Einzelbilder des digitalisierten Videofilms im Diagramm aneinandergereiht zeigen ausschließlich die Flammen im Spalt.

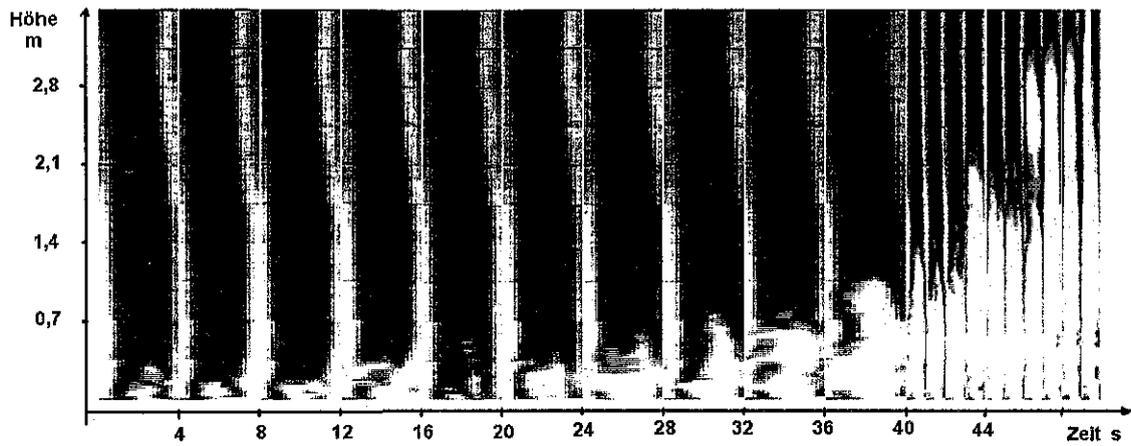


Abbildung 29: Brandausbreitung in einem Spalt bei Verpackungskarton

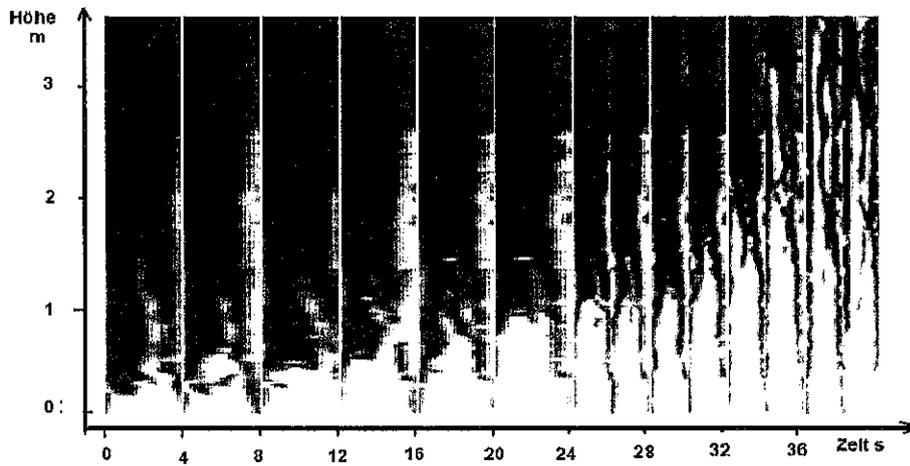


Abbildung 30: Brandausbreitung in einem Spalt bei Verpackungskarton mit PE-Folie

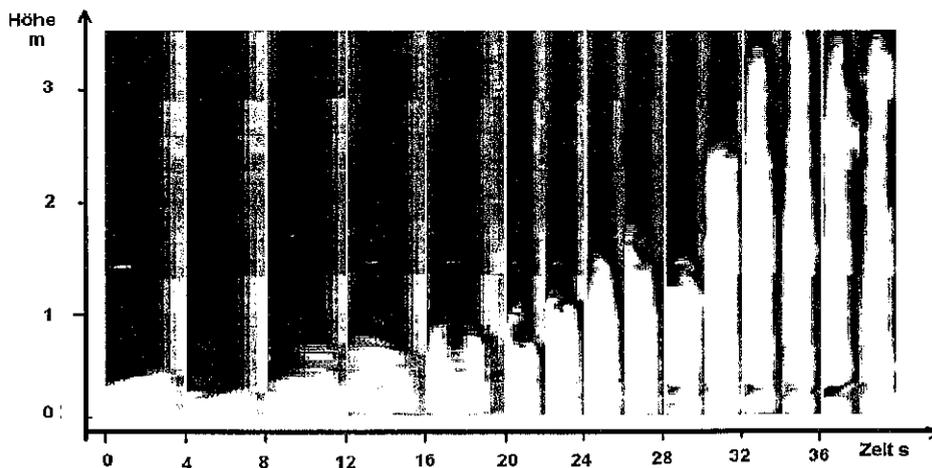


Abbildung 31: Brandausbreitung in einem Spalt bei Verpackungskarton mit PE-Füllung

Es wird deutlich, dass bei den verschiedenen Materialien praktisch nur geringe Unterschiede in der Brandausbreitung bestehen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten entwickelten sich exponentiell, wobei die Anfangsphase unterschiedlich lang war. Bei den Versuchen wurden in der Endphase der Brandausbreitung Geschwindigkeiten von 0,1 - 0,3 m/s erreicht. Da während der Ausbreitung in der letzten Phase die Beschleunigung so extrem war, konnte man nur für den Gesamtteil mit deutlichem Kurvenanstieg eine Abschätzung treffen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten ergaben für diesen Teil der Kurve Werte bis 6 m/min.

Zwischen diesen experimentell ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf senkrechten Flächen in Spalten mit einem Abstand von 0,1 m und den in Tabelle 6 zusammengestellten Werten für lineare Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf waagerechten Flächen von Brandstoffen oder deren definierten dreidimensionalen Objekten dürften sich die Brandausbreitungsgeschwindigkeiten im Realfall bewegen. Je nach Lage der Fläche und der jeweiligen Beeinflussung durch die Umgebung wird sich örtlich eine definierte Geschwindigkeit einstellen. Zum Abschätzen einer gerichteten Brandausbreitung in einem 3D-Brandobjekt können diese Grenzwerte herangezogen werden.

In der bereits erwähnten Anfangsphase kann sich die Brandentwicklung in Größenordnungen voneinander unterscheiden. In dieser Phase der beginnenden Brandausbreitung bewirkt die vorhandene offene Flamme eine thermische Aufbereitung des vorhandenen Materials. Da die Energie der Flammen im Wesentlichen durch die Konvektion der Rauchgase an die senkrechten Flächen übertragen wird und die kleine Flammenfläche durch Wärmestrahlung nur im Nahbereich wirksam wird, erfolgt zunächst ein langsames Vorheizen der Flächen. In dieser Vorheizphase verdampft die Feuchtigkeit des Brandstoffes und er wird schrittweise bis zu seiner Zersetzung aufgewärmt. Da erst mit der Zersetzung ausreichend gasförmiger Brandstoff für die Flamme zur Verfügung steht, bleibt die Flamme bis zu diesem Zeitpunkt klein. Die Zündung der Pyrolyseprodukte vergrößert die Flamme und somit auch den Rauchgasvolumenstrom. Auf dieser Grundlage erfolgt die Selbstbeschleunigung der Reaktion.

Die thermische Aufbereitung des Brandstoffes ist durch stoffliche Parameter wie Verdampfungs- oder Zersetzungsenthalpie, Zersetzungs- oder Siedetemperatur, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit aber auch durch den Gehalt an Feuchtigkeit, die Temperatur- und Strömungsverhältnisse u.a. beeinflusst. Somit müssen gerade in der Phase der thermischen Aufbereitung bei verschiedenen Bränden auch zeitliche Abweichungen der Brandentwicklung auftreten. Ist aber die thermische Aufbereitung abgeschlossen, dann wird die Brandausbreitung durch die sich einstellenden stationären Bedingungen beeinflusst und die beobachteten Größenordnungen des Abbrandes werden erreicht.

Bei großen Brandversuchen in Lageranordnungen stellten sich bezüglich der Brandausbreitung ähnliche Verhältnisse ein [Pleß, Seliger 2000]. Die Brandstoffe in Block- oder Regallagerung wurden ebenfalls durch eine offene Zündflamme in der Mitte eines Spaltes gezündet. Der im Versuch nachgebildete Lagerblock bestand aus vier Stapeln mit jeweils 3,5 übereinandergestellten Paletten. Die Stapel erreichten eine Höhe von 6,2 m. Zwischen den Stapeln wurde jeweils ein Abstand von 0,1 m zum benachbarten und gegenüberliegenden Stapel eingehalten. Nach einer entsprechenden Anlaufphase der Brandentwicklung, in der die thermische Aufbereitung des Brandgutes (Kartons mit einer Füllung aus PE-Granulat) erfolgte, konnte analog zu vorgenannten Versuchen eine steigende Beschleunigung der Brandausbreitung beobachtet werden. Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt zeitlich zugeordnet Einzelbilder von der Brandausbreitung im senkrechten Spalt zwischen den Palettenstapeln, die mit Hilfe einer Thermokamera beobachtet und aufgezeichnet wurde.

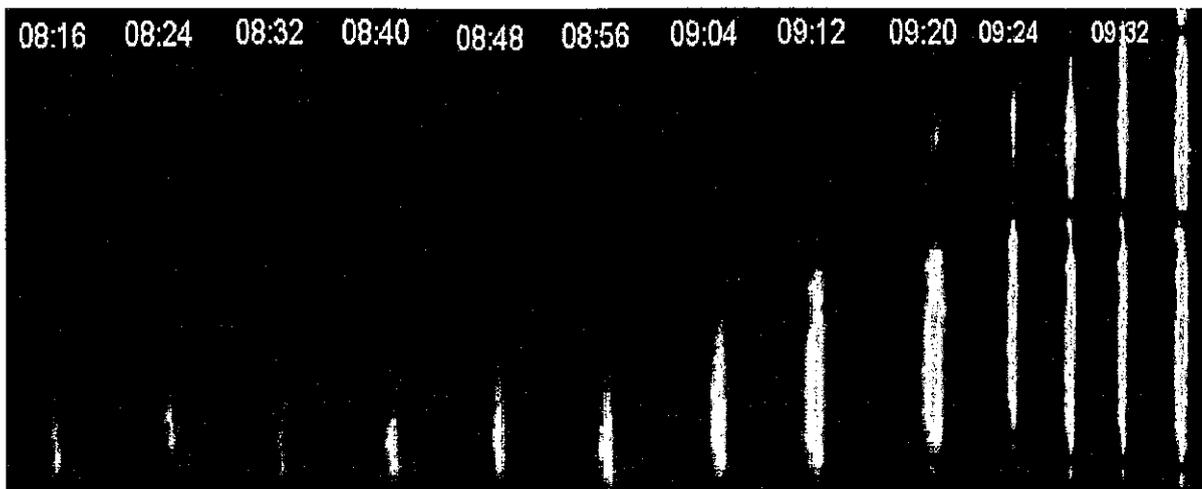


Abbildung 32: Brandausbreitung im Spalt bei einem Großversuch im Blocklager

In dieser Phase der Brandentwicklung hatte der Palettenstapel einen Masseabbrand von ca. 10 - 15 kg/min. Der Masseverlust betraf vor allem das Verpackungsmaterial. Im Thermogramm ist über der Flamme auch deutlich die Zone des Rauchgases erkennbar, welche insbesondere in der Brandentstehungsphase für die Aufbereitung des brennbaren Stoffes sorgt. Zur Charakterisierung der Brandentwicklung in dreidimensionalen Objekten wurden in einer Teilaufgabe zu dieser Arbeit Simulationsrechnungen zum Erklären grundsätzlicher Wirkungen ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind von [Kutz 2001] in einem gesonderten Teil dieses Berichtes dargestellt.

4.2. Abbrandraten

Die geometrische Anordnung des Brandgutes in einem dreidimensionalen Brandobjekt hat einen direkten Einfluss auf den Stoffübergang aus der Brandgutoberfläche in die Gasphase. Der flächenbezogene Stoffübergang wird meist als Abbrandrate bezeichnet, korrekter ist aber der Begriff Stoffübergangsrate. Dieser Begriff schließt je nach Art des Stoffüberganges die Begriffe Pyrolyserate, Zersetzungsrate oder Verdampfungsrates ein.

Da es praktisch nicht möglich war, reproduzierbare Brandflächen mit Materialien des DSD so herzustellen, dass sich während der Verbrennung über einen ausreichend langen Zeitraum nahezu unverändert stabile Brandverhältnisse einstellen, musste bei diesen Versuchen auf nichtschmelzbares Material zurückgegriffen werden. Die Versuche wurden deshalb an Holzkrippen ausgeführt. Ausgangspunkt für die Bewertung der Stoffübergangsrate waren die bisherigen Untersuchungen an Holzkrippen, die zu der Aussage geführt haben, dass eine Holzkrippe die günstigsten Abbrandbedingungen und damit die höchste Abbrandrate aufweist, wenn der Abstand der quadratischen Holzstäbe in der Krippe das 1,5-fache der Seitenlänge des Stabquerschnittes beträgt. Bei dieser Anordnung können alle Oberflächen direkt am Brand teilnehmen und erhalten auch eine ausreichende Rückstrahlung für die weitere Zersetzung des Brandstoffes.

Für die Untersuchungen wurden quadratische Holzstapel mit einer Kantenlänge von 0,5 m und einer Höhe von 0,32 m ausgewählt. Die Holzstapel bestanden aus einer jeweils unterschiedlichen Anzahl von Holzstäben mit 0,5 m Länge und einem quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von 0,04 m, die in 8 Ebenen gestapelt wurden. Wurde die Anzahl der Holzstäbe erhöht, nahm die Stapeldichte zu. Das führte zur Vergrößerung der inneren Oberfläche und zur Verkleinerung des Abstandes der Flächen zueinander. Anlage 5 enthält die grafischen Auswertungen der Versuchsergebnisse zur Brandentwicklung und zu den Stoffübergangsrates.

Obwohl mit zunehmender Stapeldichte die Brandfläche (Gesamtoberfläche der Holzstäbe) vergrößert wurde, verringerte sich die Stoffübergangsrate. Dadurch ergaben sich bei gleicher Grundfläche des Stapels und gleichen Abmessungen der Holzstäbe eine Verringerung des auf die Brandfläche bezogenen Stoffstromes. Der Zusammenhang zwischen Massestromdichte und Brandfläche wurde in Abbildung 33 näherungsweise als linearer Trend dargestellt.

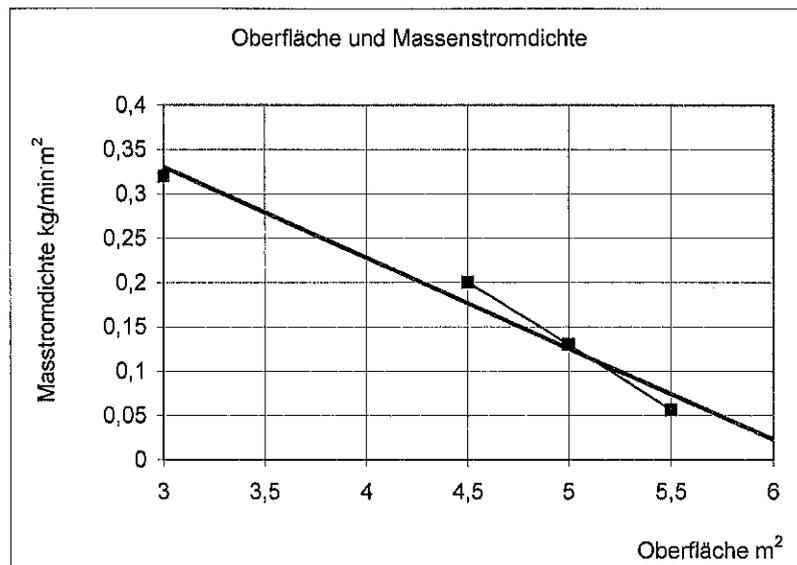


Abbildung 33: Abhängigkeit der Stoffübergangsrate von der Brandfläche bei konstanter Stapelgröße

Aus Anlage 5 wird deutlich, dass in Stapeln höherer Packungsdichte der Vollbrand später erreicht wurde als in lichterem Stapeln, auch die Temperaturen zeigten in der Phase des vollentwickelten Brandes niedrigere Werte. Ursachen für die längere Brandentwicklungszeit und Vollbranddauer sind die geringeren Energieströme, die bei dichterem Packung auf die Oberflächen einwirken können. Die Werte können nur den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Brandstoffoberfläche und Massestromdichte verdeutlichen.

Es ist jedoch zu beachten, dass bei Verwendung von Holzstäben mit anderen Maßen und anderen geometrischen Anordnungen stets ein anderes Verhältnis zwischen Brandstoffvolumen und Gesamtvolumen bestehen muss, bei dem ein maximaler Stoffstrom im Brandfall erreicht wird.

4.3. Benetzen von Oberflächen

Die Effizienz der Brandbekämpfung mit Oberflächenlöschmitteln wird u. a. von dem Wärmeübergang zwischen dem Einzeltropfen und der Phasengrenzfläche bestimmt. Liegt die Temperatur einer Phasengrenzfläche unter der Leidenfrost-Temperatur, kann sie mit Wasser benetzt werden. In diesem Fall ist die Oberflächenspannung des Wassers ein wichtiger Parameter für den Benetzungsvorgang und damit für das Ausbilden der effektiven Wärmeaustauschfläche Wasser / brennbarer Stoff.

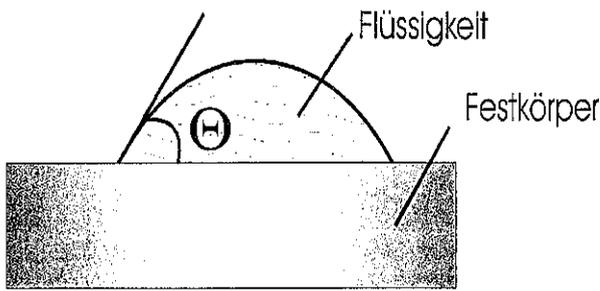


Abbildung 34: Kontakt eines Tropfens mit einer festen Phase

Wird eine Flüssigkeit auf einen festen Körper aufgegeben, so bildet sich beim Benetzen der festen Phase ein linsenförmiger Flüssigkeitstropfen an deren Oberfläche, wie Abbildung 34 zeigt. Der Randwinkel Θ ist das Ergebnis der Wirkungen der Oberflächenspannung des Tropfens, der Oberflächenspannung des Feststoffes und der Grenzflächenspannung Flüssigkeit / Feststoff am Tropfen. Die Benetzungsspannung kann nach Gleichung 6 berechnet werden.

$$\sigma_B = \sigma_{Sg} - \sigma_{Sl} = \sigma_{Lg} \cdot \cos \Theta \quad (6)$$

mit:

σ	Oberflächen- oder Grenzflächenspannung	und den Indizes:
Θ	Randwinkel	B Benetzung
		S Feststoff
		L Flüssigkeit
		g Gasphase
		l Flüssigphase

Aus Gleichung 6 geht hervor, dass die Benetzungsspannung durch eine Randwinkelmessung quantitativ bestimmt werden kann, weil die Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ_{Lg} messtechnisch leicht zugänglich ist. Die Gleichung zeigt weiterhin, dass infolge der Variation der numerischen Werte des Randwinkels die Benetzungsspannung sowohl positiv als auch negativ sein kann. Dabei treten folgende Grenzwerte auf:

- Bei einem Randwinkel $\Theta < 90^\circ$ ist $\cos \Theta > 0$ und damit die Benetzungsspannung positiv. Der Festkörper wird durch die Flüssigkeit benetzt.
- Bei einem Randwinkel $\Theta = 0^\circ$ gilt $\cos \Theta = 1$ und der Festkörper wird durch die Flüssigkeit vollständig benetzt. Die Flüssigkeit breitet sich als dünner Film auf der Oberfläche aus. Dieser Vorgang wird Spreitung genannt.
- Bei einem Randwinkel $\Theta = 180^\circ$ gilt $\cos \Theta = -1$. Es tritt der Fall absoluter Unbenetzbarkeit ein.
- Bei einem Randwinkel $\Theta > 90^\circ$ gilt $\cos \Theta < 0$. Die Benetzungsspannung wird negativ. Der Festkörper wird nicht oder nur unvollständig durch die Flüssigkeit benetzt.

Das Benetzen einer Feststoffoberfläche ist aber grundsätzlich nicht nur dann möglich, wenn die Flüssigkeit noch nicht siedet, sondern auch weit oberhalb des Siedepunktes. Die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit ist zwar temperaturabhängig, sie bleibt aber bis in die Nähe der kritischen Temperatur erhalten. Erst in der Nähe der kritischen Temperatur konvergiert sie beim Übergang in den gasförmigen Zustand gegen Null. Das Verhalten der Flüssigkeiten ist durch die Regel von Eötvös charakterisiert:

$$\sigma_m = \sigma \cdot V_m^{\frac{2}{3}} \cdot N_A^{\frac{1}{3}} = K_E (T_{kr} - \Theta - T) \quad (7)$$

mit:

- σ_m molare Oberflächenspannung
- V_m Molvolumen
- N_A Avogadro-Zahl
- K_E Eötvös-Konstante (für Wasser $7,5 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

Es gibt praktisch auch beim Beaufschlagen von Brandstoffoberflächen, deren Temperatur höher als 100°C ist, aber unter der Leidenfrost-Temperatur liegt, eine temperaturabhängige Benetzung. Diese Benetzung wird mit zunehmender Temperatur geringer und erreicht den Wert 0 bei der Leidenfrost-Temperatur.

Bei Normaltemperatur wurden bei festen Stoffen deutliche Unterschiede beim Benetzen mit Wasser und tensidhaltigem Wasser nachgewiesen (Abbildung 35).

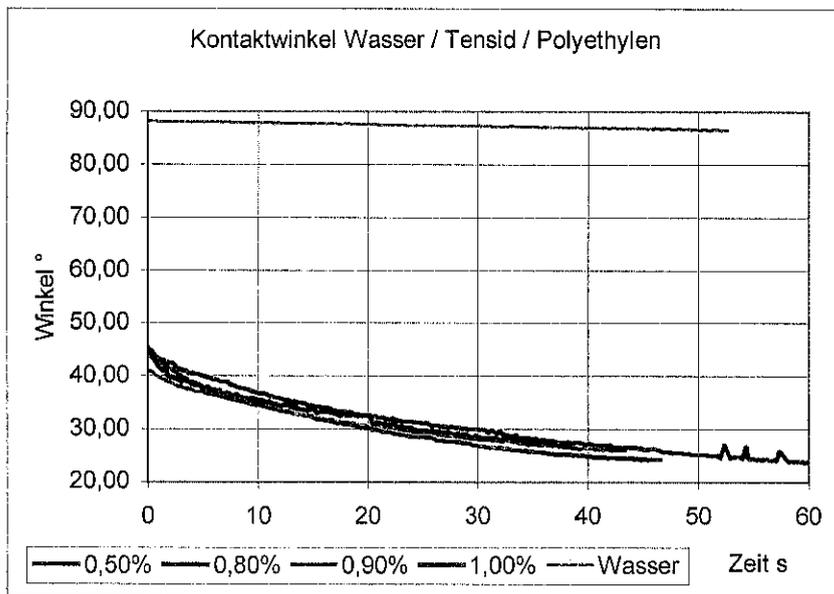


Abbildung 35: Kontaktwinkel von Wasser und tensidhaltigem Wasser auf PE bei Normaltemperatur

Infolge der geringeren Benetzung durch Wasser ist bei gleicher Tropfengröße die Berührungsfläche kleiner. Die Fläche für den Wärmeübergang ist dementsprechend geringer. Deutlich wird auch, dass sich die Randwinkel der Tensidlösungen nach dem Auftreffen auf der Oberfläche zeitlich abhängig nur noch wenig verändern. Der größte Effekt wird erzielt, wenn sich die Oberflächenspannung erheblich ändert.

Bei der Messung des Kontaktwinkels konnte weiterhin beobachtet werden, dass sich dieser unmittelbar nach Auftreffen auf der Oberfläche einstellt. Videos, die zur Berechnung des Randwinkels mit dem Kontaktwinkelmessgerät aufgenommen wurden, belegen, dass in der Anfangsphase im Bereich unter $0,1\text{s}$ praktisch keine wesentliche Veränderung des Randwinkels mehr stattfindet. Unmittelbar nach dem Auftreffen des Tropfens auf der Feststoffoberfläche entsteht entsprechend des sich einstellenden Randwinkels eine von der Tropfengröße abhängige Kontaktfläche. Der Tropfen bildet dabei die Form einer Kugelkappe, deren Basisfläche die Kontaktfläche darstellt und für verschiedene Randwinkel berechnet wurde (Abbildung 36).

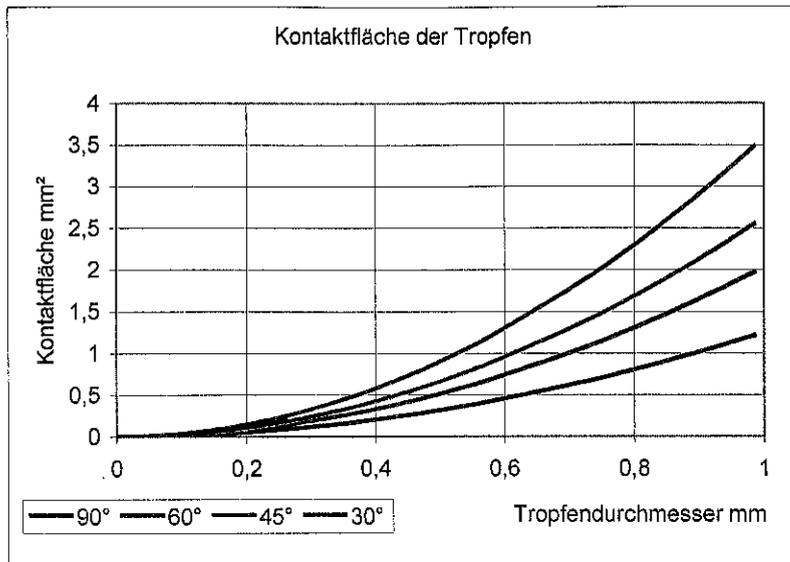


Abbildung 36: Kontaktflächen von Tropfen unterschiedlicher Größe für verschiedene Randwinkel

Die Abbildung 36 macht den Einfluss der Oberflächenspannung des Löschmittels auf die Größe der jeweiligen Kontaktfläche der Tropfen sichtbar. Demzufolge werden gleichgroße Tropfen von Wasser und tensidhaltigem Wasser unmittelbar nach dem Auftreffen auf den Oberflächen des brennbaren Stoffes immer verschieden große Kontaktflächen ausbilden, die einen unterschiedlichen Wärmeübergang bedingen.

4.3.1. Tropfengröße und Oberflächenspannung

Entsprechend den Bedingungen für die Tropfenbildung weist das Tropfenspektrum eine obere Grenze auf. Nach [Brauer 1971] ist ein Tropfen stabil, wenn die Widerstandskraft mit der Kapillarkraft im Gleichgewicht steht. Der maximale Tropfendurchmesser d ist dann abhängig vom Widerstandsbeiwert c_w des Tropfens, seiner Oberflächenspannung σ , von seiner Relativgeschwindigkeit v zum umgebenden Medium und der Dichte des Mediums ρ_L . In dimensionsloser Schreibweise kann diese Abhängigkeit als kritische Weber-Zahl ausgedrückt werden. Nach [Brauer 1971] ist die $We_{krit} = 8/c_w$. Bei [Prandtl et al. 1990] beträgt die kritische Weber-Zahl etwa 12 für Zerstäubungsvorgänge. Im vorliegenden Beispiel wurde die maximale Relativgeschwindigkeit v_{max} , die Tropfen bestimmter Größe und Oberflächenspannung erreichen können ohne weiter zu zerfallen, nach [Grothe et al. 1974] mit Gleichung (8) berechnet.

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

Die Abbildung 37 zeigt als Ergebnis die maximal stabilen Tropfengrößen bei unterschiedlicher Oberflächenspannung in Abhängigkeit von der relativen Geschwindigkeit der Tropfen zur umgebenden Luft. [Hinrichs 1961] belegte in Untersuchungen, dass ein Herabsetzen der Oberflächenspannung des versprühten Wassers das Tropfenspektrum verändert und der maximale Tropfendurchmesser verringert wird. Welchen Wert die kritische Weber-Zahl im konkreten Fall annimmt, hängt von den gegebenen Bedingungen ab. Der Trend ist aber eindeutig: soll sich die Tropfengröße beim Zusatz von Tensiden zum Löschwasser nicht verringern, muss der Druck am Strahlrohr vermindert werden.

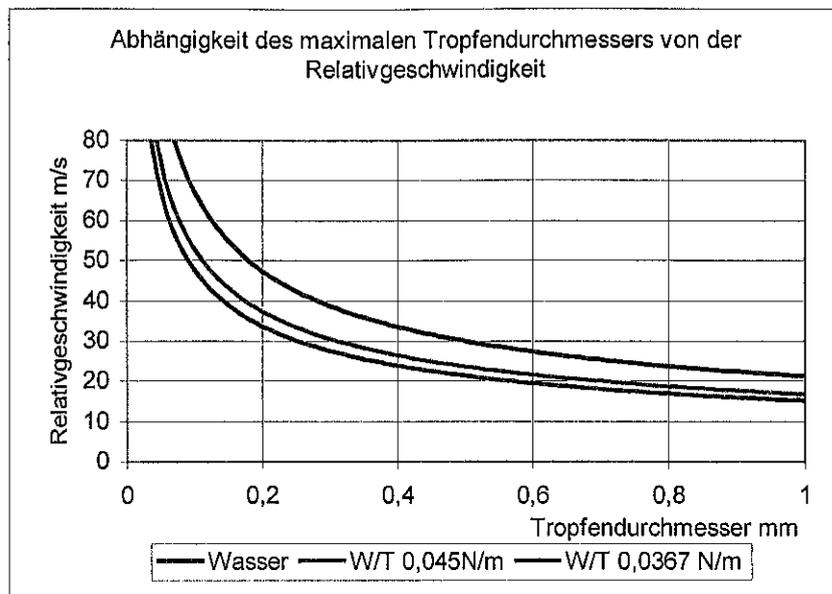


Abbildung 37: Maximale Tropfengröße bei unterschiedlichen Oberflächenspannungen in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zur Luft

Wesentliche Kriterien, ob Tropfen trotz Beeinflussung durch die Rauchgasströmung den Brandherd erreichen können, sind deren Größe und Anfangsimpuls. Bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit nimmt die Relativgeschwindigkeit kleinerer Tropfen schneller ab und sie erreichen im Gegensatz zu größeren Tropfen, gleiche Gegenströmung vorausgesetzt, den Zielort nicht, weil sie auf ihrem Flug einen Umkehrpunkt besitzen. Ist die Gegenströmung eine Heißgasströmung, beeinflussen Wärmeübergang, Verdunstung, Verdampfung und damit Masseabnahme, Verwirbelung etc. diesen Prozess. Arbeiten zur Wechselwirkung von Tropfen und Tropfenschwärmen aus Sprinklern mit Heißgasströmungen hat u.a. Kunkelmann ausgeführt und in mehreren Berichten veröffentlicht. In [Kunkelmann 1991] kommt er zu dem Ergebnis, dass unter den gegebenen Versuchsbedingungen Tropfen mit einem Durchmesser von 1mm zu einem gewissen Anteil die Oberfläche einer Energiequelle erreichen können. Wesentlich zur Löschwirkung tragen erst Tropfen mit einem Durchmesser von 2mm bei.

Unter Beachtung der Tatsache, dass die aufzuwendende Oberflächenarbeit für die Zerteilung von tensidhaltigem Wasser zu Tropfen geringer ist als bei reinem Wasser, muss zur Erzielung optimaler Tropfengrößen über eine Druckreduzierung am Strahlrohr nachgedacht werden. Sonst wird der mögliche Vorteil des Einsatzes von Tensiden kompensiert und sogar in einen Nachteil gewandelt

Grundsätzlich ist zu sagen, dass der ausschließliche Zusatz von Tensiden zum Löschwasser in der Summe aller Wirkungen keine oder nur geringe Steigerungen der Effizienz zur Folge haben wird. Verändert man aber entsprechend den veränderten Eigenschaften des Wassers auch die Bedingungen an den Strahlrohren (Druck, Durchsatz, Düsenart), dann kann der erzielte stoffliche Effekt zur Steigerung der Löschwirkung beitragen. Diese Anpassung kann aber nur nach anwendungstechnischen Untersuchungen erfolgen.

4.3.2. Benetzen der Brandstoffoberflächen

Mit der Benetzung der Oberfläche durch den Tropfen, setzt der zeitlich, örtlich und stofflich abhängige Prozess des Wärmeüberganges ein. Nahezu alle Brandstoffe weisen eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit auf. Daraus resultiert ein örtlich begrenzter Wärmübergang im brennbaren Stoff an den Stellen des direkten Kontaktes.

Eine Wirkung der Kontaktstellen als Wärmesenken in der Oberflächenschicht ist infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit des Brandstoffes und der sehr hohen Wärmerückführung aus den Flammen oder aus der Glut nicht möglich. Abgelöschte Flächen, auf denen sich Löschwasser befindet, können unmittelbar neben Brandherden liegen, ohne dass der Brand davon beeinflusst werden kann. Die Abbildung 38 zeigt ein Bild von einem Versuch zum Brandverhalten von DSD-Produkten, welcher im Auftrag von Entsorgungsbetrieben bei der Minimax AG durchgeführt wurde. In unmittelbarer Nähe des Brandherdes befindet sich ein mit fluortensidhaltigem Löschwasser gefüllter Kunststoffbeutel, dessen Inhalt trotz seiner theoretisch vorhandenen Wärmekapazität keinen Einfluss auf den in unmittelbarer Nähe ablaufenden Flammenbrand hatte.

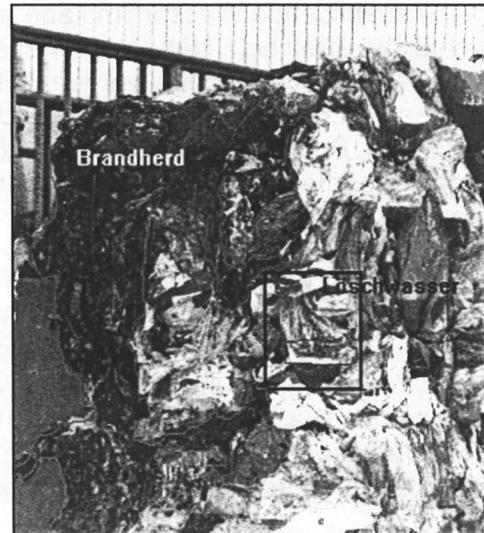


Abbildung 38: Wechselwirkung Brandherd / Löschmittel

Ein effizienter Wärmeübergang auf einer Fläche wird erst zu dem Zeitpunkt erreicht, wenn sich auf ihr flächendeckend ein Wasserfilm ausgebildet hat, der die Fläche auch direkt berührt. Der geschlossene Wasserfilm entsteht, wenn die Tropfen so dicht fallen, dass sie sich untereinander vereinigen.

Das Ausbreiten des Löschmittels von einem Punkt über die Oberfläche des Stoffes ist abhängig sowohl von der Benetzbarkeit des Brandstoffes als auch von den im Löschmittel enthaltenen grenzflächenaktiven Stoffen. Diese lagern sich an der Grenzfläche zwischen dem Brandstoff und dem Löschmittel so an, dass eine dauerhafte Benetzung der Fläche stattfindet. Enthält ein Tropfen eine ausreichende Tensidreserve, dann kann er sich entsprechend seiner Größe maximal ausbreiten. Bei nicht ausreichendem Tensidgehalt endet der Prozess der Ausdehnung, wenn die vorhandenen Tenside an der Grenzfläche angelagert sind. Tropfen, die durch den Auftreffimpuls auf der Brandstoffoberfläche breitgelaufen sind, werden sich sogar wieder auf die dem Tensidgehalt entsprechende benetzbare Fläche zusammenziehen.

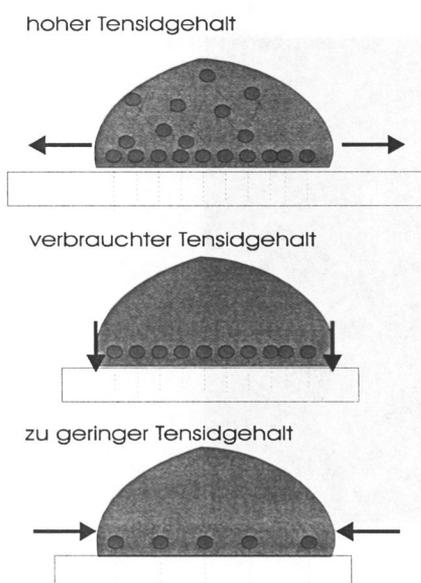


Abbildung 39: Wirkung der Tenside bei der Benetzung

Eine gleichmäßige und dauerhafte Benetzung der Oberfläche mit einem Löschmittelfilm kann nur erreicht werden, wenn die Tensidkonzentration im Löschmittel so groß ist, dass für die gesamte Zeitdauer der Benetzung nicht nur die Belegung der Grenzfläche mit Tensidmolekülen möglich ist, sondern auch im Flüssigkeitsbulk eine Tensidreserve vorhanden ist. Fehlt diese Tensidreserve, werden sich einzelne Flüssigkeitsansammlungen und Rinnsale ausbilden. In früheren Versuchen [Pleiß, Seliger 1996] mit sehr großen Tropfen wurde die notwendige Konzentration der Tenside ermittelt. Die Ergebnisse lagen im Bereich der empfohlenen Anwendungskonzentrationen der Schaummittel.

Der sich ausbildende Wasserfilm kann auch unter optimalen Bedingungen nur eine endliche Schichtdicke erreichen. Näherungsweise kann sie als laminare Grenzschichtdicke einer an- geströmten Platte betrachtet werden. Mit dem Ansatz von Blasius [Pleß, Seliger 1996] kann die Grenzschichtdicke abgeschätzt werden. Diese Aussage gilt nur für ideale waagerechte Oberflächen. Praktisch fließt aber das Löschmittel entweder infolge von Unebenheiten an der Brandstoffoberfläche an einer oder mehreren Stellen zusammen und verbleibt dort im We- sentlichen ungenutzt.

An senkrechten Flächen verändern sich die auf das Löschwasser wirkenden Kräfte grundlegend. Triebkraft für das Abfließen des Wassers ist die Schwerkraft. Im waagerechten Anteil kommen auch molekulare Kräfte des Wassers zum Tragen. Sind im Wasser ausreichend Tenside für die Benetzung der Flächen vorhanden, bildet sich ein abfließender Wasserfilm. Die Breite des Wasserfilmes wird durch den Massestrom des abfließenden Wassers be- stimmt. Bei guter Benetzung kann die Schichtdicke den Wert der laminaren Grenzschicht- dicke erreichen und damit auch ihre maximale Breite.

Entsprechend dieser Zusammenhänge müssten durch abfließendes Wasser bei ausreichen- dem Massestrom und sehr guter Benetzbarkeit senkrechte Brandstoffoberflächen sicher mit Löschwasser zu beaufschlagen und damit zu löschen sein.

DSD-Wertstoffe werden nach dem Sortierprozess zu Ballen gepresst und bis zu ihrer Wei- terverarbeitung gelagert. Die Dichte der Ballen erreicht maximal 75 % der Dichte des jeweili- gen Ausgangsmaterials. Die Hohlräume im Ballen enthalten vorzugsweise Luft, so dass sich durch diese Strukturierung ein veränderter Abbrand in die Ballentiefe zeigt. Es bilden sich sehr schnell ausgebrannte Hohlräume, die durch weiteres Ballenmaterial überdeckt und da- mit vor Löschmaßnahmen geschützt werden.

Die starke Zerklüftung der Ballenaußenflächen (Abbildung 40) verändert auch die Zündbar- keit des Materials. Brandstoffe können an Kanten und Ecken wesentlich einfacher durch eine offene Flamme gezündet werden als auf einer geschlossenen Fläche. Die Beflammungszeit mit offener Flamme bis zur Zündung kann an einer Materialkante 10 - 50 % der für eine flä- chige Zündung erforderlichen Zeit betragen [Thater 1968]. Damit wird die Zeit für die Aufbe- reitung der brennbaren Materialien an den Grenzflächen deutlich verändert. Die Zeitspanne bis zum Eintritt der beschleunigten Brandausbreitung an einer senkrechten Fläche wird ver- kürzt.

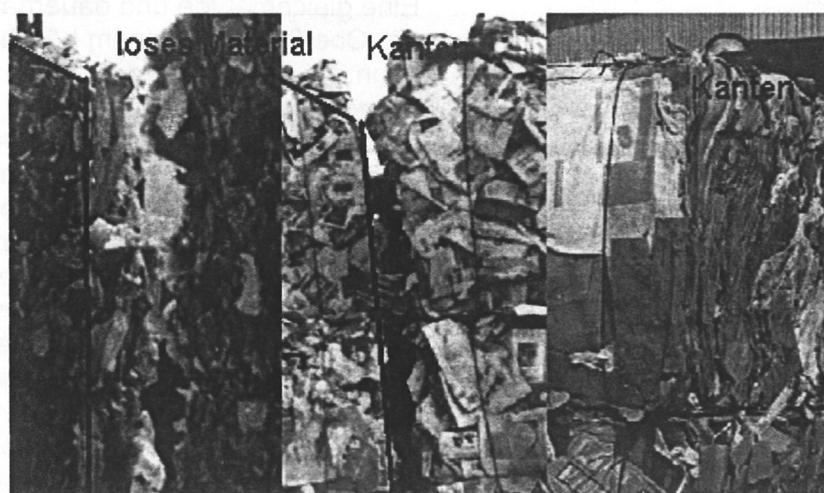


Abbildung 40: Außenflächen von DSD-Wertstoffballen

Ein weiterer nachteiliger Aspekt der zerklüfteten Oberflächen betrifft die Fließeigenschaften des Löschmittels. Die Kanten und die äußere Struktur der Lagermaterialien lassen ein gleichmäßiges Abfließen von Löschwasser nicht zu. Bedingt durch Unebenheiten erfolgt eine

Kanalisation des Löschwassers in bevorzugten Ablaufbahnen. Überhängende Kanten können zum vollständigen Ablösen des Löschmittelstromes von der Oberfläche führen. Vertiefungen und Einbrennungen werden überdeckt, so dass eine Beaufschlagung mit Löschwasser verhindert wird.

Zusätzlich zu den geometrisch bedingten Problemen beeinflussen die thermischen Verhältnisse an den senkrechten und waagerechten Flächen den Lösprozess.

- Bei einer Oberflächentemperatur des Brandstoffes von mehr als 374°C kann Wasser nicht mehr benetzen. Trotzdem erfolgt bei dieser Temperatur im Moment der Berührung des Wassers mit der Brandstoffoberfläche ein Wärmeübergang, der nach [Frick 1985] eine Leistung von ca. 2000 kW/m^2 besitzt. Würde dieser Wärmeübergang nicht erfolgen, dann wäre ein Abschrecken der Oberflächen bis auf Temperaturen, bei denen eine Benetzung erfolgen kann (Leidenfrost-Temperatur), nicht möglich. Durch den sehr hohen Energiestrom wird ein Teil des Löschwassers schlagartig verdampft. Es bildet sich eine isolierende Dampfschicht zwischen dem Wasser und der zu benetzenden Oberfläche. Lediglich durch ständige Zerstörung des Dampffilmes ist es möglich, einen ausreichenden Wärmeübergang zu gewährleisten. Um diese Turbulenz an der Grenzfläche zu erzeugen, müssen ständig neue Wassertropfen die Oberfläche treffen.
- Oberflächentemperaturen von $300 - 500^{\circ}\text{C}$ führen zur Zersetzung oder zum Schmelzen der brennbaren Stoffe. Dadurch verändern die Oberflächen ihre Struktur, Größe und Lage im Raum. Temperaturunterschiede führen zu mechanischen Spannungen und Verformungen im Brandstoff. Der Zielort der Löschmittelaufgabe ist deshalb durch sich ständig verändernde Strukturen charakterisiert. Durch die Wechselwirkung mit dem Löschmittel können bestehende thermische Spannungen verstärkt werden, Schmelzen zum Erstarren gebracht werden und Wasser aufnehmende Verbrennungsprodukte zur weiteren Veränderung der Oberflächen führen.
- Flammen und abströmende Rauchgase übertragen ihre Energie durch Konvektion insbesondere auf senkrechte Brandstoffoberflächen. Deshalb werden diese Flächen am ehesten und am extremsten beim Brand belastet.

Als Ergebnis dieser Wechselwirkungen kann abgeleitet werden, dass abfließendes Löschwasser mit einem ausreichenden Tensidgehalt zwar alle Voraussetzungen besitzt, um an den senkrechten Flächen eine Benetzung zu ermöglichen. Trotzdem ist aber selbst bei einem ausreichenden Massestrom an Löschmittel die gleichmäßige Benetzung der Oberflächen nicht wahrscheinlich, weil die Oberflächen infolge thermischer Prozesse nicht eben sind, hervorstehendes Material abschirmend gegenüber dem Löschmittel wirkt und sich verdeckte Brände ausbilden. So wird der Löscherfolg in Spalten und Kanälen eine zufallsabhängige Größe. Mit zunehmendem Massestrom an Löschmittel kann zwar die mit dem Löschmittel benetzte Fläche vergrößert werden, gleichzeitig erhöht das aber auch den Anteil an ungenutztem Löschmittel, wobei dieser Anteil im Verhältnis zum genutzten Löschmittel dann unverhältnismäßig ansteigt.

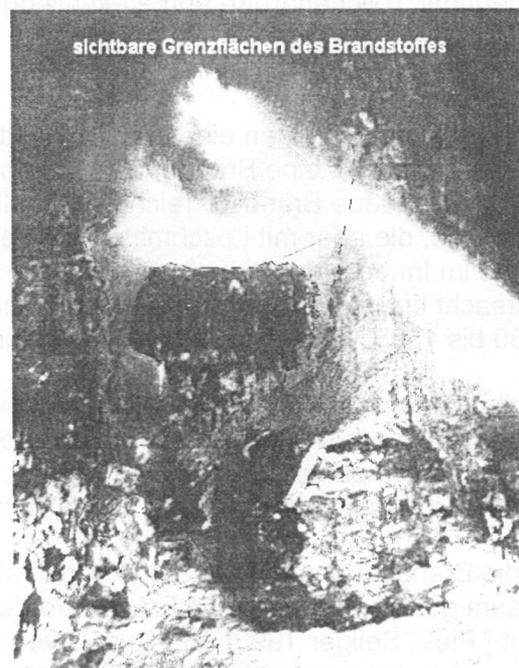


Abbildung 41: Senkrechte Brandflächen (Detail)

Ein Steigern des Löschmittelvolumenstromes ist in der Mehrzahl der Fälle begrenzt durch das zur Verfügung stehende Wasser. Aus diesen Gründen muss die Löschtaktik auf die gegebene Situation eingestellt werden. Das Löschmittel ist gezielt an die brennenden Oberflächen heranzubringen. Damit muss einerseits das Löschmittel konzentriert auf der zu löschenden Teilfläche aufgebracht werden und andererseits ist diese Fläche dabei durch Kühlen mit Schutzrohren vom übrigen Brandherd abzuschotten. Trotzdem muss diese Maßnahme nicht in allen Fällen erfolgreich sein. Erst das Freilegen der verdeckten Oberflächen und deren direktes Benetzen mit Löschwasser bringt dann den Löscherfolg.

4.4. Taktische Maßnahmen für das Oberflächenlöschen

4.4.1. Schwerpunkte in DSD- und weiterverarbeitenden Betrieben

In Betrieben des DSD und der weiterverarbeitenden Industrie treten die anfallenden Materialien unmittelbar vor und während des Sortier- und Verarbeitungsprozesses in drei unterschiedlichen Lagerformen auf, die sich im Wesentlichen durch ihre Dichte und durch die Größe der Wertstoffe unterscheiden.

- Unmittelbar nach der Anlieferung wird das gesammelte Material unsortiert und ohne Aufbereitung als Schüttung geringer Dichte zusammengeführt. Das Schüttgutlager besitzt Grundflächen von 300 bis 500 m² und eine Höhe der Schüttkegel bis zu 10 m.
- Nach dem Sortieren wird ein wesentlicher Materialanteil zu Ballen verdichtet und bis zur weiteren Verarbeitung gelagert. Durch das Pressen sind die Wertstoffe soweit verdichtet, dass der Luftanteil weniger als 50% des Ballenvolumens ausmacht. Die Ballenaußenflächen sind uneben. Es ragen einzelne Materialkanten lose heraus. Der Zusammenhalt der Ballen wird durch Metalldrähte oder Bänder gesichert. Die Sortierungen führen zu Kunststoff- und Verbundmaterialballen. In der Mehrzahl der Fälle werden in den Betrieben auch Pappe und Papiersammlungen verdichtet, so dass diese als dritte Gruppe berücksichtigt werden müssen.
- Ein geringerer Anteil des Sammelgutes wird mechanisch zerkleinert und zu Schüttgut mit geringer Teilchengröße aufbereitet (Agglomerate aus unsortierten Altkunststoffen)

4.4.2. Schüttgüter

Die Schüttgutlager bilden eine leicht geneigte Oberfläche aus, die, wie schon diskutiert, im Fall eines Brandes eine Brandausbreitung begünstigen kann. Selbst im Inneren des Schüttgutes entstandene Brände erreichen schnell die Oberfläche der Schüttung. Es entsteht meist eine Mulde, die aber mit Löschmittel leicht erreichbar ist. Das schnelle Entstehen verdeckter Brände im Inneren der Schüttung wird einerseits durch deren geringe Schüttdichte verursacht und andererseits durch den vorhandenen Kunststoff begünstigt, welcher bereits bei 80 bis 150°C schmilzt oder weich wird und in sich zusammenfallen kann.

Durch die in der Schüttung enthaltene Luft wird die Verbrennung gefördert und die Flammenstrahlung erhöht. Deshalb muss bei Bränden in Schüttungen mit geringer Dichte im Gegensatz zu kompakten Brandflächen immer mit einer gesteigerten Brandintensität gerechnet werden. Eine örtliche Ausbildung von Glut kann besonders bei längerer Branddauer erfolgen.

Für die Brandbekämpfung in Schüttungen sind sowohl Wasser, Wasser mit Netzmittel und Schaum geeignet. Die besten Erfolge werden beim Einsatz von Wasser mit Netzmitteln erreicht [Pleiß, Seliger 1996]. Der Zusatz von Netzmitteln garantiert das Benetzen der Oberflächen und verhindert ein Auswerfen von geschmolzenen Kunststofftröpfchen verbunden mit einer schlagartigen Steigerung der Brandintensität durch Sprayverbrennung.

Das Wasser mit Netzmittel sollte dabei möglichst gleichmäßig über die Oberfläche der Schüttung verteilt werden. Bei größeren Flächen sind vorzugsweise Wasserstrahlrohre mit großer Wurfweite einzusetzen. Das können auch Vollstrahlrohre sein, die dann aber aufgrund der konzentrierteren örtlichen Beaufschlagung mehr bewegt werden müssen.

Bereits in der Flammenzone verdampfende Löschmittelanteile senken zwar die Temperatur des Abgases, sind aber nicht in der Lage, die Verbrennungsreaktion in der Gasphase zu unterbrechen. Wasserdampf hat als inertes Gas einen Einfluss auf die Verbrennungsgeschwindigkeit. Unterhalb der Grenze für die Löschkonzentration ist die Veränderung der Verbrennungsgeschwindigkeit aber so gering, dass sie für den Brand als globales Geschehen praktisch keine Auswirkung hat. Erst die Wechselwirkung zwischen der Oberfläche des brennbaren Stoffes und dem Löschmittel führt örtlich begrenzt zu Veränderungen im Stoff- und Energietransport, die letztendlich bei großflächiger Wirkung zum Löscherfolg führen.

Schwerschäume besitzen ebenfalls eine gute Löschwirkung bei Schüttgütern, wenn sie mit dem brennbaren Stoff in Wechselwirkung treten können. Infolge der geringen Fließfähigkeit von Schäumen auf viskosen oder sich verfestigenden Oberflächen, die meistens uneben sind, sollte der Schaum möglichst schon bei Austritt aus dem Strahlrohr seine Zielrichtung erhalten. Dass das angestrebte Ziel allein durch die Fließbewegung des Schaums erreicht wird, sollte nur auf kurzen Strecken erforderlich sein. Beim Einsatz von Mittel- oder Leichtschaum kann infolge der größeren Volumenströme das bessere Fließen des Schaums erreicht werden. Wobei der Schaum zuerst die Fläche benetzen muss, um den nachfolgenden Schaum darauf fließen zu lassen. Weil die Zerklüftung der Oberflächen das Schaumfließen zusätzlich behindert, muss die Standortwahl sorgfältig getroffen und sicherlich häufiger gewechselt werden. Es ist immer zu beachten, dass auch bei Schäumen höherer Verschäumungszahlen nur die Schwerkraft die eigentliche Triebkraft für das Fließen ist.

4.4.3. Ballenlager

Die übereinander gestapelten Wertstoffballen bilden dreidimensionale Objekte mit einem großen Anteil von Oberflächen aus, die direkt am Brandprozess teilnehmen können. Die aus einer Vielzahl einzelner Materialteile bestehenden Ballen weisen auch äußerst poröse Außenflächen auf, welche leicht zündfähig sind und thermisch gut aufbereitet werden können. So sind nach der Zündung mit einer offenen Flamme alle Voraussetzungen vorhanden, um innerhalb eines minimalen Zeitraumes zu einer beschleunigten Brandausbreitung vor allem an den senkrechten Flächen zu führen. In diesen Lageranordnungen kann örtlich bereits nach wenigen Minuten die Vollbrandphase erreicht sein.

In dieser Phase ist zu erwarten, dass Flächen jeglicher räumlicher Anordnung, und damit auch verdeckte vom eigenen Standort nicht einsehbare Flächen, an der Verbrennung teilnehmen. Die direkte Beaufschlagung der brennenden Flächen kann nur realisiert werden, wenn sie durch die Flugbahn der Tropfen oder des Vollstrahls erreicht werden können. In diesem Fall kann direkt Einfluss auf die Verteilung des Löschwassers auf den Flächen genommen und dafür gesorgt werden, dass an allen Stellen der Fläche ausreichend Löschwasser zur Verfügung steht, um die Stoff- und Energieströme zu beeinflussen und die Verbrennung zu unterbinden. Bei gleichmäßiger Beaufschlagung kann die Löschwirkung des Wassers infolge des an einer ausreichend großen Fläche gleichzeitig ablaufenden Energieaustauschs optimal genutzt werden. Je nach Größe des Temperaturunterschiedes als wirksame Triebkraft, kann das Wasser einen definierten Wärmestrom aufnehmen, der letztendlich dann nicht mehr für die Verdampfung oder Pyrolyse des brennbaren Stoffes zur Verfügung steht.

Die gezielte Beaufschlagung der brennenden Flächen in Spalten oder von verdeckten Brandherden ist durch Löschmittelstrahlen nicht mehr möglich. Das sind Bereiche innerhalb der dreidimensionalen Brandobjekte, in denen ein gezielter Einsatz des Löschmittels und damit eine aktive Wirkung nicht mehr gegeben ist. In diese Bereiche muss das Löschmittel ausschließlich durch sein Fließverhalten infolge der Schwerkraft gelangen. Beim Abfließen des Löschmittels an senkrechten und geneigten Flächen kommt es an den Berührungstel-

len auch zu Veränderungen der Stoff- und Wärmeübergangsprozesse, nur kann diese Wirkung nicht mehr aktiv beeinflusst werden. Hier muss von einer passiven Löschwirkung des abfließenden Wassers gesprochen werden. Die passive Löschwirkung ist abhängig vom Weg, den das abfließende Wasser an den Oberflächen des brennbaren Stoffes nimmt. Dieser Weg ist durch eine Vielzahl von Parametern, welche die Oberfläche des brennbaren Stoffes charakterisieren, vorgegeben. Welcher von den Parametern dann aber tatsächlich wirksam wird, ist Zufall, da sie sich zeitlich und stofflich abhängig verändern. Auf jeden Fall gehören aber Zonen mit hohen Oberflächentemperaturen, gerichteten Gasströmungen und Materialverformungen nicht zu den begünstigten Wegen. Deshalb werden Brandherde vom abfließenden Löschmittel regelrecht umgangen, ohne beeinflusst zu werden wie aus Abbildung 42 ersichtlich ist.

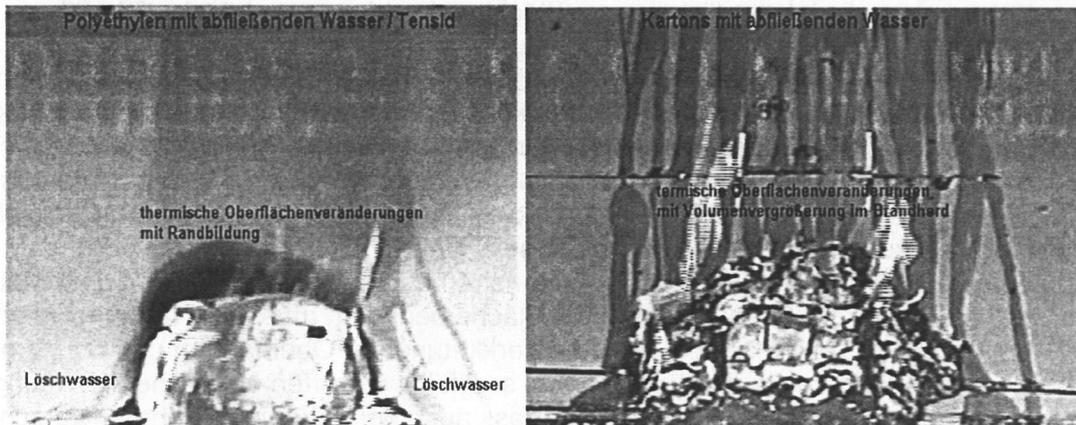


Abbildung 42: Passives Löschen durch abfließendes Löschmittel

Um verdeckte Brände aktiv mit Löschmittel bekämpfen zu können, müssen deren Oberflächen dem direkten Einfluss des Löschmittels zugänglich gemacht werden. Das kann durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

- Entfernen aller brennbaren und nichtbrennbaren Stoffe, welche die am Brand beteiligten Flächen verdecken. Die sicherste Methode, Flächen verdeckter Brandherde zu erreichen, ist zugleich auch die aufwendigste Methode. Die in diesen Fällen einzusetzende Fördertechnik muss für einen solchen Einsatz geeignet sein. Das betrifft vor allem die technische Funktionssicherheit bei höheren Temperaturen, der Schutz des Bedienpersonals vor mechanischen Einflüssen, wie sie z. B. von herabfallenden Teilen verursacht werden, und die Ausrüstung der Personalkabine mit einem Belüftungssystem.
- Situationsbedingtes Anpassen der Standorte für den Löschangriff, um insbesondere Brände in Spalten zu beherrschen. Diese Maßnahme erfordert eine ausreichende Zugänglichkeit des Brandobjektes mit der Option, neue Angriffswege im Verlauf der Löschmaßnahmen zu schaffen. Die dazu erforderliche Technik muss vorhanden sein.
- Einsatz von Löschmittelstrahlen mit hoher Energie, durch deren mechanische Wirkung verdeckte Brandherde freigelegt werden können. Diese Maßnahme wird nur in begrenztem Umfang zum Erfolg führen, weil nur loses oder leicht ablösbares Material vom Brandgut in den Spalten und von verdeckten Flächen entfernt werden kann.

Es ist anzumerken, dass sich verdeckte Brände während der Brandentwicklung verändern und in der Regel ein vollentwickelter Brand durch Einstürzen, Schmelzen oder Abbrennen der dreidimensionalen Struktur nach einer längeren Branddauer, die je nach Lagergut nach mehr als 2 bis 5 Stunden erreicht ist, eine vorzugsweise flächige Struktur entwickelt. Es entsteht eine unebene Oberfläche, die mit dem Löschmittel gut zu erreichen ist. In diesem Brandstadium werden auch große Brandflächen wieder beherrschbar und Löscherfolge sind möglich.

4.4.4. Agglomerate in Schüttgutbunkern

Die Lagerung von Agglomeraten erfolgt in der Regel in Bunkern aus Metall (Stahl oder Aluminium) und ist aus logistischen Gründen eine sehr günstige Variante. Automatische Befüll- und Entleerungseinrichtungen verhindern den direkten Zugriff auf das Brandgut. Subjektive Brandursachen lassen sich somit weitgehend ausschließen.

Trotzdem ist es in der Vergangenheit zu mehreren Bränden in Bunkern mit Agglomeratschüttungen gekommen. Die Brandursache ist in der Neigung der Materialien zur Selbstentzündung zu sehen. In Abschnitt 3 wurden die möglichen Reaktionen diskutiert und Grenzparameter für die Temperatur und den Feuchtigkeitsgehalt der einzulagernden Agglomerate vorgeschlagen.

Vordringlichstes Ziel bei einem Brand in einem Bunker mit Schüttgut ist ein möglichst frühzeitiges Erkennen des Brandes.

Für die Brandbekämpfung sind die schlechtesten Ausgangsbedingungen anzunehmen:

- Das Schüttgut besitzt sein höchstes Schüttgewicht, demzufolge befindet sich wenig Luft in der Schüttung. Damit werden sich vorzugsweise Pyrolyseprodukte durch Zersetzungs- und Glimmprozesse bilden, die durchzündend können. Es besteht Verpuffungs- und Explosionsgefahr insbesondere beim Öffnen des Bunkers.
- Der Brandherd entsteht vorzugsweise an besonders gut isolierten Stellen im Brandgut. Eine Beurteilung des Bunkers mittels Wärmebildkamera oder Pyrometer von außen gibt nur bedingt Hinweise auf die Existenz von Brandherden. Lassen sich aber bereits von außen Temperaturunterschiede erkennen, dann ist auf einen voll entwickelten Brand mit hohen Anteilen gasförmiger Pyrolyseprodukte zu schließen.
- Durch den Glimmbrand wird die Energie auf das Schüttgut übertragen. Es trocknet und zersetzt sich. Dabei bilden sich in der Regel auch feine feste Partikel. Die Gefahr einer Staubexplosion besteht.
- Im Gasraum des Bunkers sind brennbare Gase enthalten, deren Konzentrationsgefälle beim Öffnen des Bunkers durch Messungen schlecht erfasst werden kann. Die höchsten Konzentrationen sind an der Grenze zwischen Brandstoff und Luftraum zu erwarten.

Die Löschmaßnahmen müssen nachfolgende Aktivitäten aufgrund taktischer Überlegungen berücksichtigen:

- Um eine Zündung der Gase und Dämpfe zu verhindern, muss zunächst so schnell als möglich eine Isolationsschicht zwischen dem Brandherd und den brennbaren Dämpfen gelegt werden. Dabei sind Lufteinmischungen im Dampfraum weitgehend zu vermeiden. Es wird vorzugsweise Mittelschaum eingesetzt, welcher auch aus größerer Höhe leicht auffließt und sehr schnell die notwendige Isolationsschicht aufbaut.
- Bei einer Vielzahl von Stoffen bewirkt der Einsatz von Wasser das Aufquellen des Schüttgutes, im ungünstigsten Fall das Entstehen einer wasserundurchlässigen Schicht. Ist ein Aufquellen zu erwarten, muss die weitere Behandlung des Glimmbrandes im Bunker in kürzester Zeit erfolgen. In der Mehrzahl der Fälle wird das Schüttgut aus dem Bunker über die vorgesehenen Entleerungsöffnungen entfernt. Das ausgeförderte Schüttgut wird mit Sprühwasser beaufschlagt. Bei schwer benetzbarem Material und bei hohem Feinstoffanteil ist dem Löschwasser von vornherein Netzmittel zuzumischen oder das Schüttgut mit Schaum zu behandeln. In allen Fällen ist es geraten, den Bunker vollständig zu entleeren und zu reinigen. Während des gesamten Entleerungsvorganges sollte die aufliegende Schaumschicht erhalten oder ständig erneuert werden.

- Um das Quellen des Schüttgutes durch den Einsatz von Wasser zu umgehen, können zur Brandbekämpfung schwere Löschgase wie Kohlendioxid eingesetzt werden. In geschlossenen Bunkern wird häufig mit festem Kohlendioxid (Trockeneis) gearbeitet, welches in größerer Menge mit einem textilen Behältnis vorsichtig bis zur Schüttgutoberfläche herabgelassen werden kann. Trockeneis hat den Vorteil einer sehr niedrigen Temperatur von -72°C und einer langsamen Verdampfungsrate. Aber auch in diesem Fall muss der Bunker entleert und der Glimmbrand gelöscht werden.
- Es ist abzuwägen, ob der Einsatz von Löschlanzen und Geräten, die in das Innere der Schüttung vorgetrieben werden, vertretbar ist. Er führt nur dann zum Erfolg, wenn der Brandherd vorher exakt lokalisiert werden kann. Durch diese Techniken wird die Gefahr einer Verpuffung oder Explosion aufgewirbelter Stäube und durchmischter Pyrolysegase deutlich erhöht.
- Bei fortgeschrittenem Bunkerbrand mit teilweiser Zerstörung der metallischen Außenhaut sollte grundsätzlich Schaum mit hohem Benetzungsvermögen eingesetzt werden. Es muss in diesem Fall die völlige Entleerung des Bunkers gesichert werden, die in diesem Stadium der Brandentwicklung nicht mehr langsam und gezielt über die Entleerungsöffnungen möglich ist. Meistens müssen neue Öffnungen geschaffen werden. Zur Absicherung aller Maßnahmen sollte stets Schaum verwendet werden. Ebenso sollte das bereits entleerte Schüttgut mit Schaum abgedeckt werden, um Zündungen und Aufwirbelungen zu vermeiden.

5. Literatur:

- [Aerosole in Lagerhäusern 1987] Anonym: Einschätzung der Entflammbarkeit von Aerosolen in Lagerhäusern, Fire Prevention, London 201(1987) S.24 - 28
- [Arbeitshinweise 1976] Arbeitshinweise, Voraussetzungen und Grundlagen der Einsatzplanung, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Blatt 2.1.3., Hauptabteilung Feuerwehr, Berlin 1976
- [Berghoff 1968] Berghoff, W.: Erdölverarbeitung und Petrochemie, Tafeln und Tabellen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968
- [Bern, Malmquist 1989] Bern, M.; Malmquist, O.: Ungefährliche Flüssigkeiten werden zu gefährlichem Spray, Brand & Rädning, Stockholm 4(1989) S.18-19
- [Brauer 1971] Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmung, Verlag Sauerländer, Aarau (Schweiz) 1971
- [Brein 1985] Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind, Teil 1: Literaturlauswertung, Forschungsstelle für Brandschutztechnik Karlsruhe 1985
- [Demidov 1970] Demidov, P. G.: Feuerwehrtaktik, Wissenschaftliche Forschungs- und Redaktions-Verlagsabteilung, Moskau 1970
- [DS-Service] DS-Service für Journalisten - Bilddatenbank, Foto-Nr. 063, <http://gruenerpunkt.de/fotodatenb>.
- [Frick 1985] Frick, E.: Fluid- und Thermodynamik der instationären Zweiphasenströmung bei der Notkühlung von Kernreaktoren, Dissertation Technische Hochschule Zürich, 1985
- [Grothe et al. 1974] Grothe, H.; Thews, H.; Wilke, F.: Löschwasser und seine Anwendung in Gebäuden, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1975
- [Güldenbog et al. 1995] Güldenbog, H. J.; Hespers, H.; Steeg, M.: Brand nach Explosion in Kempener Chemiefabrik
- [Hinrichs 1961] Hinrichs, B. R.: Die Tropfengröße unter dem Einfluß von Zusätzen zum Löschwasser bei der Versprühung, VFDB-Zeitschrift Heft 10(1961)1, S.14-18
- [Kindler, Muhs 1996] Kindler, W.; Muhs, A.: Feuerwehr legt Feuer, Video für Explosiv Magazin, RTL Studio, Köln 1996
- [Kunkelmann 1991] Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind, Teil 8: Simulation der Wechselwirkung eines Tropfenschwarms mit einer Heißgasströmung, Forschungsstelle für Brandschutztechnik Karlsruhe 1991
- [Kutz 2001] Kutz, M.: DSD – Brandschutz und Brandbekämpfung in Wertstofflagern, Teil 3: Numerische Simulation von Temperatur- und Strömungsfeldern infolge des Brandes von stapelförmig gelagertem Material mit dem Programmsystem FLUENT, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge 2001, Forschungsbericht Nr. 123/2, Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe (TH), 2001
- [Lewis, v. Elbe 1968] Lewis, B.; v. Elbe, G.: Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press, New York 1961
- [Lühr 1998] Lühr, J.: Selbstentzündung von Kunststoffagglomeraten, Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling mbH, Köln 1998
- [Montford, Johnson 1964] Montford, A.; Johnson M. S.: The technical aspects of flammability hazards of isobutane from leakage of isobutan during warehousing of water-based aerosols Aerosol Age (1964) Juli, S.18-23

- [Montrealer Protokoll 1987] Montrealer Protokoll 1987: Protokoll zum Verbot der Verwendung von Stoffen, die zur Zerstörung der Ozonschicht in der Atmosphäre führen, Montreal 1987
- [Motz, Fischer 1983] Motz, R.; Fischer, H. G.: Untersuchung der Anforderungen an den Umgang und die Lagerung von Aerosolerzeugnissen, die als Treibmittel brennbare verflüssigte Gase enthalten, Institut der Feuerwehr, Bericht Nr. 120, Heyrothsberge 1983
- [Obuchov 1971] Obuchov, F.: Pozarnaja profilaktika pri ispolsovani aerosolnych upakowok, CTIF Symposium, Rouen 1971
- [Pleß, Steinbach 1987] Pleß, G.; Steinbach, K.: Rekonstruktion der Brandausbreitung in einem Trockner für Rohkautschuk, IdF- Bericht, Heyrothsberge 1987
- [Pleß, Seliger 1996] Pleß, G.; Seliger, U.: Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten, Teil 3: Wechselwirkung zwischen Löschwassertropfen und Plastoerflächen, Einbringung von Wassertropfen in Kanäle verdeckter Brände und organische Schadstoffe bei Plastbränden, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge 1996, Forschungsbericht Nr. 101, Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1996
- [Pleß, Seliger 1995] Pleß, G.; Seliger, U.: Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen - Konzepte für Wertstoff-Zwischenlager des Dualen Systems Deutschland (DSD) und für Reifenlager aus der Sicht der mobilen Brandbekämpfung und Ableitung von Löschrategien, Teil 1: Analyse des Ist-Standes zum Brandschutz und zur stationären und mobilen Brandbekämpfung, Forschungsbericht Nr. 107, Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1995
- [Pleß, Seliger 2000] Pleß, G.; Seliger, U.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepte für Störfälle in Chemikalienlagern (IV), BMBF-Forschungsprojekt 01RG 9510, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Instituts-Bericht Nr. 386, Heyrothsberge 2000
- [Prandtl et al. 1990] Prandtl, L.; Oswatitsch, K.; Wieghardt, K.: Führer durch die Strömungslehre, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig 1990
- [Richtlinie ARGEBAU 1995] Musterrichtlinie über den Brandschutz bei der Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoffen (Kunststoff-Lager-Richtlinie) der ARGEBAU 11/1995
- [Richtlinie VKE 1994] Brandschutztechnische Richtlinien für die Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff, Verband der Kunststoffherzeugenden Industrie e.V. Frankfurt, 06/1994
- [RÖMPP 1995] RÖMPP Chemie Lexikon, CD-Rom, Version 1.0, 9. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart 1995
- [VDI-Wärmeatlas 1997] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997
- [VdS-Richtlinie 1996] VdS-Richtlinie 2513: Brandschutztechnische Richtlinien für die Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff, Verband der Schadensversicherer e.V. N. 06/96 (01) Köln
- [Thater 1968] Thater, R.: Brennverhalten von Plastformstoffen, Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968

Anlage 1
Berstversuche mit leeren Sprayflaschen

Abbildung 1: Wannenspray

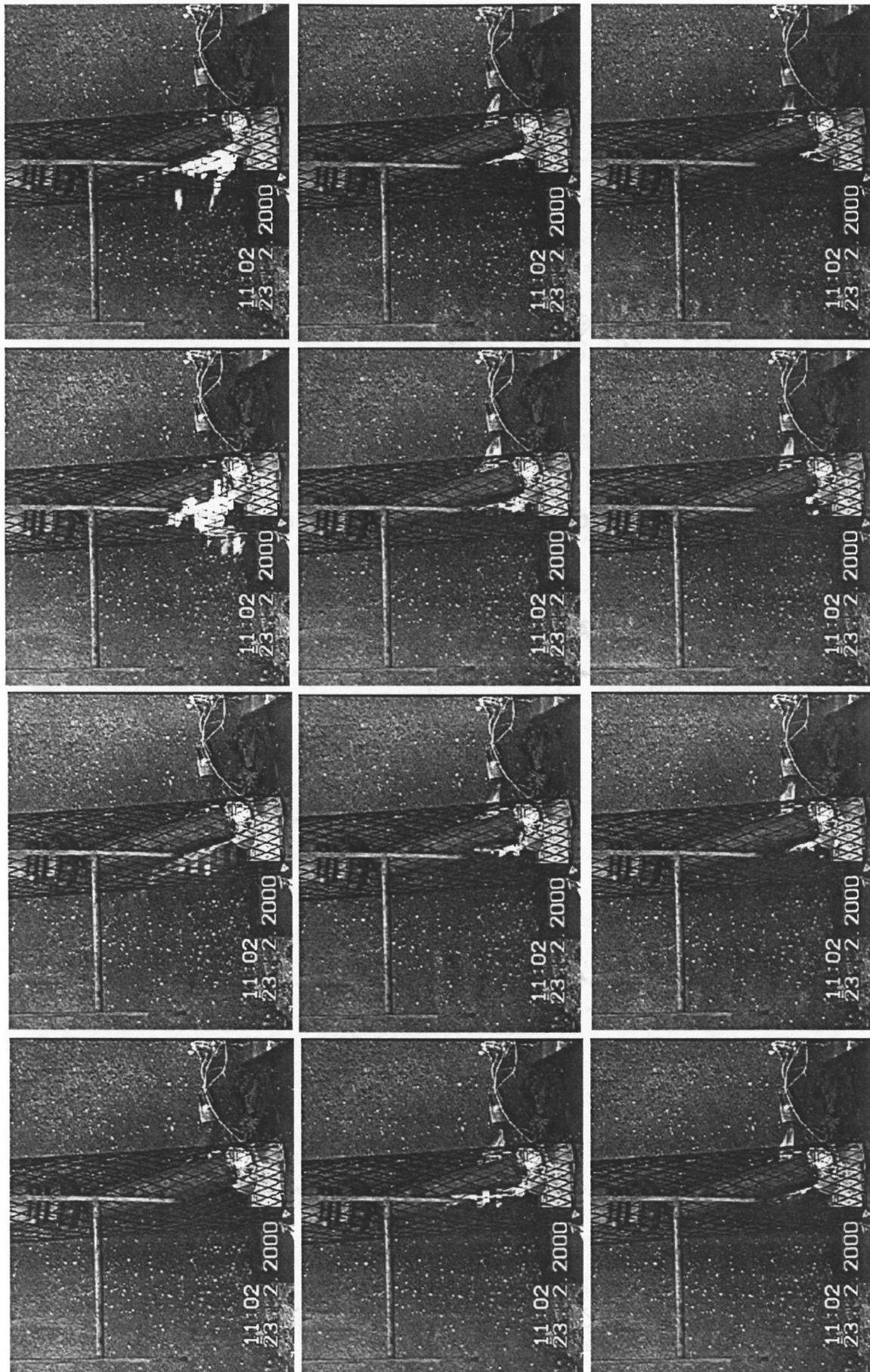


Abbildung 2: Trennspray

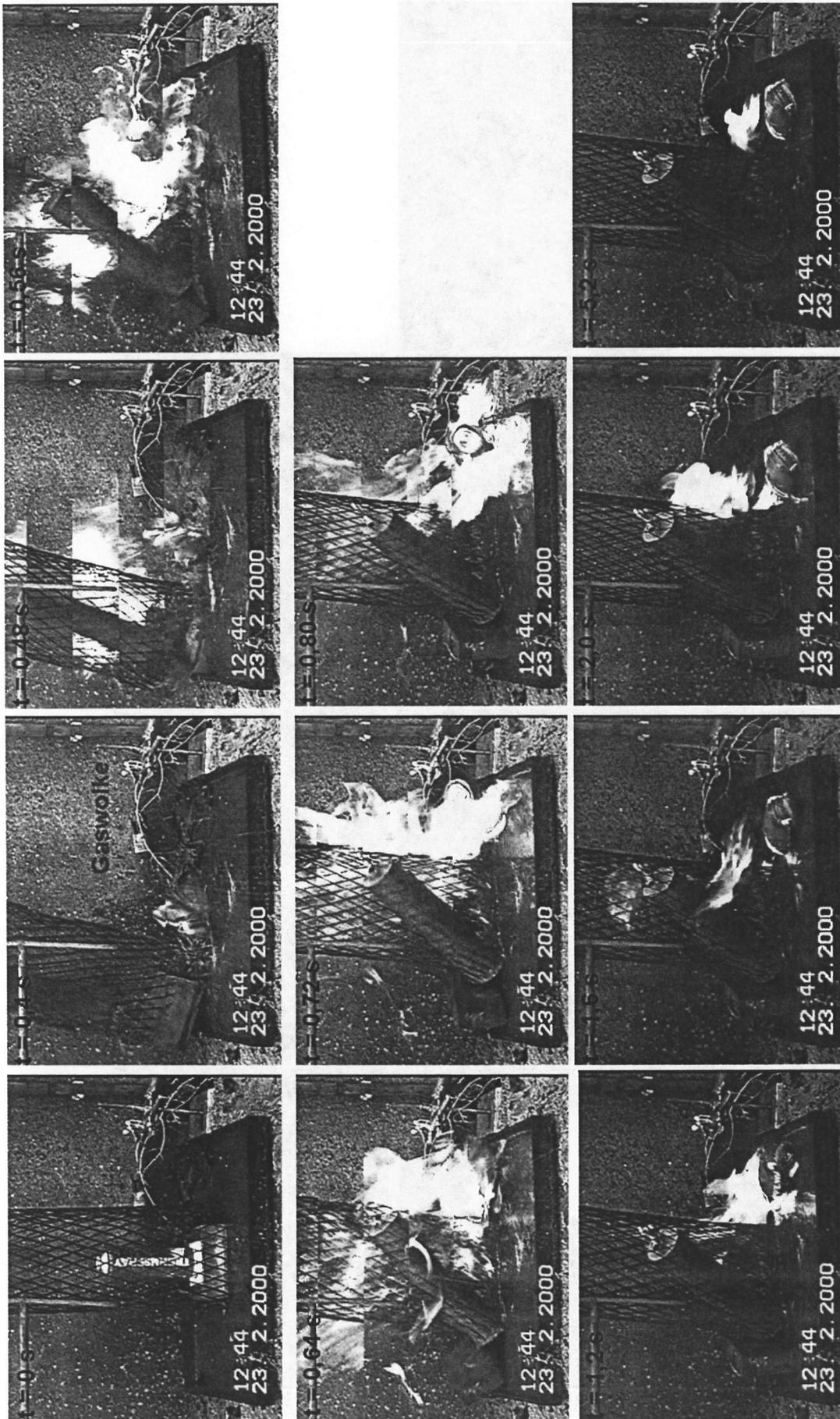


Abbildung 3: Haarspray

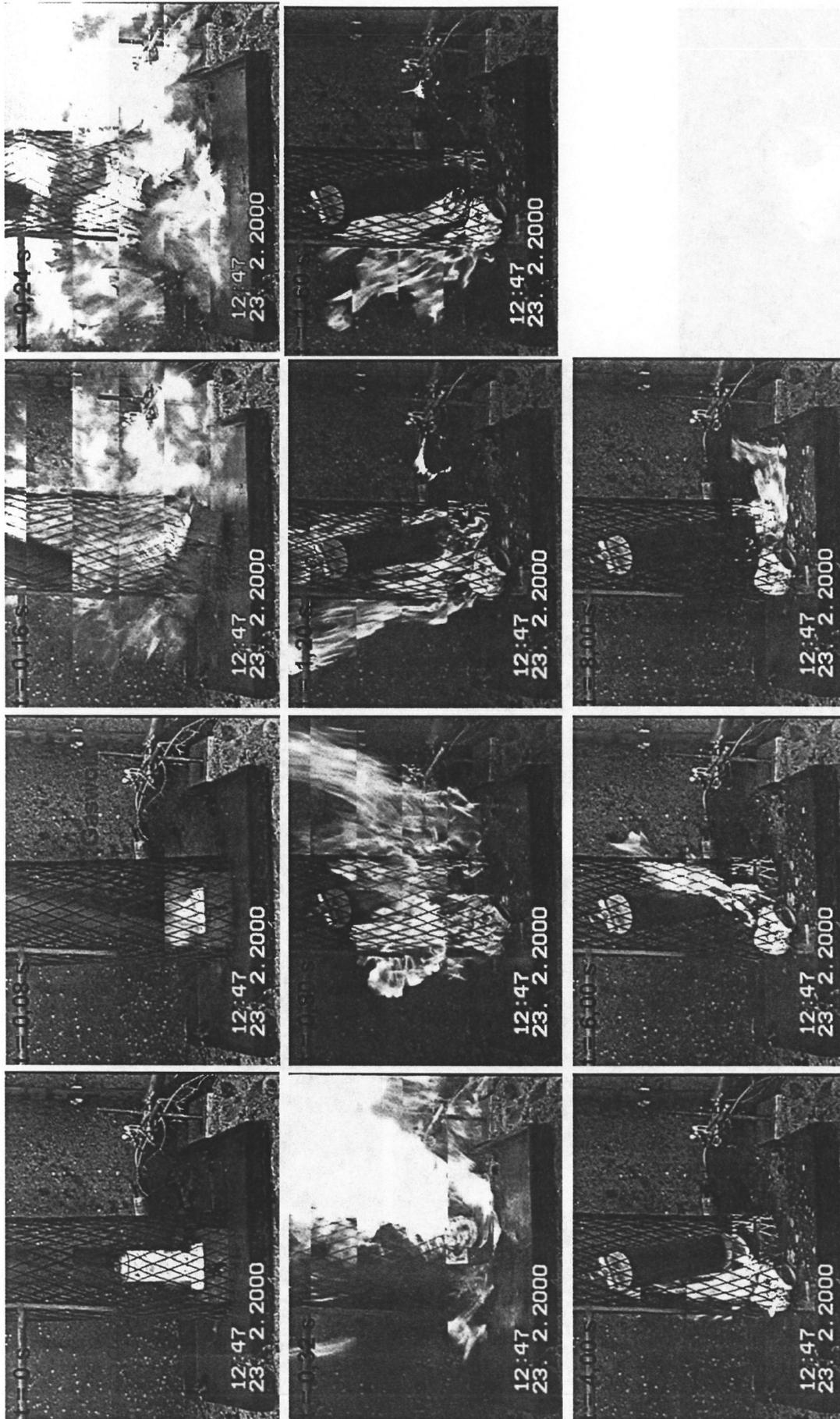


Abbildung 4: Badreiniger

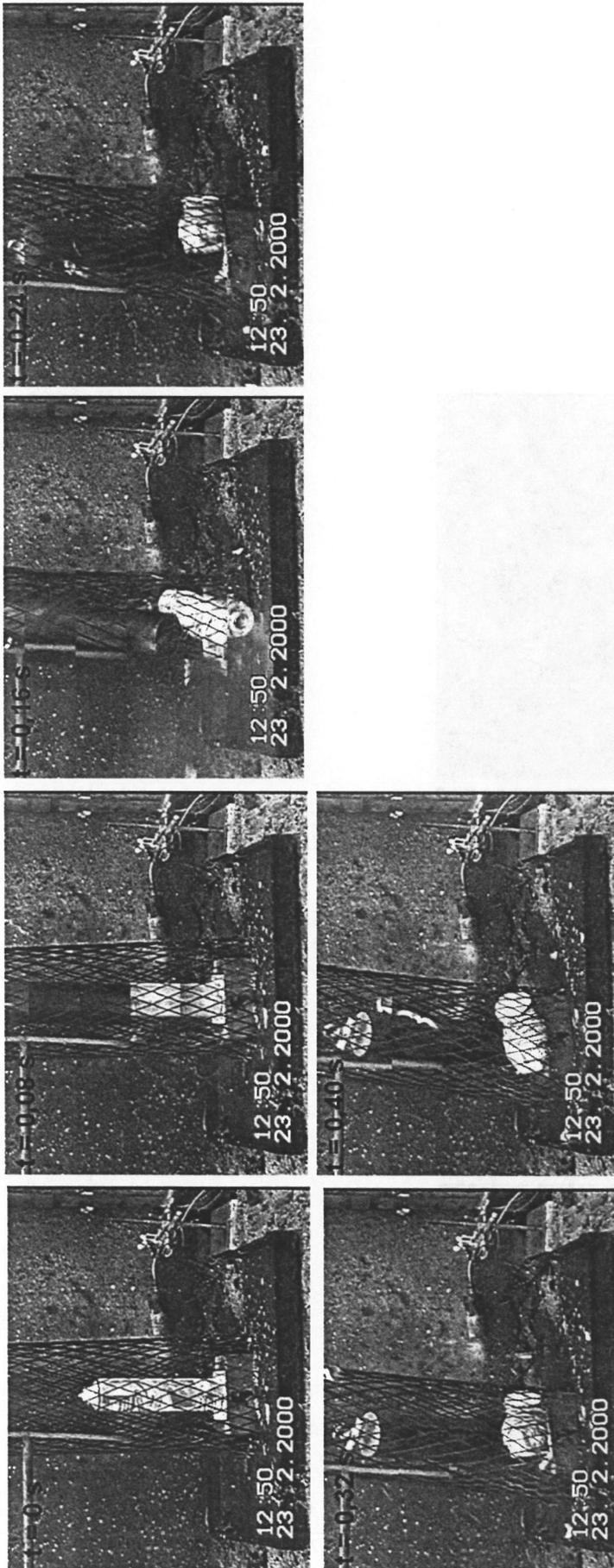


Abbildung 5: Badreiniger

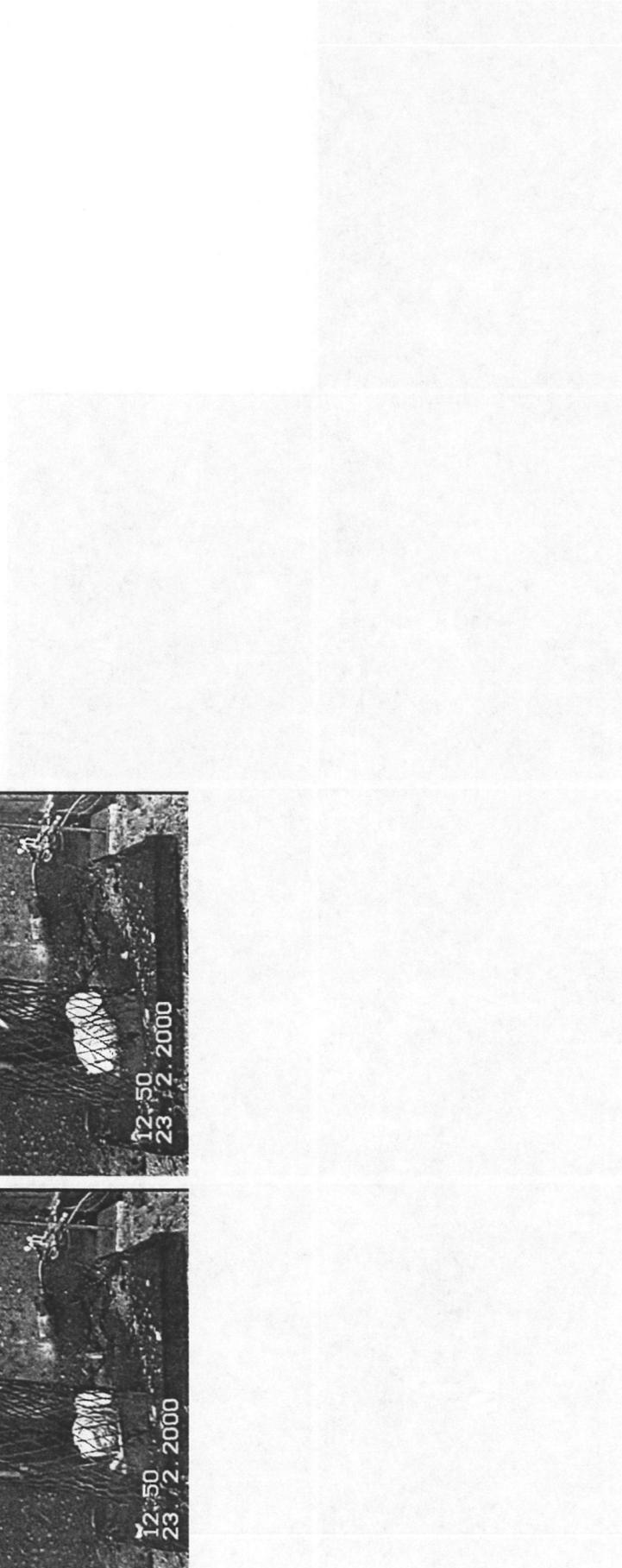


Abbildung 5: Bremsenreiniger

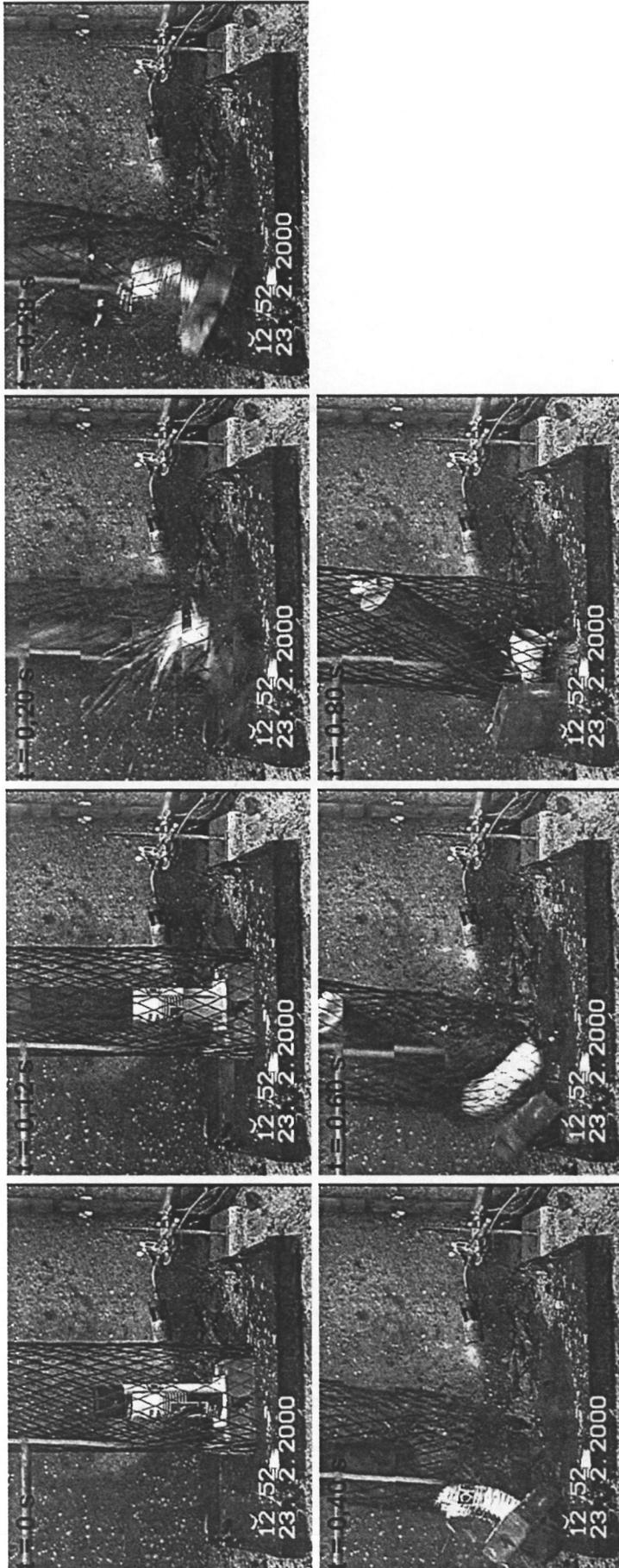


Abbildung 4: Bremsreiniger

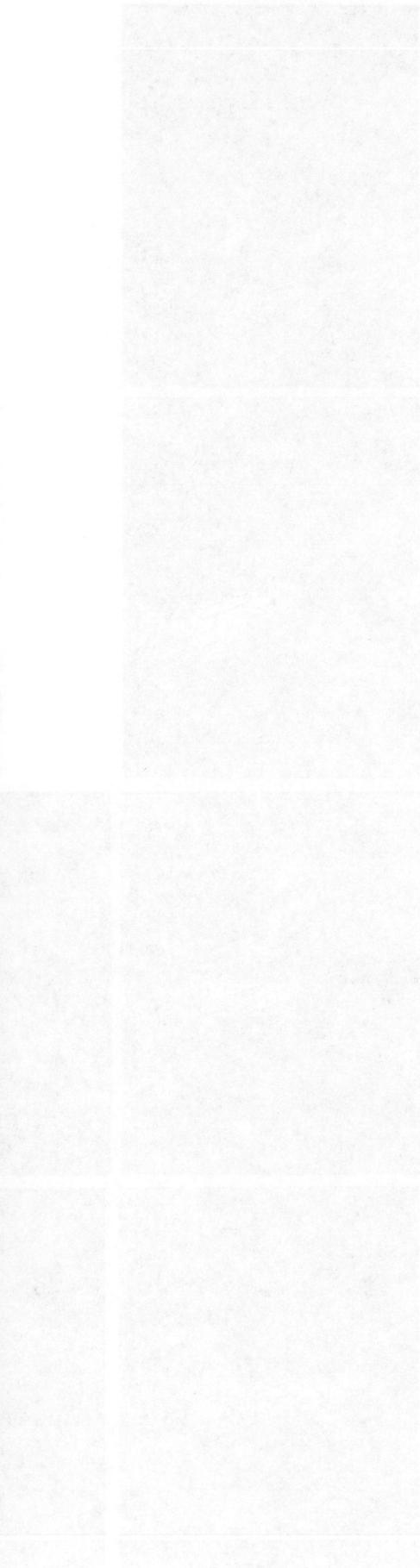


Abbildung 6: Montageschaum

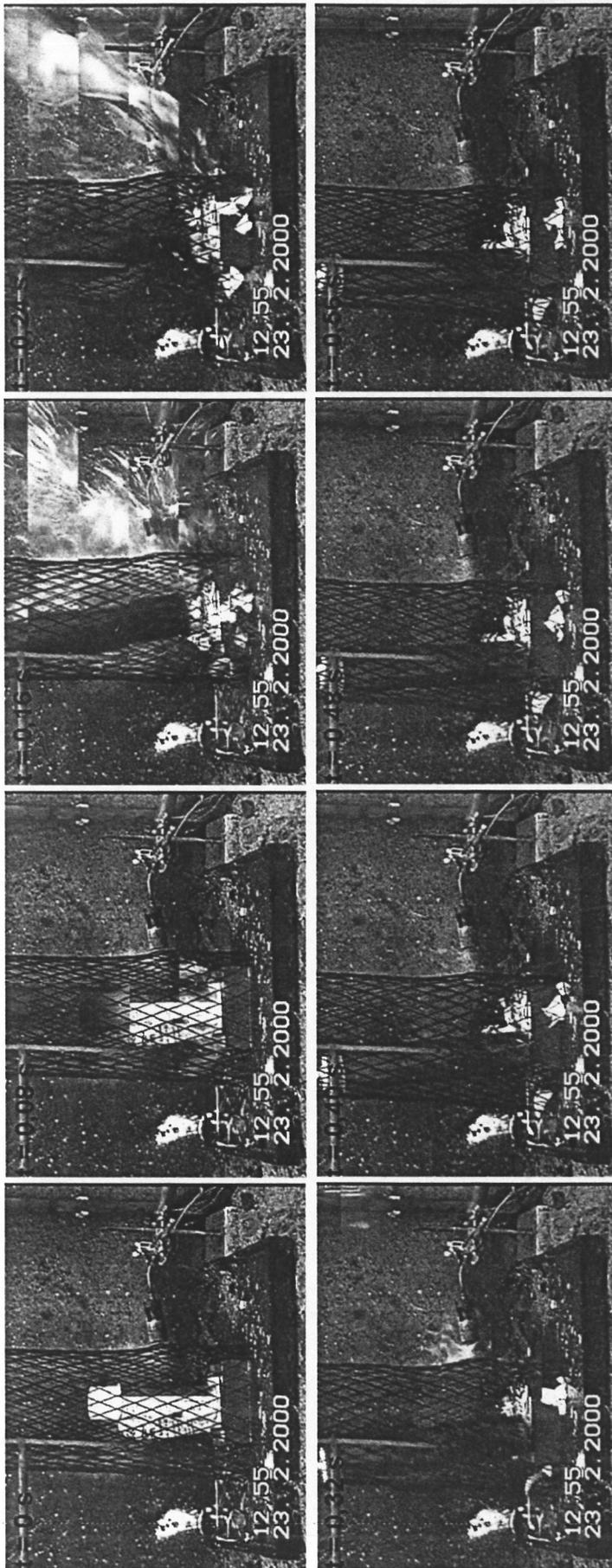


Abbildung 7: Schweißnähte

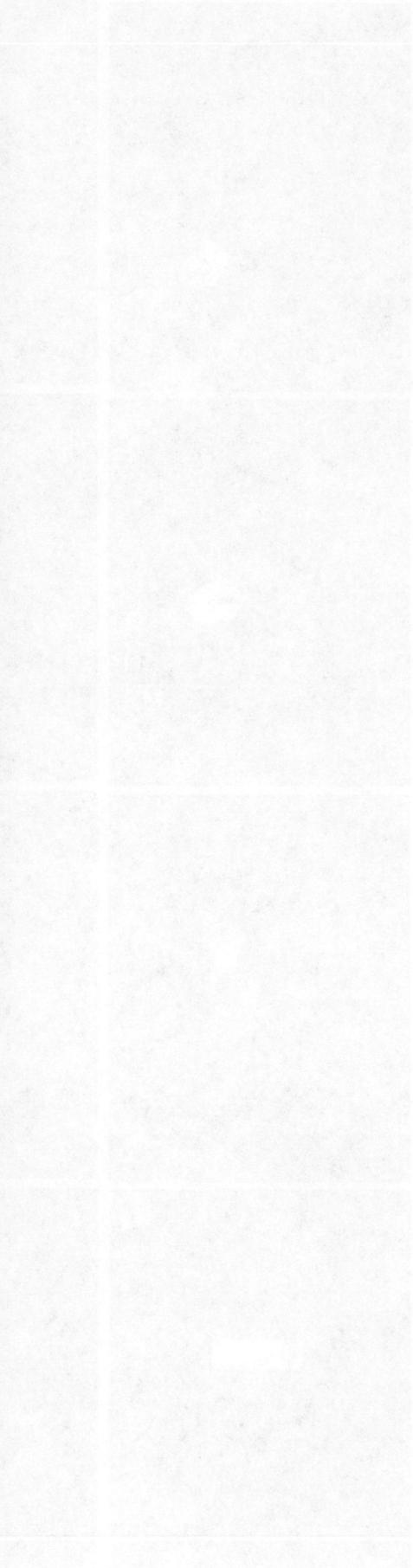


Abbildung 7: Schnellreiniger

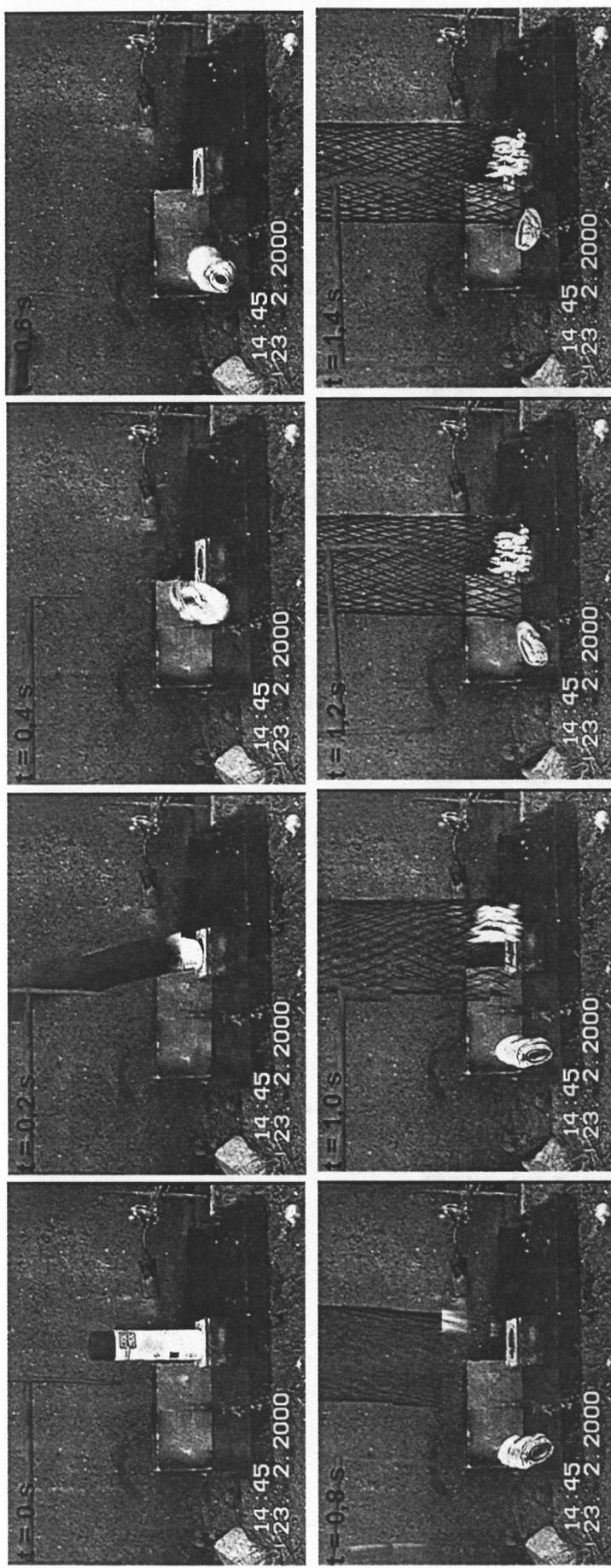


Abbildung 8: Montageschritt

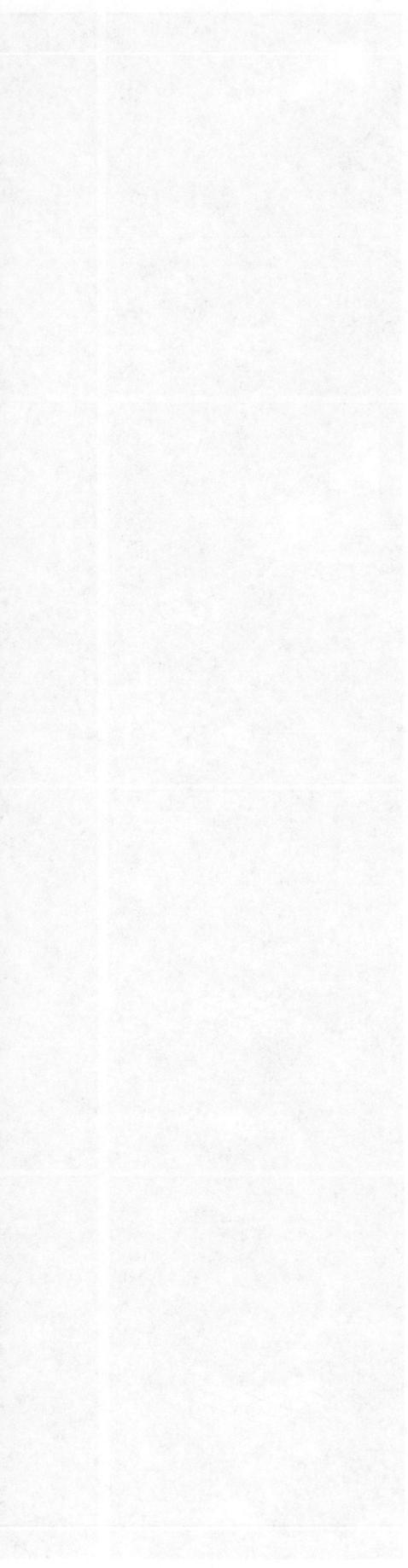


Abbildung 8: Sprühreiniger für Bremsen

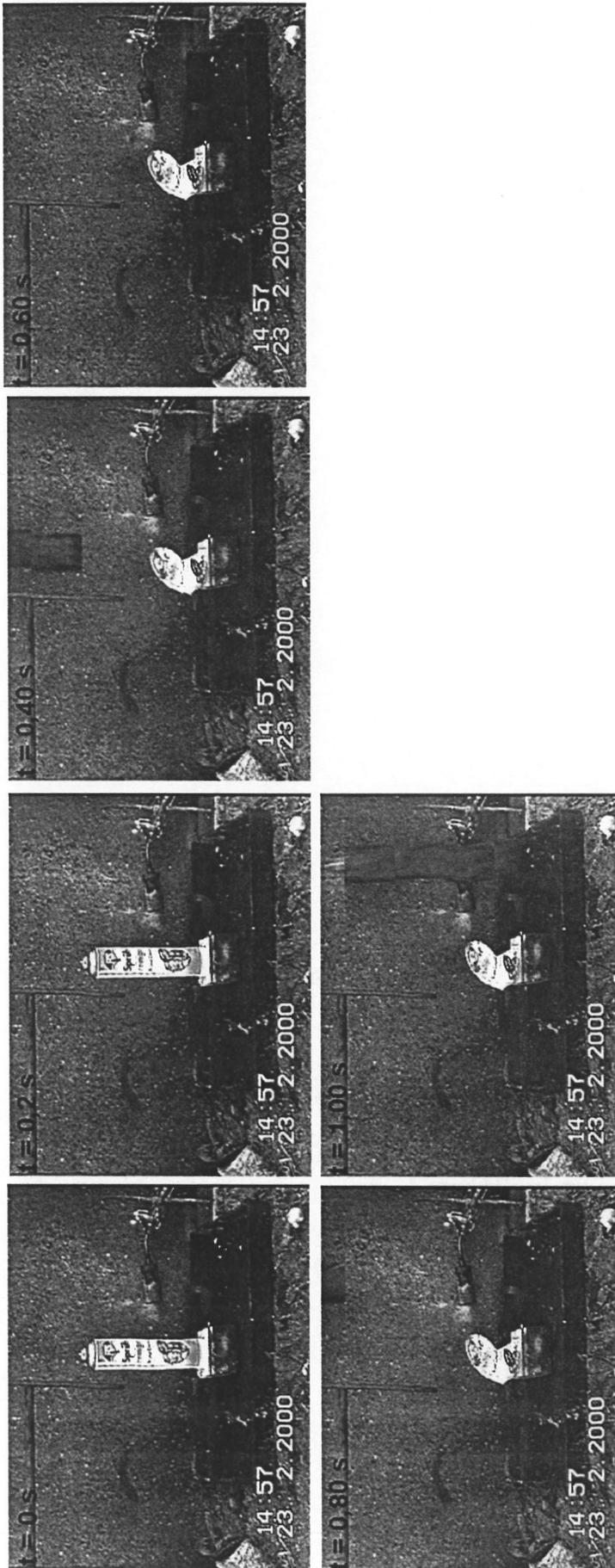


Abbildung 9: Montagebaum

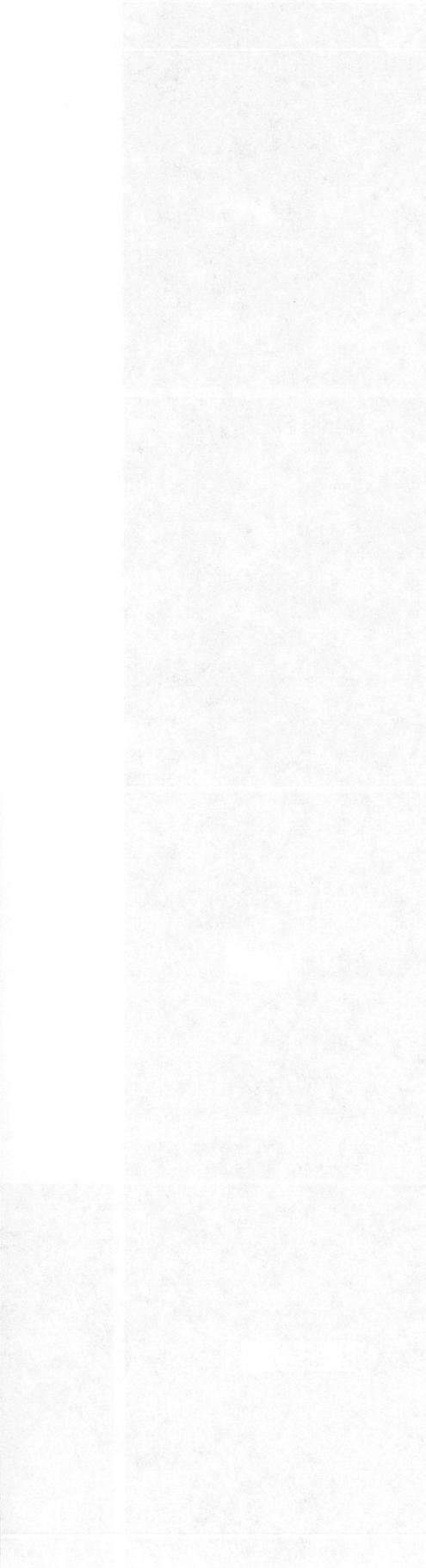


Abbildung 9: Montageschaum

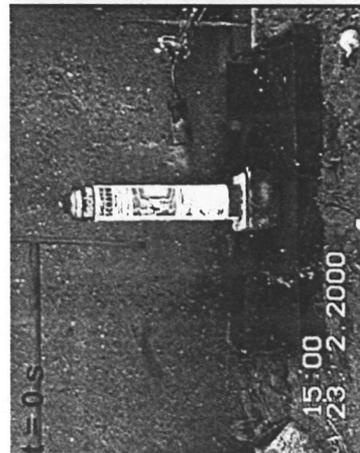
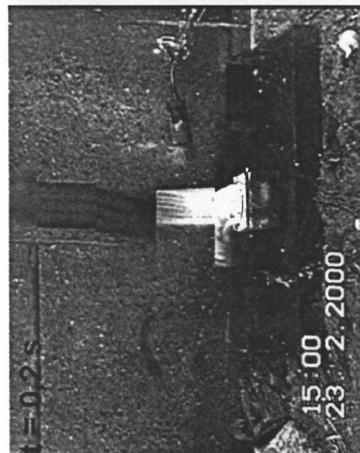


Abbildung 9: Sprühstrahl für Bremsen

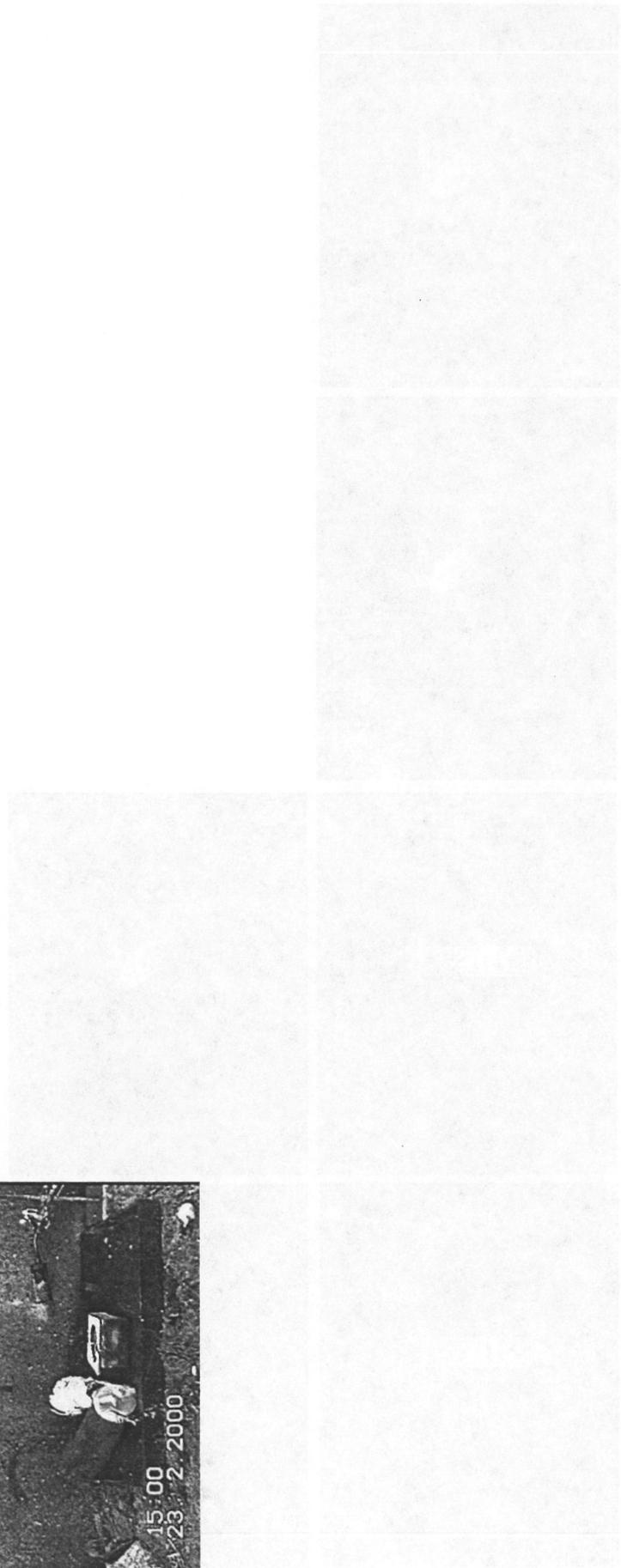


Abbildung 10: Metallreiner



Abbildung 11: Metallreiner

Abbildung 11: Haarspray

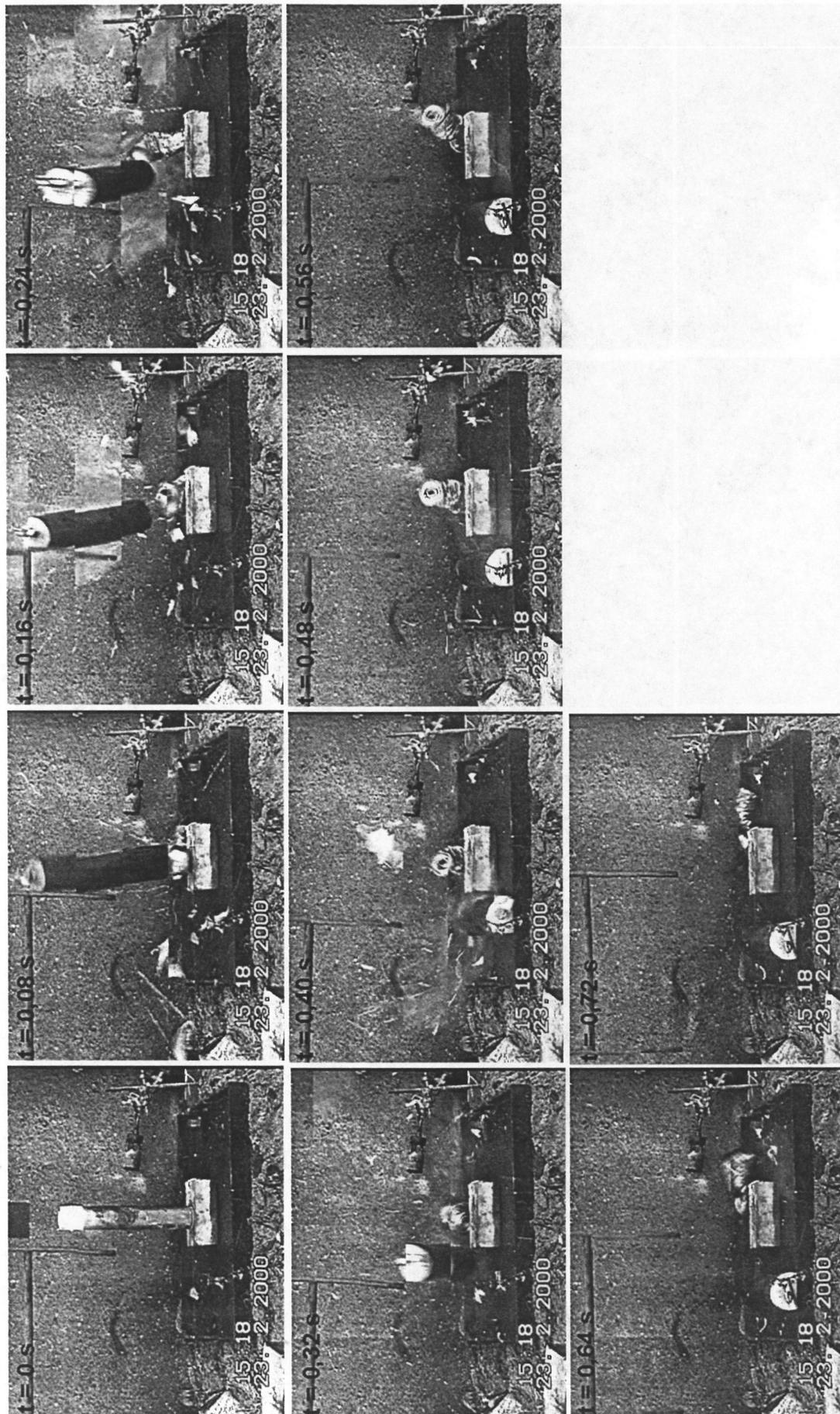


Abbildung 12: Schaumfestiger

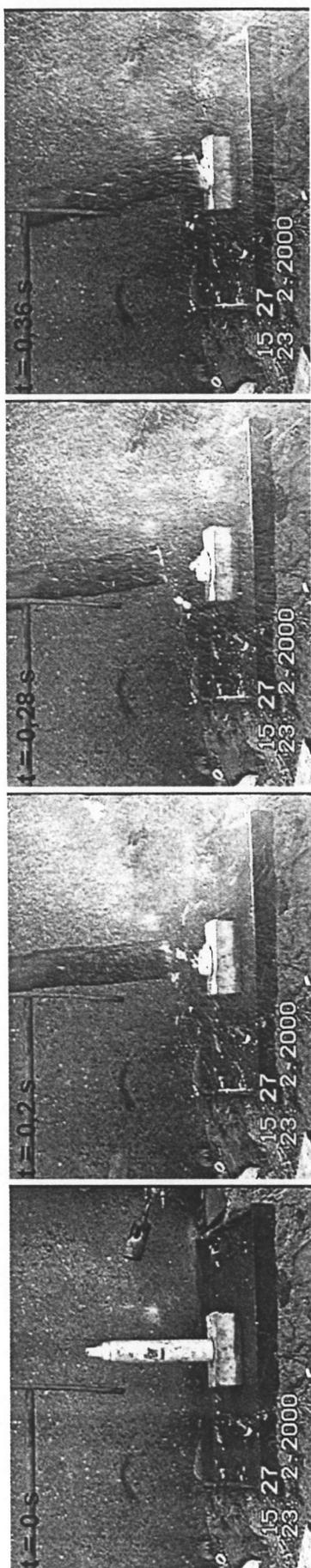


Abbildung 13: Schaumfestiger

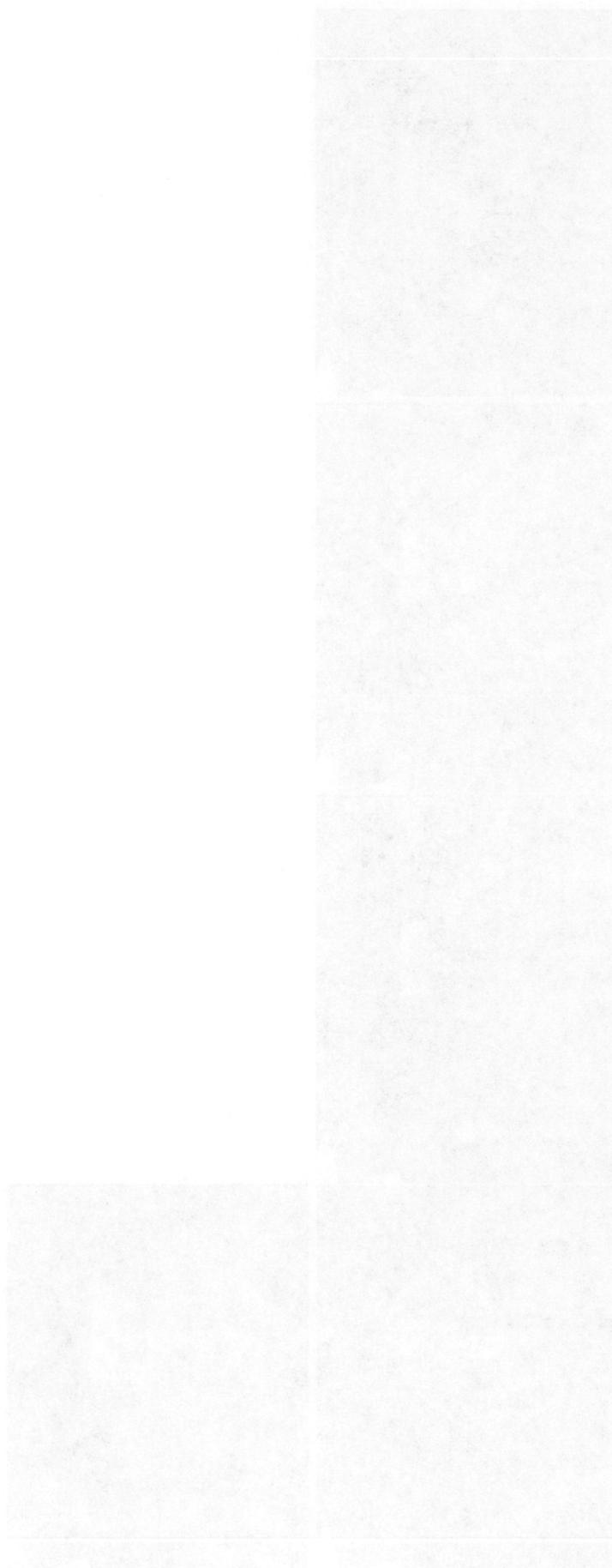


Abbildung 13: Raumspray

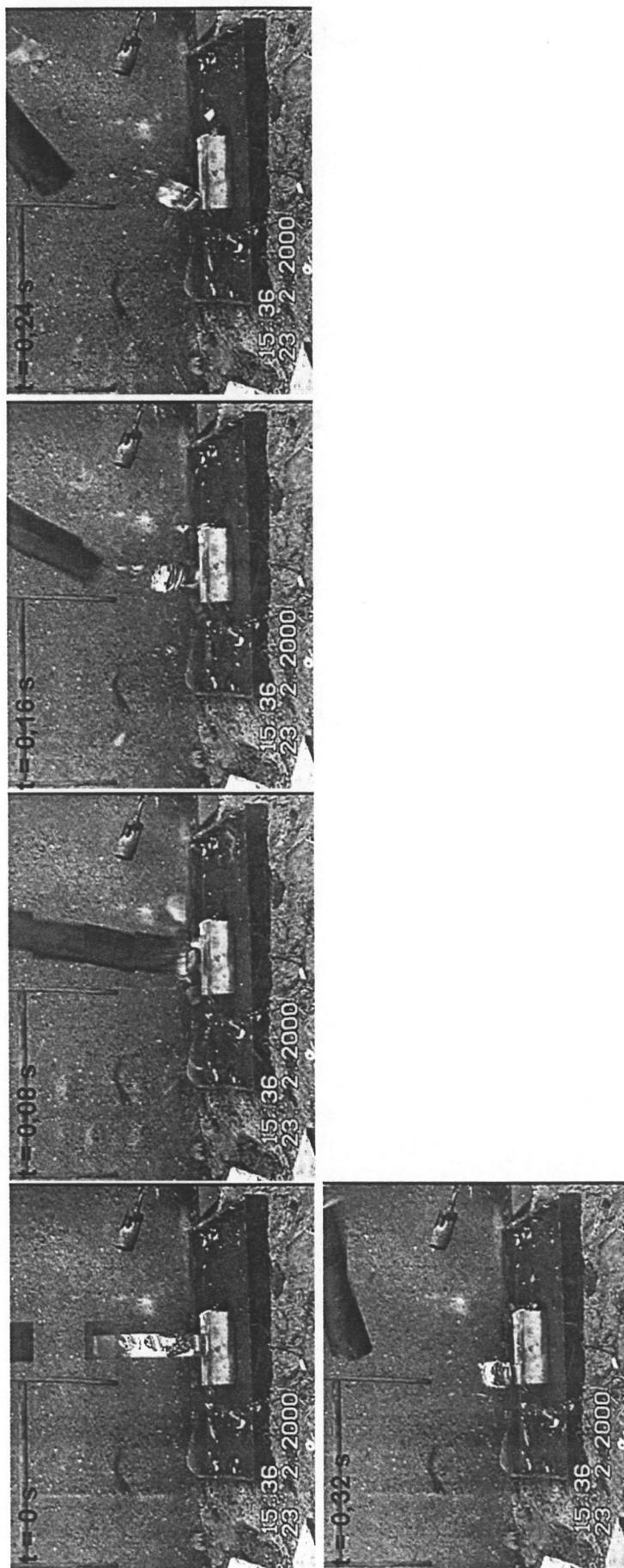


Abbildung 13: Schaumtestleiter

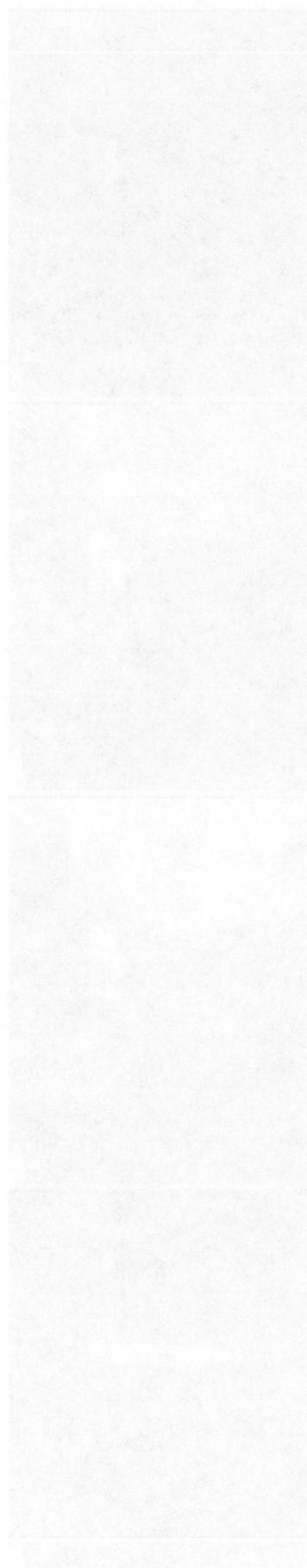


Abbildung 14: Haarspray

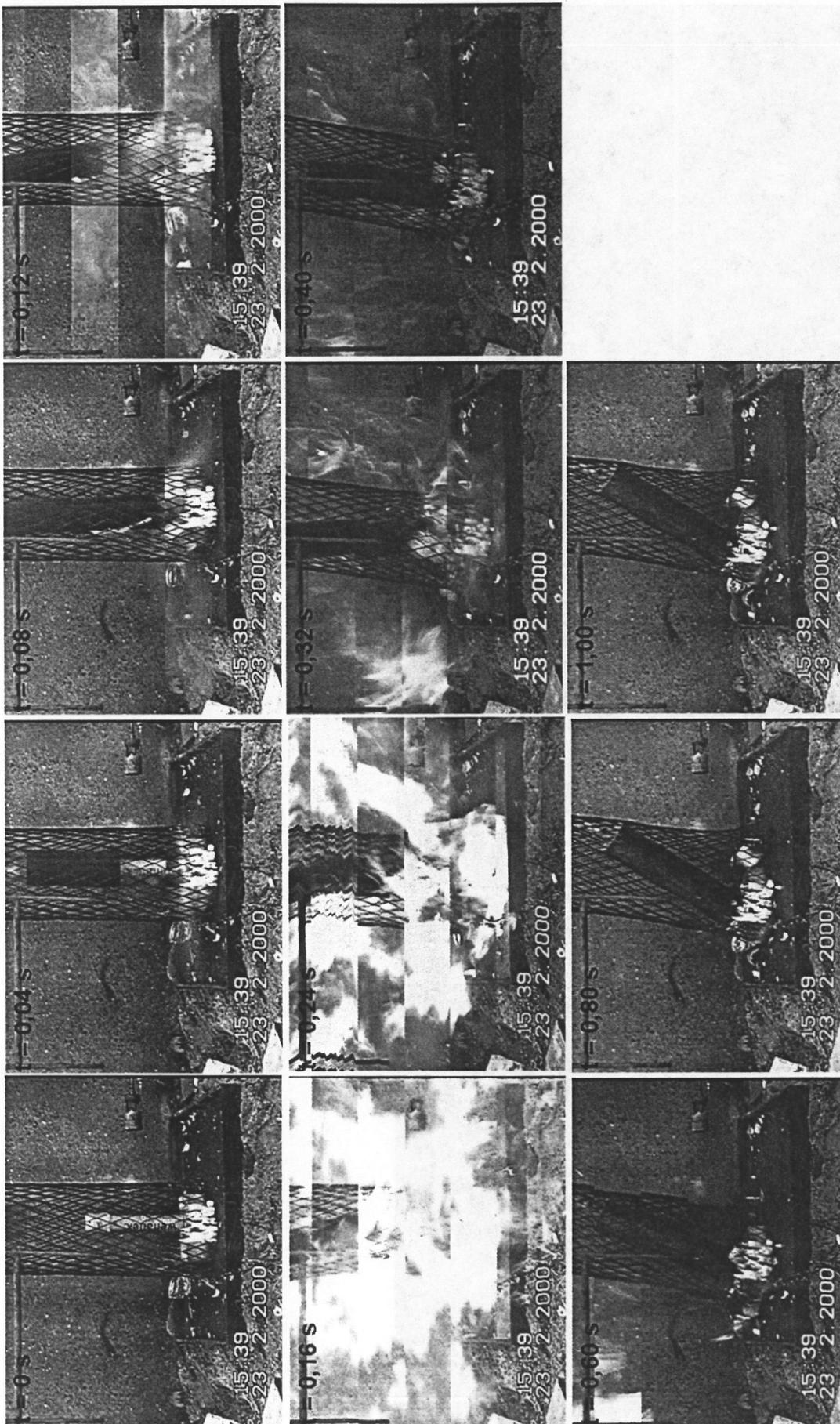


Abbildung 15: Haarspray

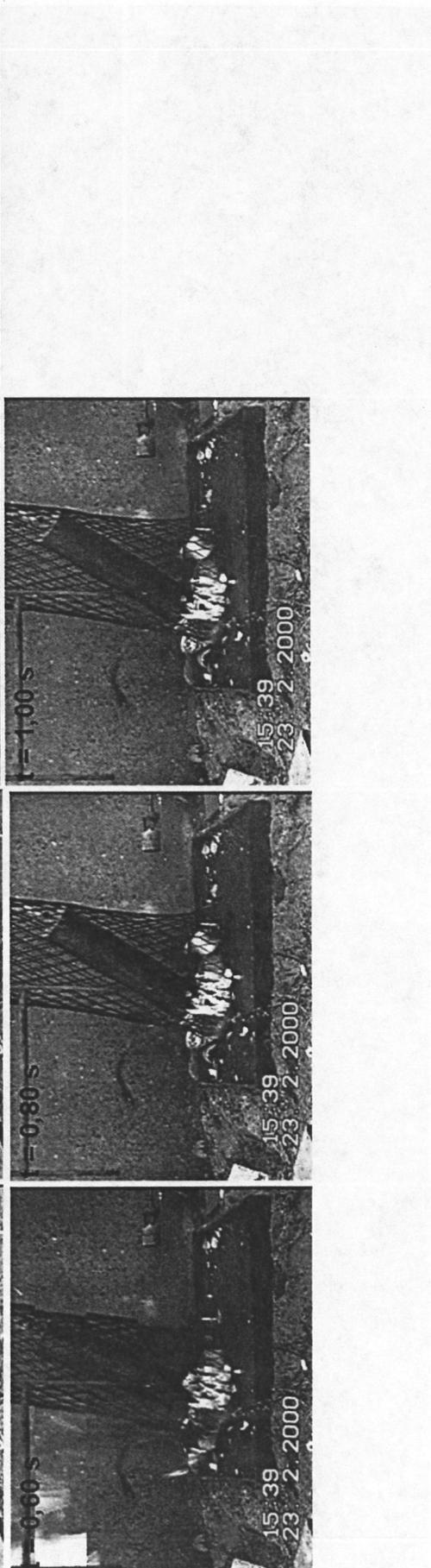


Abbildung 15: Haarspray

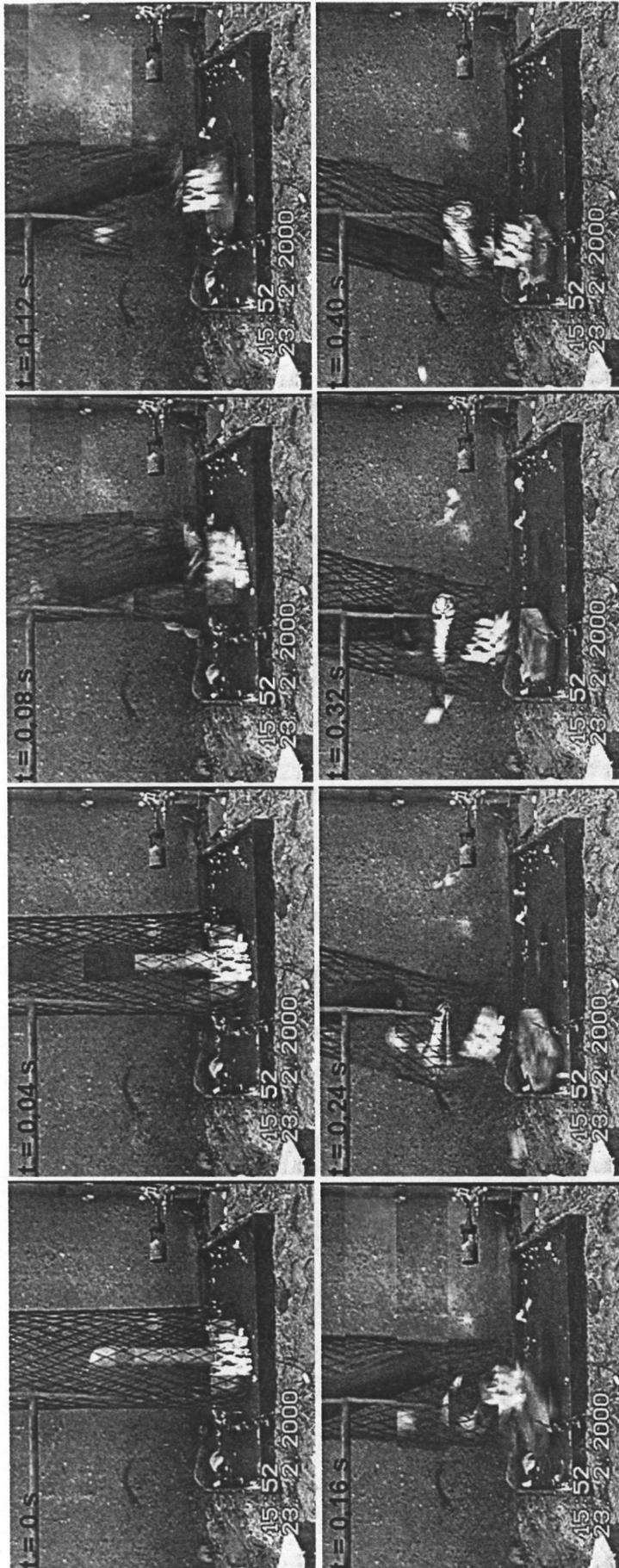


Abbildung 14: Haarspray



Abbildung 16: Haarspray

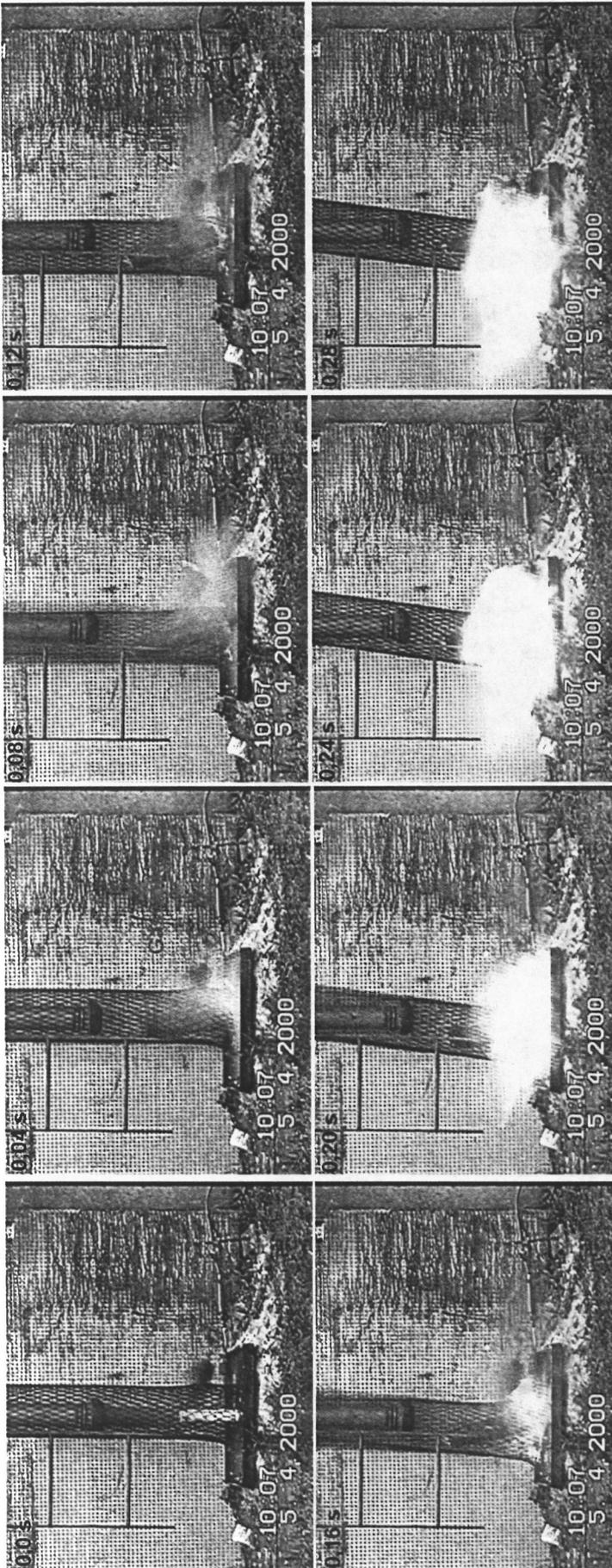
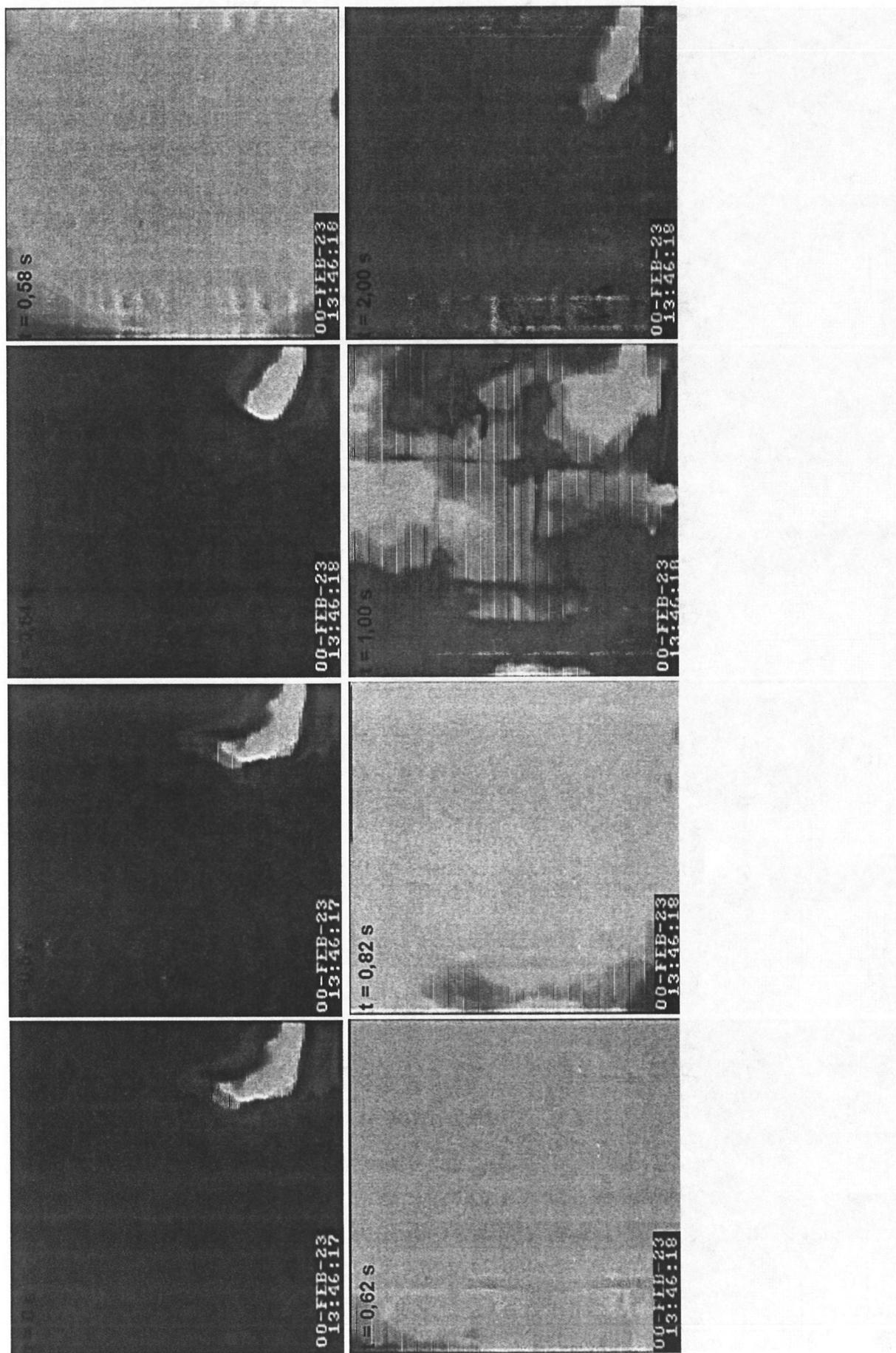


Abbildung 17: Wärmebildaufnahme Haarspray



Anlage 2
Berstversuche mit vollen Sprayflaschen

Abbildung 1: Haarspray (Gard)

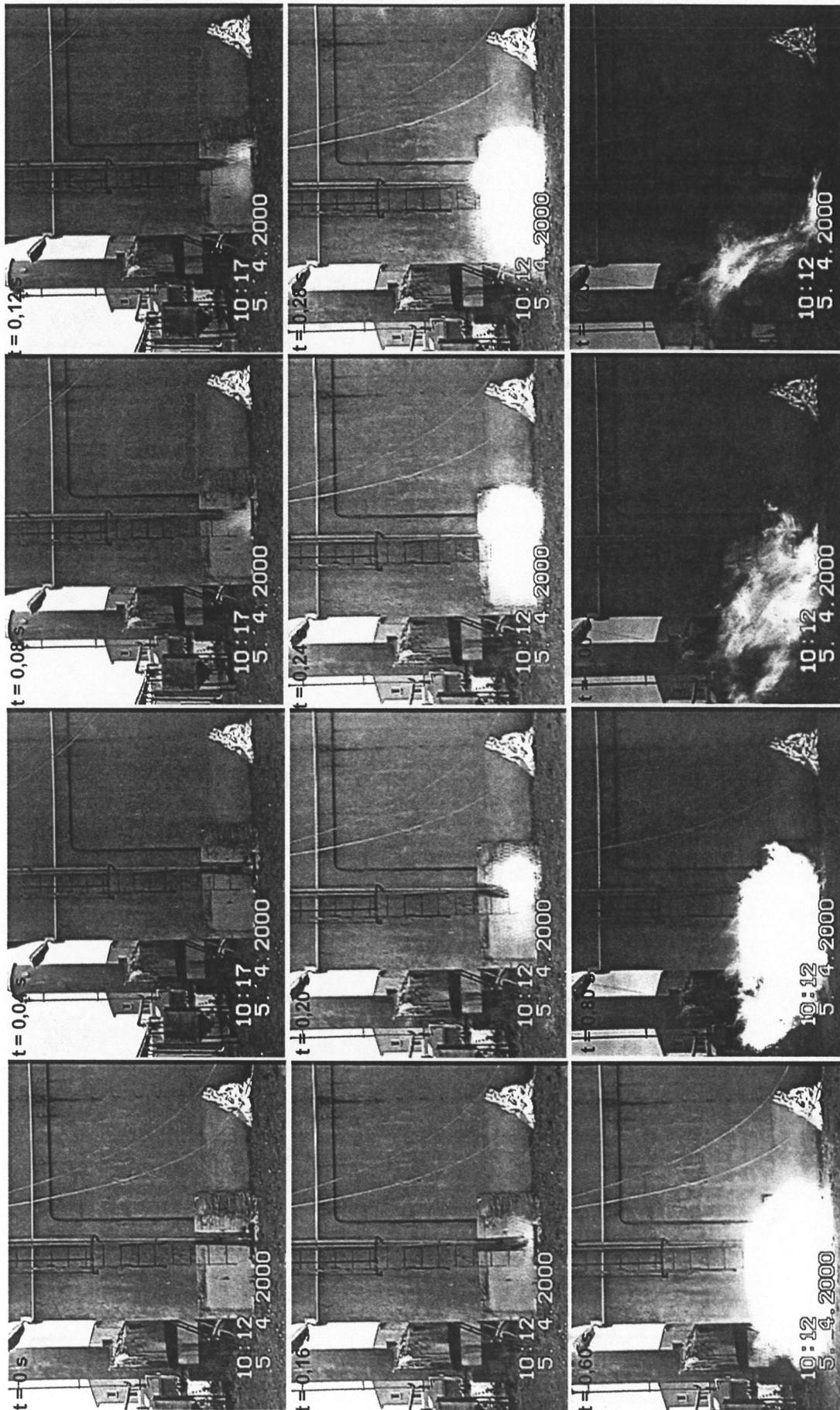


Abbildung 2: Haarspray (Wellaflex)

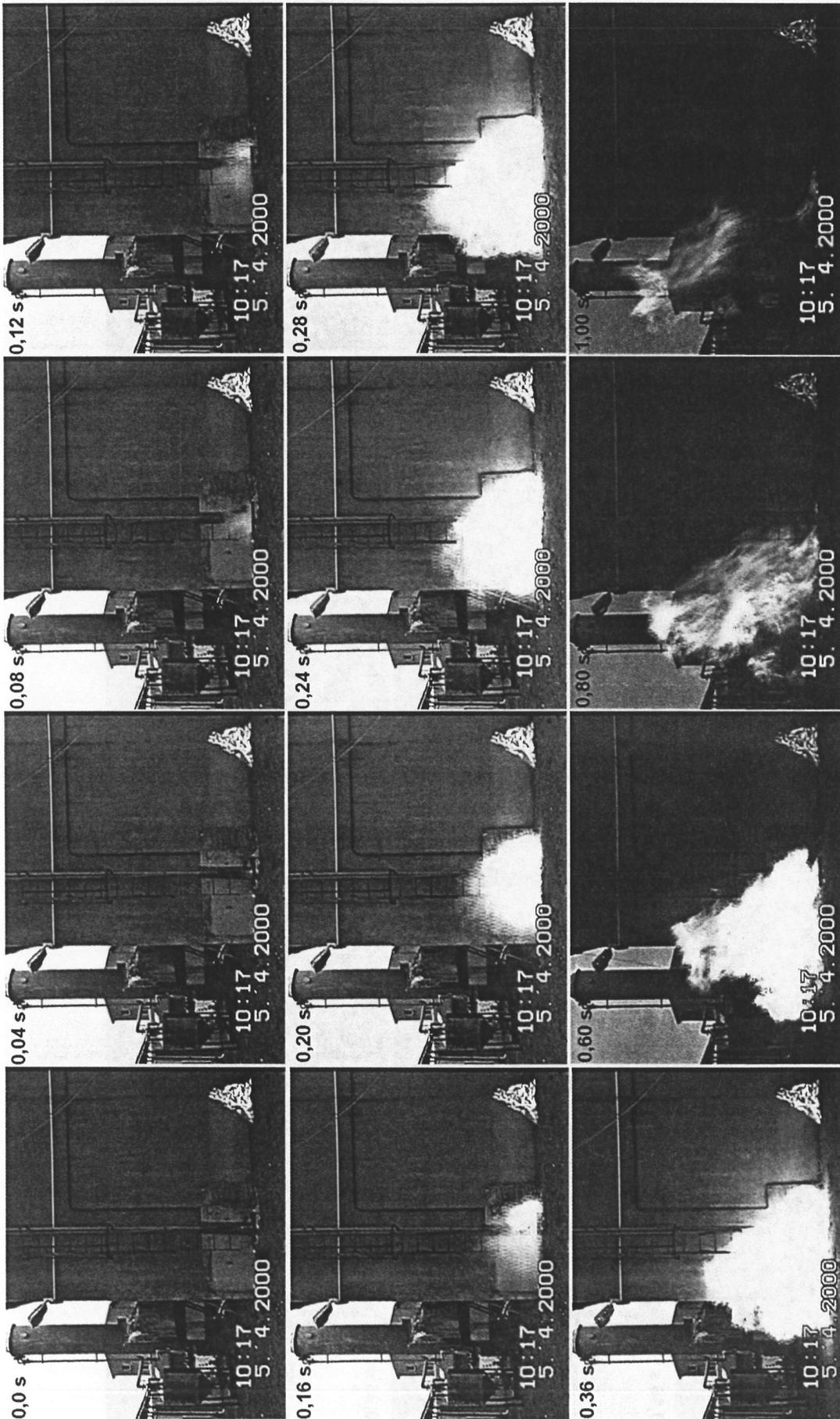


Abbildung 3: Haarspray (Soisee)

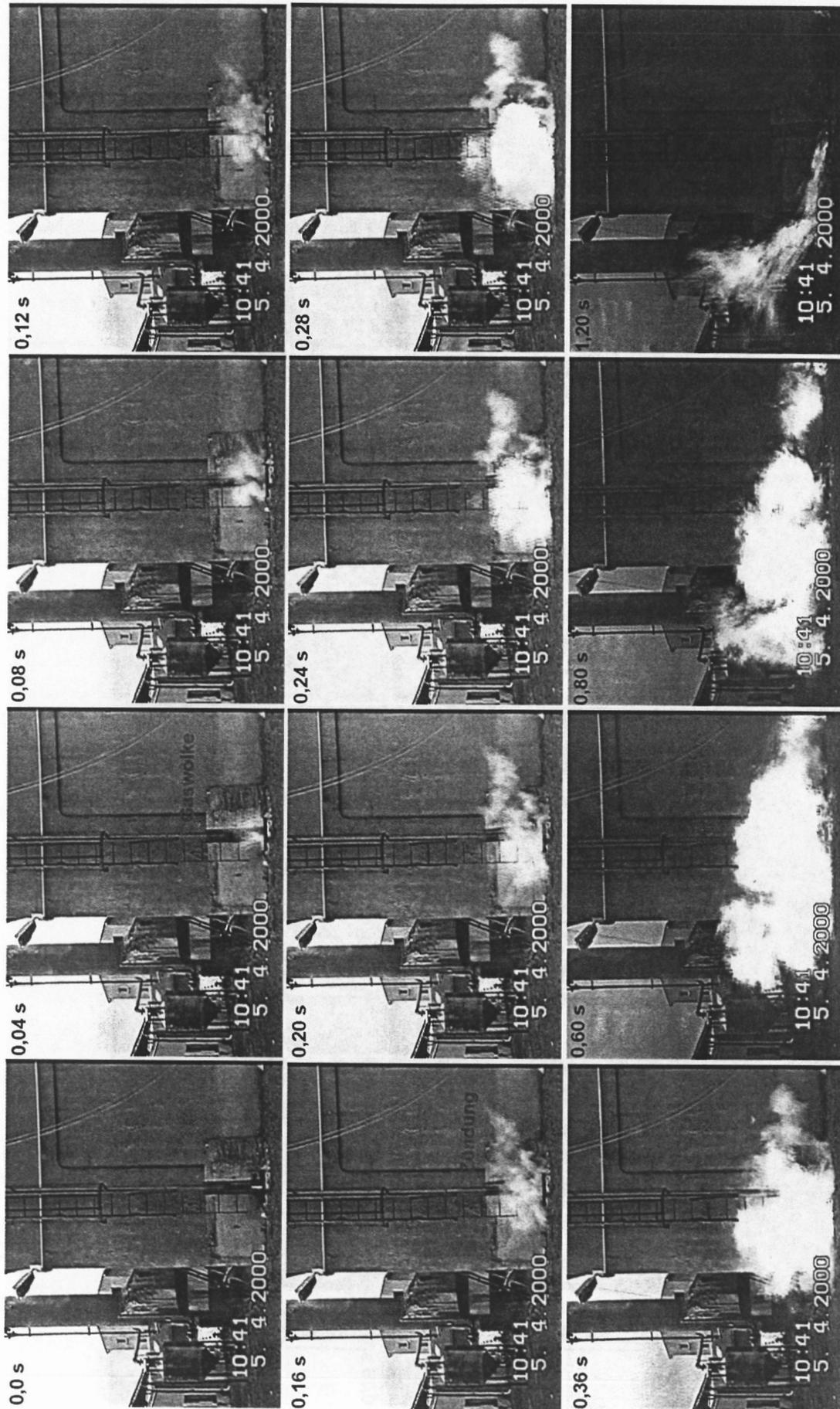


Abbildung 4: Imprägniermittel für Schuhe

Abbildung 8: Fischlikeray

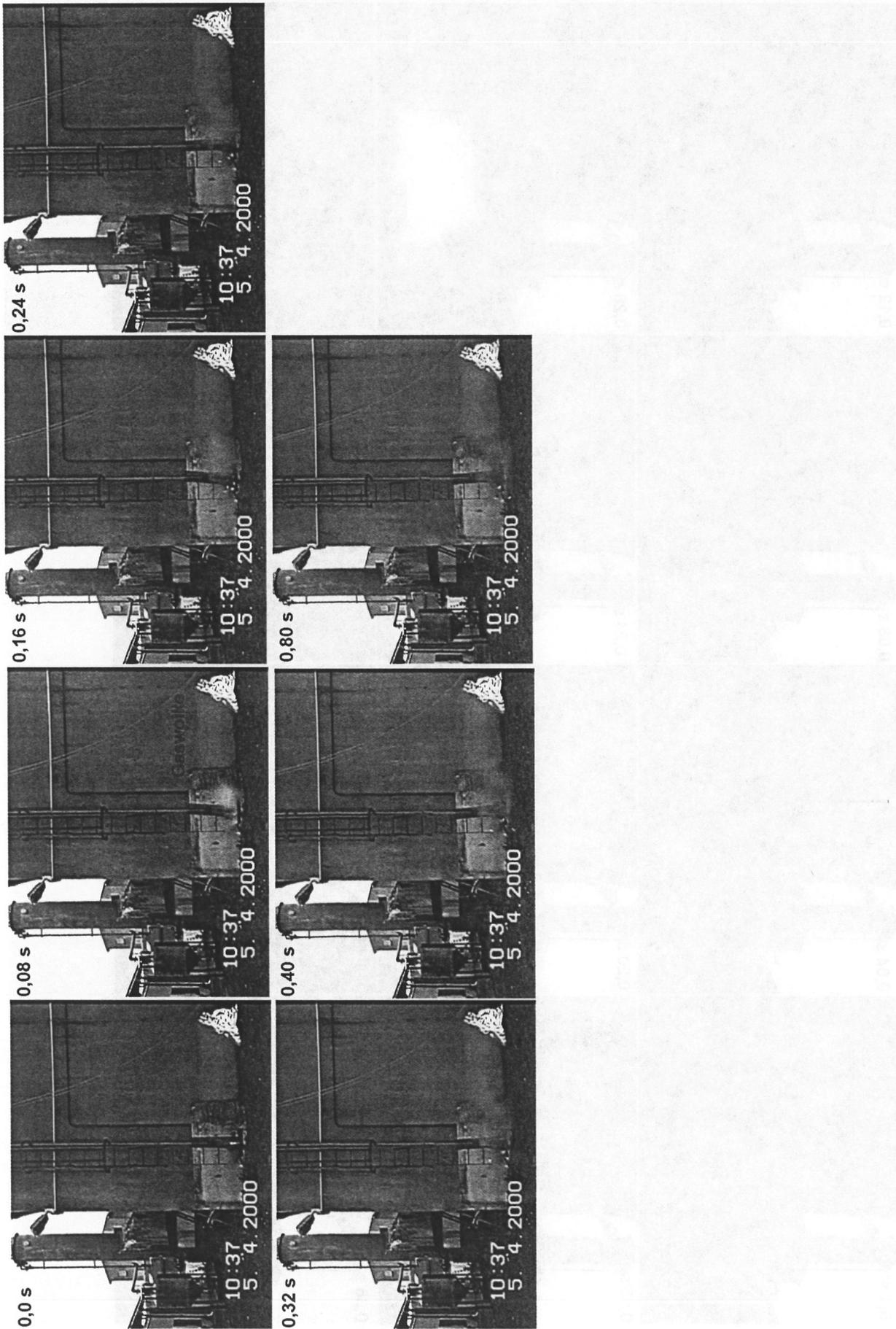


Abbildung 5: Frischluftspray

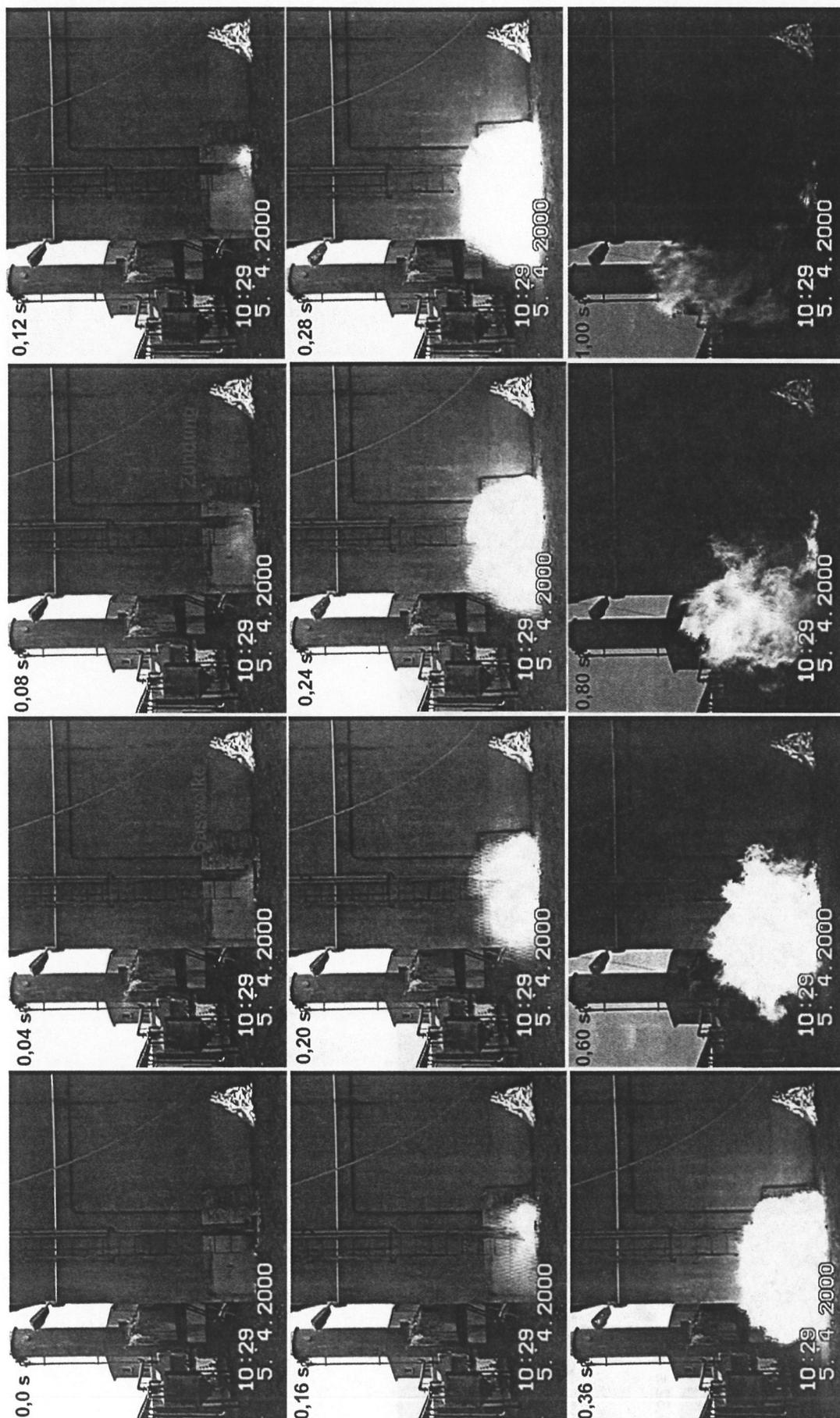


Abbildung 6: Bügelleicht-Spray

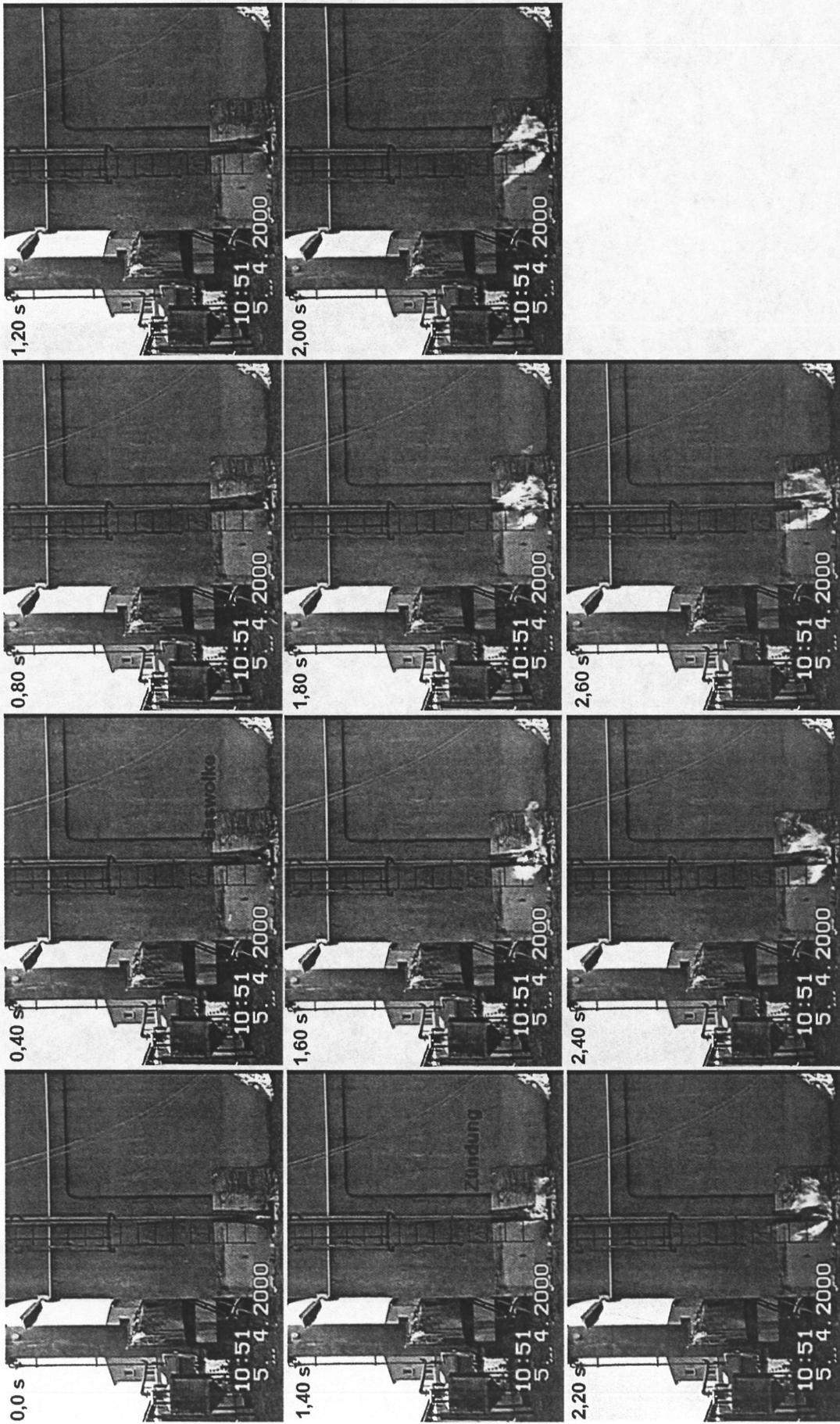


Abbildung 7: High-speed-Aufnahme Haarspray (Gard)

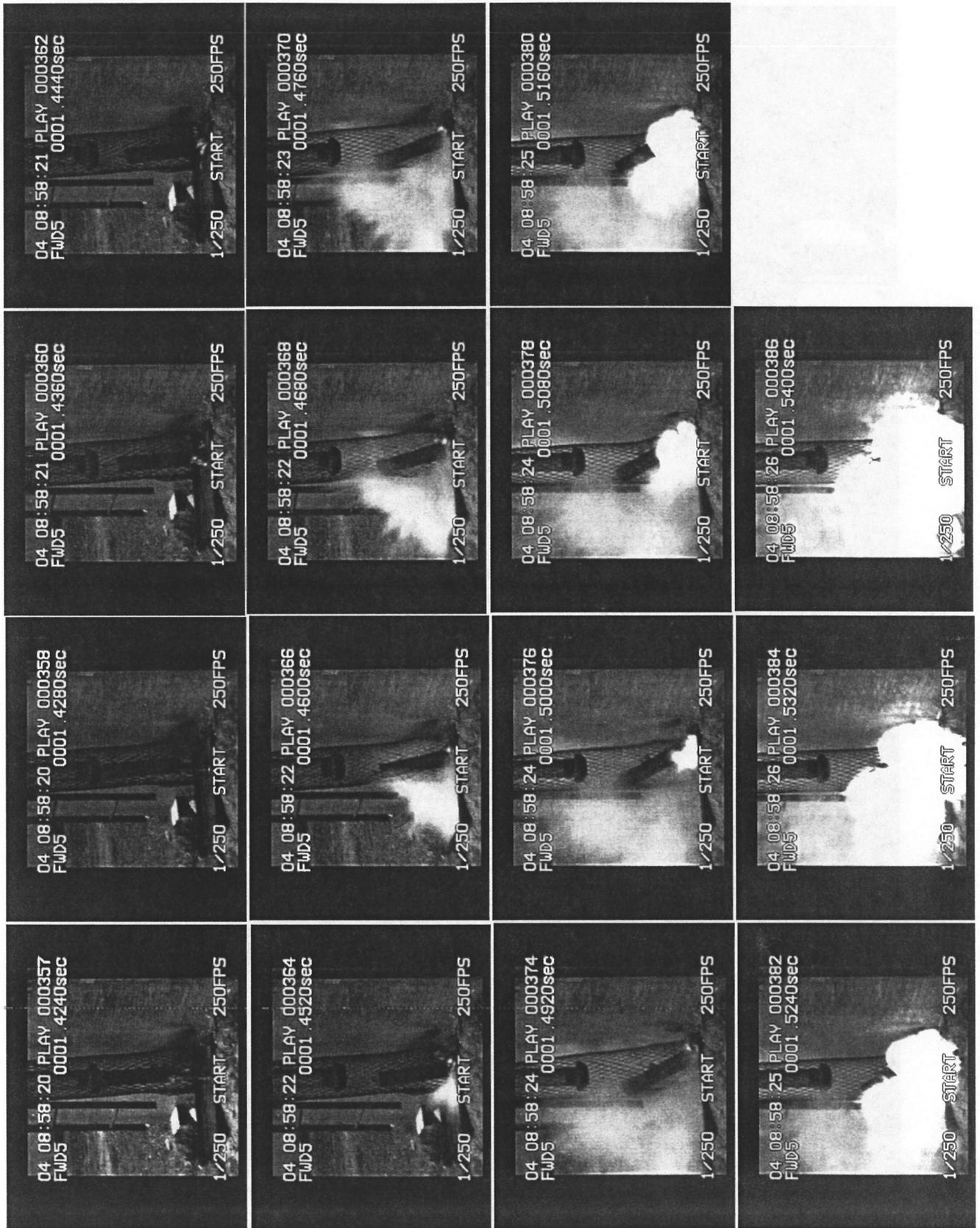


Abbildung 8: High-speed-Aufnahme Haarspray (Wellaflex)

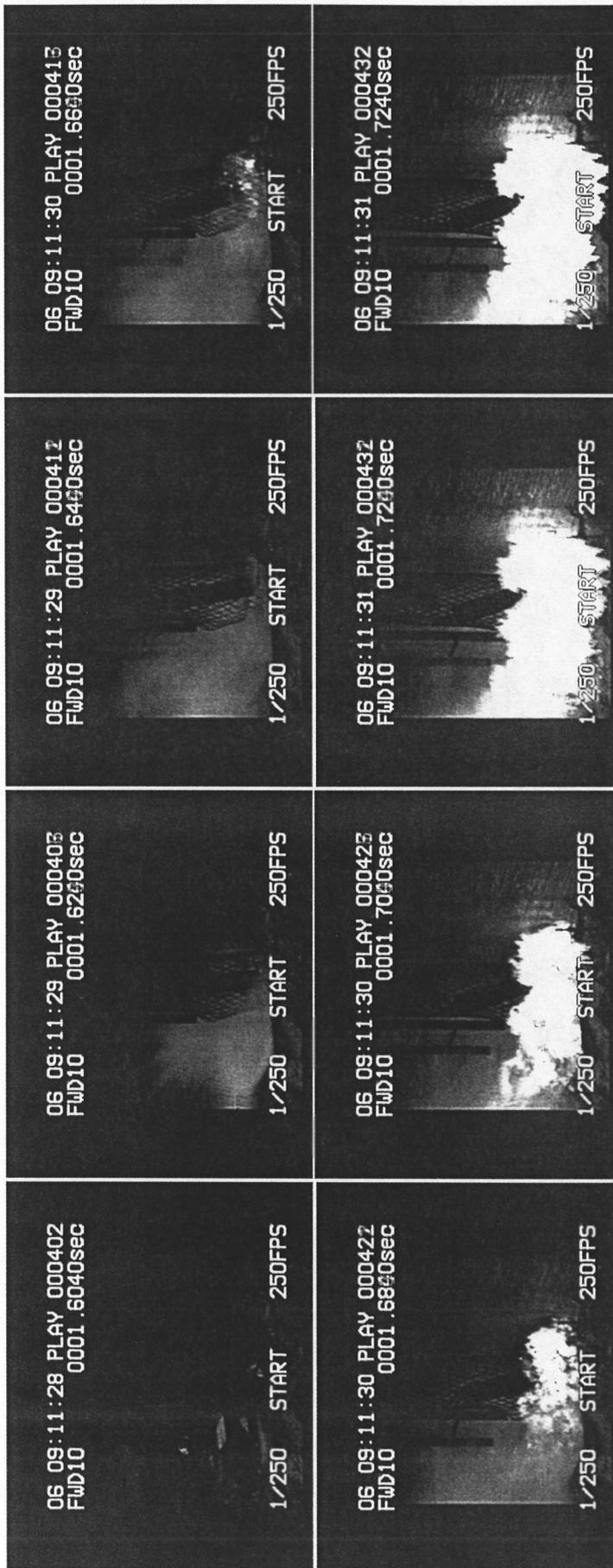


Abbildung 9: High-speed-Aufnahme Imprägniermittel für Schuhe

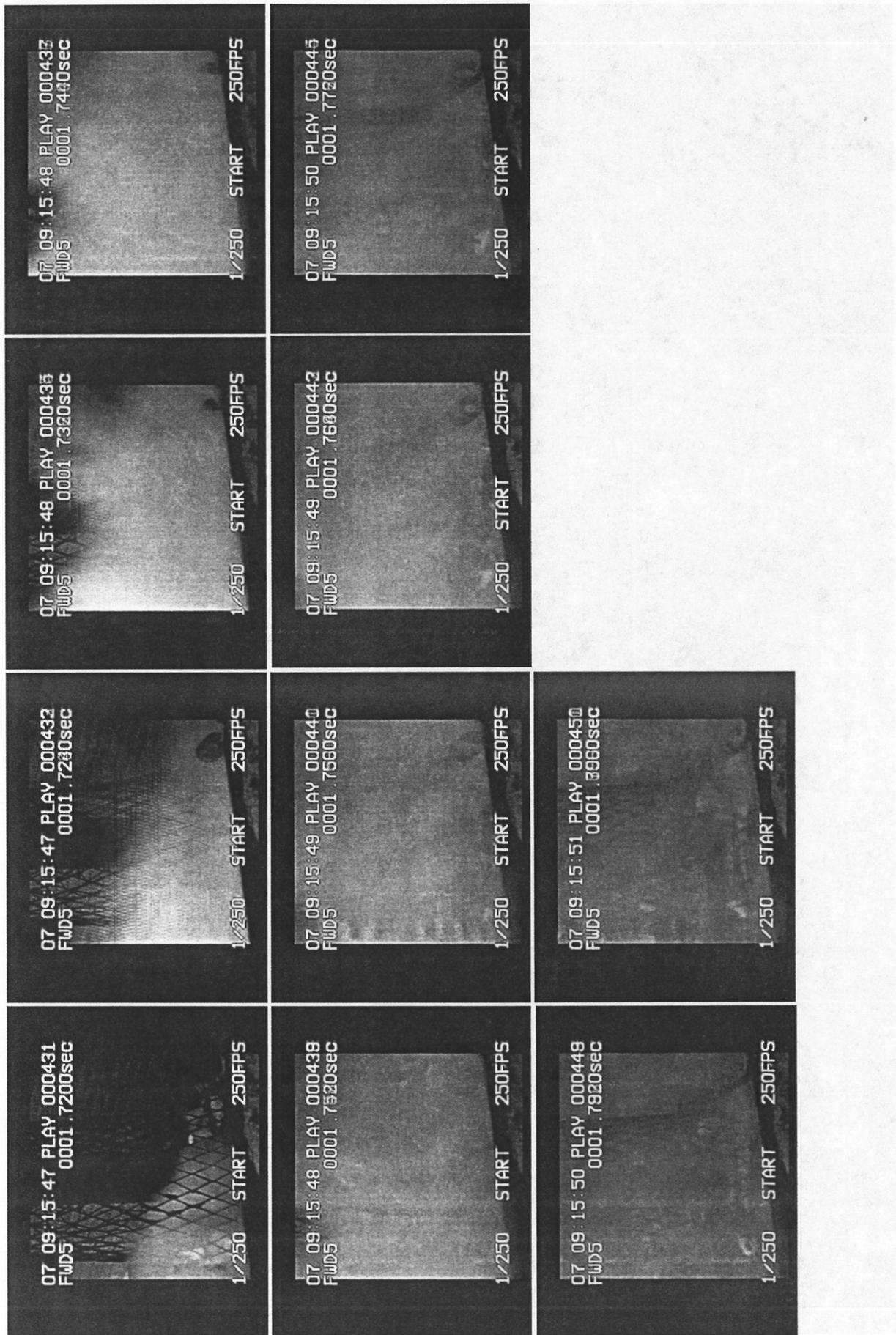
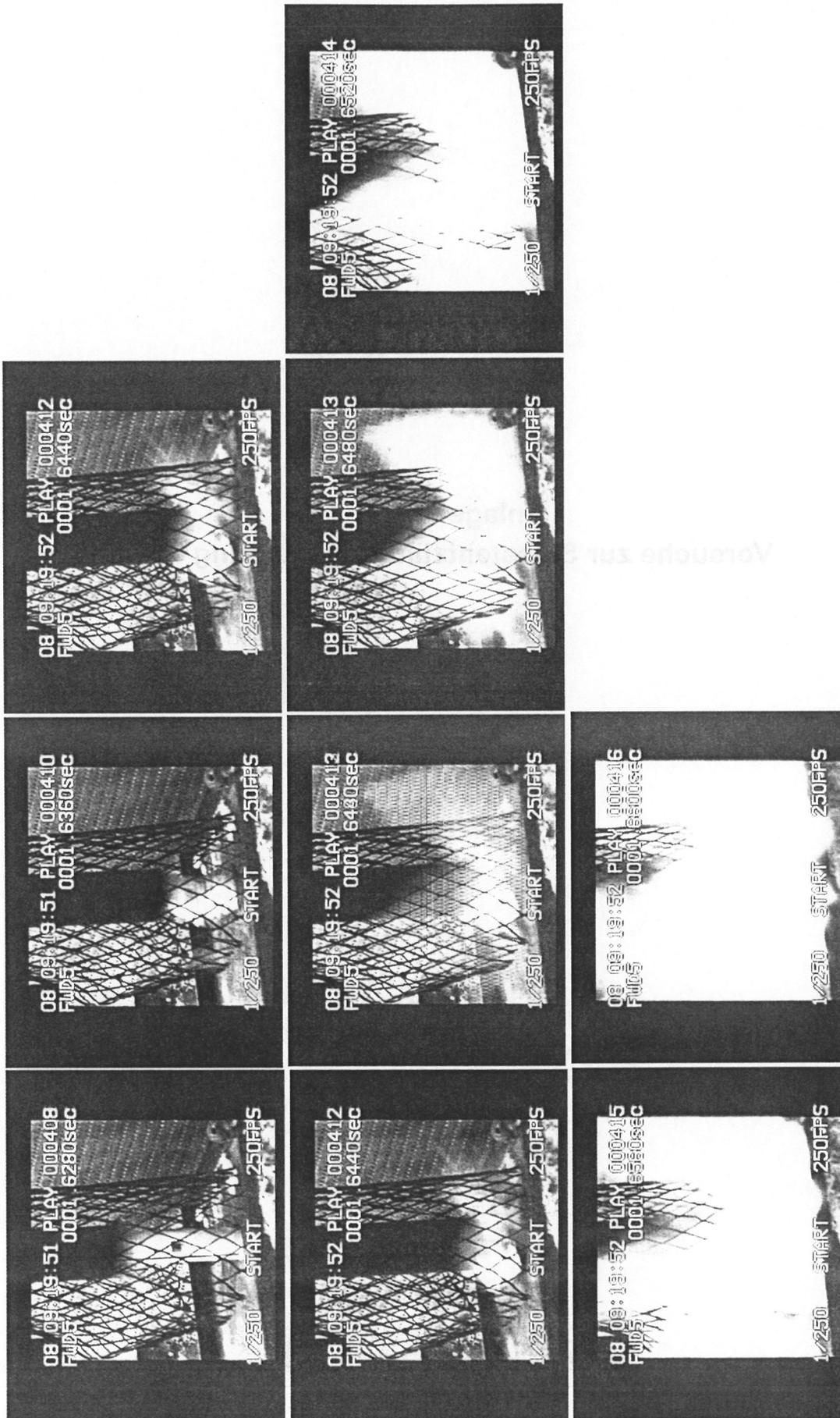


Abbildung 10: High-speed-Aufnahme Frischluftspray



Anlage 3
Versuche zur Selbstentzündungsneigung

Abbildung 1: Agglomerat im Temperaturbereich bis 100°C

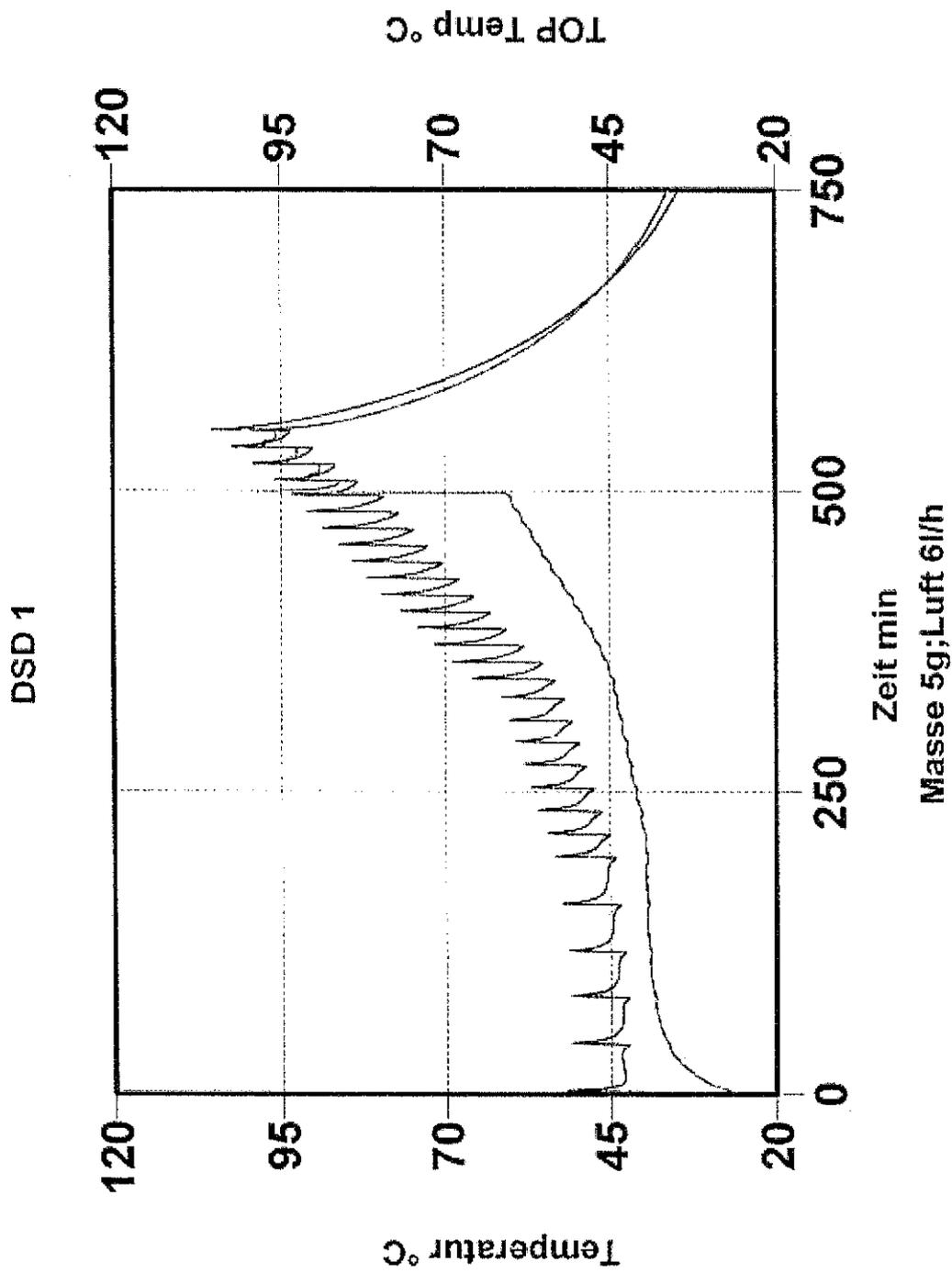


Abbildung 2: Agglomerat im Temperaturbereich bis 110°C bei 50% rel. Luftfeuchte

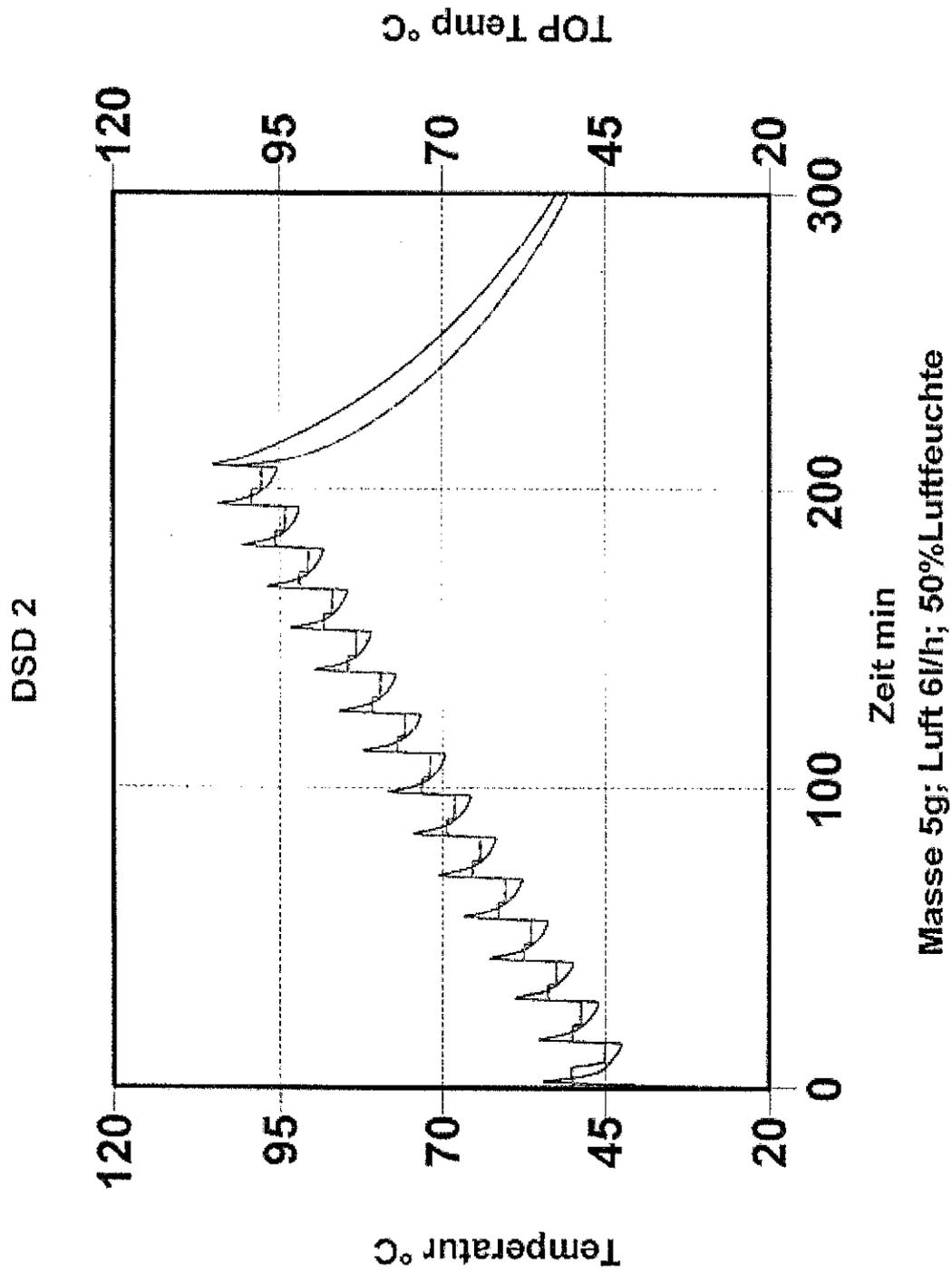


Abbildung 3: Agglomerat im ISO-Einstufentest bei 80°C und 79% rel. Luftfeuchte

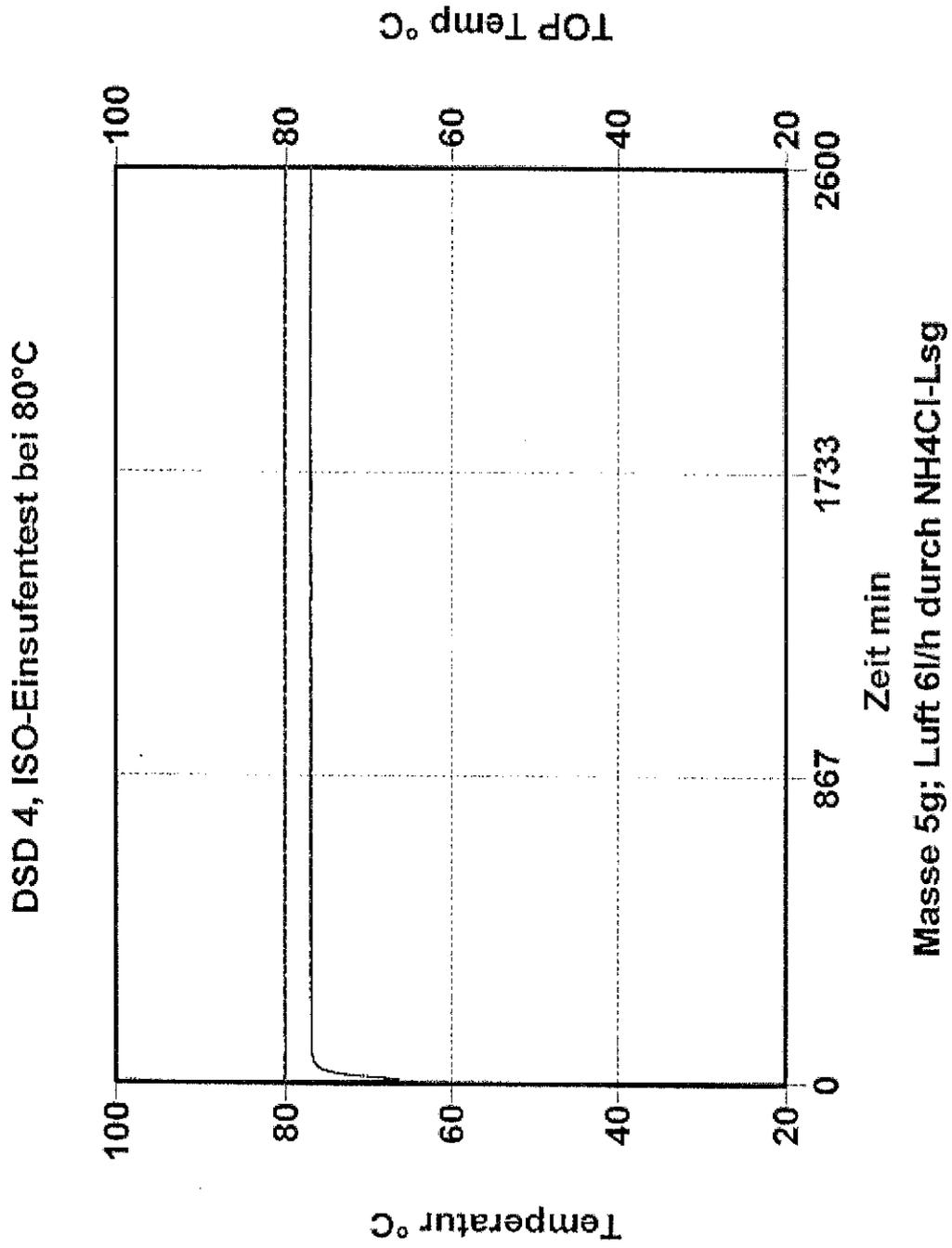


Abbildung 4: Agglomerat im ISO-Einstufentest bei 90°C und 93% rel. Luftfeuchte

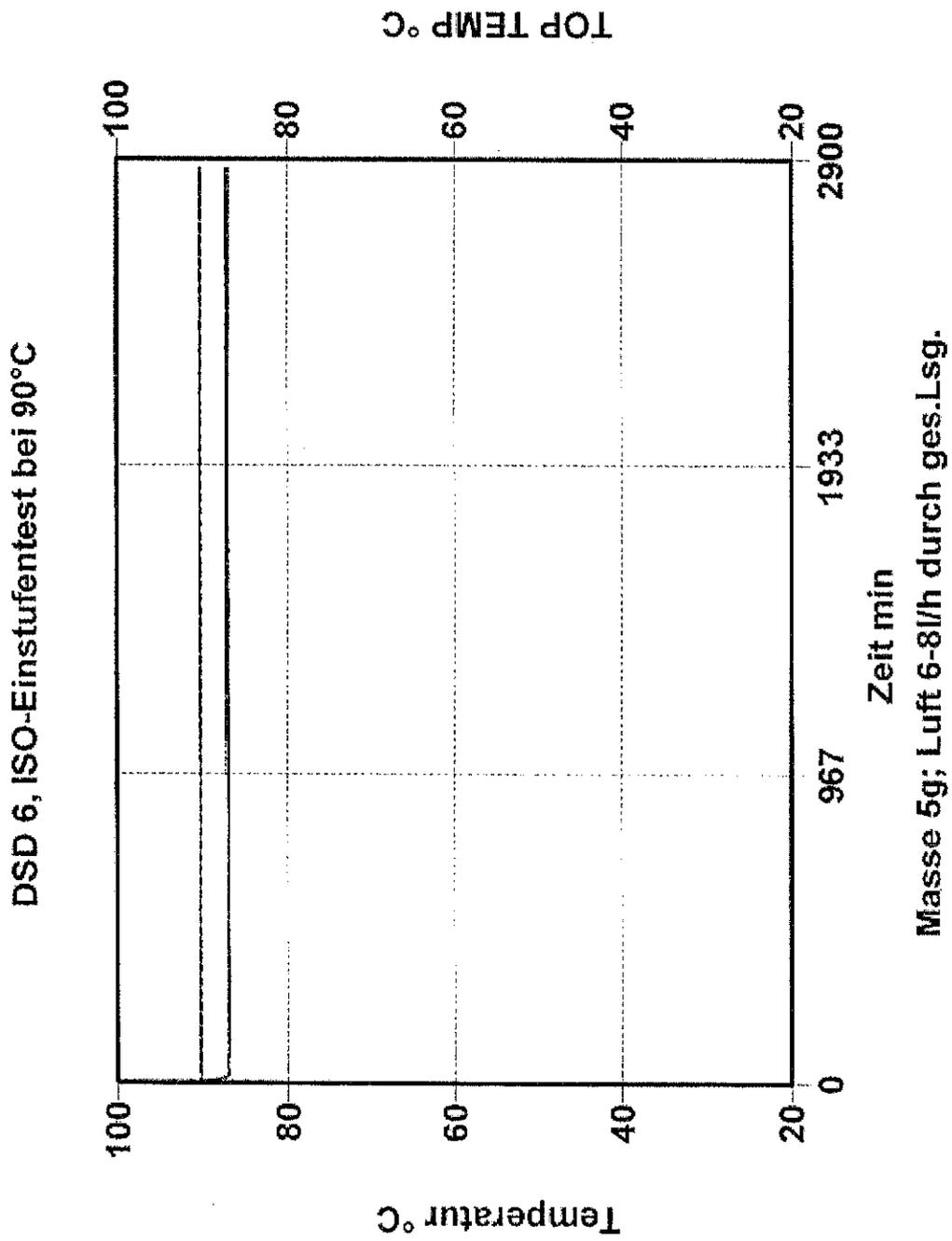


Abbildung 5: Agglomerat im ISO-Einstufentest bei 140°C

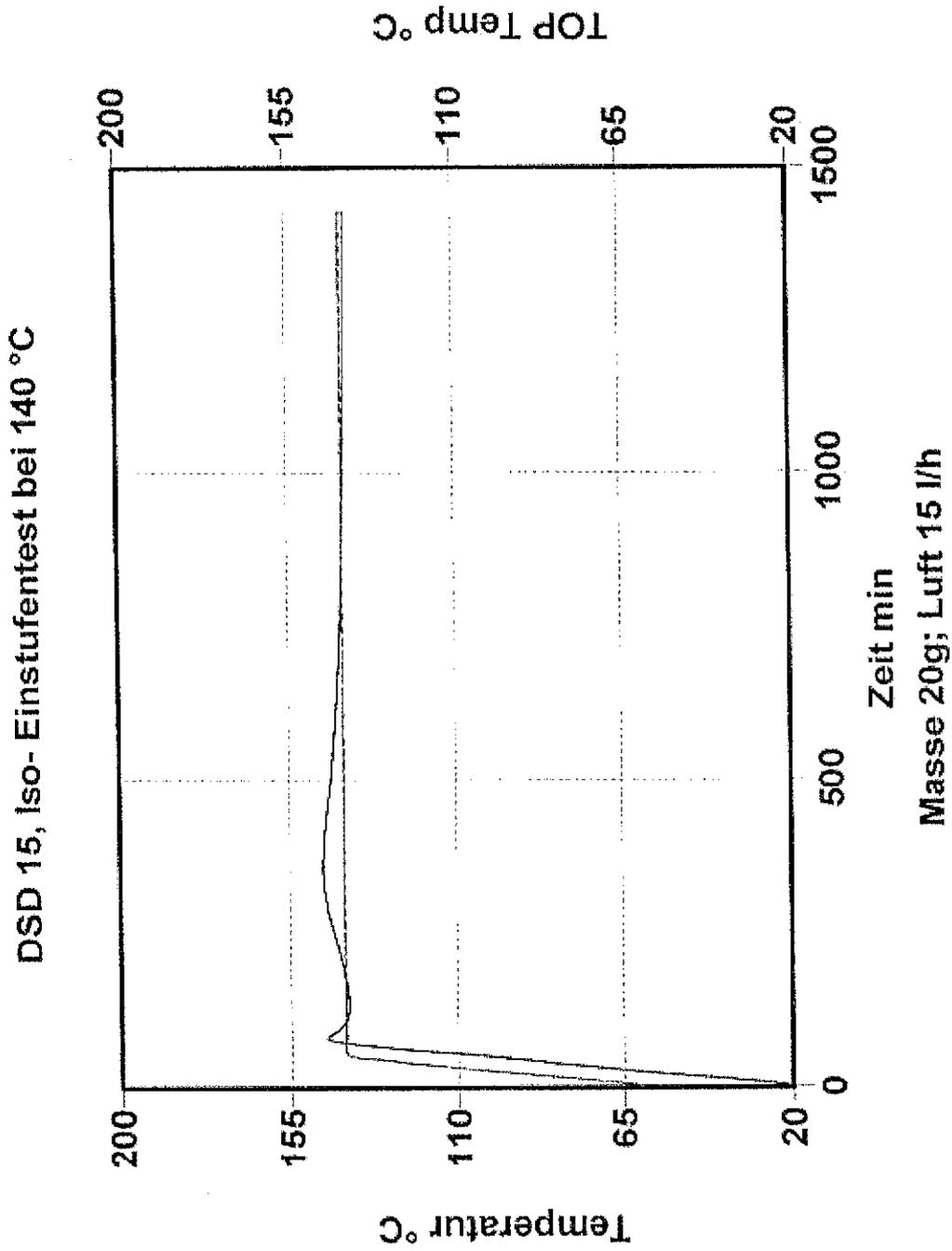


Abbildung 6: feuchtes Agglomerat im ISO-Einstufentest bei 140°C

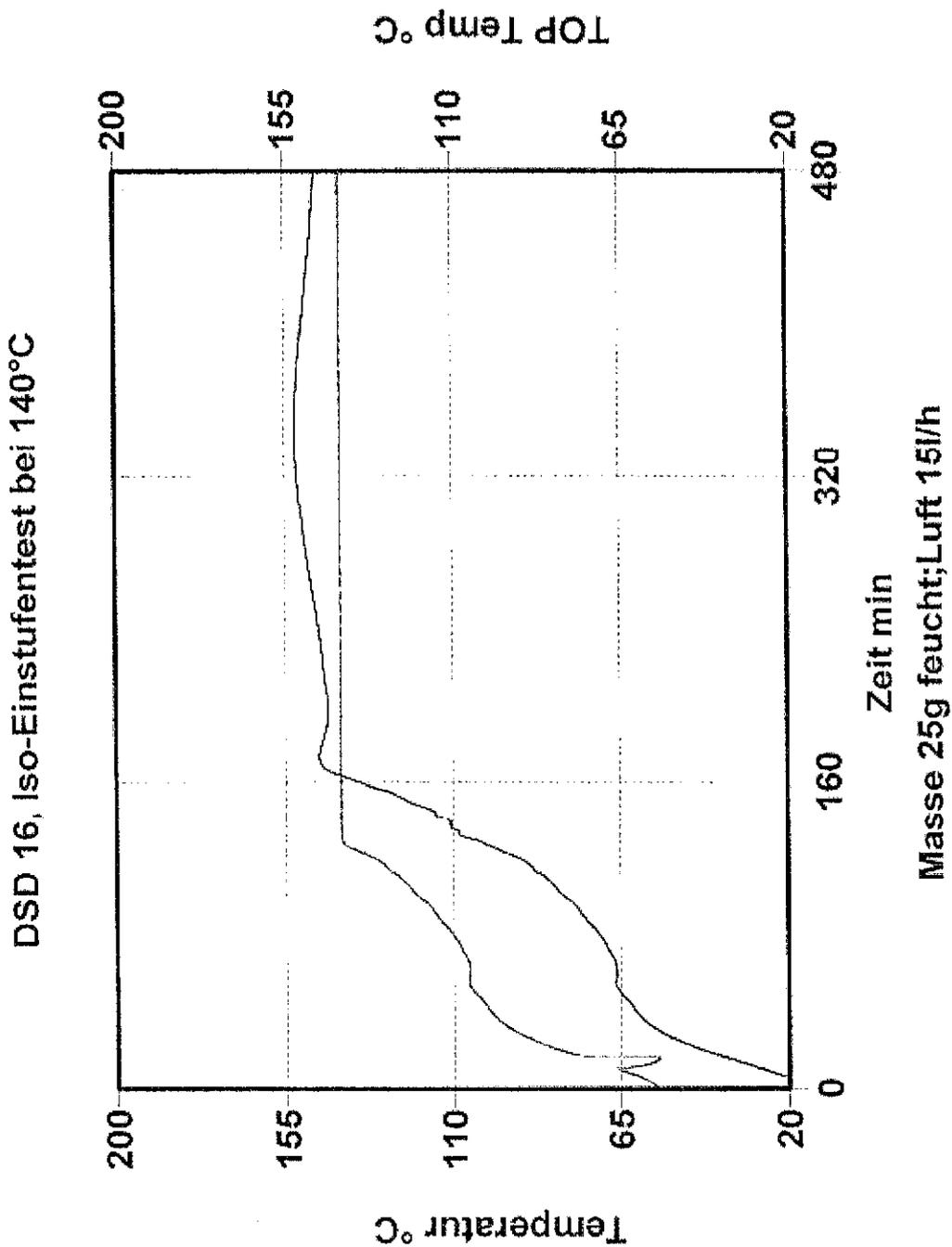


Abbildung 7: Agglomerat im ISO-Einstufentest bei 160°C

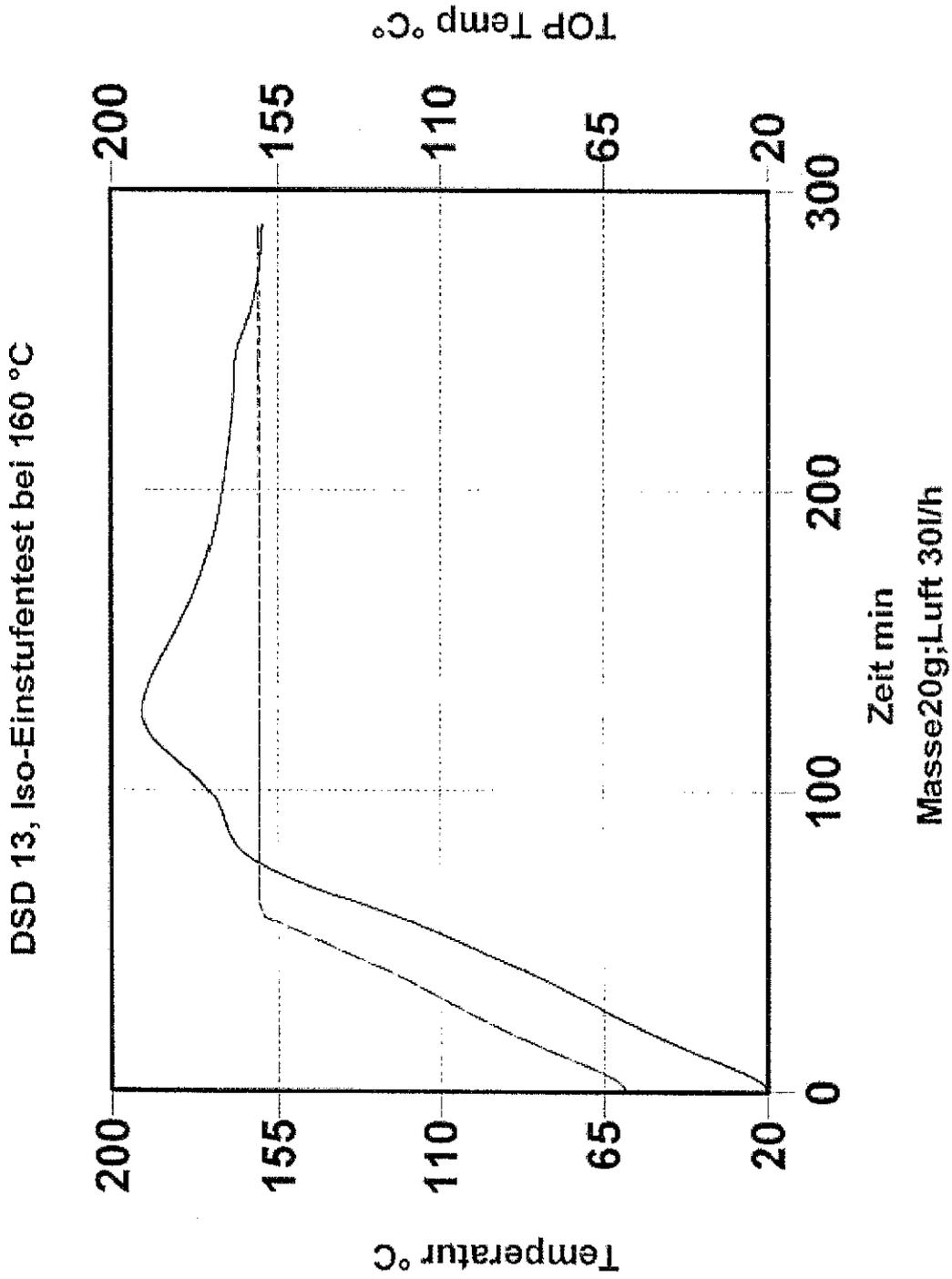


Abbildung 8: feuchtes Agglomerat im ISO-Einstufentest bei 160°C

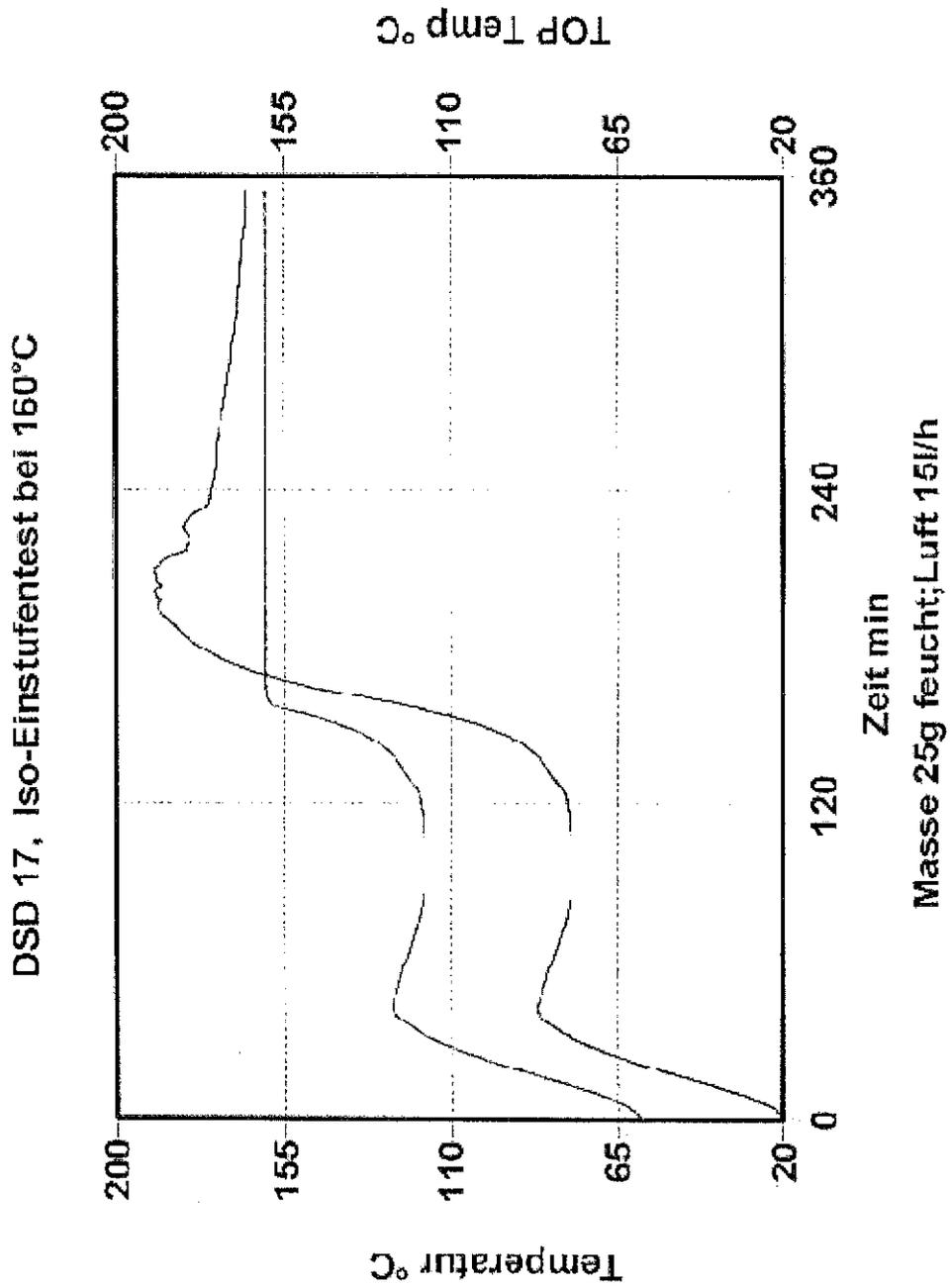


Abbildung 9: feuchtes Agglomerat im ISO-Einstufentest bei 160°C

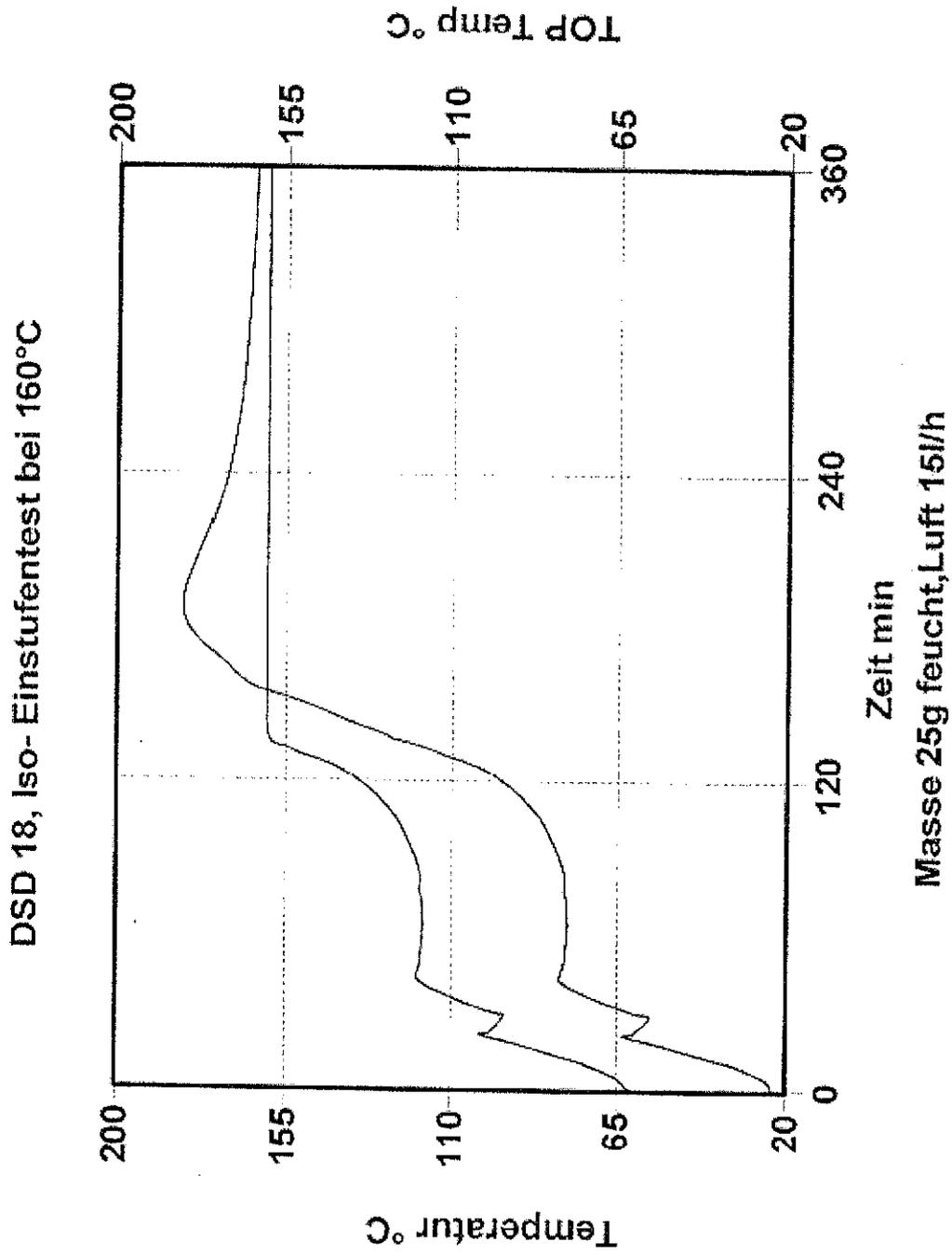


Abbildung 10: Agglomerat (mit Salzsäure gekocht) im ISO-Einstufentest bei 160°C,

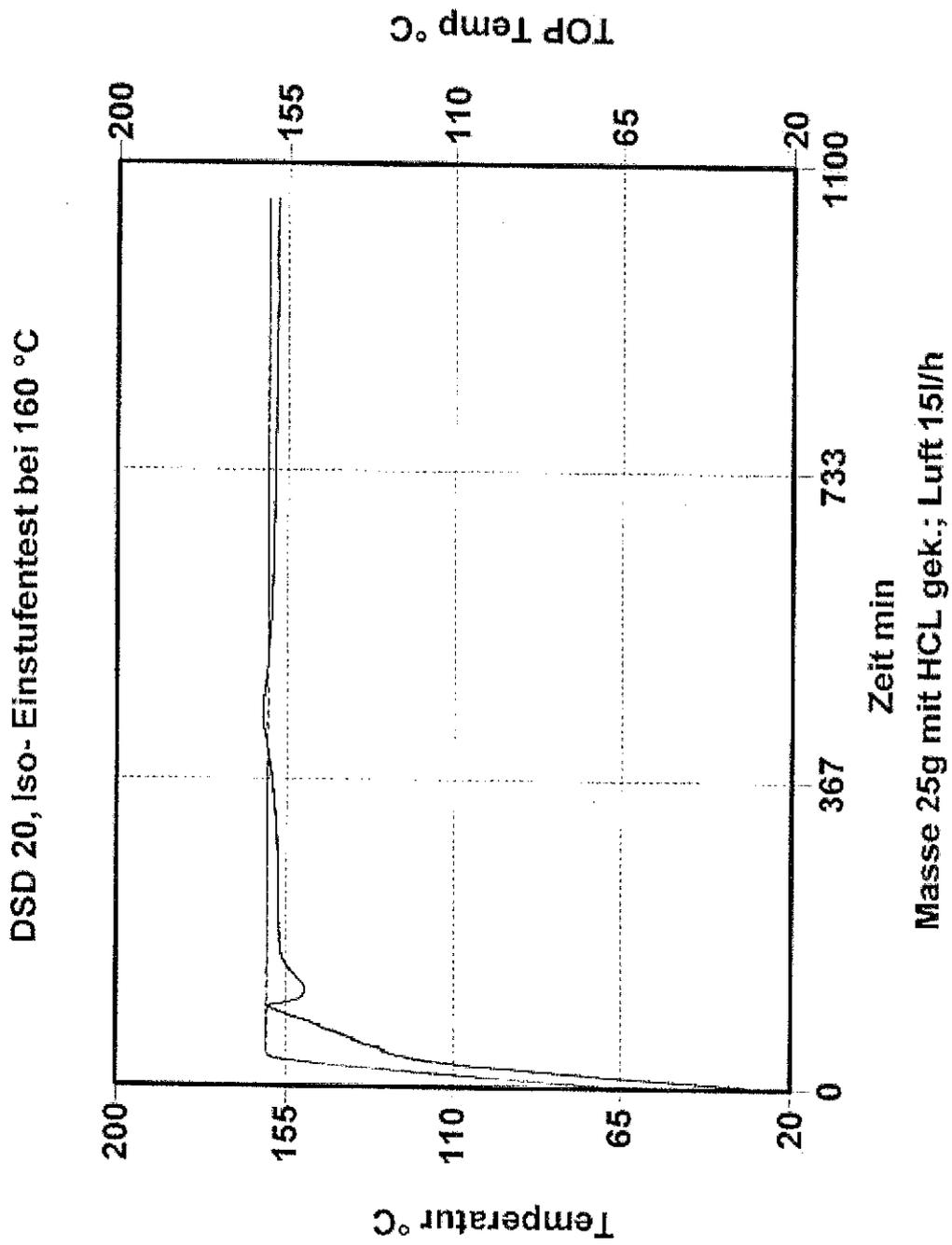


Abbildung 11: Agglomerat (mit Salzsäure gekocht) im ISO-Einstufentest bei 160°C,

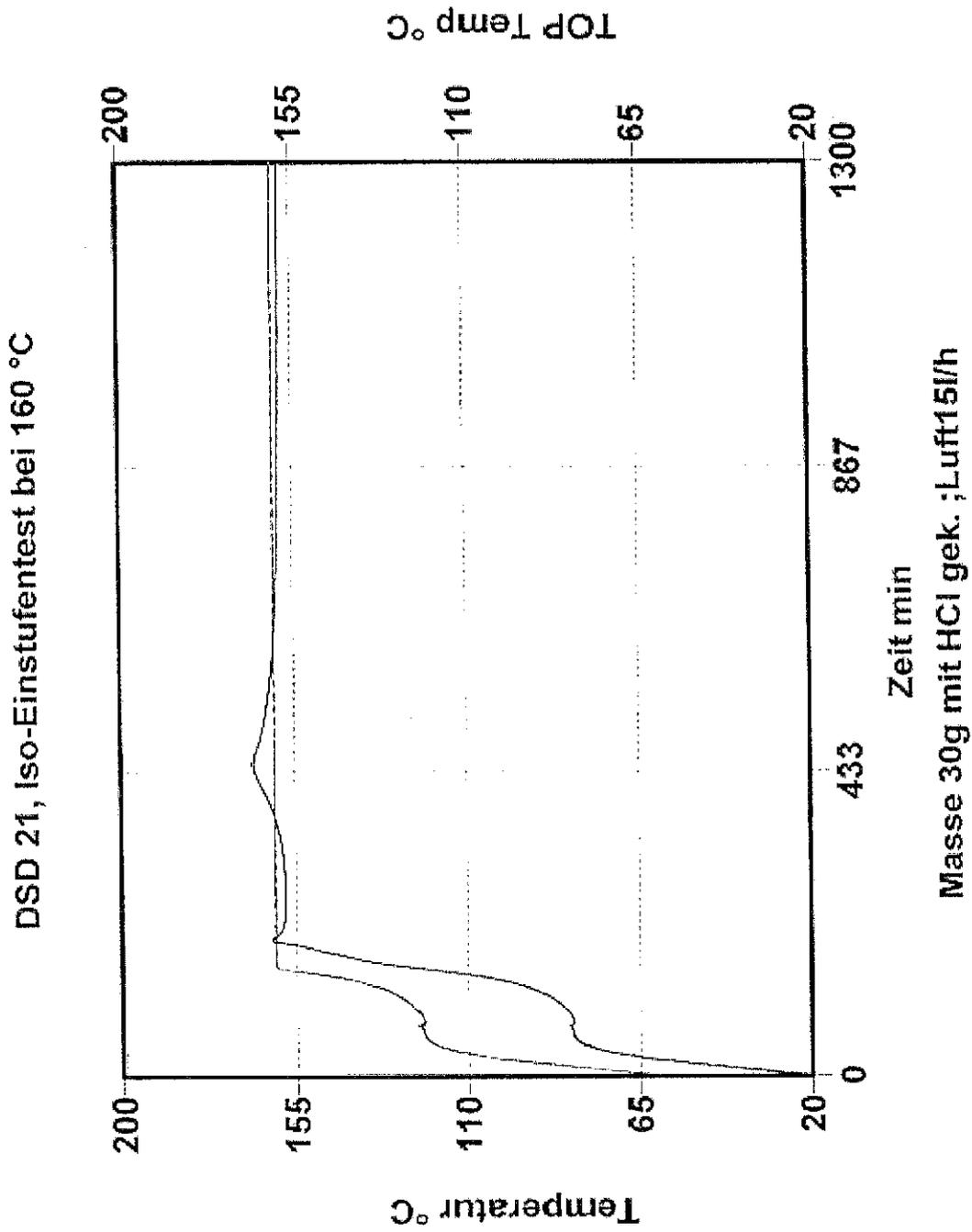


Abbildung 12: Agglomerat im Mehrstufentest bis 160°C

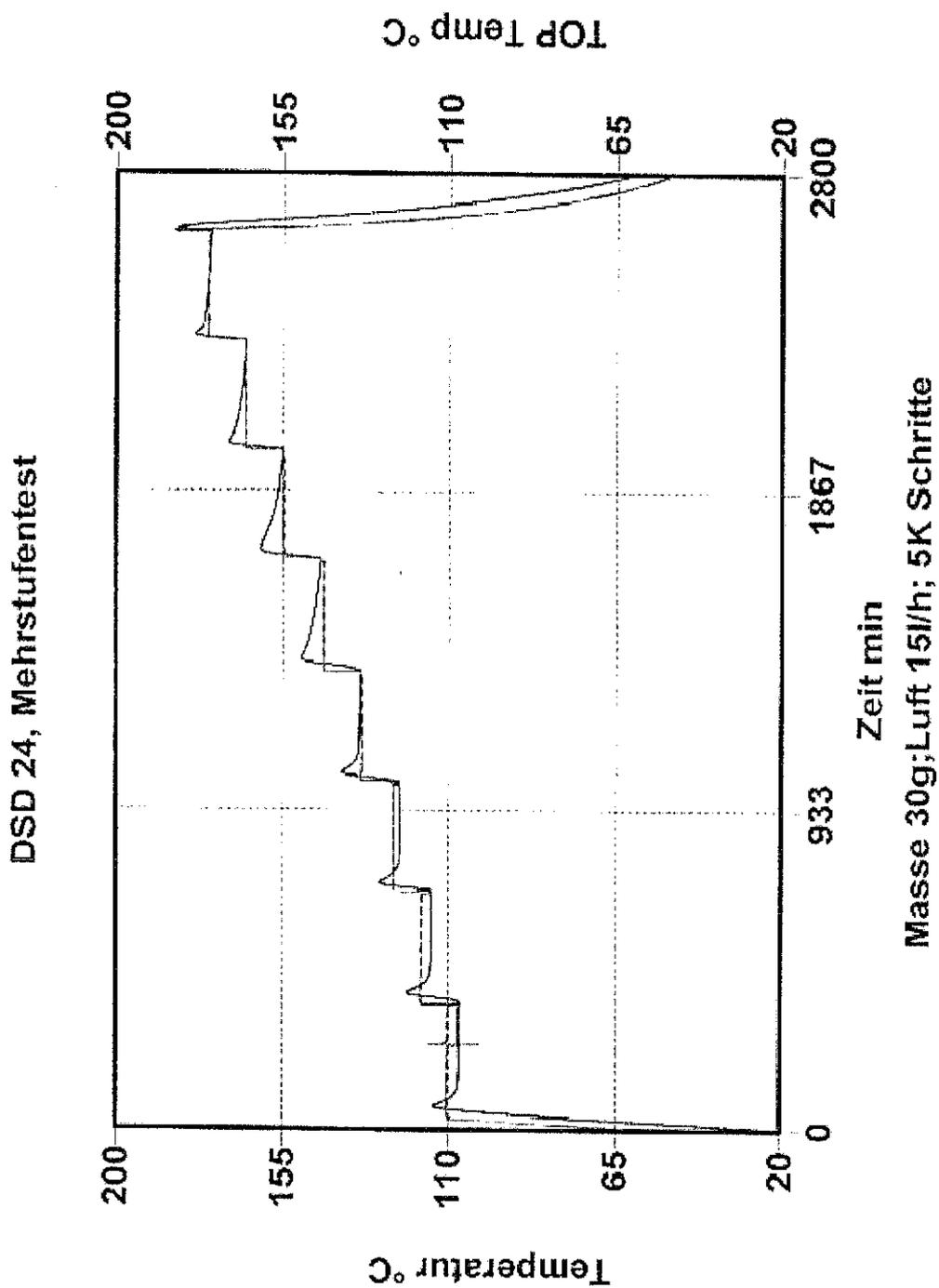


Abbildung 13: feuchtes Agglomerat im Mehrstufentest bis 160°C

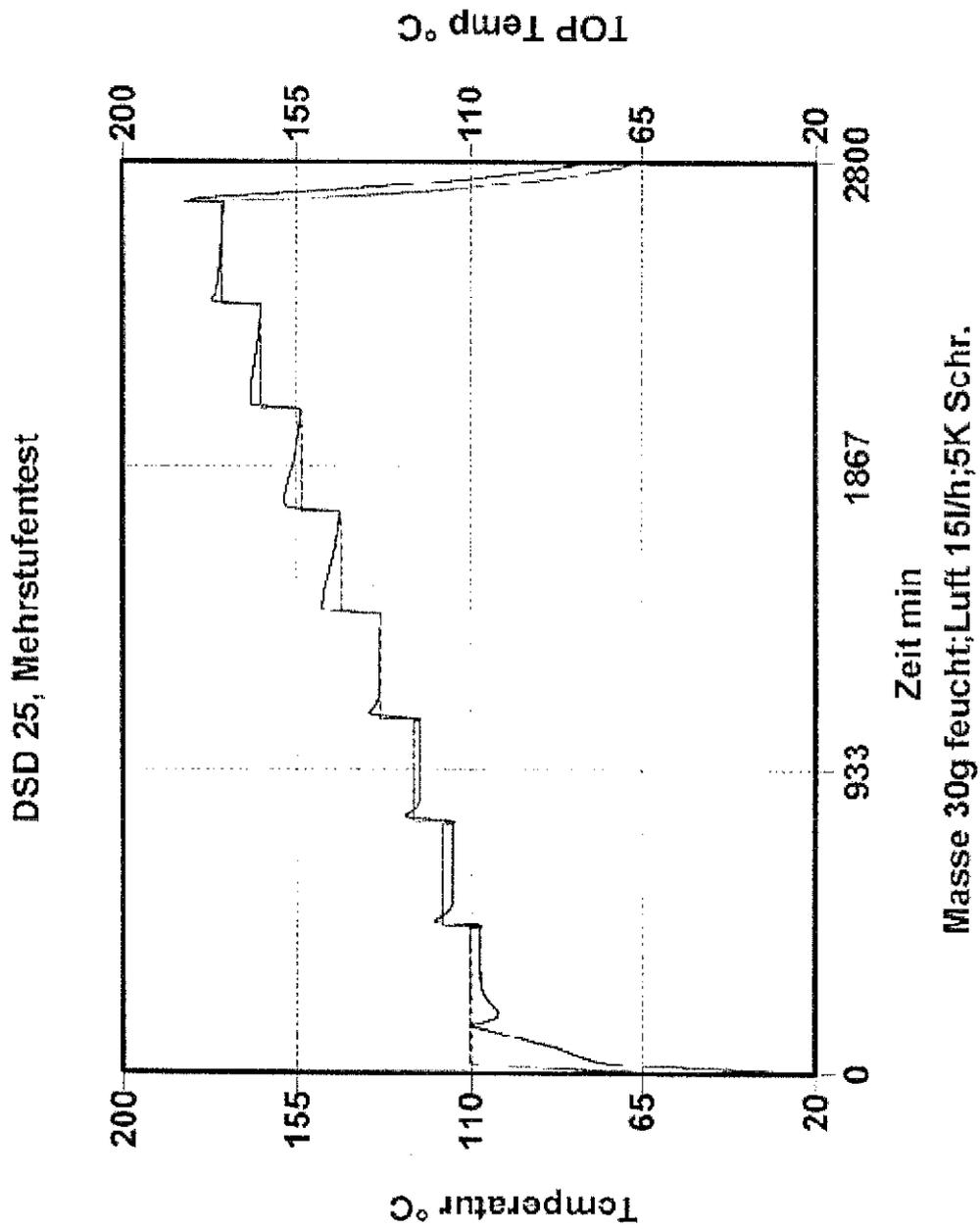


Abbildung 14: Alfa-Zellulose (alkalisch) im ISO-Einstufentest bei 160°C

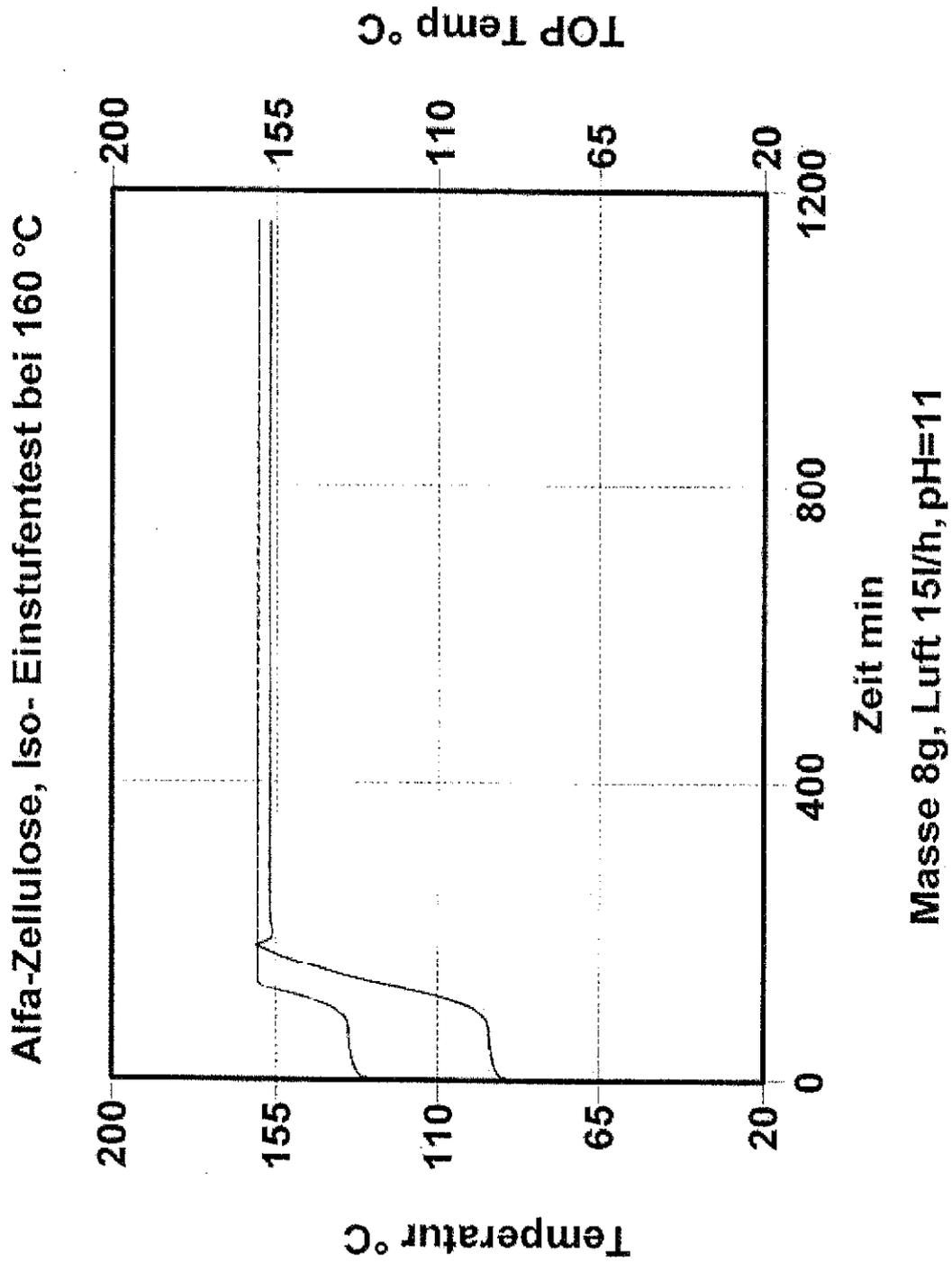


Abbildung 15: Alfa-Zellulose (angesäuert) im ISO-Einstufentest bei 160°C

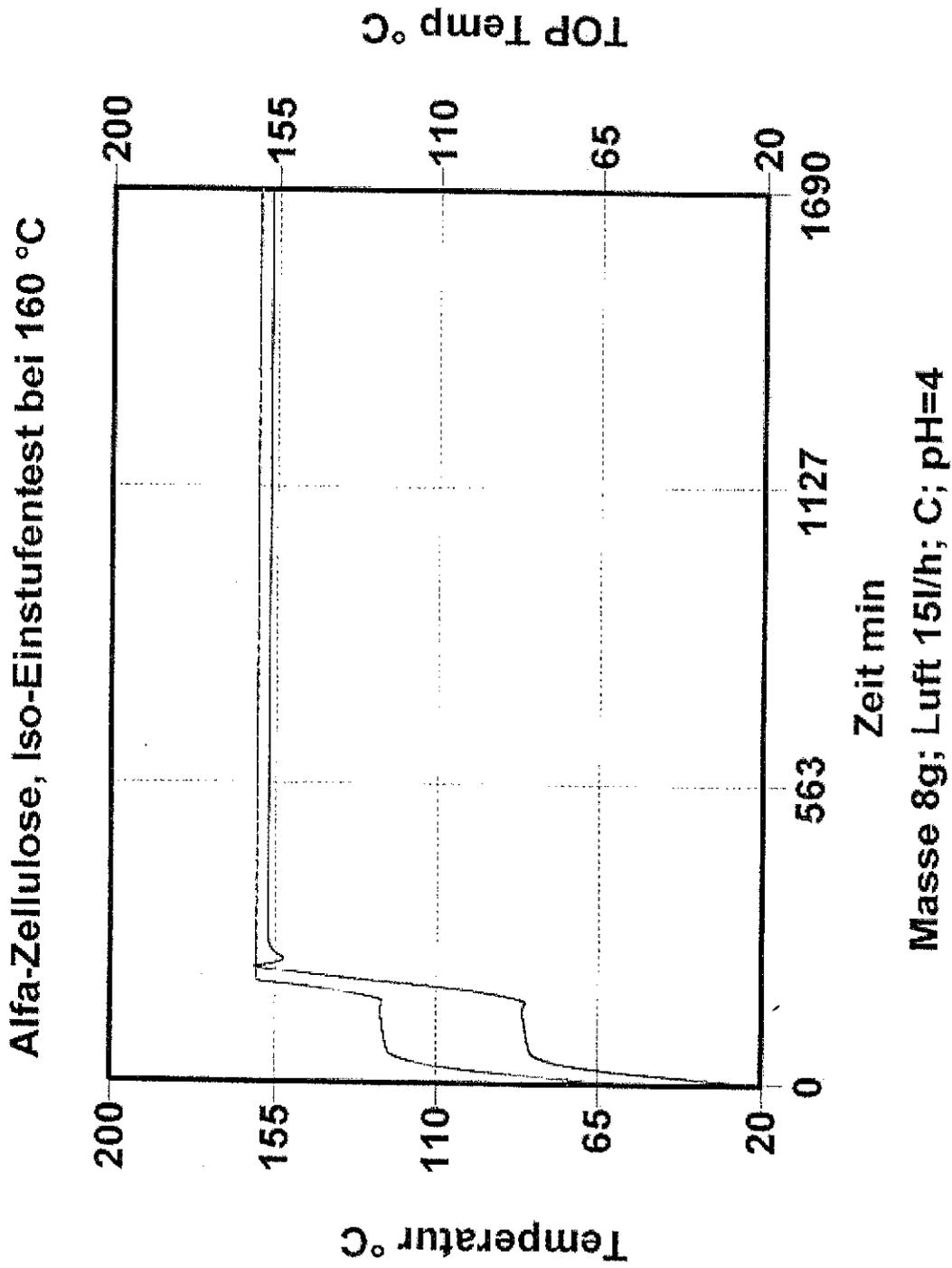


Abbildung 16: Alfa-Zellulose mit Aluminiumpulver im ISO-Einstufentest bei 160°C

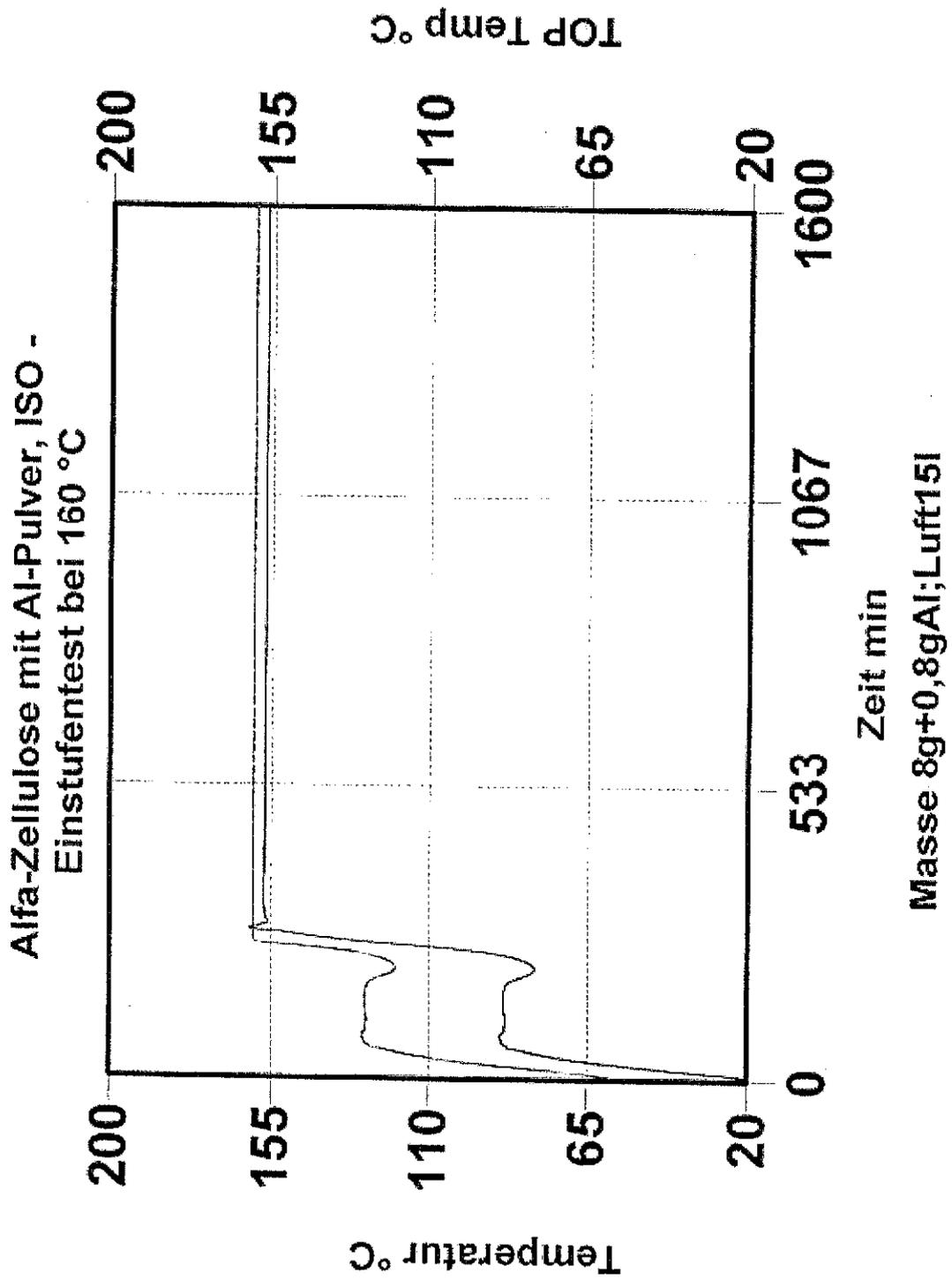


Abbildung 17: Alfa-Zellulose mit Aluminiumpulver (Lsg. alkalisch) im ISO-Einstufentest bei 160°C

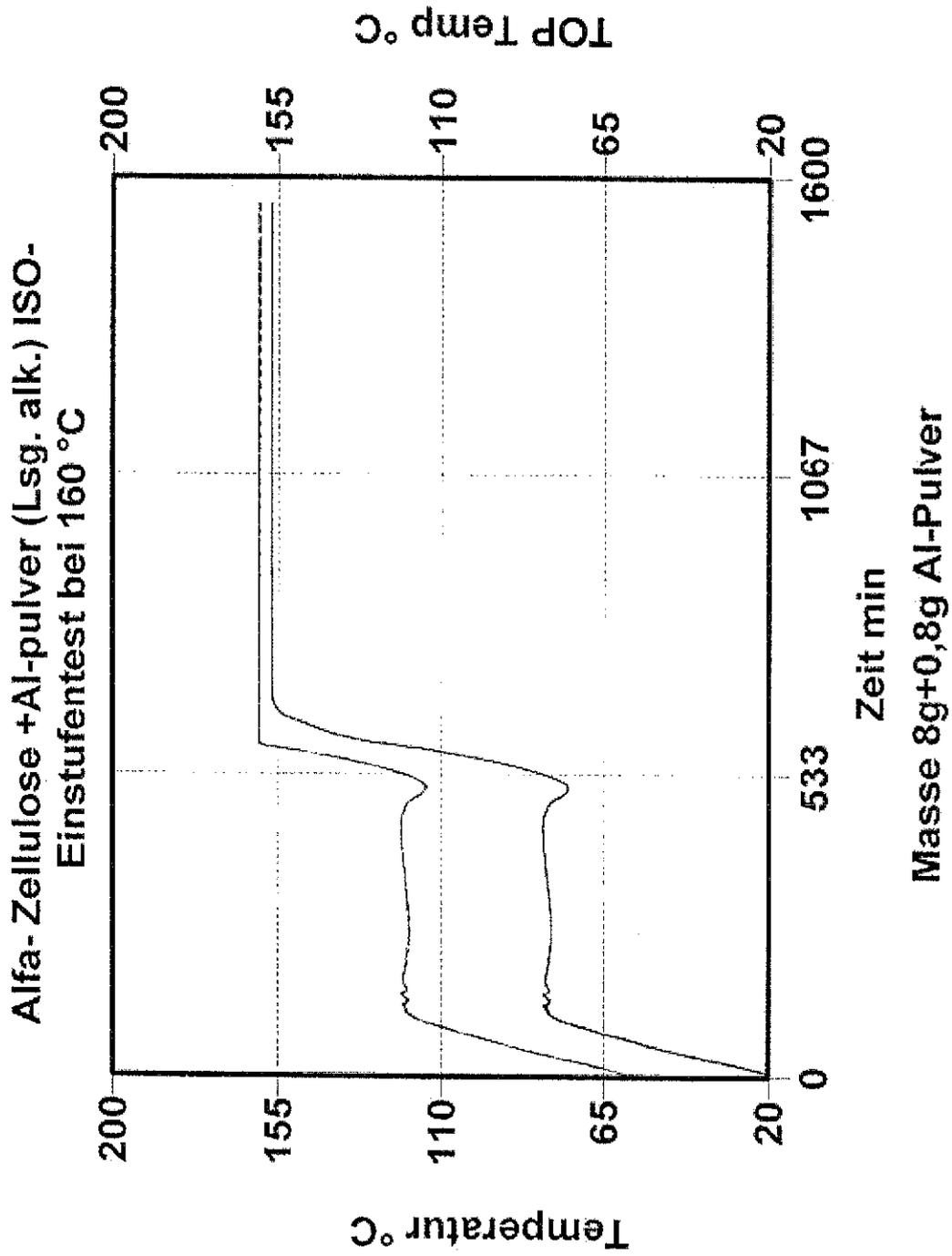


Abbildung 18: Alfa-Zellulose mit Aluminiumpulver im ISO-Einstufentest bei 110°C

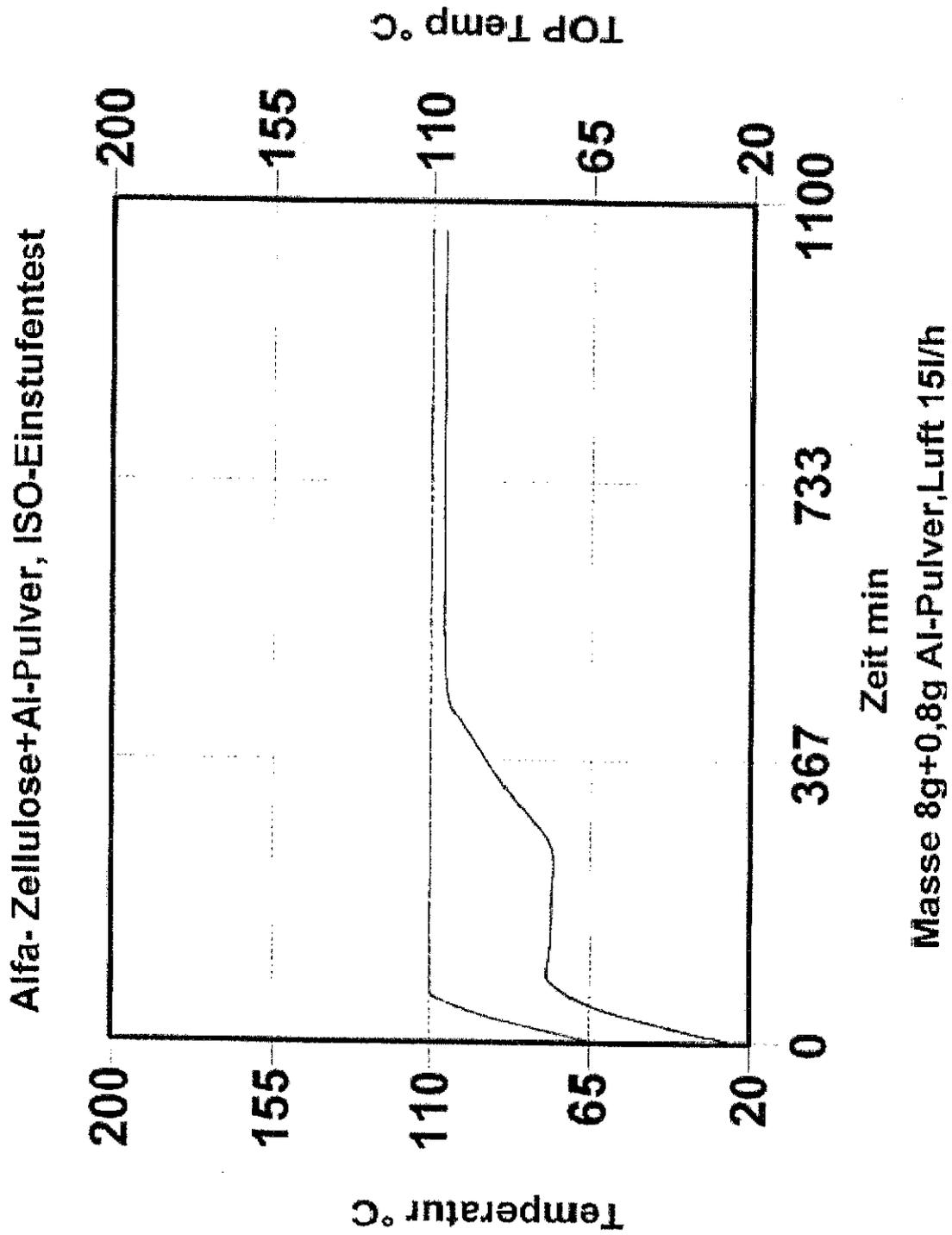


Abbildung 19: Alfa-Zellulose im Mehrstufentest bis 180°C

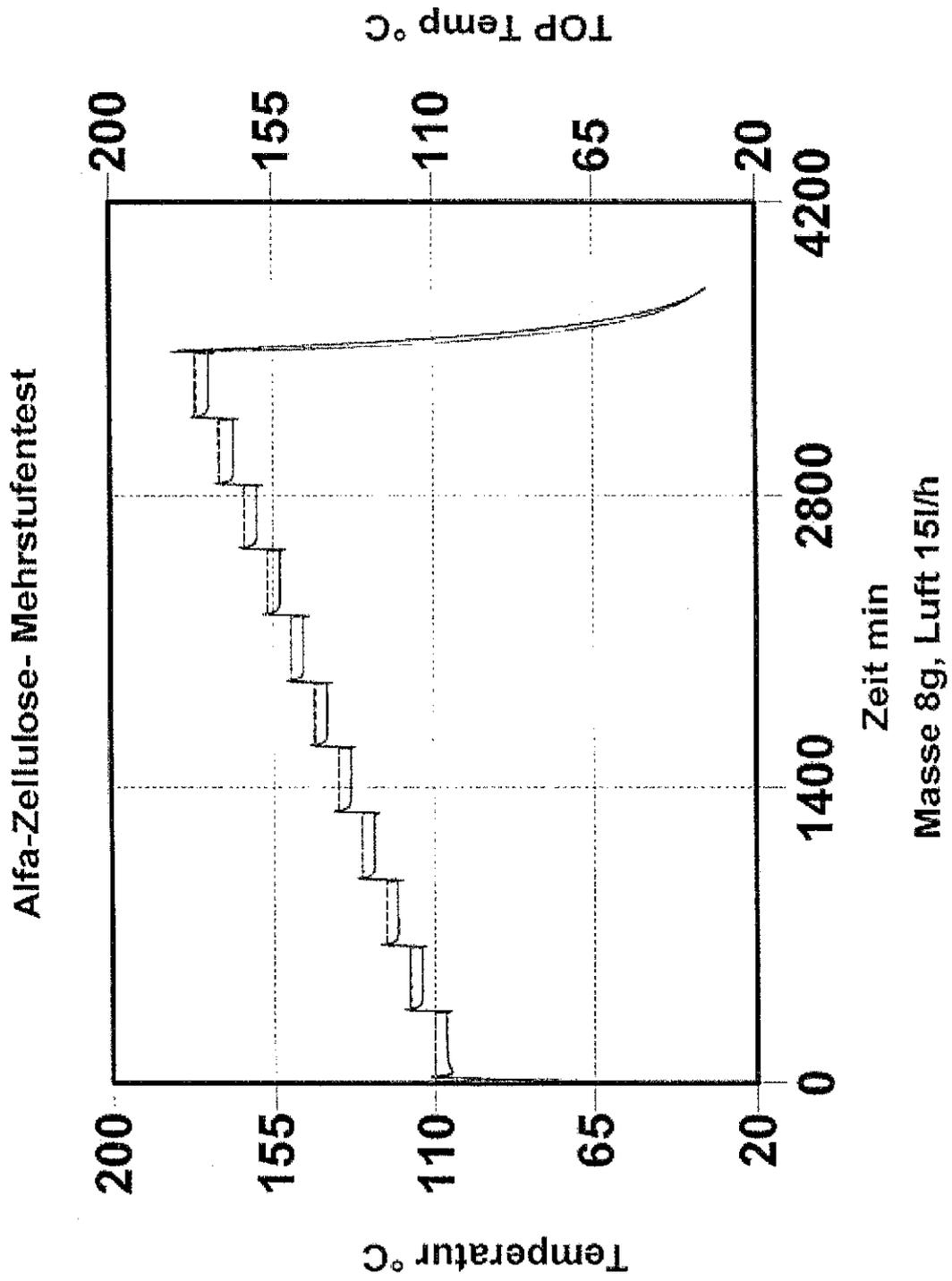


Abbildung 20: Getränkekarton ohne Aluminiumfolie im ISO-Einstufentest bei 160°C

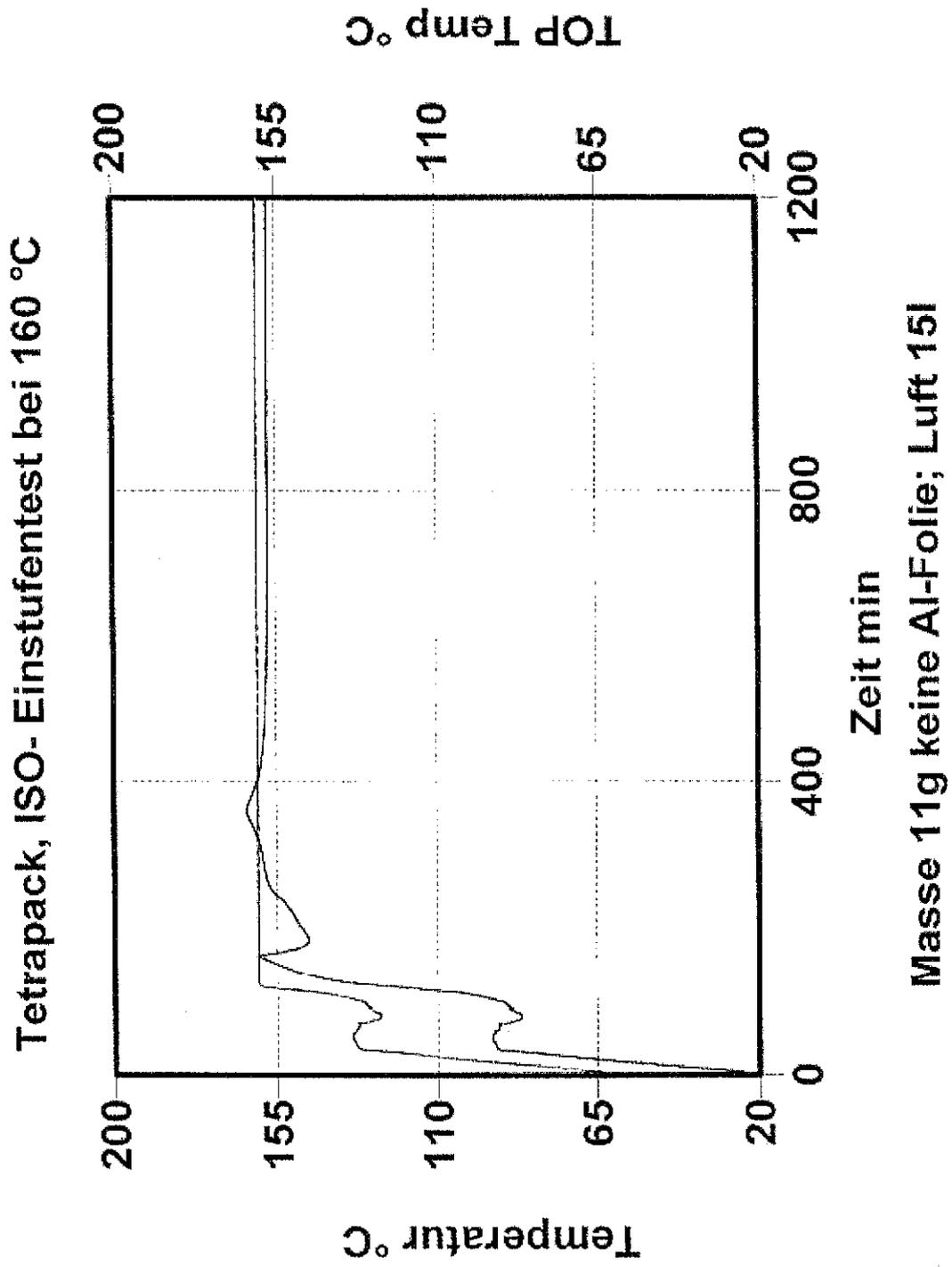


Abbildung 21: Getränkekarton mit Aluminiumfolie im ISO-Einstufentest bei 160°C

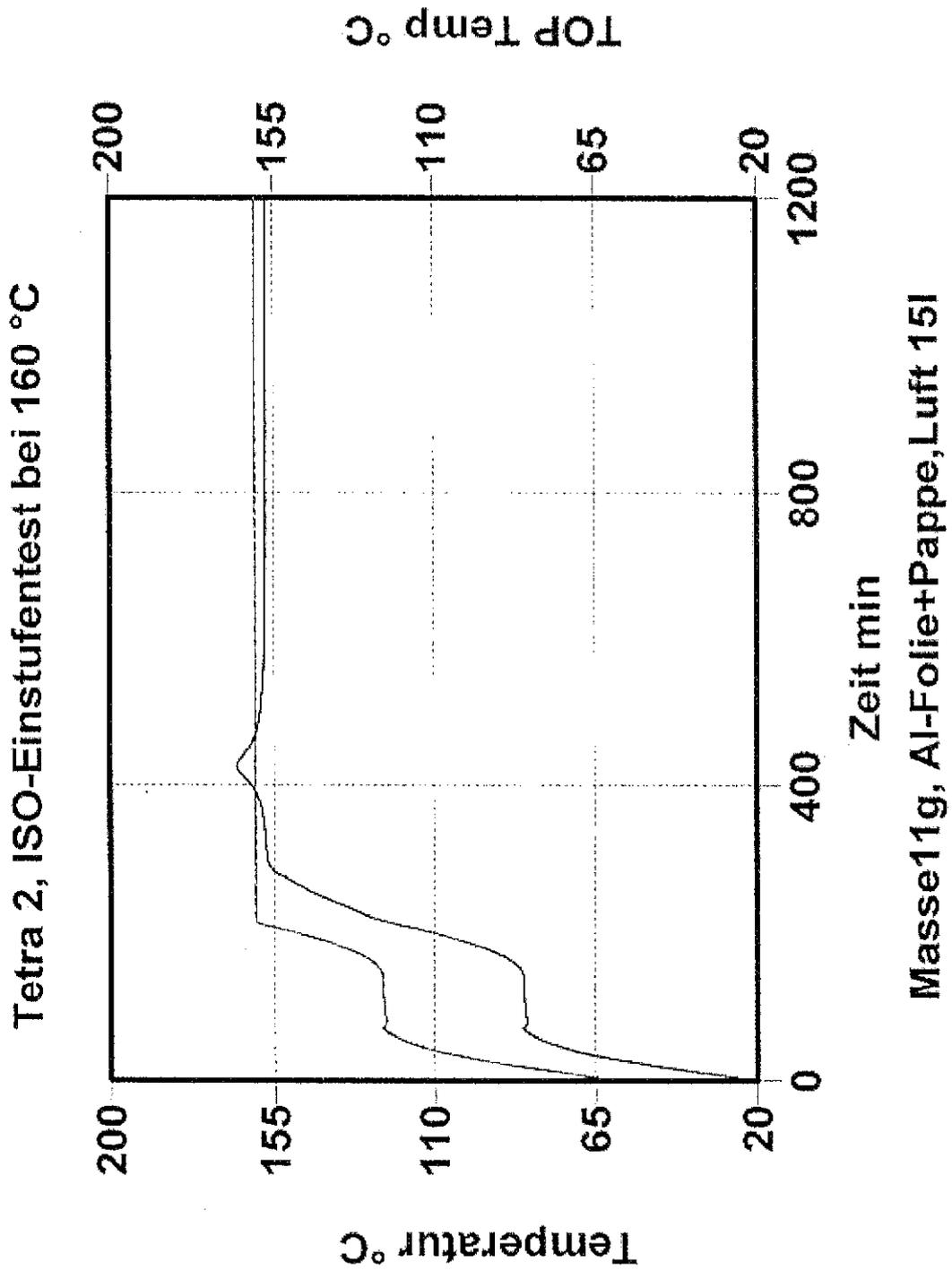


Abbildung 22: Getränkekarton-Zellstofffasern im ISO-Einstufentest bei 160°C

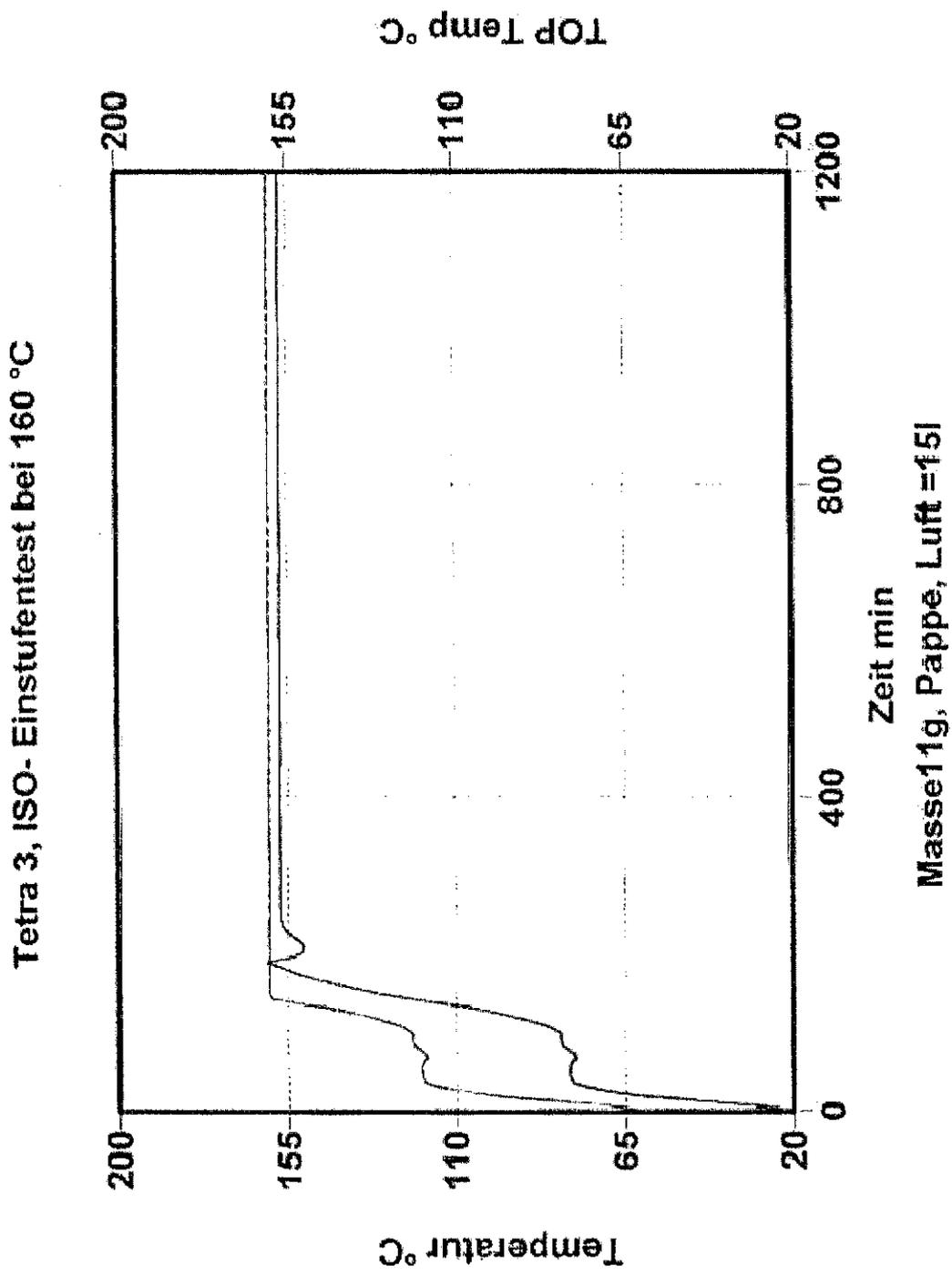


Abbildung 23: Getränkekarton–Außenhülle ohne Folie im ISO-Einstufentest bei 160°C

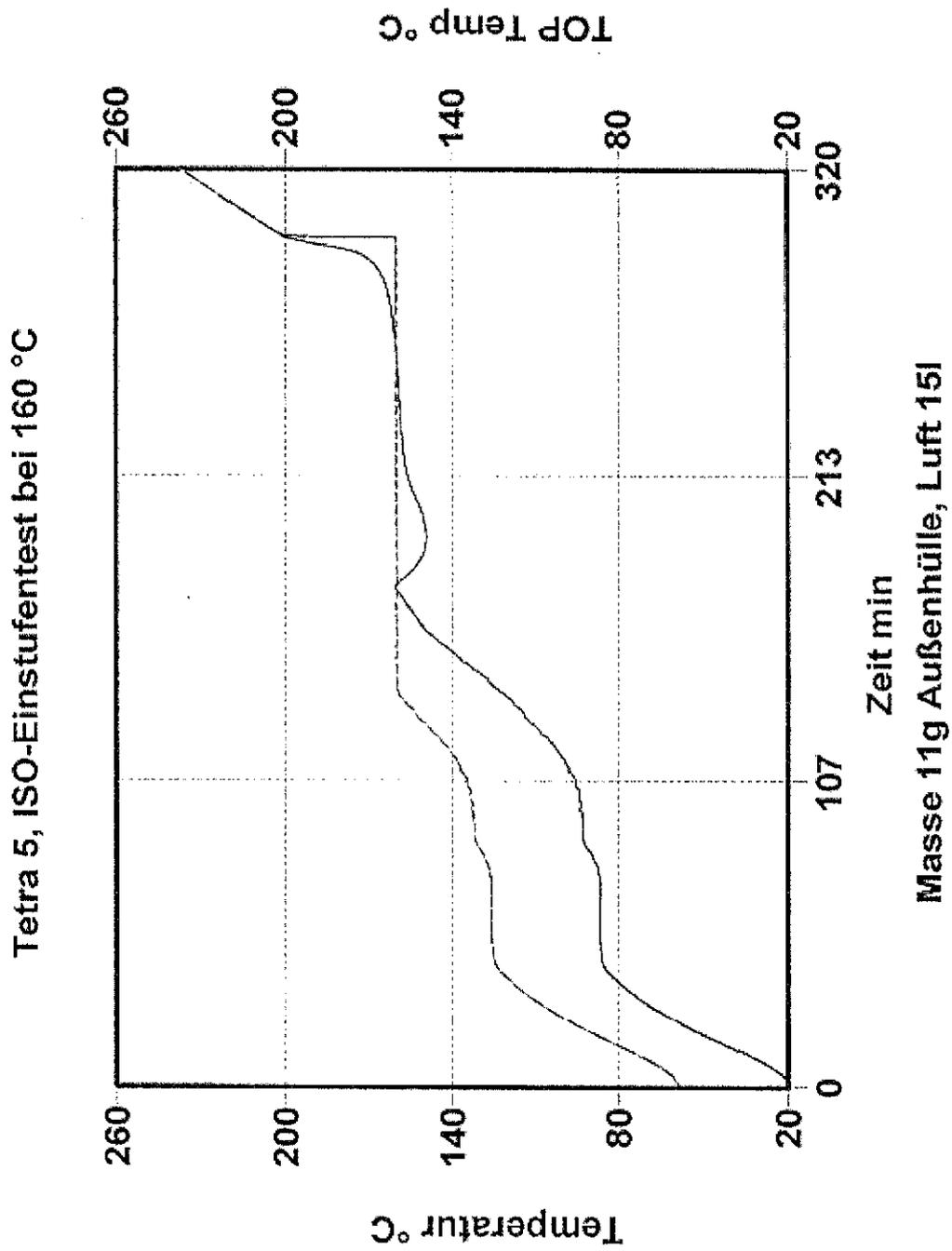


Abbildung 24: Getränkekarton-Innenmaterial im ISO-Einstufentest bei 140°C

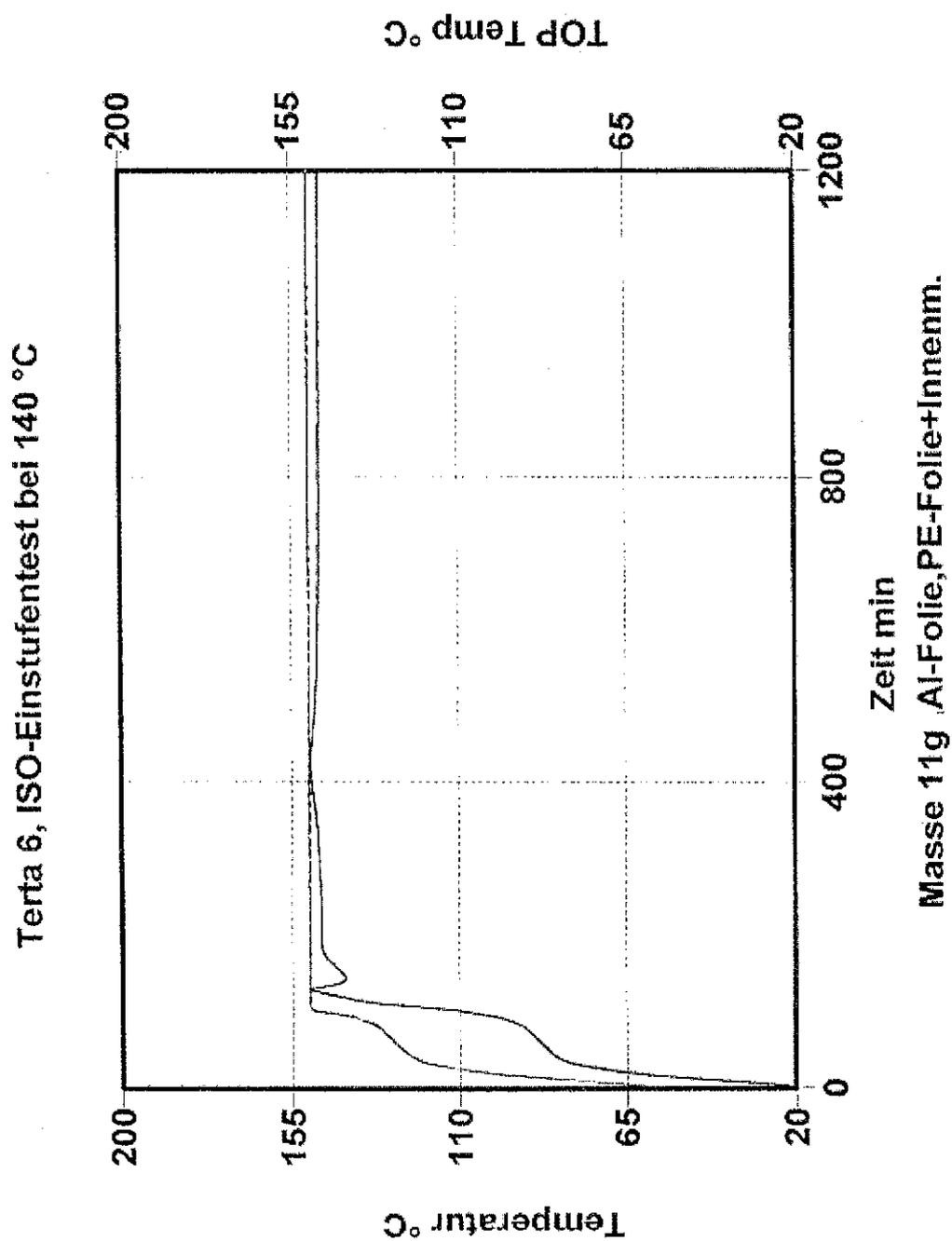


Abbildung 25: Getränkekarton–Außenmaterial im ISO-Einstufentest bei 160°C

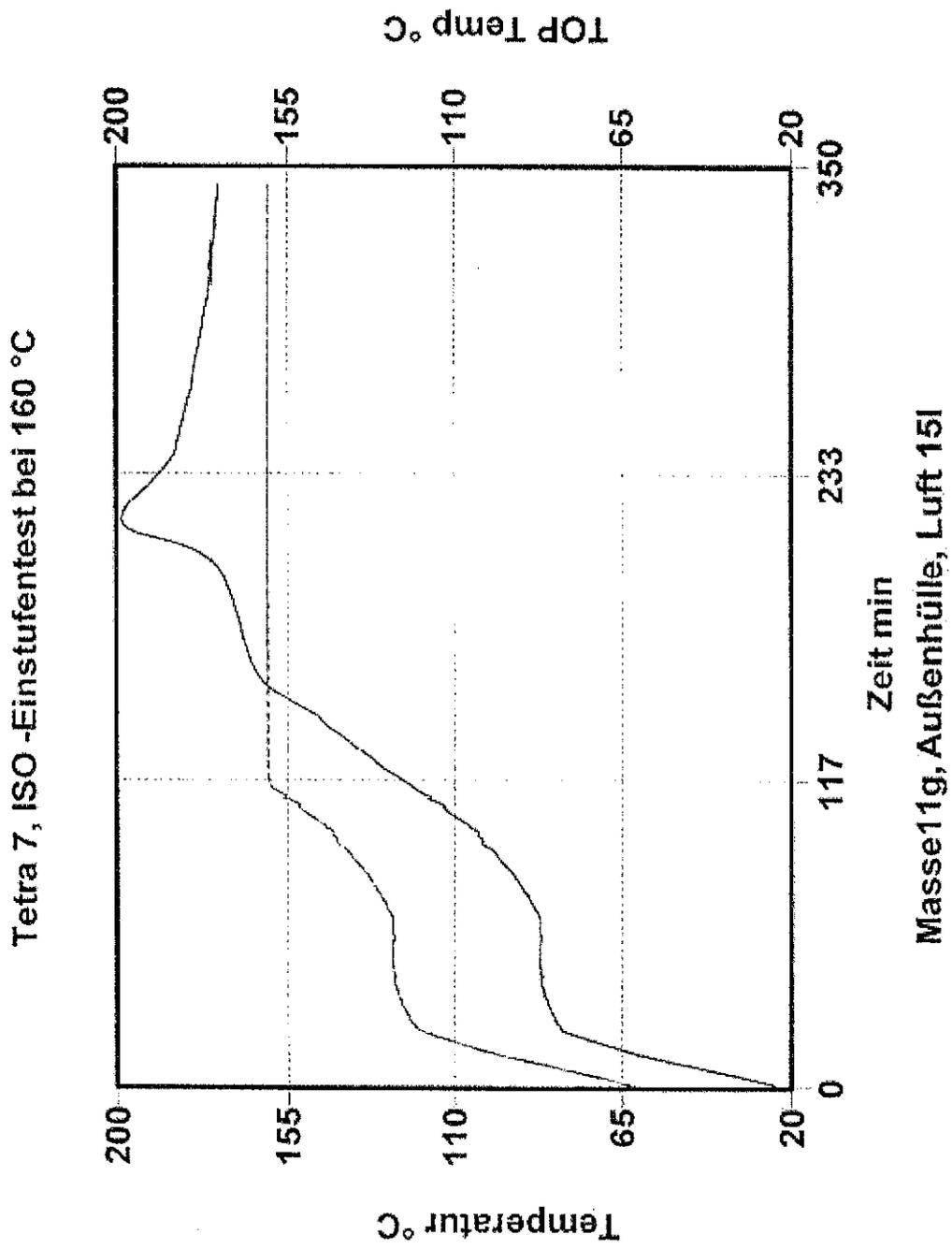


Abbildung 26: Pellets aus Müllaufbereitung (LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C

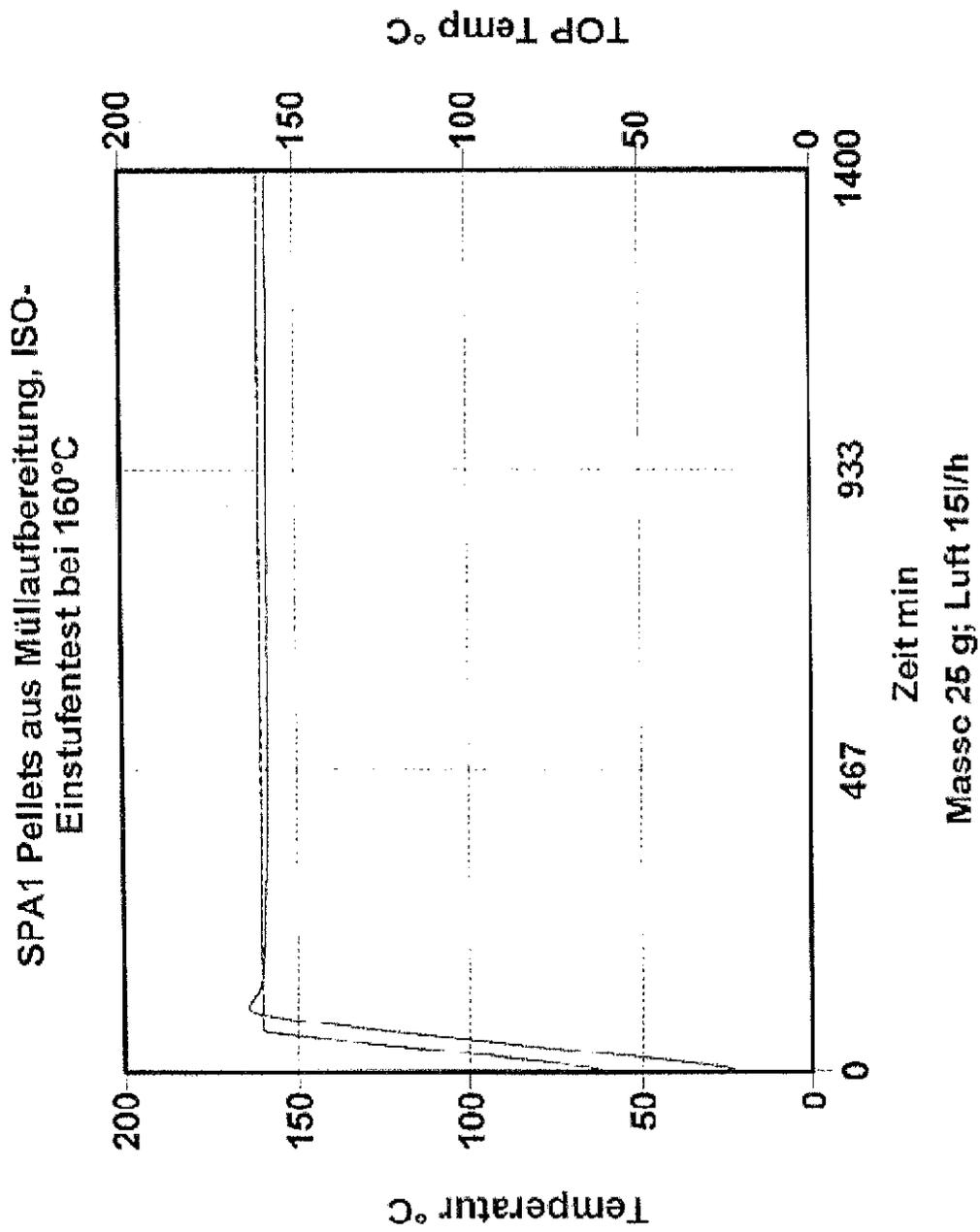


Abbildung 27: Kunststoffkompaktat (Rollies, LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C

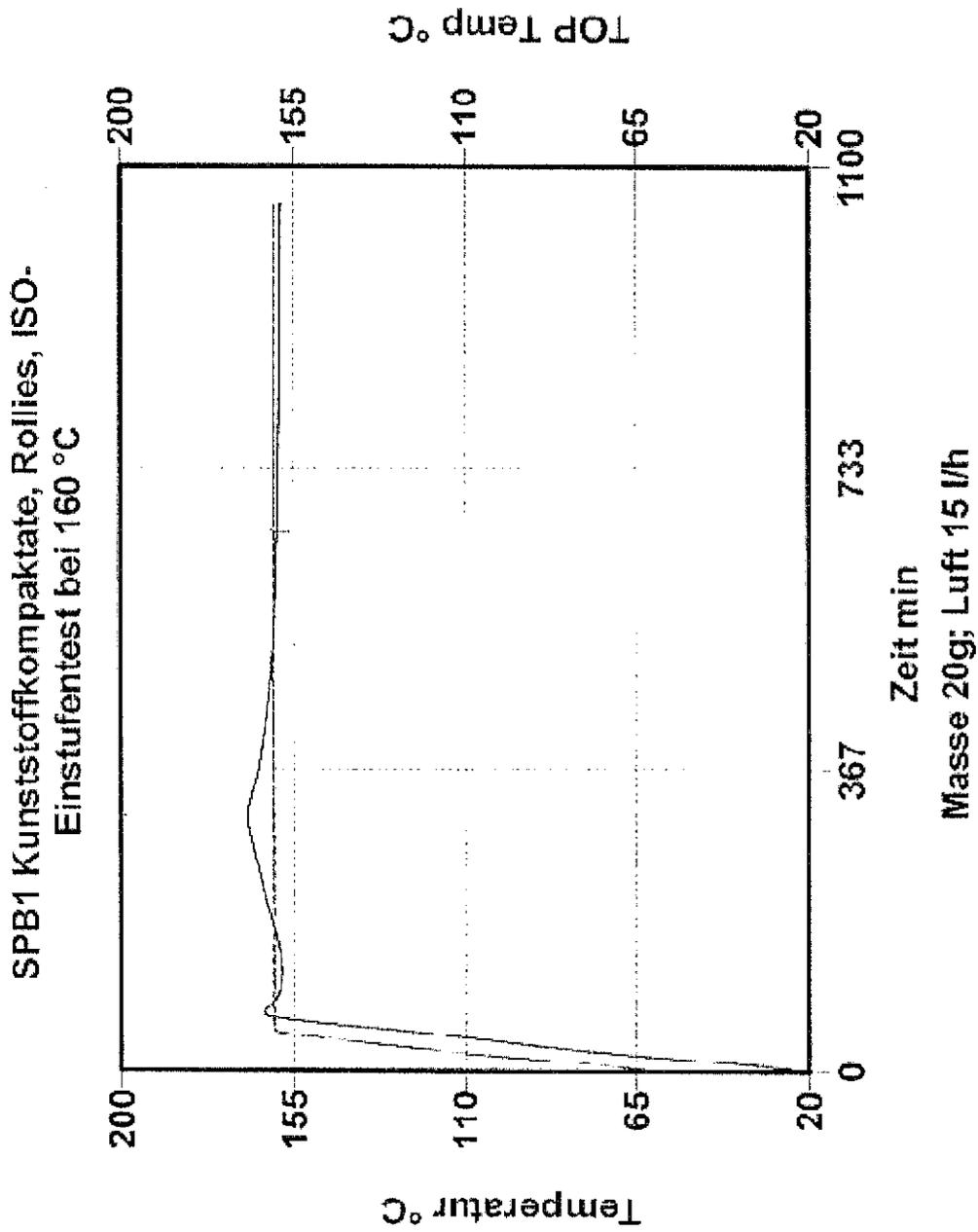


Abbildung 28: feuchtes Kunststoffkompaktat (Rollies, LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C

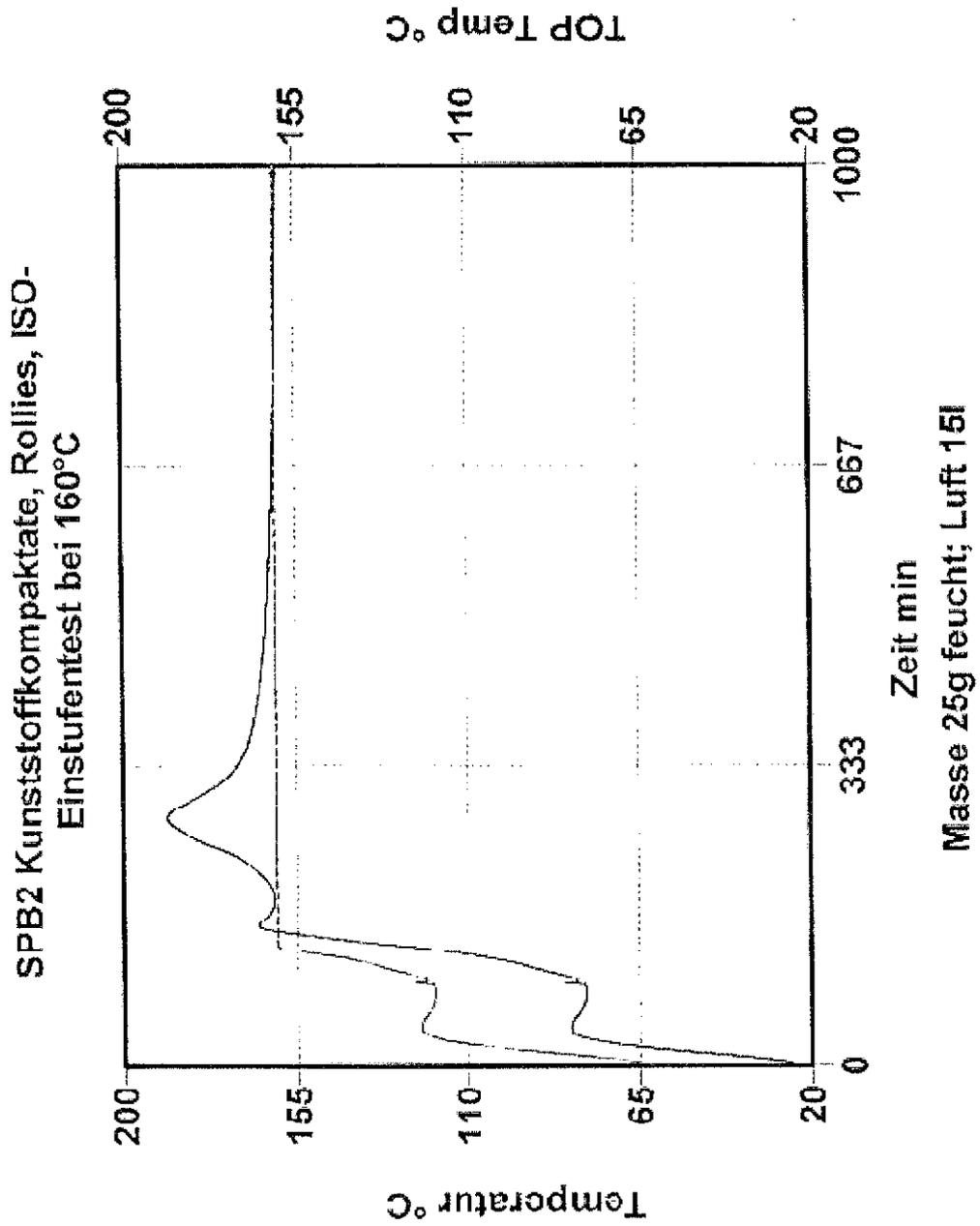


Abbildung 29: Kunststoffkompaktat (Siloanlage, LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C

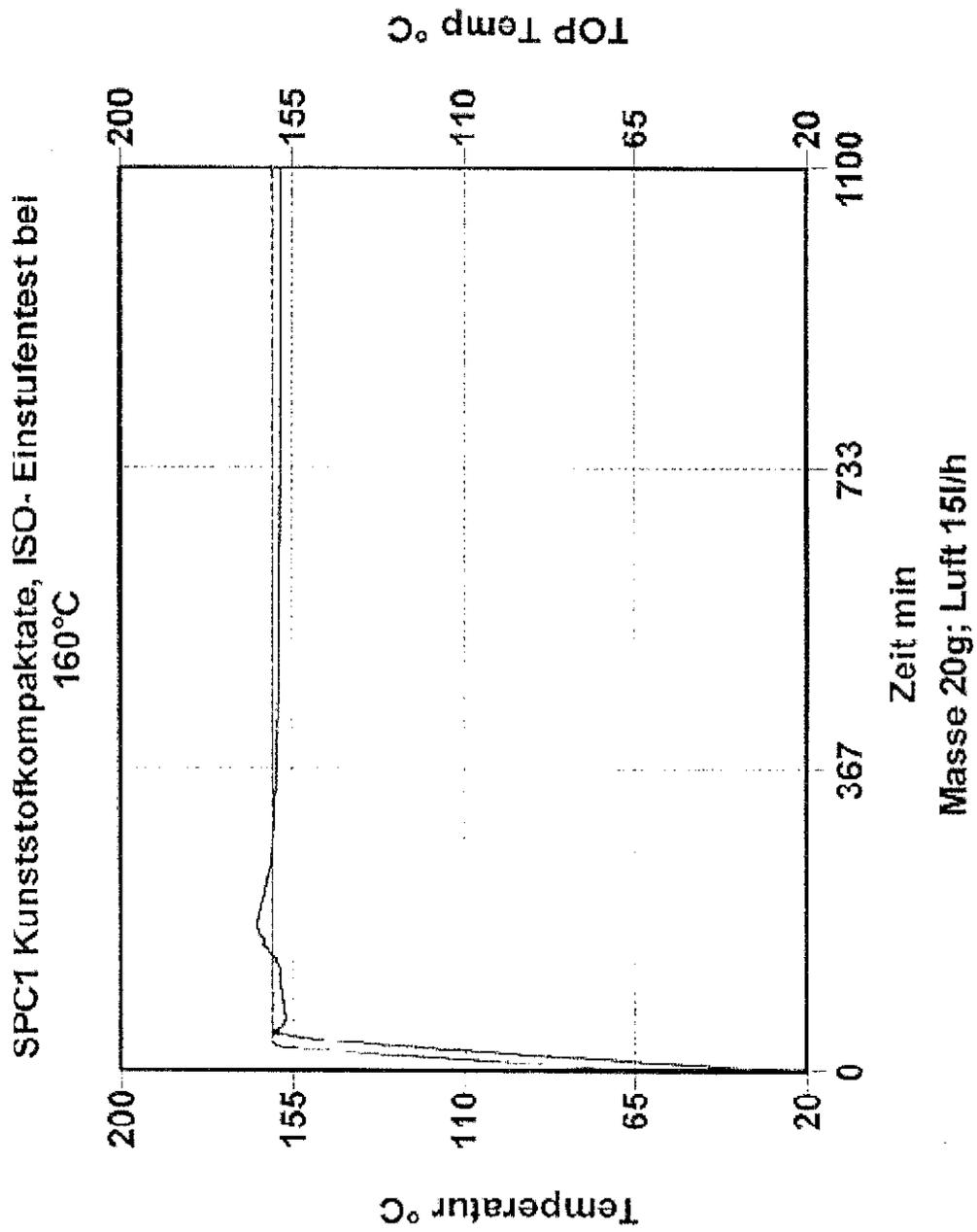


Abbildung 30: Kunststoffkompaktat (Kompaktieranlage, LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C

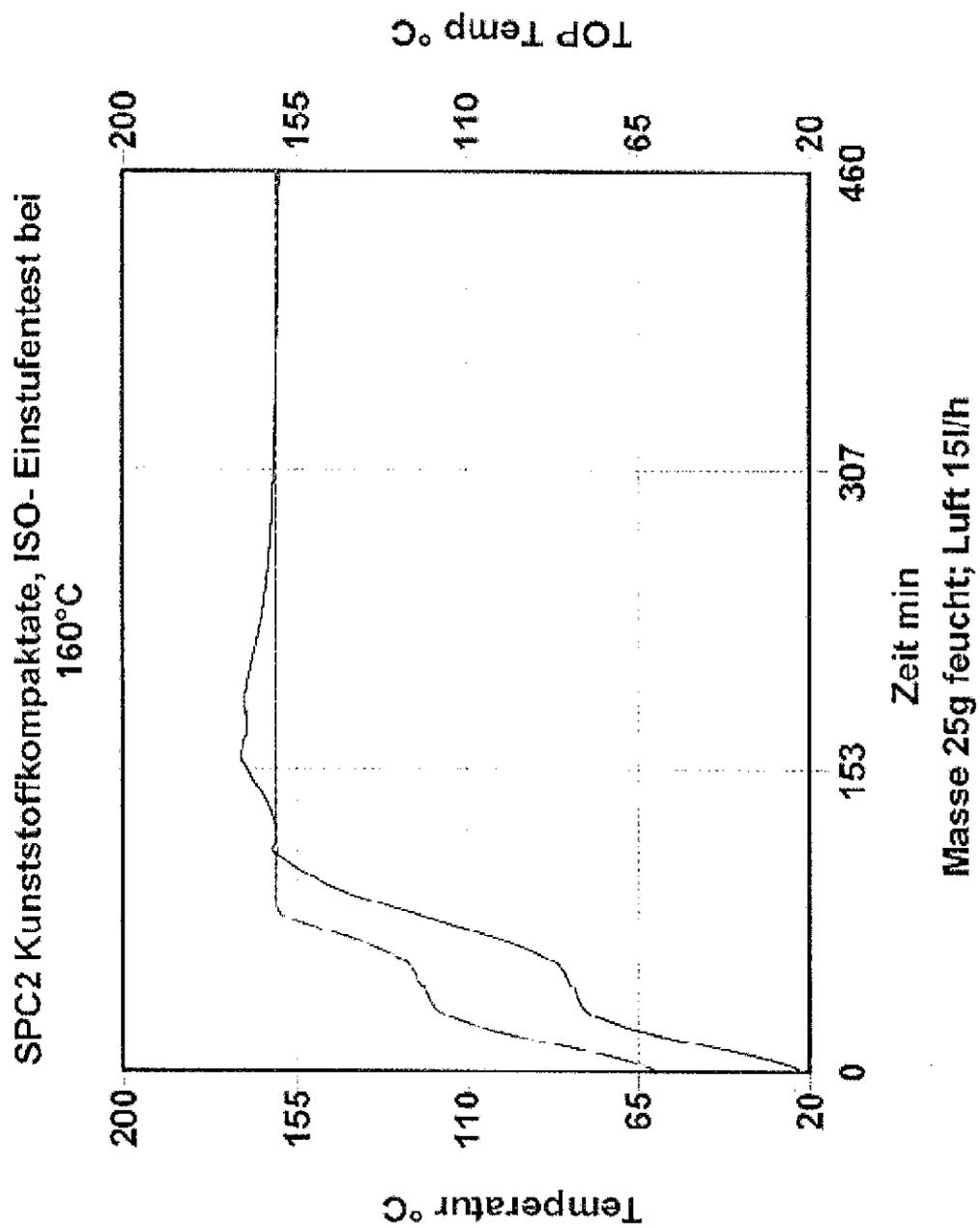


Abbildung 31: Flugstaub aus der Müllaufbereitung (LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C

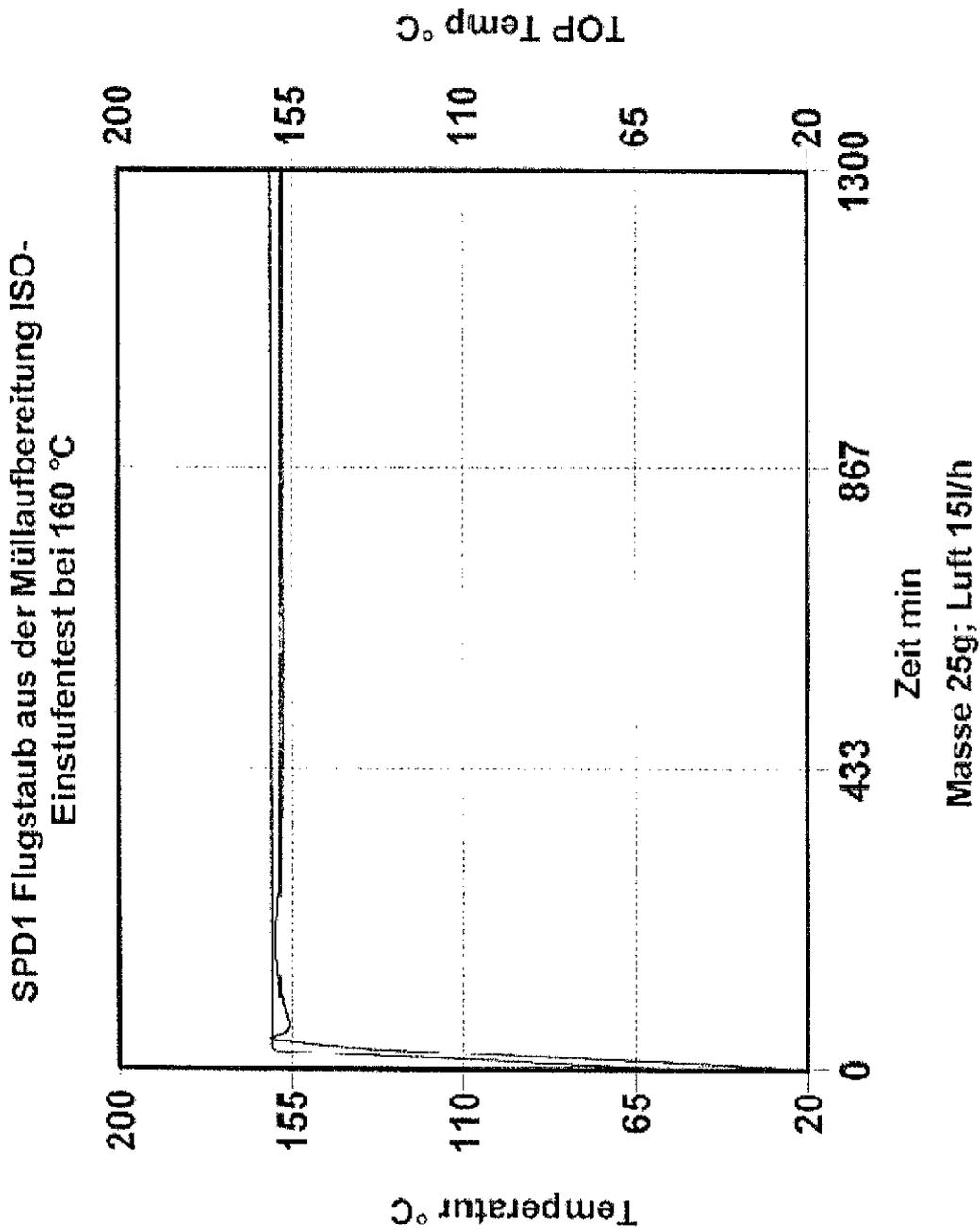


Abbildung 32: Flugstaub aus der Müllaufbereitung (LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C

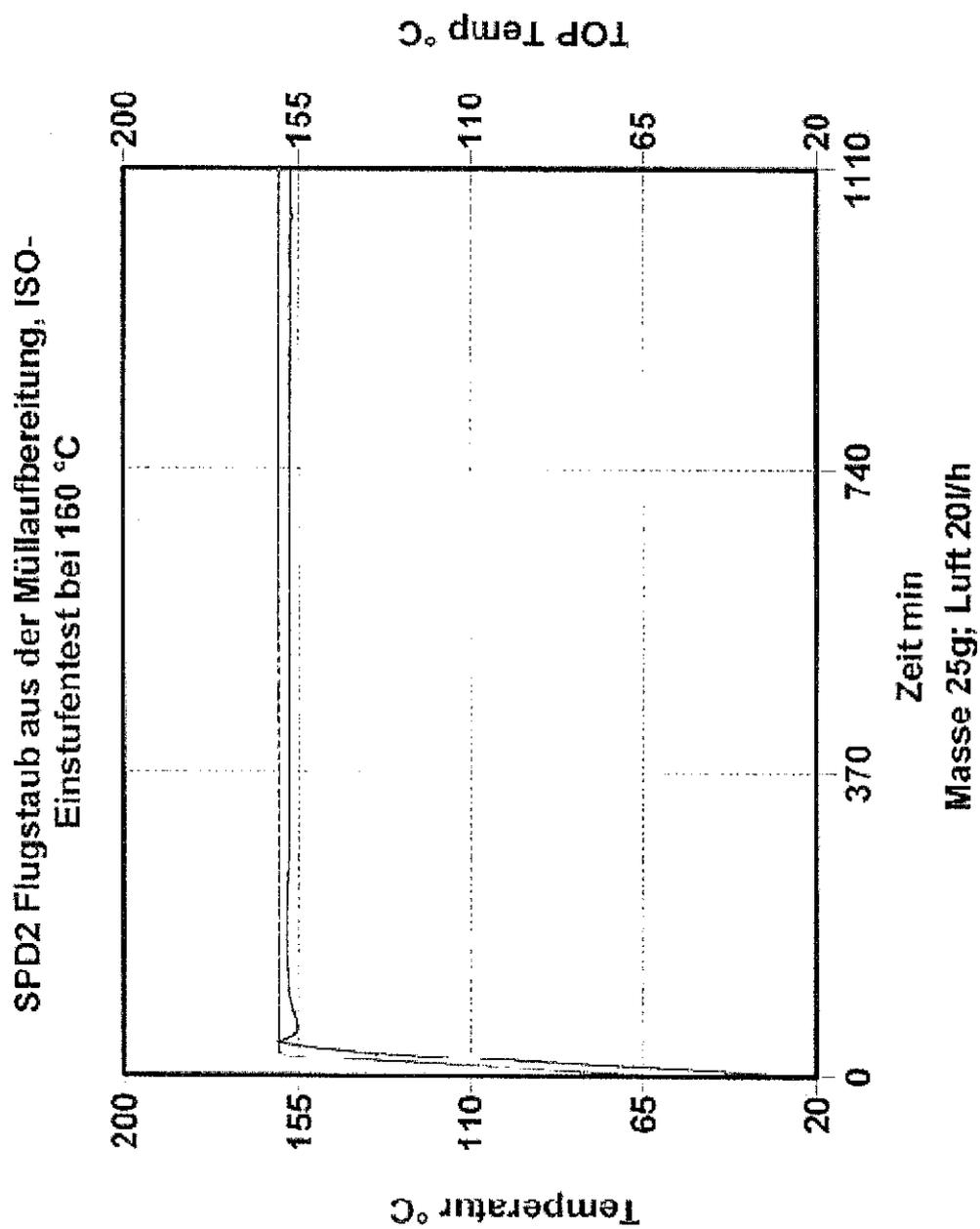
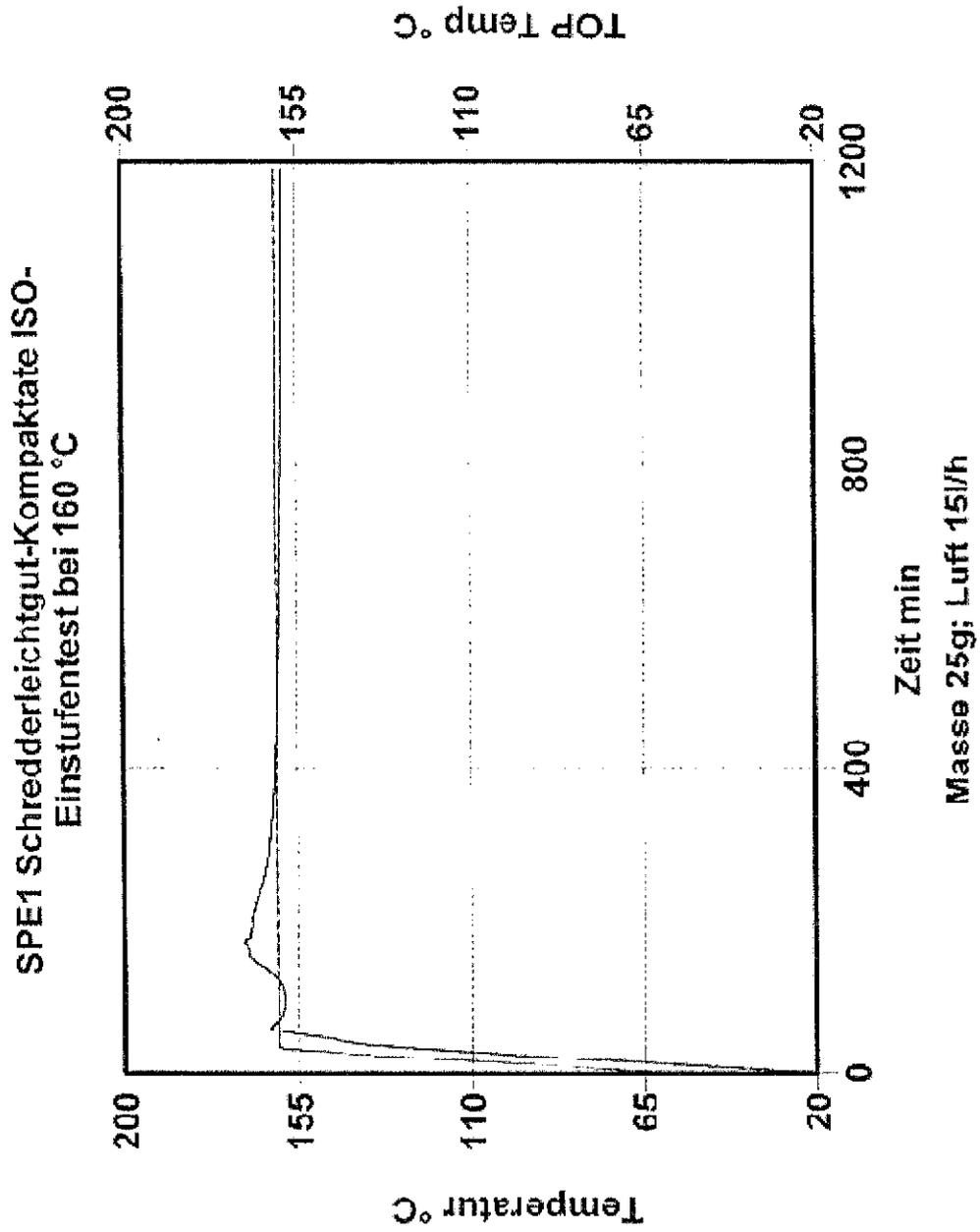


Abbildung 33: Schredderleichtgut-Kompaktate (LAUBAG) im ISO-Einstufentest bei 160°C



Anlage 4
Versuche zur Brandausbreitung

Versuch 1:
Material: Verpackungskarton mit glatter Oberfläche

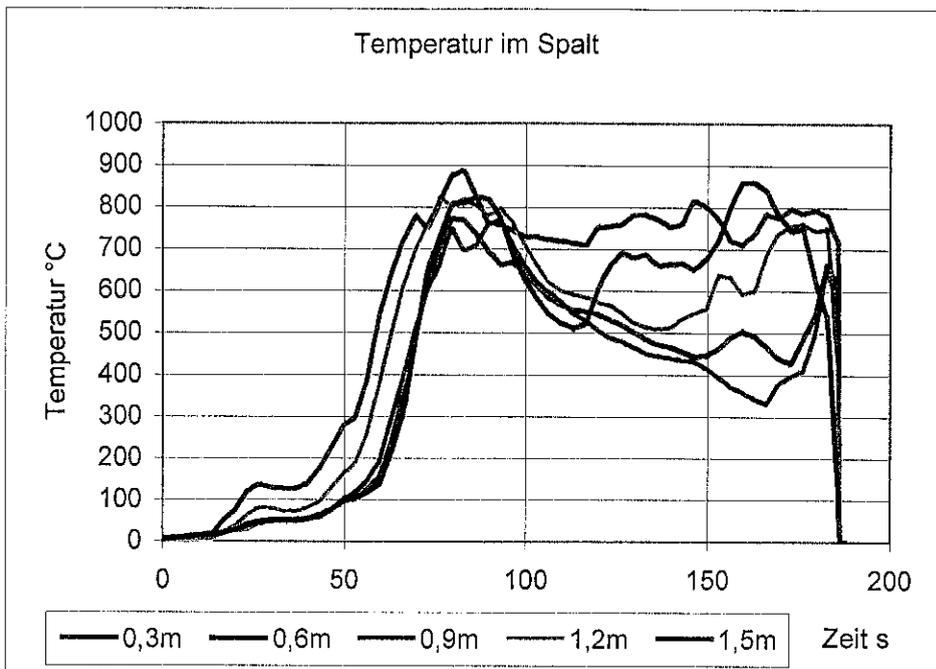


Abbildung 1: Temperatur in verschiedenen Höhen

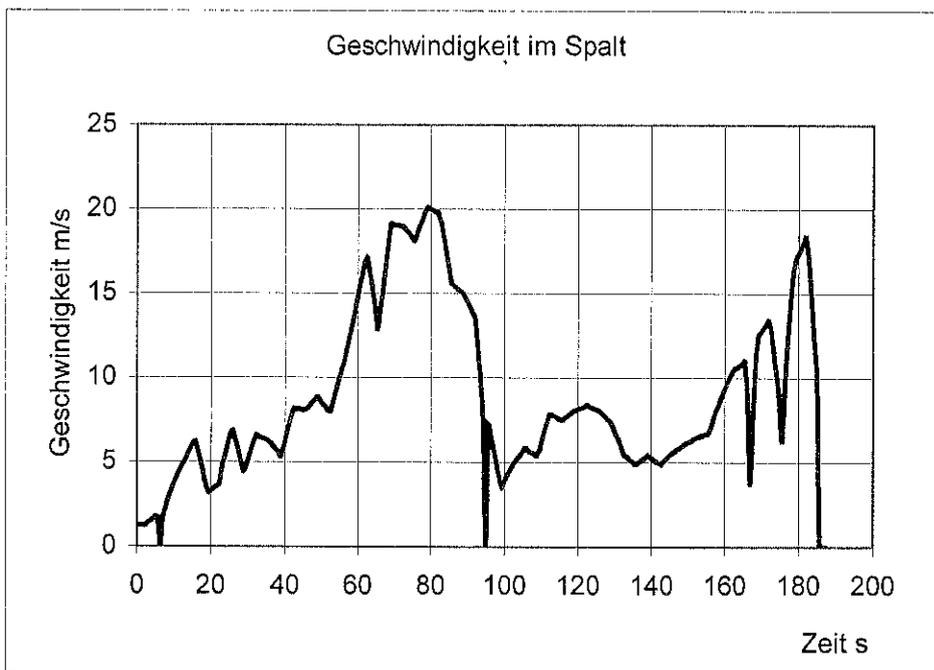


Abbildung 2: Geschwindigkeit im Spalt

Versuch 2:

Material: Verpackungskarton mit glatter Oberfläche

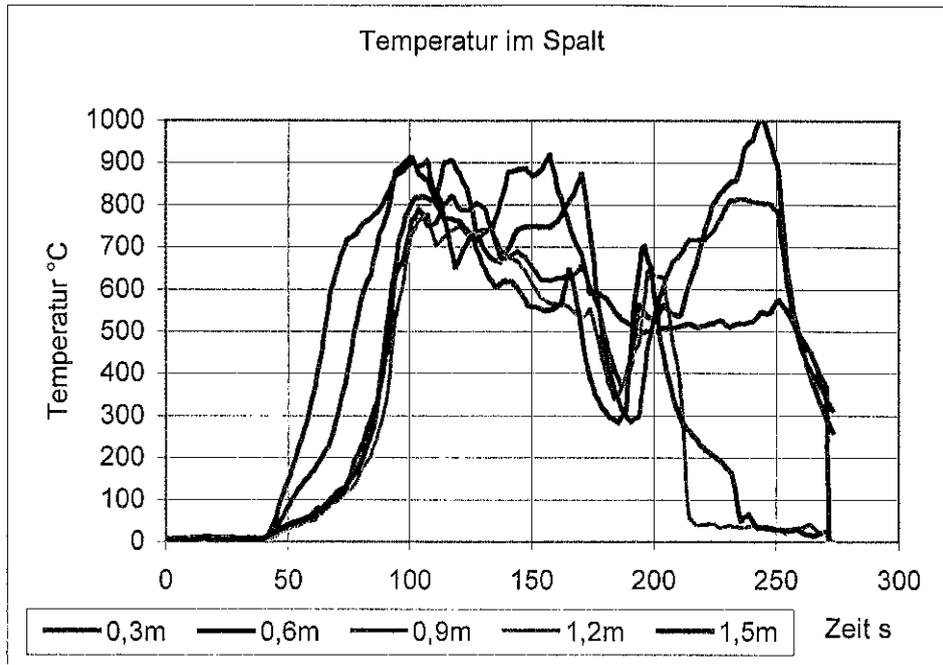


Abbildung 3: Temperatur in verschiedenen Höhen

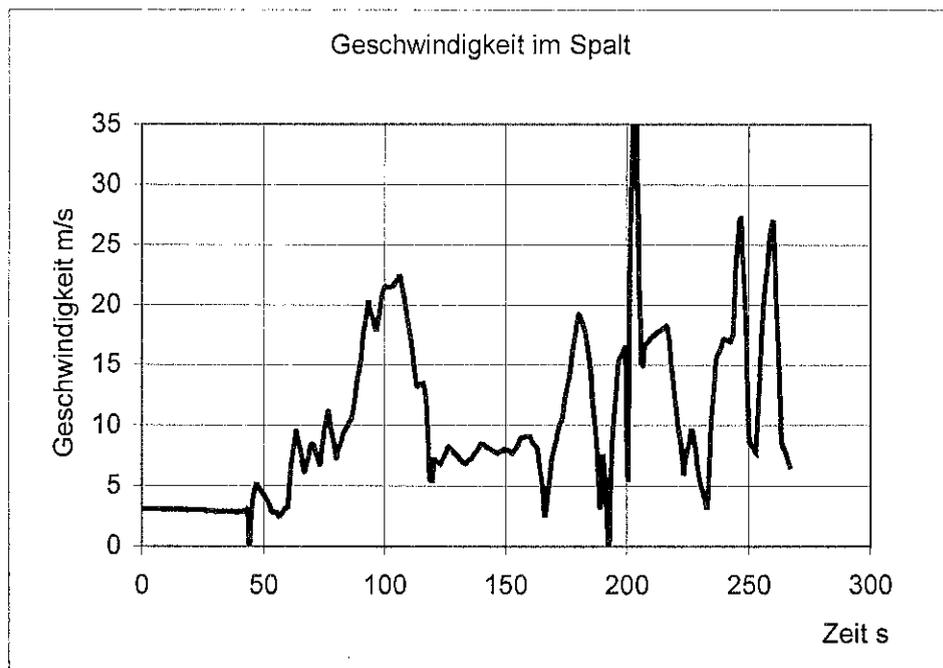


Abbildung 4: Geschwindigkeit im Spalt

Versuch 3:

Material: Verpackungskarton mit glatter Oberfläche

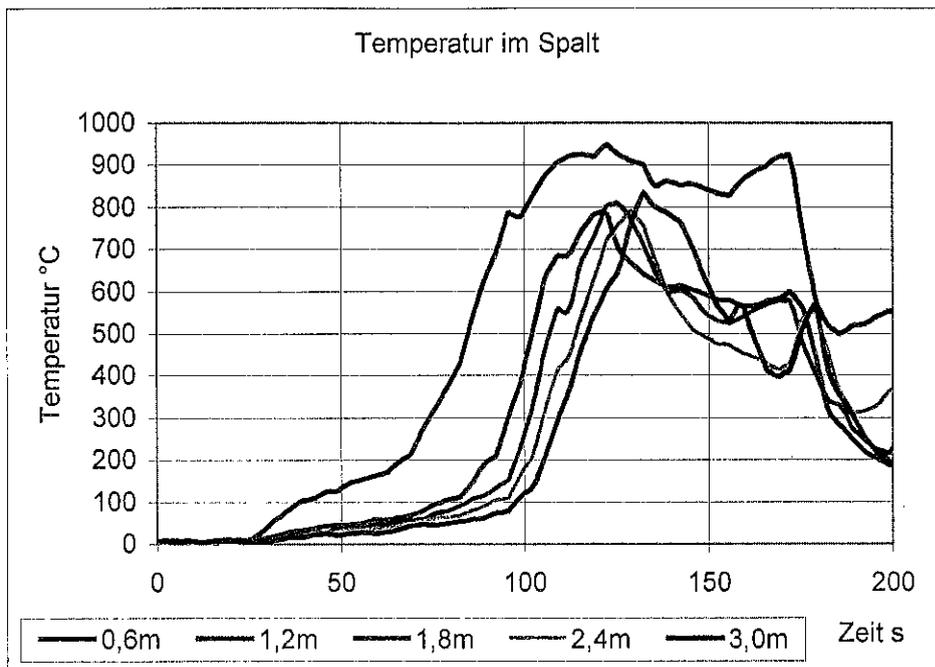


Abbildung 5: Temperaturentwicklung in verschiedenen Höhen

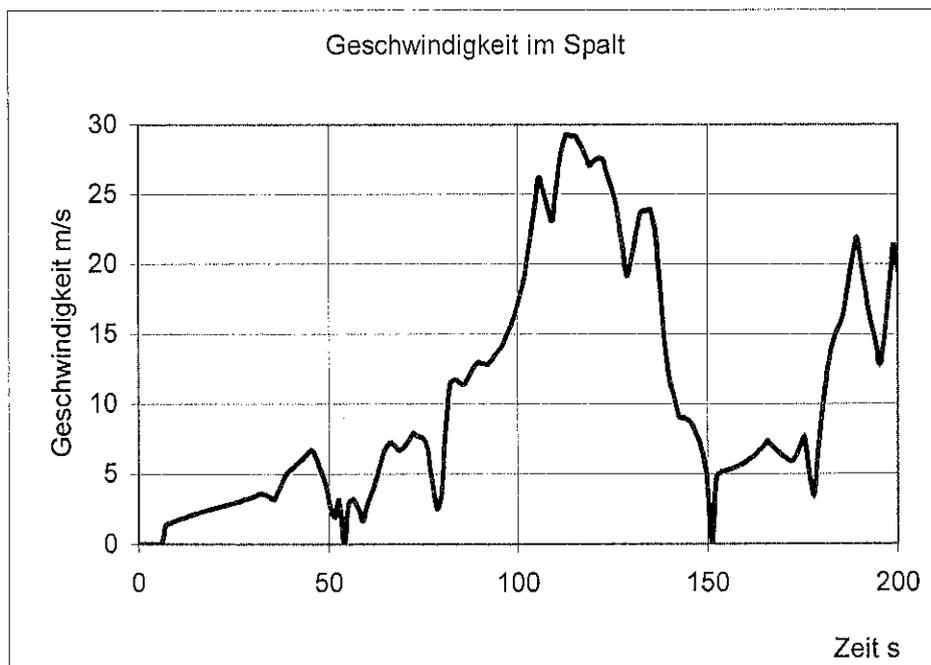


Abbildung 6: Geschwindigkeit im Spalt

Versuch 4:

Material: Verpackungskarton (glatte Oberfläche) umwickelt mit PE-Folie (0,5mm dick)

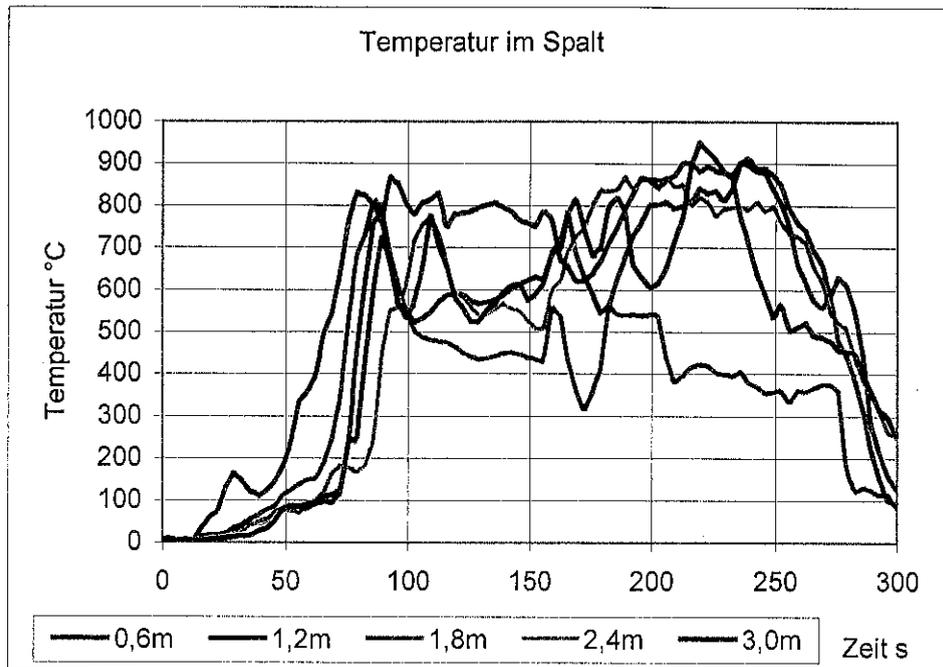


Abbildung 7: Temperatur in verschiedenen Höhen

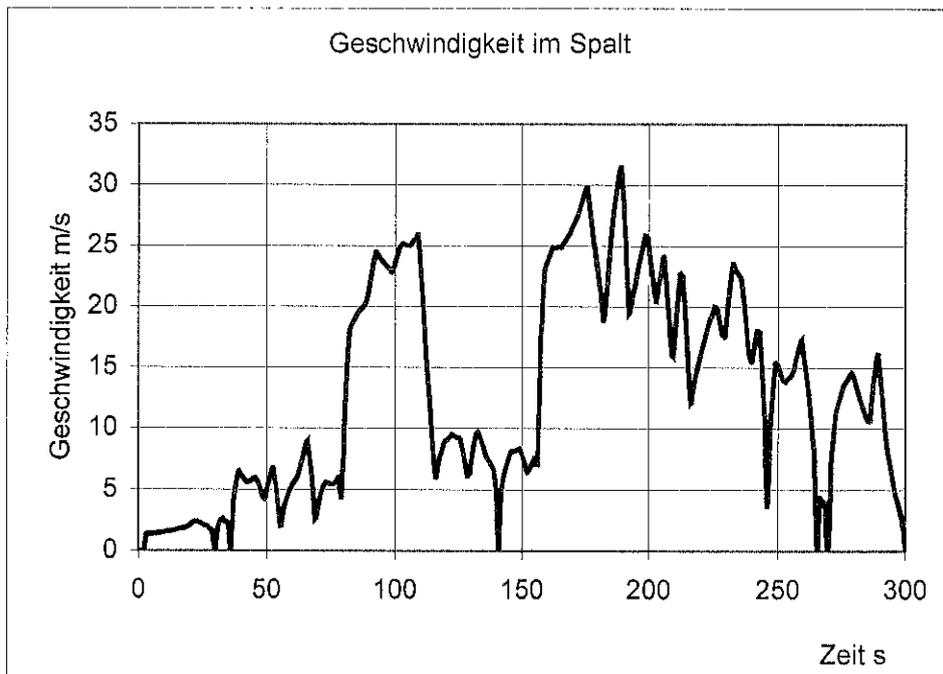


Abbildung 8: Geschwindigkeit im Spalt

Versuch 5:

Material: Verpackungskarton (glatte Oberfläche) umwickelt mit PE-Folie (0,5 mm dick)

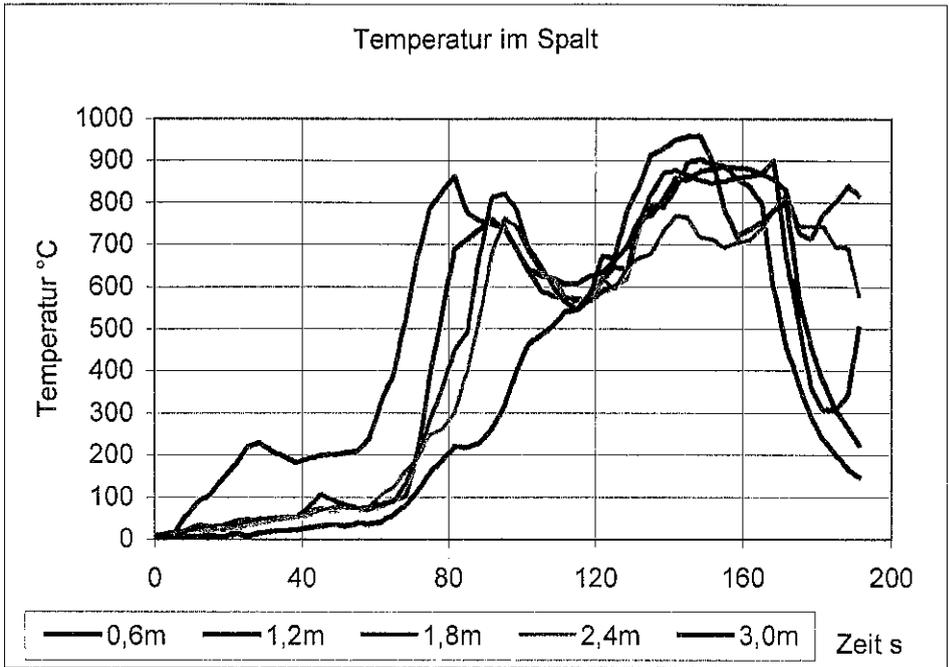


Abbildung 9: Temperaturentwicklung in verschiedenen Höhen

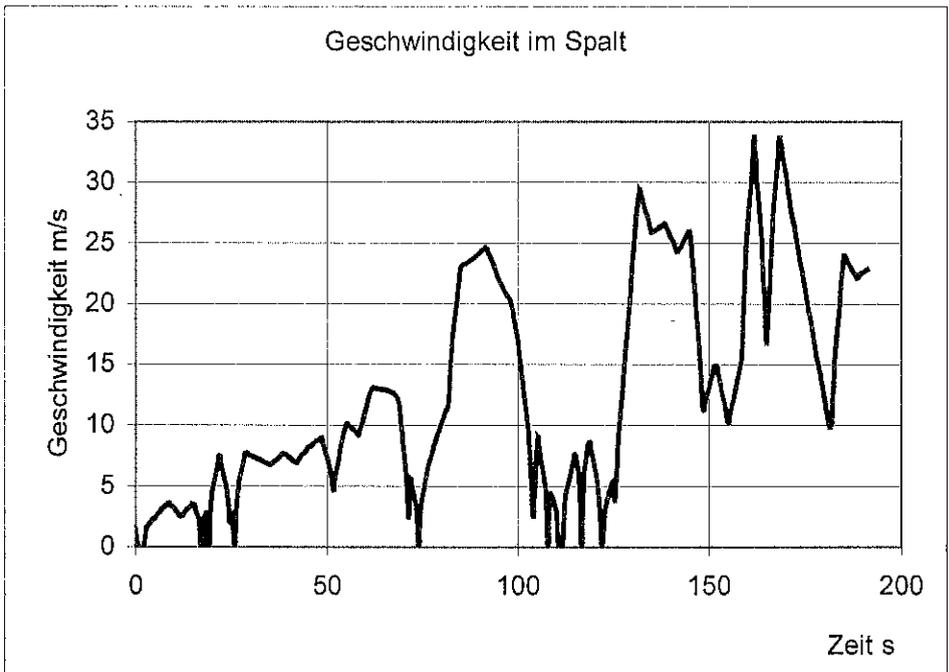


Abbildung 10: Geschwindigkeit im Spalt

Versuch 6:

Material: Verpackungskarton (glatte Oberfläche) umwickelt mit PE-Folie (0,5 mm dick)

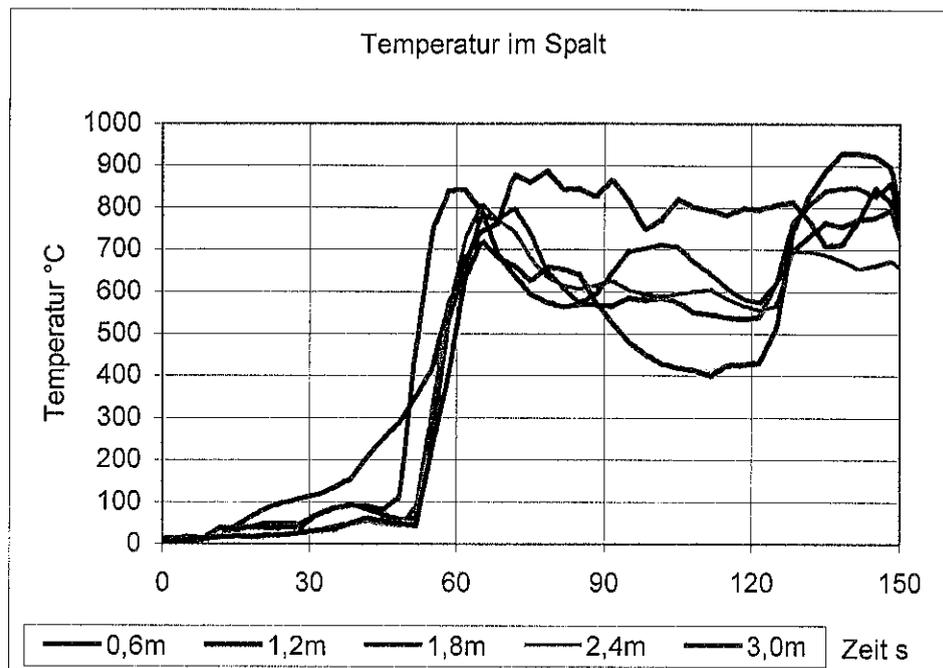


Abbildung 11: Temperaturentwicklung in verschiedenen Höhen

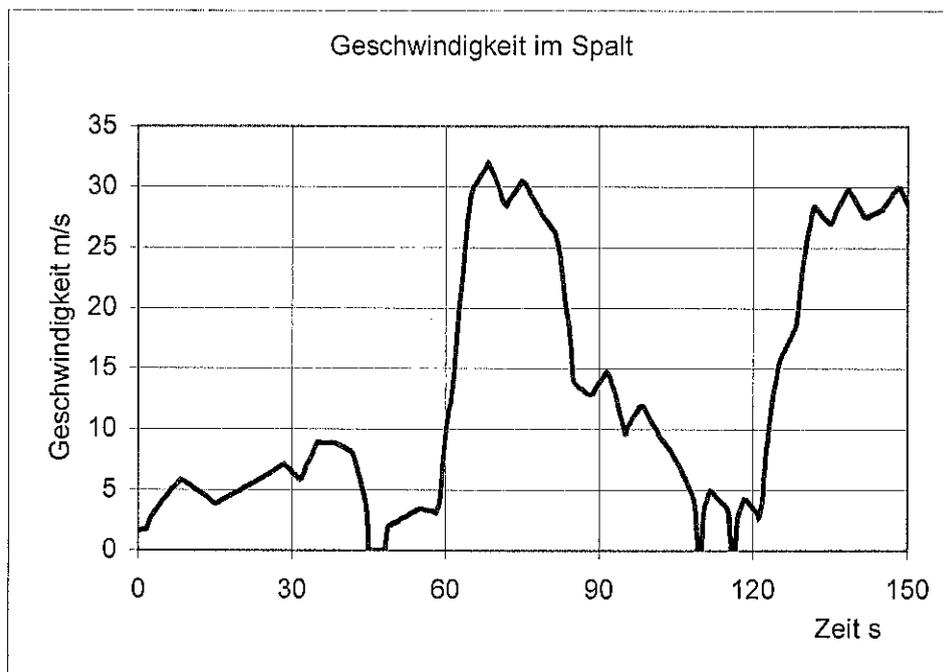


Abbildung 12: Geschwindigkeit im Spalt

Versuch 7:

Material: Verpackungskarton (glatte Oberfläche) gefüllt mit PE-Granulat

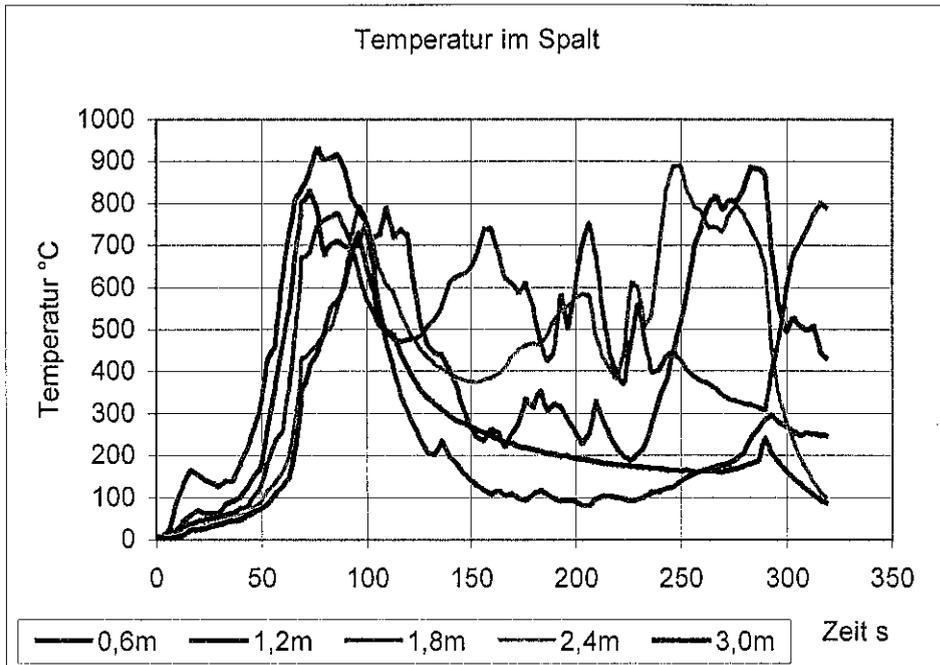


Abbildung 13: Temperaturentwicklung in verschiedenen Höhen

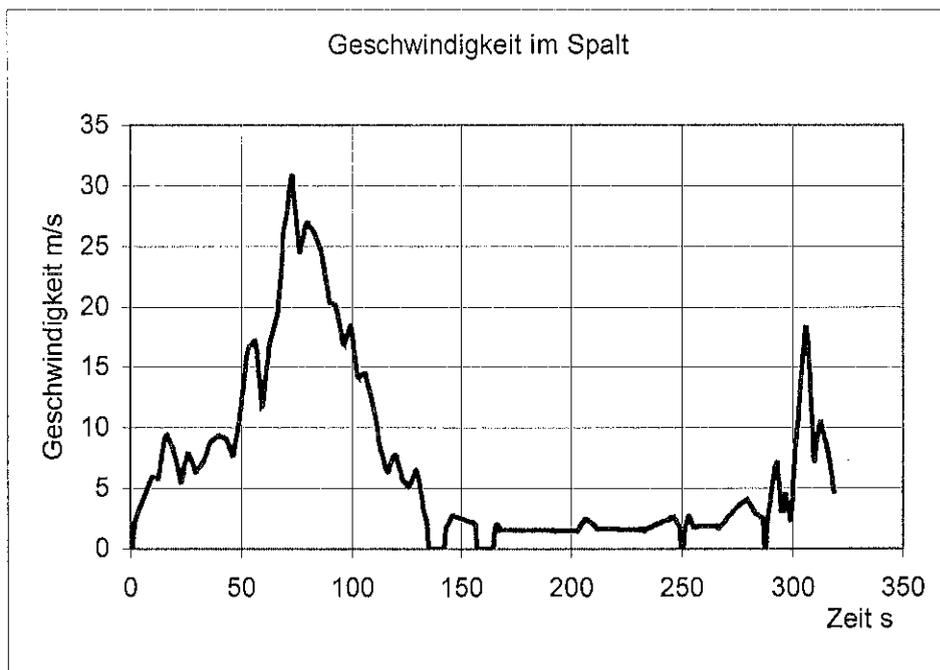


Abbildung 14: Geschwindigkeit im Spalt

Anlage 5
Versuche zu Stoffübergangsraten

Versuch 1:
Stapel mit 40 Holzstäben

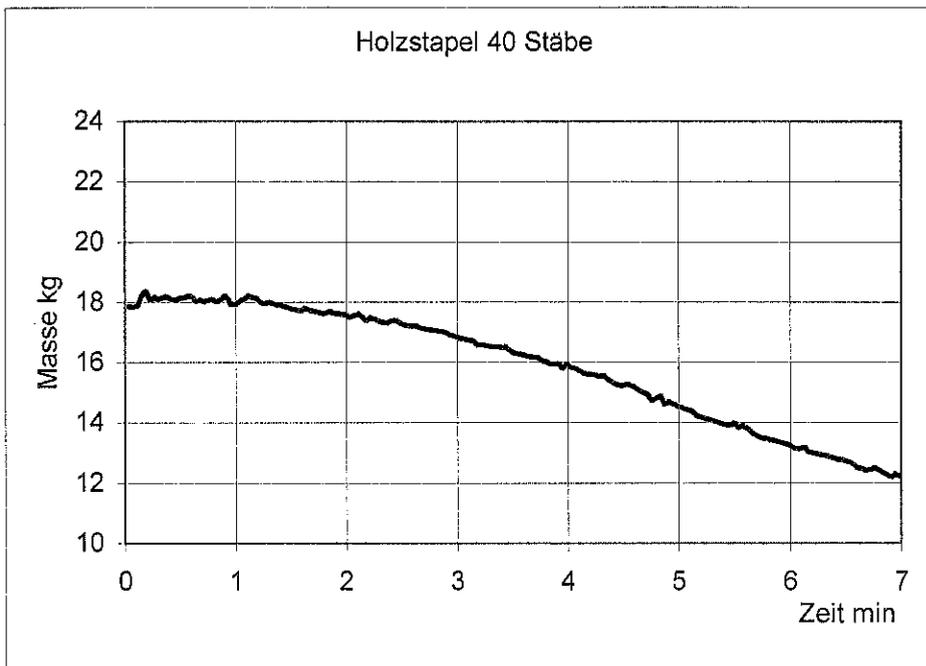


Abbildung 1: Masseverlust während des Abbrandes

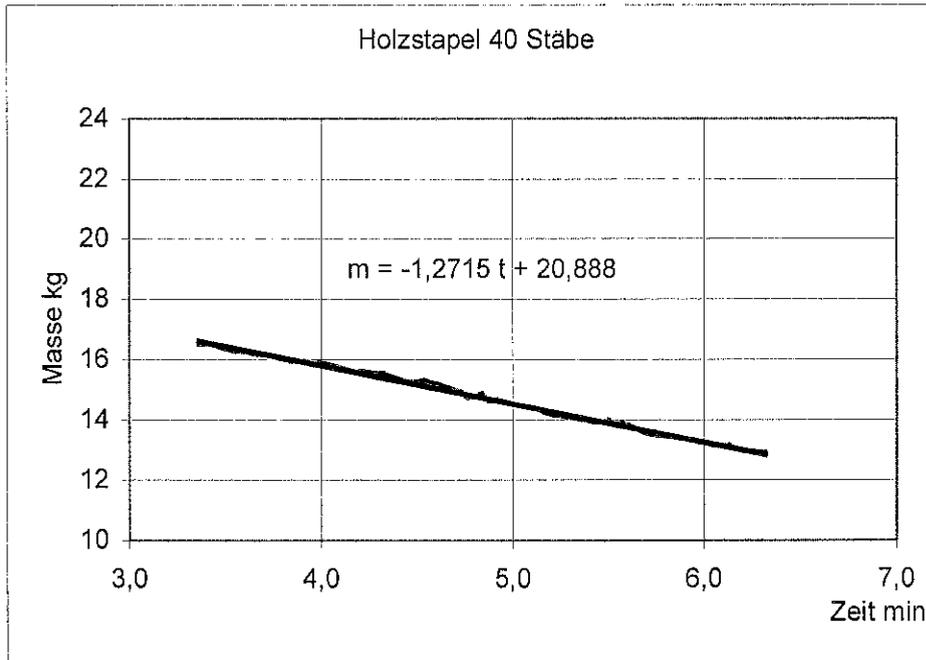


Abbildung 2: Anstieg (Stoffübergangsrate)

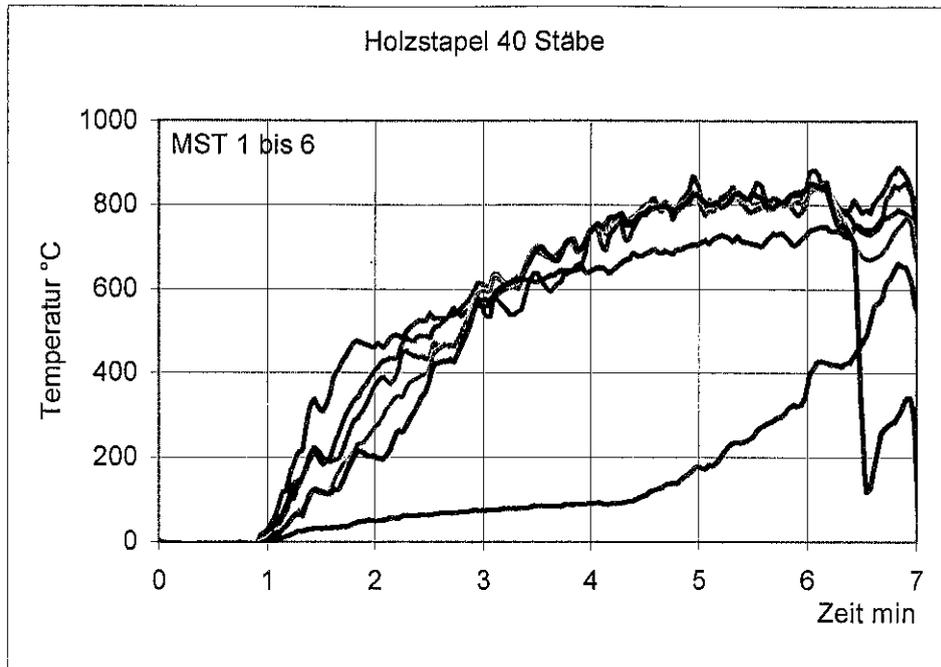


Abbildung 3: Temperaturverlauf beim Abbrand

Versuch 2:
Stapel mit 40 Holzstäben

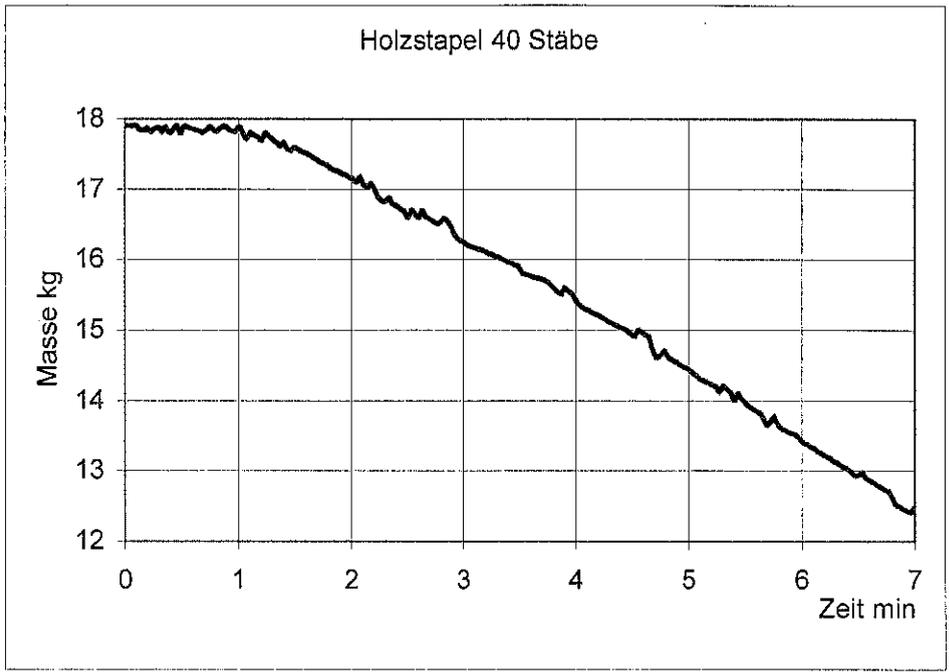


Abbildung 4: Masseverlust während des Abbrandes

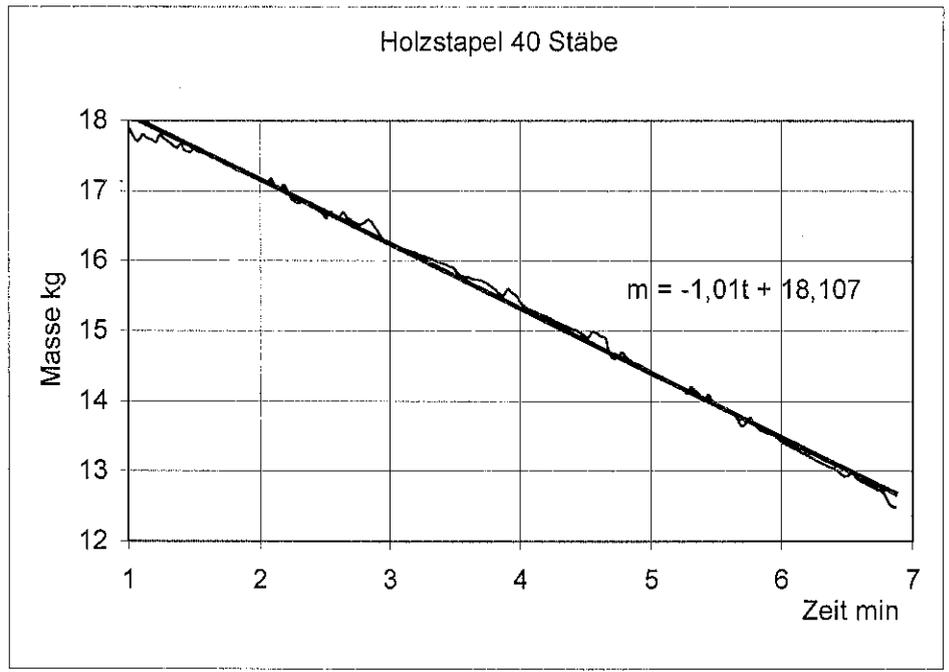


Abbildung 5: Anstieg (Stoffübergangsrate)

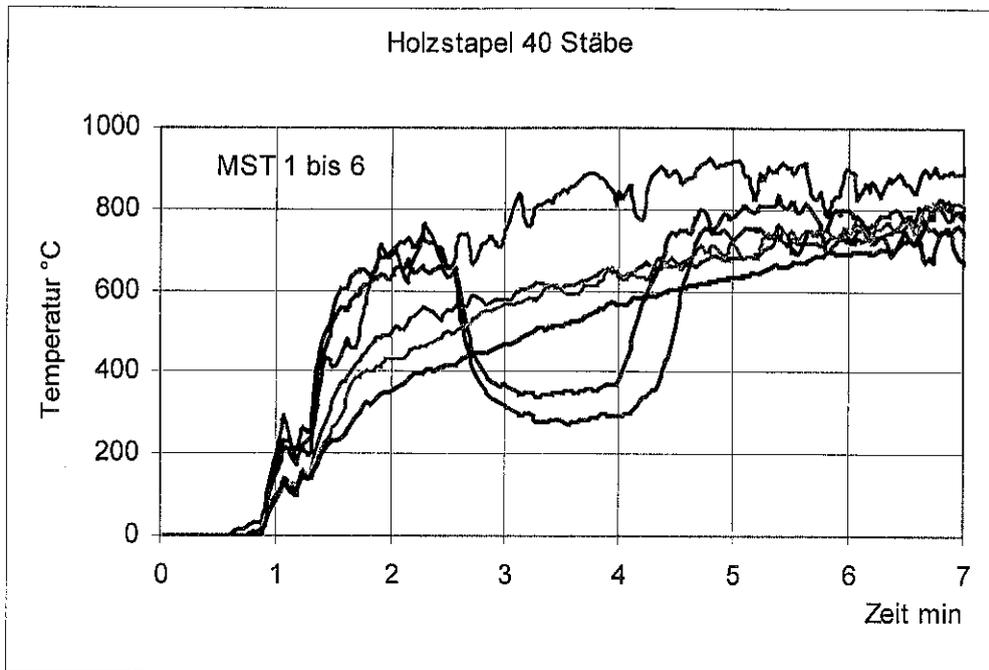


Abbildung 6: Temperaturverlauf beim Abbrand

Versuch 3:

Stapel mit 56 Holzstäben

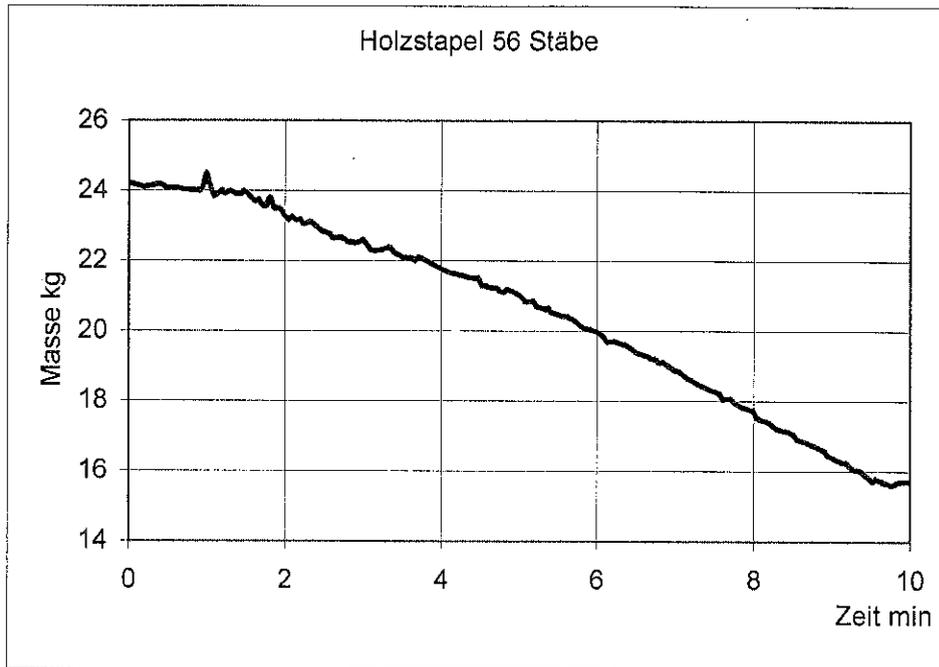


Abbildung 7: Masseverlust während des Abbrandes

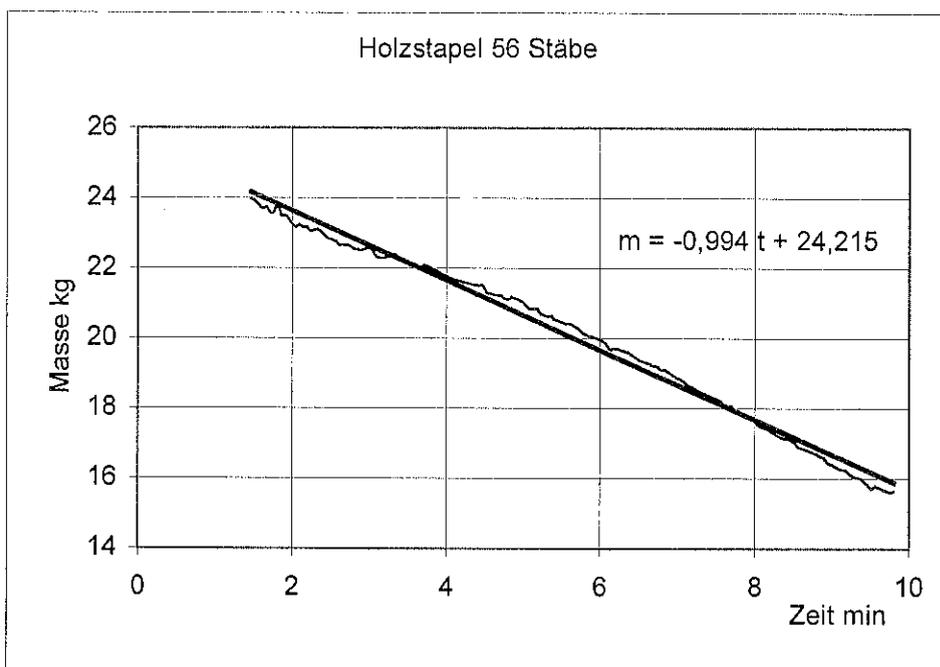


Abbildung 8: Anstieg (Stoffübergangsrate)

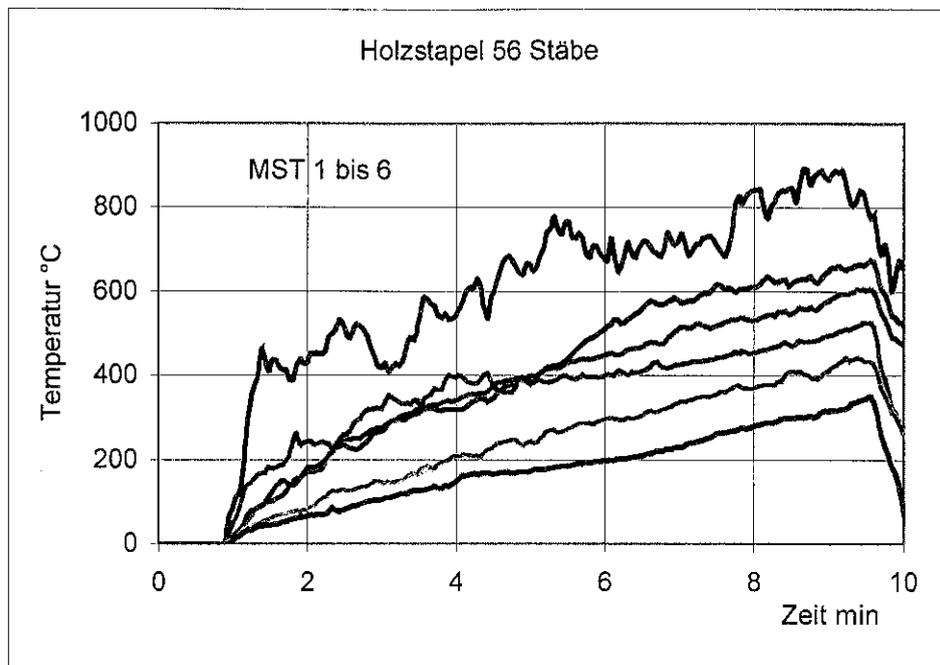


Abbildung 9: Temperaturverlauf beim Abbrand

Versuch 4:
Stapel mit 56 Holzstäben

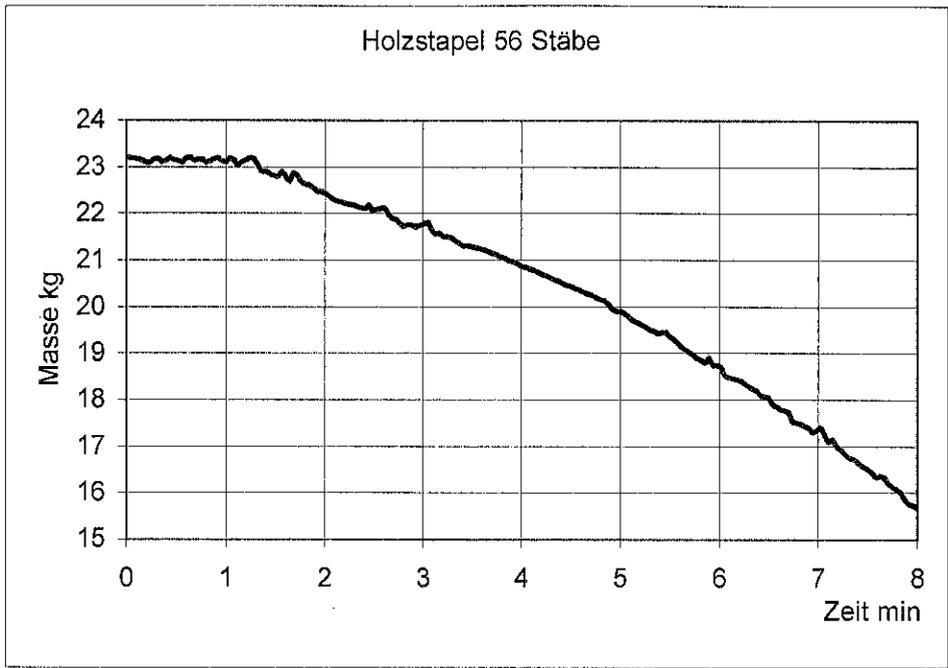


Abbildung 10: Masseverlust während des Abbrandes

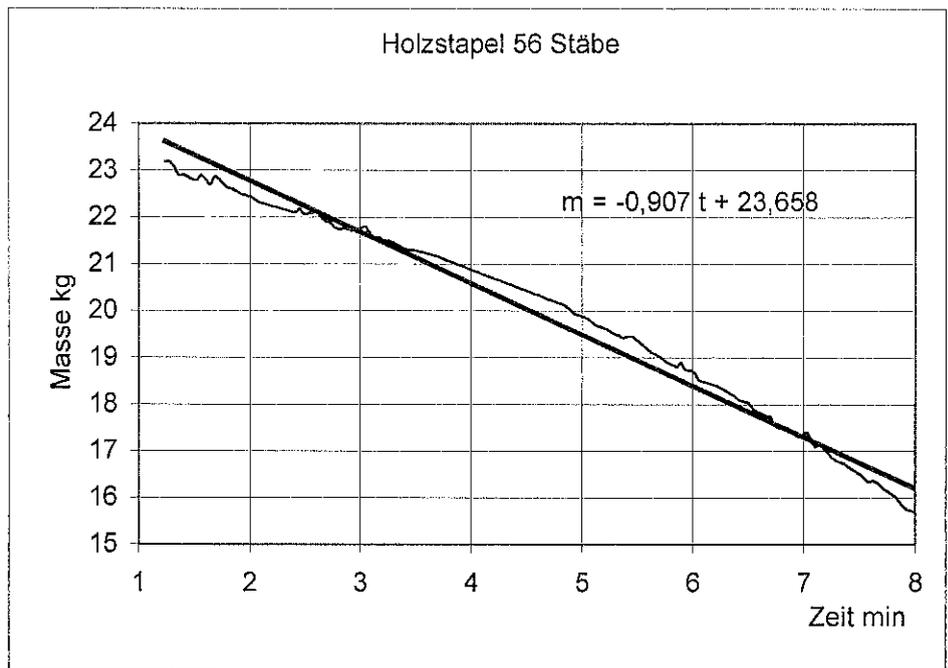


Abbildung 11: Anstieg (Stoffübergangsrate)

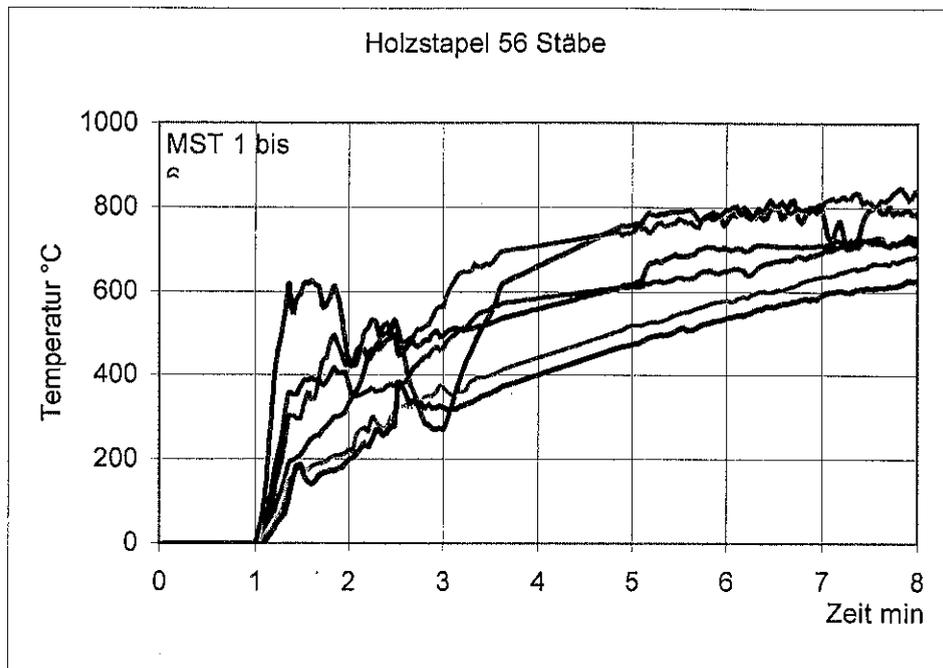


Abbildung 12: Temperaturverlauf beim Abbrand

Versuch 5:
Stapel mit 64 Holzstäben

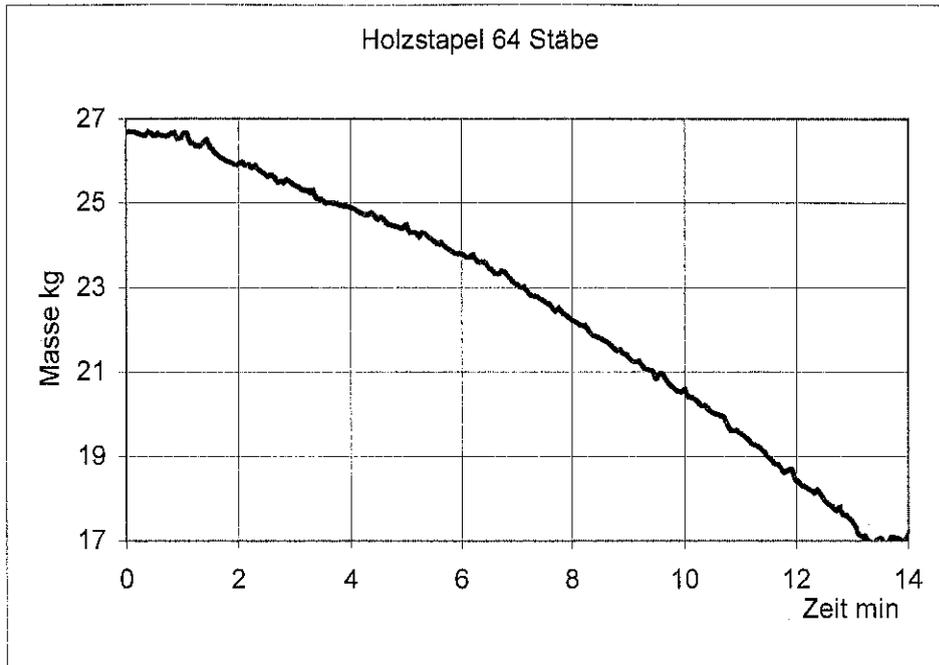


Abbildung 13: Masseverlust während des Abbrandes

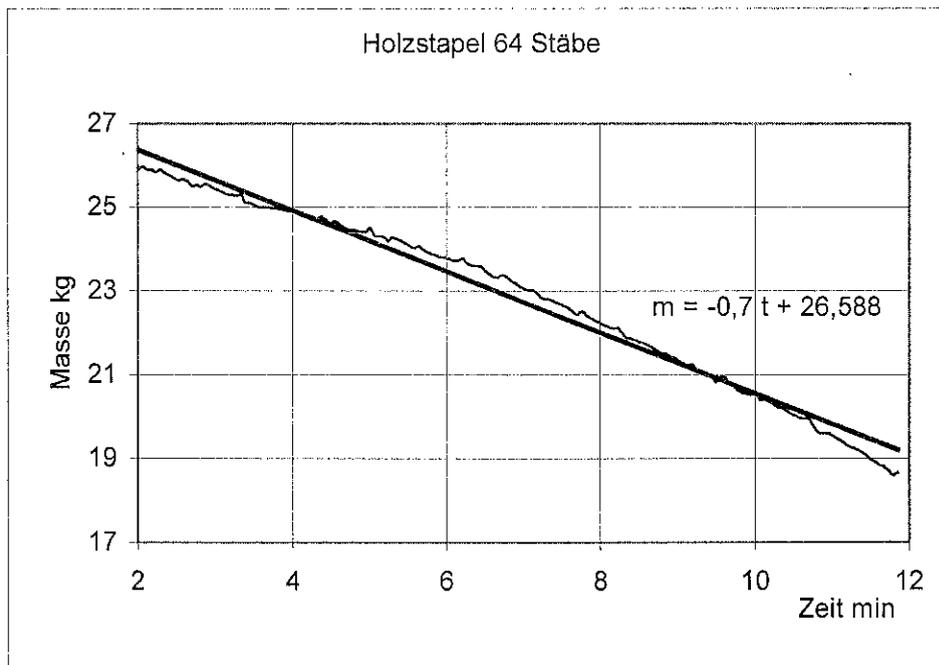


Abbildung 14: Anstieg (Stoffübergangsrate)

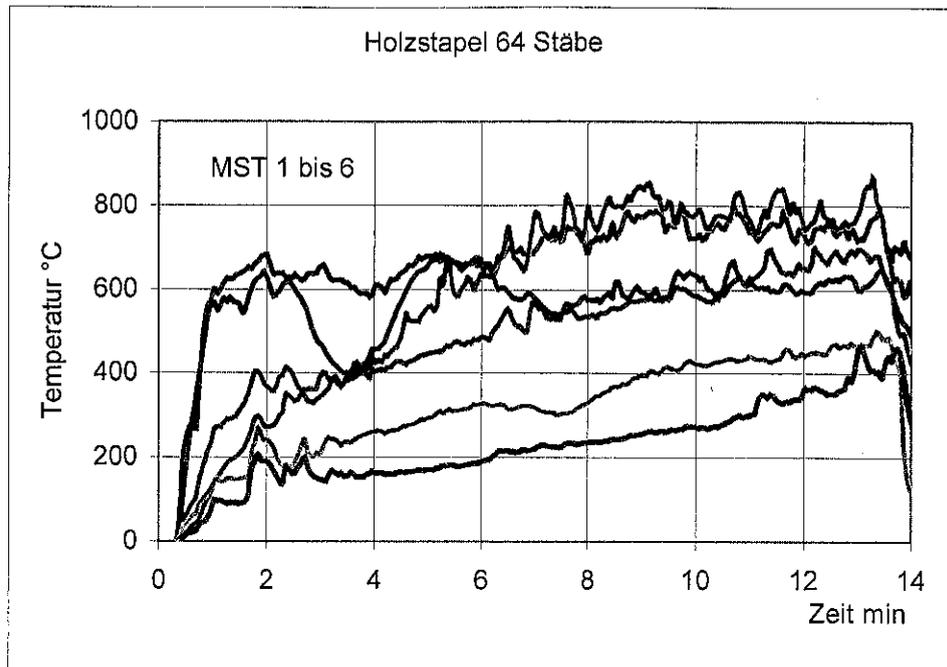


Abbildung 15: Temperaturverlauf beim Abbrand

Versuch 6:
Stapel mit 64 Holzstäben

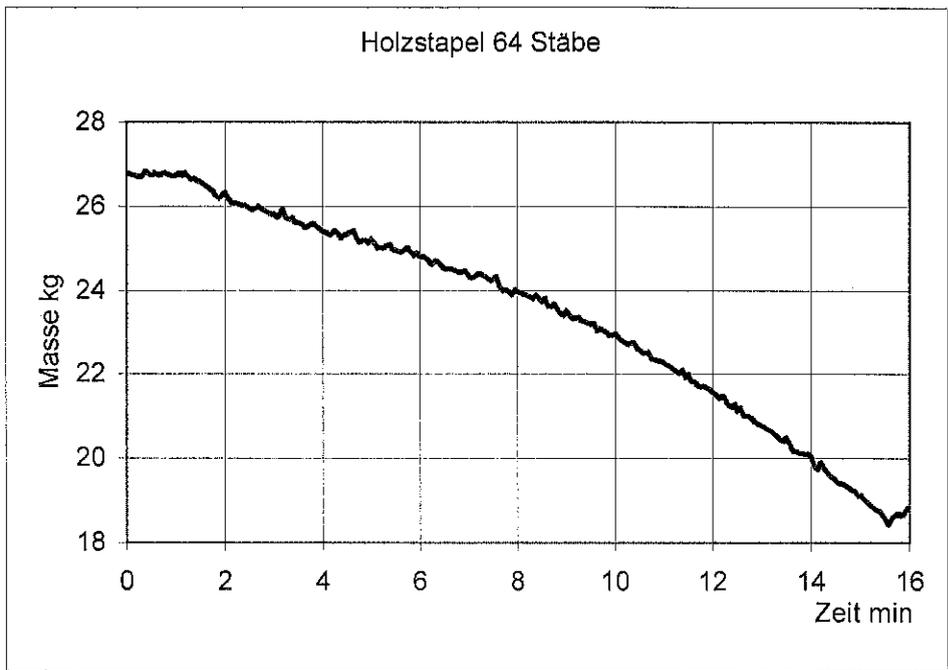


Abbildung 16: Masseverlust während des Abbrandes

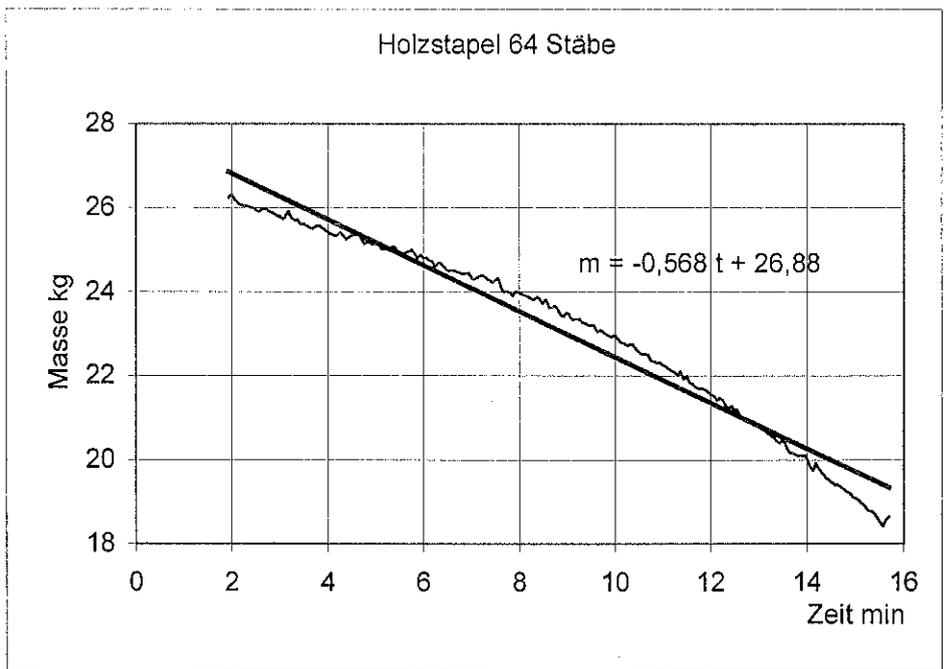


Abbildung 17: Anstieg (Stoffübergangsrate)

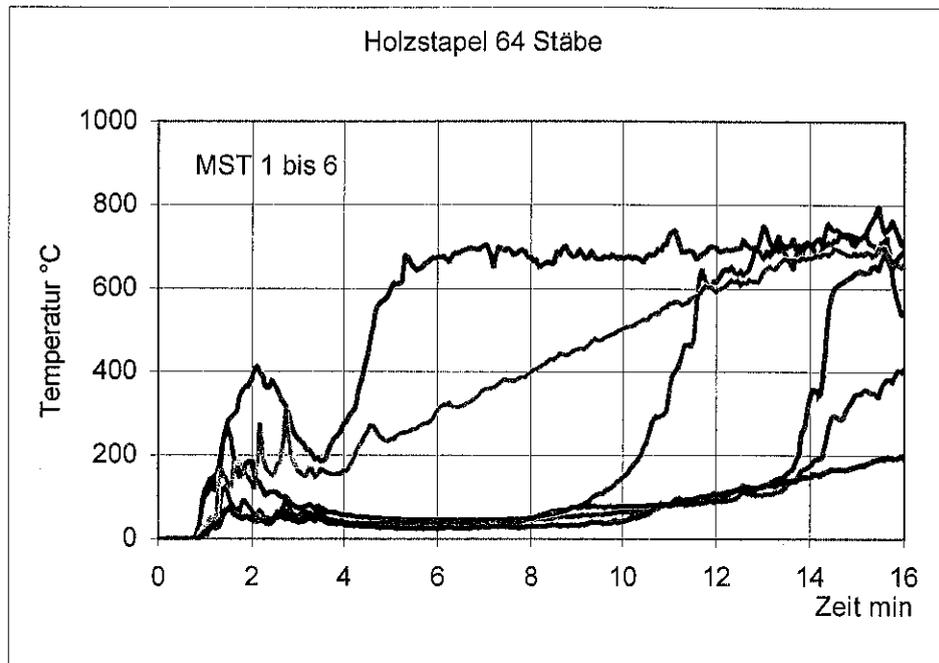


Abbildung 18: Temperaturverlauf beim Abbrand

Versuch 7:
Stapel mit 72 Holzstäben

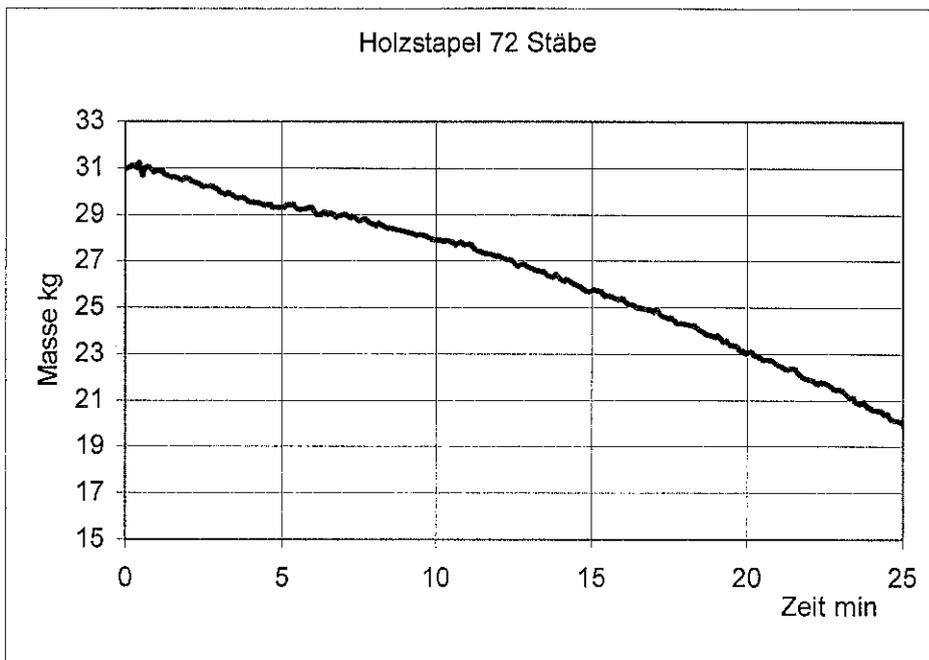


Abbildung 19: Masseverlust während des Abbrandes

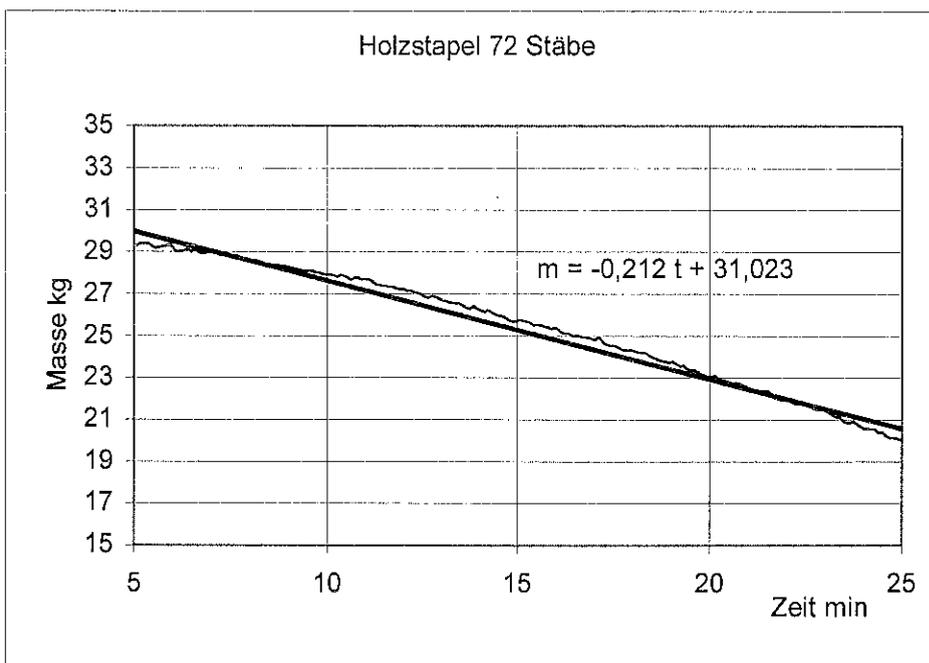


Abbildung 20: Anstieg (Stoffübergangsrate)

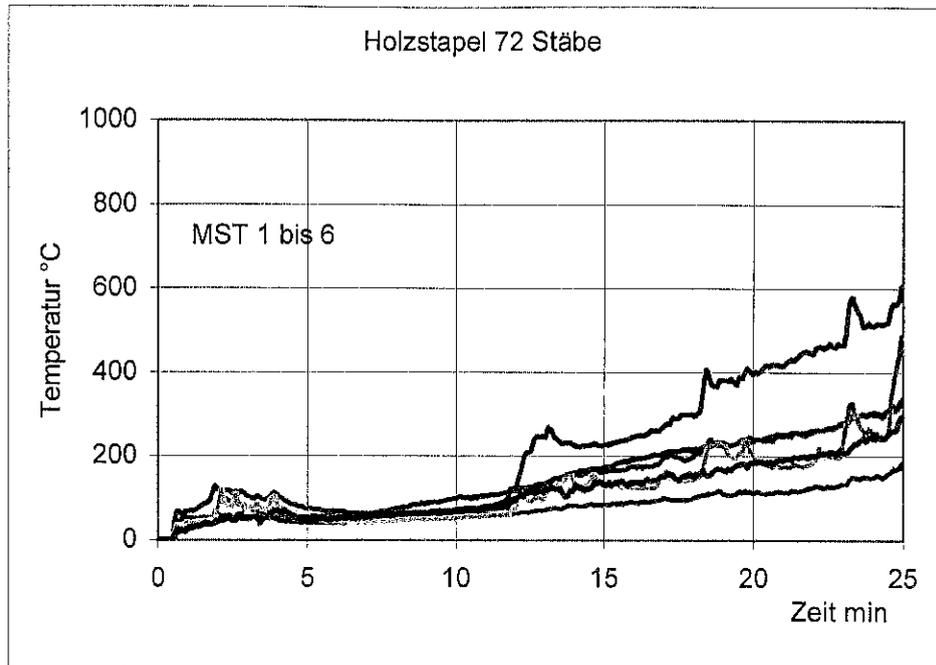


Abbildung 21: Temperaturverlauf beim Abbrand

Versuch 8:
Stapel mit 72 Holzstäben

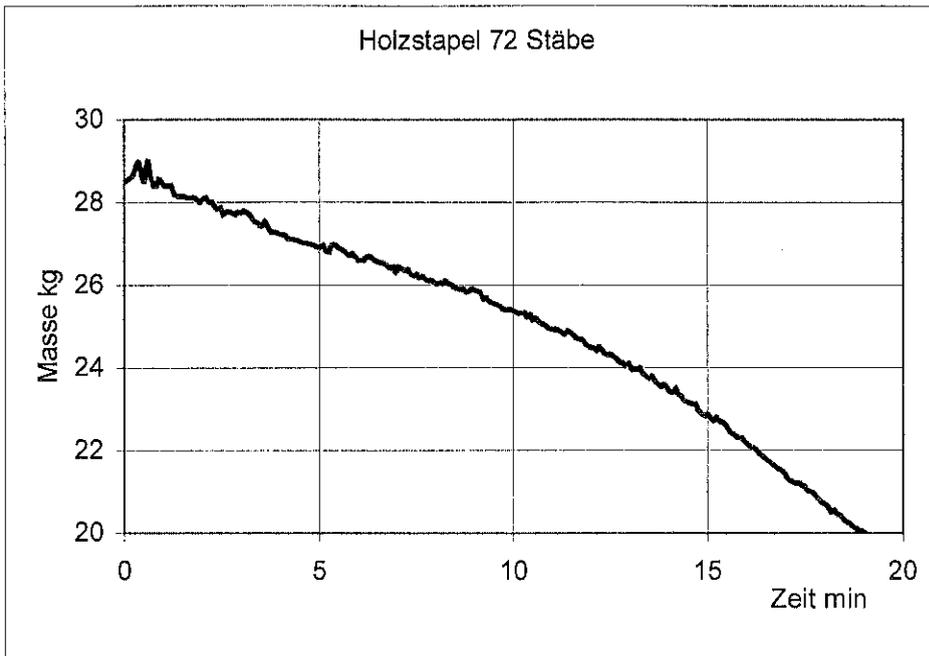


Abbildung 22: Masseverlust während des Abbrandes

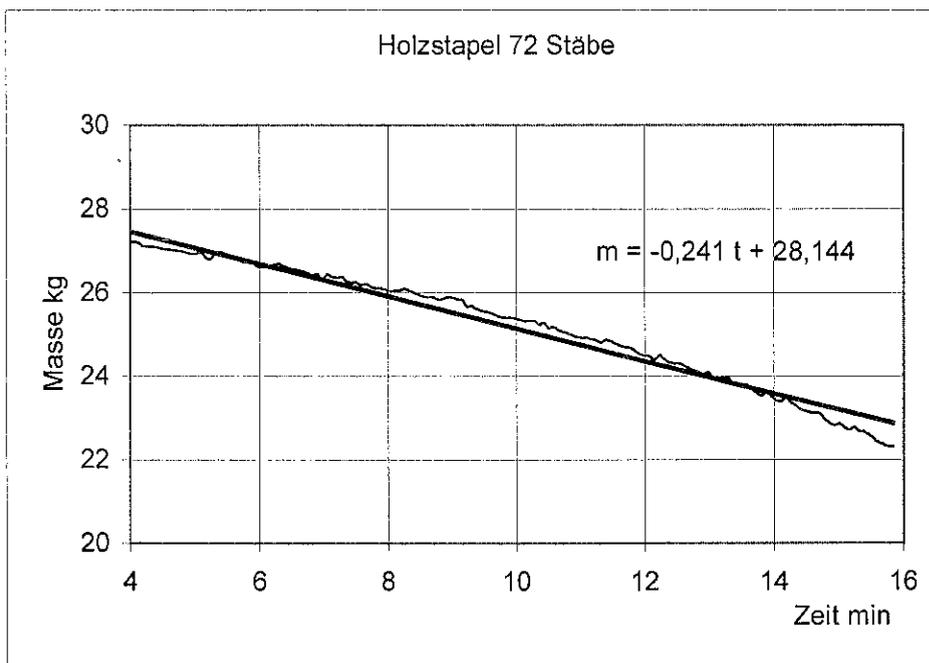


Abbildung 23: Anstieg (Stoffübergangsrate)

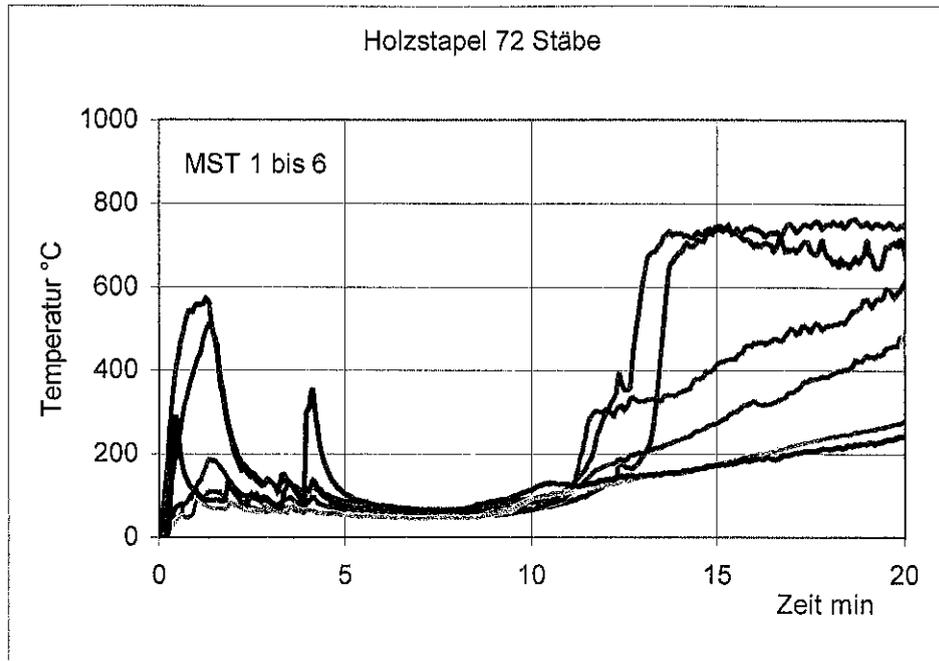


Abbildung 24: Temperaturverlauf beim Abbrand