

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

107

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

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 Löschstrategien

Teil 1: Analyse des Ist-Standes zum Brandschutz und zur stationären und mobilen Brandbekämpfung

Forschungsbericht Nr. 107

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

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

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Heyrothsberge
Dezember 1996

ISSN 0170-0060

1. BERICHTSNUMMER

354 (IdF)

2. TITEL DES BERICHTES (KURZ)

Studie Brandschutz und Brandbekämpfung
DSD

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: Leitender Branddirektor

Prof. Dr. rer. nat. habil. Grabski

5. FÖRDERNDE INSTITUTION/AUFTRAGGEBER (NAME/ANSCHRIFT)

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

6. ABSCHLUßDATUM

Dezember 1996

7. FÖRDER-/ AUFTRAGS-NR.

IMK 13 (1/95) H

8. SEITENZAHL

38

9. ABBILDUNGEN

10

10. TABELLEN/DIAGRAMME

13 / 2

11. LITERATURANGABEN

40

12. KURZFASSUNG

Die Arbeit umfaßt eine Bewertung des gegenwärtigen Standes der Maßnahmen des Brandschutzes in Recyclinganlagen auf der Grundlage der vorliegenden Vorschriftenentwürfe, der Bewertung wesentlicher Großbrände in Recyclingbetrieben und der Beurteilung einzelner Technologien in den Betrieben. Für Altreifenlager wurde die Bewertung an Hand der verfügbaren Literatur vorgenommen. Es werden dabei vorrangig grundsätzliche Schwerpunkte in der stationären und mobilen Brandbekämpfung herausgearbeitet und daraus der weitere notwendige Forschungsbedarf abgeleitet.

13. SCHLAGWÖRTER

Recycling, Kunststoffe, Altreifen, Brandbekämpfung, verdeckte Brände, Löschtaktik

14. VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

Dezember 1996

Inhaltsverzeichnis:

1.	Kreislaufwirtschaft statt Abfallbeseitigung	4
2.	Zusammensetzung von Abfällen	4
3.	Brände im Abfall	8
3.1	Brandentstehungsursachen.....	8
3.1.1	Selbstentzündung.....	8
3.1.2	Zündung durch Sprayflaschen.....	9
3.1.3	Zündung durch äußere Zündquellen	10
3.2	Brandentwicklung und -ausbreitung	11
3.3	Brandentwicklung unter Berücksichtigung der Geometrie der Brandstoffe.....	12
4.	Brandschutz bei Recycling- und Entsorgungsprozessen.....	13
4.1	Eingangslagerung von Abfall und Zwischenlagerung für Restmüll.....	13
4.2	Sortieranlagen	13
4.3	Zwischenlager für sortierte Wertstoffe.....	14
4.3.1	Vorgaben für die Lagerung von Kunststoffen.....	14
4.3.2	Verhältnisse in Sekundärstofflagern	16
4.4	Altreifenlager	18
4.4.1	Allgemeine Aussagen zur Lagerung	18
4.4.2	Altreifen als Brandstoff	19
5.	Brandbekämpfung in Sekundärstoff- und Altreifenlagern	20
5.1	Sekundärstofflager	20
5.2	Brandbekämpfung in Altreifenlagern	24
5.3	Bedingungen für die optimale Brandbekämpfung.....	25
5.3.1	Stationäre Anlagen	25
5.3.2	Mobile Brandbekämpfung.....	26
5.4.	Gefahrenschwerpunkte bei der Brandbekämpfung	27
5.4.1	Energieflußdichte.....	27
5.4.2	Schadstoffe	28
6.	Versuche mit Recyclingmaterialien.....	32
7.	Auswertung großer Brände.....	34
8.	Schlußfolgerungen für die Weiterführung der Arbeiten	36
9.	Literaturverzeichnis.....	37

1. Kreislaufwirtschaft statt Abfallbeseitigung

Die Entwicklung aller Bereiche der Gesellschaft hat in den letzten 50 Jahren zu einem erhöhten Aufkommen an Abfall geführt, dem keine ausreichende Entsorgungskapazität gegenüberstand. Um dieser Entwicklung entscheidend und vor allem langfristig gegenüberzutreten, wurde die Produktverantwortung neu geregelt und das Abfallgesetz im Sinne eines Stoffflußgesetzes zur Förderung einer umweltverträglichen Kreislaufwirtschaft weiterentwickelt.

Die Produktverantwortung beginnt bei der Produktentwicklung mit dem Einsatz wiederverwertbarer Rohstoffe. In der Produktion sind Abfälle mehr als bisher zu vermeiden und die Roh- und Hilfsstoffe weitgehend im Wirtschaftskreislauf zu halten. Beim Verbrauch sind vor allem Verpackungen zu minimieren, die entstehenden Abfälle zurückzuführen bzw. durch neue Produktionslinien aufzubereiten.

Die Abfallwirtschaft wurde aus der bisherigen Aufgabe der Entsorgung aller Abfälle herausgeführt. Es wurden Voraussetzungen für die weitgehende Rückführung von Abfällen in den Wirtschaftskreislauf vorbereitet [1]. Mit der Ablösung des bisherigen Abfallwirtschaftsgesetzes (AbfG) durch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 7.10.1996 wird der grundsätzliche Wandel gesetzlich sanktioniert. Die Produzenten werden stärker in die Verantwortung einbezogen und die in der Vergangenheit grundsätzlich öffentlich rechtliche Entsorgungsverpflichtung wird zurückgenommen.

Im Bereich der Vermeidung und Verwertung von Abfällen wird durch das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz nichts unmittelbar geregelt. Es werden vielmehr Wege für Rechtsverordnungen geebnet, die einzelne Teilbereiche verbindlich regeln.

Der erste und wesentlichste Schritt für den Eintritt in die Kreislaufwirtschaft wurde mit der Verpackungsverordnung vom 12.06.1991 [2] gelegt. Damit wurde die Erfassung und Verwertung von Verpackungsmaterial und die Festlegung von Sammelquoten bundesweit möglich. Die Sammelquote beträgt seit Juli 1995 für alle Verpackungsmaterialien einheitlich 80 %. Davon müssen 80 bis 90 % sortiert und der Wiederverwendung zugeführt werden. Als Verpackungsmaterial werden erfaßt, gesammelt und sortiert:

- Gläser
- Dosen aus Aluminium und Weißblech
- Verpackungen aus Papier, Pappe und Karton
- Kunststoffe
- Verbundmaterialien

Neben diesem der Verpackungsverordnung unterliegenden Abfall, gibt es eine Reihe weiterer Abfallarten, die ebenfalls einer Wiederverwertung zugeführt werden müssen. Dazu gehören z. B. aus dem Bereich der Produktionsabfälle der Elektronikschrott oder die Altreifen und im Bereich des Hausmülls die Bioabfälle, sowie die Sonderabfälle aus allen Bereichen.

2. Zusammensetzung von Abfällen

Die Zusammensetzung von Abfällen ist weitgehend heterogen und kann deshalb nur schwer zusammenfassend beurteilt werden. Unter dem Blickwinkel der Kreislaufwirtschaft lassen sich wichtige Stoffgruppen zusammenfassen, die als Wertstoffe zurückgeführt bzw. weiter verarbeitet werden. Die prozentualen Angaben sind grundsätzlich auf die im Abfall enthaltene Trockensubstanz bezogen.

Da Aufkommen und Zusammensetzung der Wertstoffe in den verschiedenen Bereichen der Wirtschaft und im Wohnbereich unterschiedlich sind, werden in der Bundesrepublik Deutschland drei wesentliche Arten von Müll unterschieden:

- Geschäftsmüll
- Gewerbemüll
- Hausmüll

Tabelle 2.1 gibt die prozentualen Anteile der wichtigsten Bestandteile der Müllarten wieder. Spalte 5 enthält die mittleren Massen an Wertstoffen je Einwohner und Jahr bei einem Hausmüllanfall von 350 kg.

Tabelle 2.1: Zusammensetzung unterschiedlicher Müllarten und Anteil der Wertstoffe je Einwohner und Jahr [3]

Wertstoff	Geschäftsmüll Wertstoffanteil in %	Gewerbemüll Wertstoffanteil in %	Hausmüll Wertstoffanteil in %	Wertstoffpotential je Einwohner in kg/a
Papier / Pappe	40	20	28	56
Glas	2	2		32,5
Kunststoff / Textil	2	10	2,5	18,9
Metalle	6	9	6,5	28,7
Holz / Leder / Gummi	15	15	3	
Mineralien	5	32	41	
Vegetabiler Rest	20	12	15	

Unter der Voraussetzung der Zusammenfassung der Abfallstoffe in Gruppen, bestehen auch für andere Staaten Aussagen zur Zusammensetzung. In Tabelle 2.2 sind Beispiele dargestellt.

Tabelle 2.2: Zusammensetzung von Abfällen in ausgewählten Staaten

Staat	Wertstoffe in Gew.-%				
	Glas	Metall	Papier	org. Stoffe	Mineralien
Belgien	3	2,5	20,5	23	48
Frankreich	3,9	4,2	29,6	24	24,3
Niederlande	4,9	4,8	45	14	9,1
BRD	9,8	5,1	18,7	21,1	30
Spanien	4	3	21	45	22
Großbrit.	7,5	7,5	27,5	12,5	35
Österreich	11,1	8,4	27,1	38,2	0

Daraus ergibt sich für trockenen Abfall ein Verhältnis von nichtbrennbaren zu brennbaren Anteilen von 1,23 bis 0,3. In der Mehrzahl der Länder überwiegt damit der brennbare Anteil im Müll.

In Deutschland wurde mit der Realisierung der Verpackungsmittelverordnung eine weitere Linie für die Verwertung ausgewählter Abfälle aufgebaut. Dazu wurde die GmbH Duales System Deutschland (DSD) gegründet, die von mehr als 600 Gesellschaften getragen wird und die für diese Gesellschaften die Aufgaben der Verwertung des Verpackungsabfalles übernimmt.

Im Rahmen des Dualen Systems werden die unter die Verpackungsmittelverordnung fallenden Verpackungen erfaßt, gesammelt, sortiert und aufbereitet. Die gesammelten Verpackungsmaterialien haben die in Tabelle 2.3 dargestellte mittlere Zusammensetzung.

Tabelle 2.3: Mittlere Zusammensetzung von Verpackungsmittelabfällen des Dualen Systems in den Jahren 1991 /1992 [4]

Wertstoff	Zusammensetzung in Gew.-%		
	Nov. 91	März 92	Juni 92
Fe-Dosen	26,8	24,1	22,8
Aluminium	3,7	2,6	3,6
Metalle gesamt	30,5	26,7	26,4
Folien	15,4	14,5	12,8
Hohlkörper	10,1	4,9	5,3
Becher/Bliester	12,1	7,3	8,4
Verbund	7,9	7,4	7
Styropor	1,4	1,9	1,7
Kunststoffe gesamt	46,9	36,0	35,2
Sonstiges	22,7	37,9	37

Der sonstige Anteil (Sortierreste) enthält nach Tabelle 2.4 folgende Substanzen

Tabelle 2.4: Zusammensetzung der Sortierreste

Stoff	Anteil in %
Glas	2,0
Papier	21,0
Nicht-Verpackungs-kunststoff	16,0
Unrat	19,0
Metalle	6,0
Kunststoffe	38,0

Die Sortierreste sind mit 35 bis 40 % mengenmäßig fast konstant und werden nach 3 Kategorien unterteilt:

- Reste mit erhöhtem Verschmutzungsgrad und hoher Belastung an organischem Material
- Reste, bei denen keine Zuweisung zu den Stoffgruppen möglich ist
- Stoffe, deren Partikelgröße unterhalb von 70 mm liegt und eine Handsortierung nicht mehr möglich ist

Der organische Anteil liegt mit etwa 75 % sehr hoch.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, daß zunächst etwa 60 % der Trockensubstanz der wichtigsten Abfälle aus organischem Material besteht. Als wesentliche organische Bestandteile sind

- Papier, Pappe und Kartons,
- Holz und Holzabfälle, zellulosehaltige Frischabfälle, Haare, Leder und
- Kunststoffe

zu nennen.

Eine weitere Abfallstrecke im Rahmen des Recyclingprozesses ist die Aufarbeitung von Altreifen. Das Aufkommen an Altreifen betrug 1990 $45 \cdot 10^5$ t. Die Prognose für das Jahr 2000 liegt bei ca. $80 \cdot 10^5$ t [5]. Die Entsorgung von Altreifen erfolgt durch Zerkleinerung in Kalt- und Warmmahlverfahren. Das entstehende Gummimehl wird für den Straßenbau und Spiel- und Sportplatzbau wiederverwendet. Etwa 30% der Altreifen werden in Zement- und Ziegelwerken thermisch verwertet. Ein Anteil von ca. 20 % wird durch Runderneuerung wieder genutzt. Versuche zur industriellen Pyrolyse von Altreifen wurden durchgeführt. Tabelle 2.5 zeigt die Entsorgungsstruktur von Altreifen [5].

Tabelle 2.5: Entsorgungsstruktur von Altreifen

Altreifenverbleib	Menge in 10 ³ t/a	Anteil in %
thermische Verwertung: - Zementherstellung - Runderneuerung	170 157 13	37
stoffliche Verwertung: - Runderneuerung - mech. Zerkleinerung	100 90 10	22
Export	49	11
nicht verwertbare Altreifen: - Ablagerung auf öffentlichen Deponien - Ablagerung auf unternehmenseigenen Deponien - Altreifen im Shredder - Unbekannter Verbleib (Fehlmengen)	136 50 61	30
Gesamt	455	100

Damit müssen gegenwärtig noch etwa 41 % der Altreifen anderweitig entsorgt werden. Eine chemische Analyse von Reifen zeigt die in Tabelle 2.6 zusammengefaßte mittlere Zusammensetzung [5].

Tabelle 2.6: Mittlere Zusammensetzung von Altreifen

Element	Gehalt in %
Kohlenstoff	88,3
Wasserstoff	7,3
Schwefel	2,1
Zink	1,6
Heizwert	29,3...33,5 MJ/kg

3. Brände im Abfall

3.1 Brandentstehungsursachen

3.1.1 Selbstentzündung

Im Abfall können unterschiedlichste Materialien durch Selbstentzündung für Brände verantwortlich sein. Für die Mehrzahl aller Selbstentzündungsreaktionen im Abfall sind im wesentlichen zwei Reaktionsmechanismen verantwortlich:

- die biologische Selbstentzündung von Zelluloseprodukten
- die Selbstentzündung ungesättigter Verbindungen, insbesondere Fettsäuren (in fetten Ölen) in Verbindung mit nicht schmelzbaren Stoffen als Trägermatrix

Für den bakteriellen Abbau ist vor allem ein hoher Feuchtigkeitsgehalt des Abfalles von Bedeutung, der eine aerobe oder anaerobe Zersetzung des Biomaterials ermöglicht.

Der bakterielle Abbau von Zellulosematerialien ist mit einer Wärmeproduktion gekoppelt, die zu einer Temperaturerhöhung bis maximal 100 °C führen kann. Die entstehenden Zersetzungsprodukte besitzen meist große innere Oberflächen und können an diesen Gase und Dämpfe einschließlich Sauerstoff adsorbieren [6]. Die Adsorptionsreaktion verläuft ebenfalls exotherm, so daß eine Steigerung der Temperatur bis etwa 150 °C möglich wird. Bei diesen Temperaturen ist mit nachfolgenden Oxidationsprozessen an den Oberflächen zu rechnen, so daß die Reaktion bis zum Glimmbrand und offenen Flammenbrand verlaufen kann. Ein hoher Feuchtigkeitsgehalt wirkt nur in der anfänglich biologischen Aufheizphase und in der Adsorptionsphase positiv. Bei höheren Temperaturen kann ein großer Feuchtigkeitsgehalt für den Abbruch der exothermen Aufheizung sorgen. Da diese Reaktion eine zeitliche und von örtlichen Bedingungen des Wärmeüberganges charakterisierte Abhängigkeit zeigt, ist nur in großen Schüttungen bei längeren Ruheperioden mit derartigen Prozessen zu rechnen [7]. Das betrifft vor allem die Ablagerung auf Deponien und die Lagerung in sehr großen Anlieferungsbunkern mit geringen Verarbeitungsraten.

Die Selbstentzündung ungesättigter Verbindungen, insbesondere Fettsäuren fester Öle, erfordert eine ausreichende Oberfläche für das reaktionsfähige Öl. Diese Voraussetzung ist gegeben, wenn das Öl von einem nichtschmelzbaren festen Stoff mit großer Oberfläche (Papier, Holzspäne, Putzwolle, Mineralwolle) aufgenommen wurde und das Material einerseits mit ausreichend Sauerstoff zur Oxidation der Doppelbindungen versorgt wird und andererseits die entstehende Reaktionswärme sehr langsam abgeführt wird, so daß ein Wärmestau entstehen kann, der schließlich zur Zündung des Materials führt [8]. Im Inneren der Abfallstapel muß dann ausreichend glutbildendes Material vorhanden sein, das in der Lage ist, mit der vorhandenen geringen Sauerstoffzufuhr die Oxidation als Glimmbrand zu erhalten. Glimmende Materialien vermögen an der Phasengrenzfläche den gesamten zur Verfügung stehenden Sauerstoff zu binden. Aus diesem Grund werden in Glimmbrandherden nur geringe Sauerstoffkonzentrationen < 2 % gefunden [9]. Erst bei genügender Sauerstoffzuführung, z. B. wenn ein Glimmbrand die Oberfläche einer Schüttung erreicht, geht er in einen offenen Flammenbrand über.

Kunststoffe sind nur unter spezifischen Bedingungen in der Lage, eine Wärmeproduktion, die bis zur Zündung der Kunststoffe führt, zu gewährleisten. Dazu müssen im Kunststoffmolekül reaktionsfähige Zentren vorhanden sein, die unter den gegebenen Bedingungen weiterreagieren. Solche Zentren sind noch vorhandene Doppelbindungen, reaktionsfähige und vernetzbare Gruppen. Die Wärmeproduktion allein kann aber nicht zur Zündung des Materials führen, weil in der Mehrzahl der Fälle der Kunststoff schmilzt und sich zersetzt. Die Zersetzungstemperatur liegt unter der Zündtemperatur der Zersetzungsprodukte. Damit führt die Reaktion nicht bis zur Zündung sondern nur bis zur Bildung brennbarer und zündfähiger Gase. Erst die Bildung von nichtschmelzbaren Strukturen durch Vernetzung der Moleküle schafft glimmfähiges Material. Die Reaktion von Kunststoffen bis zur Bildung hei-

ßer Oberflächen mit Temperaturen $>450\text{ °C}$, die für die Zündung gasförmiger Zersetzungsprodukte erforderlich sind, durch Vernetzung und die Ausbildung glimmfähiger Strukturen ist bei Abfallkunststoffen nicht wahrscheinlich.

Darüber hinaus werden durch die Schmelzen von Kunststoffen hydrophobe Oberflächen reaktionsfähiger Materialien belegt. Es bildet sich eine flüssige Schicht im Bereich der Phasengrenze Feststoff / Gasraum. Durch diese Schicht wird die Reaktion zwischen Sauerstoff und den reaktionsfähigen Zentren an den Oberflächen des festen Stoffes unterbunden.

Aus diesen Gründen kann die Möglichkeit der Selbstentzündung durch Kunststoffe nahezu ausgeschlossen werden.

3.1.2 Zündung durch Sprayflaschen

Einen nicht zu unterschätzenden Anteil des Verpackungsmülls machen Sprayflaschen unterschiedlichster Art aus. Gebrauchte Sprayflaschen enthalten meist nur noch ein Minimum ihres ursprünglichen Inhaltes. Trotzdem herrscht in den Sprayflaschen meist noch ein durch Restanteile des Treibgases hervorgerufener Überdruck. Die heute verwendeten Treibgase sind fast alle brennbar und bestehen vorzugsweise aus C_4 -Kohlenwasserstoffen, da die nichtbrennbaren Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) aus umweltrelevanten Gründen nicht mehr eingesetzt werden.

Bei mechanischer Belastung der Sprayflaschen durch die in Müllbunkern im Umschlagsprozeß eingesetzten Radlader oder durch die Ballenpressen nach der Sortierung kommt es zu einer Kompression des noch vorhandenen Flascheninhaltes mit nachfolgender Zerstörung des Druckbehälters und Freisetzung des Treibgases. Die Kompression und die damit verbundene Kondensation des Treibgases liefert erhebliche Energie. Diese Energie könnte eine Zündquelle für Müllbunkerbrände sein. In der Literatur wird diesem Phänomen bisher keine Beachtung geschenkt. Es wurde aber im praktischen Betrieb von Müllverarbeitungsunternehmen mehrmals beobachtet, daß in Müllbunkern schlagartig Brände entstanden sind. In diesen Fällen wurden stets auch von den Rädern eines Radladers zerquetschte Sprayflaschen gefunden [10].

Die Zündung des austretenden Gases kann aber auch durch eine heiße Fläche im Bereich eines Radladers bzw. einer Ballenpresse erfolgen. Als heiße Flächen könnten die Ölwan- nen und die Auspuffanlagen der Radlader in Frage kommen. Bei den Ballenpressen könnten elektrische Zündquellen auftreten.

Eine weitere Gefahr besteht darin, daß während des Preßvorgangs der Sprayflaschen die noch vorhandenen Treibgase freigesetzt werden und diese sich unter ungünstigen Verhältnissen innerhalb der Ballen sammeln können. Die Lagerung dieser Ballen, insbesondere unmittelbar nach dem Preßvorgang, könnte beim Vorhandensein von Zündquellen zu schneller Brandausbreitung bzw. sogar zu Verpuffungen führen.

Es muß aber darauf verwiesen werden, daß gegenwärtig keine exakten Untersuchungsergebnisse vorliegen, die Gefahren von Sprayflaschen als Zündquellen bzw. als Lieferanten zündfähiger Gemische beweisen. Die möglichen Gefahren durch Sprayflaschen sollten in weiteren Untersuchungen analysiert und Maßnahmen zu ihrer Verhinderung abgeleitet werden.

3.1.3 Zündung durch äußere Zündquellen

Zellulosehaltige Materialien und Naturprodukte in Abfällen lassen sich bereits mit Zündquellen geringer Energie zünden. Die Zündtemperatur liegt je nach Aufbereitung der Zellulose oder des Naturproduktes zwischen 250 und 450 °C. In Tabelle 3.1.3.1 sind Zündtemperaturen wichtiger Stoffe zusammengefaßt.

Tabelle 3.1.3.1: Zündtemperaturen von Zellulose- und Naturprodukten [11]

Stoff	Zündtemperatur in °C	Glimmtemperatur in °C
Papier	270 - 370	250
Wellpappe	427	258
Eichenholzspäne	342	229
Fichtenholzspäne	347	220
Kiefernholzspäne	306	230
Baumwolle	255 - 407	205
Heu	333	204
Filz	370	287
Wolle	570 - 600	

Die Zündtemperaturen von Zellulosematerialien und Naturprodukten werden durch Feuchtigkeit wesentlich erhöht. Produkte mit mehr als 30 % Feuchte sind praktisch nicht mehr zündfähig [12].

Kunststoffe besitzen ebenfalls Zündtemperaturen in vergleichbaren Temperaturbereichen. Im Gegensatz zu den Naturstoffen besteht aber nur bei einigen vernetzten Kunst-

stoffen und solchen mit hohen Anteilen von brennbaren Füllstoffen (Ruß, Fasern, Zellulose) die Möglichkeit der Ausbildung von Glimmbränden. Tabelle 3.1.3.2. zeigt die Zündtemperaturen wichtiger Kunststoffe.

Tabelle 3.1.3.2.: Zündtemperaturen von Kunststoffen

Im Gegensatz zu den Naturstoffen sind die meisten Kunststoffe hydrophob. Damit ist durch Feuchtigkeit keine Beeinflussung der Zündeigenschaften möglich.

Offene Flammen, heiße Flächen, Glut und elektrische Lichtbögen können alle im Abfall befindlichen brennbaren Materialien zünden.

Stoff	Zündtemperatur in °C
Polyethylen (Niederdruck)	349 - 417
Polyethylen (Hochdruck)	350 - 440
Polycyanuratschaum	417
Polypropylen	350 - 570
Polymethylmethacrylat	430 - 476
Polystyrol	484 - 500
Polystyrolschaum	350 - 491
Polyvinylchlorid (hart)	344
Polyvinylchlorid (weich)	441 - 455
Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat	454
Polyamid 6	425 - 444
Polyester	380 - 570
Polycarbonat	575
Butadien-Acrylnitril-Kautschuk	330
Butadien-Styrol-Kautschuk	330
Chloropren-Kautschuk	436

3.2 Brandentwicklung und -ausbreitung

Zellulosematerialien und Naturprodukte sind in der Lage, Glimmbrände und offene Flammenbrände auszubilden. Kunststoffprodukte bilden grundsätzlich offene Flammenbrände aus.

Glimmbrände bilden sich im Inneren von Schüttungen aus. Es ist dabei unerheblich, ob der Glimmbrand durch eine Selbstentzündung oder durch Eintragen von Glut, Asche, heißen Teilen oder anderen Zündquellen entstanden ist. Bei Glutbränden findet die Oxidationsreaktion an der festen Phase des brennbaren Stoffes statt. Der Sauerstoff für die Reaktion wird durch Diffusion und Strömung an den Glimmbrandherd herangeführt. Im Brandherd wird der Sauerstoff nahezu vollständig verbraucht. Der stoffliche Umsatz ist je nach Bedingungen des Glimmbrandes unterschiedlich. Von Hedermann [13] wurde in Laborversuchen bei Glimmbränden mit Zellulose ein minimaler Umsatz von $0,041 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}$ gefunden. Dieser Wert entspricht etwa $\frac{1}{25}$ der Abbrandrate eines Flammenbrandes von Zellulose.

Bei Glimmbränden mit einem Anteil von Kunststoffen in der Schüttung muß davon ausgegangen werden, daß die gebrauchten und chemisch ausreagierten Kunststoffe trotz ihres hohen Heizwertes für die Erhaltung von Glimmbränden im Inneren von Schüttungen keinen Beitrag liefern können. Die Zersetzungsprodukte der Kunststoffe sind gas- bzw. dampfförmige Verbindungen, deren Zündtemperatur oberhalb der Reaktionstemperatur des Glimmbrandes liegt. Weiterhin befindet sich die Konzentration des Sauerstoffes im Bereich des Glimmbrandes unterhalb der Zündgrenzen der Gemische. Da die Mehrzahl der normalen Zersetzungsreaktionen von Kunststoffen endotherm sind, wird dem Glimmbrand zusätzlich Energie entzogen.

Glimmbrände können in Schüttungen sehr große Ausmaße annehmen. In einer Deponie wurde ein Glimmbrand mit einer Ausdehnung von ca. 4 m Breite, 12 m Länge und 6 m Tiefe und damit ca. 290 m^3 Glimmbrandvolumen gefunden [14]. Die Temperaturen in den Zentren der Glimmbrände schwanken zwischen 250 und 390 °C. Die Lebensdauer eines Glimmbrandes kann sich aufgrund des geringen stofflichen Umsatzes je nach Ausgangsvolumen auf mehrere Tage bis zu Jahren erstrecken. Erreicht ein Glimmbrand die Nähe einer Oberfläche, so steigt der stoffliche Umsatz je nach Sauerstoffangebot an. Ein Glimmbrand an der Grenzfläche zwischen Schüttung und Luft wird schließlich in einen offenen Flammenbrand übergehen. Als gefährliche Reaktionsprodukte treten in den Abgasen von Glimmbränden vor allem Kohlenmonoxid und aromatische Kohlenwasserstoffe auf.

Nach dem Übergang eines Glimmbrandes in einen offenen Flammenbrand erreicht der stoffliche Umsatz (Abbrandrate) für feste Brandstoffe Werte zwischen 0,8 und $1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}$. Durch die bereits beschriebene Dochtwirkung der nichtschmelzbaren Anteile des Sekundärstoffes kommt es zu einer Steigerung der für Thermoplaste bekannten Abbrandraten auf Werte von 1,5 bis $2,5 \text{ kg/min} \cdot \text{m}^2$ [15]. Die mittlere lineare Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammen über die Oberfläche des brennbaren Materials liegt stoffabhängig zwischen 0,1 bis 0,5 m/min, bei Folien und Schaumstoffen oder geneigten Flächen können Werte bis 4 m/min erreicht werden [15].

Kunststoffe bilden bei Flammenbränden bis auf wenige Ausnahmen an ihren Oberflächen Schmelzen aus. Die Schmelztemperaturen liegen zwischen 120 und 300 °C. Aus der Schmelze werden durch Zersetzung flüchtige Gase und Dämpfe abgegeben, die in der Flamme verbrennen. Die Zersetzungstemperaturen liegen zwischen 300 und 500 °C [16]. Die niedrigsten Zersetzungstemperaturen der abgegebenen gas- oder dampfförmigen Stoffe liegen im Bereich der Zündtemperaturen mit Fremdzündung.

Die Schmelze kann tropfen und mit dem Tropfen eine Flammenzone mitführen, die als Zündquelle für weiteren noch nicht von den Flammen erfaßten Kunststoff fungieren kann. Vollentwickelte Kunststoffbrände besitzen eine geschlossene Schmelze an ihrer Oberfläche. Die Schmelze ist mit einer erhitzten brennbaren Flüssigkeit vergleichbar. Sie kann aber im Gegensatz zu flüssigen Stoffen durch Abschrecken leicht an der Oberfläche wieder verfestigt werden.

Bei Mischabfällen von Kunststoffen und Zellulosematerialien verbrennen im Brandfall zunächst vorrangig die schmelzenden Kunststoffe. Die Belegung der Oberflächen der un-schmelzbaren Zelluloseprodukte durch Anteile der Plastschmelze führt zu einer Vergröße- rung der Oberfläche der Schmelze und dadurch zur Steigerung der grundflächenbezoge- nen Verdampfungs- bzw. Zersetzungsraten. Die Dochtwirkung steigert die Abbrandrate derartiger Gemische und beeinflusst auch die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit [12]. Die zellulosehaltigen Brandstoffe bleiben bis zum Abbrand der geschmolzenen Stoffe im wesentlichen unzersetzt und verbrennen erst zu einem späteren Zeitpunkt der Brandent- wicklung.

3.3 Brandentwicklung unter Berücksichtigung der Geometrie der Brandstoffe

Die einfachsten Verhältnisse für die Verbrennung fester glutbildender oder fester schmel- zender Stoffe sind zu erwarten, wenn die Stoffe als Schüttgüter mit geringen Teilchengrö- ßen vorliegen. In diesem Fall wird die sich nach der Zündung ausbildende Flamme stets nur Teile der relativ gleichmäßigen Oberfläche durch Strahlung aufbereiten können. Es erfolgt eine gleichmäßige, von einem Punkt ausgehende Ausbreitung der Flammen über die Ober- fläche. Ein Eindringen des Flammenbrandes in die Schüttung ist nicht möglich.

Bei sehr losen Schüttungen oder Schüttungen großer Teile (z. B. gefüllte Müllbeutel) und einem Flammenbrand an der Oberfläche können tiefere Bereiche der Schüttungen von au- ßen durch den Brand erfaßt werden und als verdeckter Brand oder Glimmbrand weiter be- stehen.

Brände in Räumen oder Lagern besitzen infolge der Geometrie der einzelnen brennbaren Stoffe eine äußere und eine innere Struktur. Betrachtet man einen vollentwickelten Brand mit festen Brandstoffen, so ist zunächst festzustellen, daß die gesamte nach außen gerich- tete Grenzschicht der brennbaren Körper, d. h. die äußere Oberfläche der Körper als Ge- samtheit, den Flammen brennbare Gase und Dämpfe liefert und von den Flammen Strah- lungswärme auf die Oberfläche der brennbaren Stoffe zurückgeführt wird. Neben der äuße- ren Oberflächenschicht werden aber bei brennbaren Feststoffen auch innere Oberflächen zwischen einzelnen Körpern in Hohlräumen, vertikalen und horizontalen Kanälen von den Flammen erhitzt. Es bilden sich verdeckte Brände mit zusätzlichen Phasengrenzflächen aus, die ein eigenes, vom Oberflächenbrand unabhängiges, stabiles Brandregime besitzen.

Bei Kanälen muß bereits ab 2 cm Spaltbreite mit einer Brandentwicklung und damit Ausbil- dung verdeckter Brände gerechnet werden [27] [35]. Bei geschlossenen Hohlräumen ist zu erwarten, daß je nach Brandstoff eine entsprechende Zeit bis zum Durchbrand oder Ab- schmelzen der den Hohlraum verdeckenden Flächen erforderlich ist, bevor es zur Ausbil- dung eines verdeckten Brandes im Hohlraum kommt. Diese Zeit wird bestimmt durch den Tiefenabbrand der vorhandenen Brandstoffflächen. Für Holz wurden Abbrandtiefen von 0,7 bis 1 mm/h ermittelt [17]. Bei Kunststoffen liegen die Werte unter vergleichbaren Bedingun- gen infolge des Aufschmelzens des Brandstoffes bei 1-2 mm/min [18].

4. Brandschutz bei Recycling- und Entsorgungsprozessen

4.1 Eingangslagerung von Abfall und Zwischenlagerung für Restmüll

In den Eingangslagern wird der angelieferte und vorsortierte Abfall gelagert. Eingangslager enthalten somit unterschiedliche Brandstoffe, deren Anteil mehr als 50% ausmacht, und nichtbrennbare Stoffe. Der Abfall wird als lose Schüttung gelagert und kann wie ein poröser Körper betrachtet werden. Vergleichbare Aussagen sind auch für die Lager von Sortierresten (Restmüll) zu treffen, die mit etwa 35 % des gesamten Anlieferungsgutes einen erheblichen Anteil ausmachen. Aus der Sicht der Brandgefahren und der Brennbarkeit ergibt sich, daß

- Selbstentzündungsprozesse nur bedingt anlaufen können, weil die Wärmeableitung in losen Schüttungen hoch ist,
- durch Eintragen von glimmenden Materialien, glühenden Aschen oder durch Brandlegung sich Brände entwickeln können und die vorhandene Schüttgutoberfläche schnell durch den offenen Flammenbrand erfaßt wird,
- nach offenen Flammenbränden mit längeren Brandzeiten einzelne Brandnester als Glimmbrand im Inneren der Schüttung erhalten bleiben können und
- durch mechanische Belastung von Sprayflaschen (Radlader oder Fördergeräte) direkt, oder über eine nachfolgende Zündung der freiwerdenden Gase, Brände entstehen können.

Schwerpunkte der Überwachung sollten deshalb vor allem im Anlieferungsbereich des Mülls gesehen werden, um eine Zündung der Schüttung zu verhindern bzw. bereits im Anfangsstadium zu erkennen. Es sollten grundsätzlich keine Möglichkeiten der Brandentstehung durch offene Flammen, heiße Flächen, Glut oder andere Zündquellen im Bereich der Eingangslagerung bestehen. Dies bedeutet, eine generelle Verschlusssicherheit und eine Überwachung des Lagerbereiches nicht nur durch Brandmeldetechnik sondern auch durch Videoüberwachung zu realisieren. Allgemeine Brandschutzmaßnahmen wie Rauchverbot und Verbot des Umgangs mit offenem Feuer oder Licht sind einzuhalten. Ebenso sind bei notwendigen Wartungsmaßnahmen mögliche Zündquellen auszuschließen

Glimmbrände können auch entstehen, wenn glutbildende Stoffe den wesentlichen Anteil des Schüttgutes ausmachen und die Möglichkeit des Anlaufens von Selbstentzündungsprozessen besteht. Diese Brände sind nur durch entsprechende Meßtechnik zu erkennen und erfordern eine gesonderte Behandlung. Zur Detektion von Glimmbränden können Infrarotsichtgeräte, aktive Rauchgasmelder und auch die Überwachung der Kohlenmonoxidkonzentration in der Gasatmosphäre über der Schüttung dienen.

Eine Früherkennung von Rauchgasen im Raum bzw. heißen Zonen innerhalb der Schüttung, wie in Müllbunkern von Verbrennungsanlagen bereits angewendet, sollte auch hier angestrebt werden.

4.2 Sortieranlagen

Der Bereich der Sortieranlagen ist durch einen sehr hohen Aufwand an manueller Arbeit gekennzeichnet. Durch diesen vorzugsweise manuellen Sortiervorgang ist die Konzentration brennbarer Materialien auf dem Sortierband gering und deren Verteilung groß. Eine Zündung brennbarer Materialien würde sofort bemerkt werden und könnte noch als Entstehungsbrand mit geringem Aufwand durch übliche Handlöschgeräte bekämpft werden. Zum Zeitraum des Stillstandes der Sortieranlage (Schichtende, Wartungs- und Pflegearbeiten) sind Sortierbänder und -bunker geleert. Für die Einhaltung wesentlicher Maßnahmen der Sicherheit und des Brandschutzes enthält die VDS Richtlinie 2513 [25] grundsätzliche Hinweise.

4.3 Zwischenlager für sortierte Wertstoffe

4.3.1 Vorgaben für die Lagerung von Kunststoffen

Kunststoffe müssen aufgrund des hohen Aufkommens und noch nicht ausreichender Aufarbeitungskapazität in größerem Umfang zwischengelagert werden. Eine Reihe von Brandfällen in diesen Lagern (Lengerich 1992 [36]; Düsseldorf 1995 [37]; Porta Westfalica 1994 [32], Miesbach 1996 [38]) zwingt zu entsprechenden Regelungen für den Brandschutz.

Gegenwärtig werden vom VdS, dem Verband der Kunststoffhersteller, dem Arbeitskreis Recycling des Verbandes der Entsorgungswirtschaft und der ARGEBAU Entwürfe für Richtlinien zur Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoffen diskutiert.

In Tabelle 4.3.1.1 sind die wesentlichen Schwerpunkte der unterschiedlichen Entwürfe zusammengefaßt.

Tabelle 4.3.1.1: Schwerpunkte zum Brandschutz bei der Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoff in den verschiedenen Entwürfen [23],[24],[25],[26]

Schwerpunkt	Musterrichtlinie ARGEBAU	Richtlinie VKE 6/94	Richtlinie VDS 2513	Entwurf Entsorger
Geltungsbereich	> 100 t Lagergut als Mono- oder Mischfraktion, kompakt oder als Schüttgut, lose, in ortsfesten oder ortsbeweglichen Behältern, in Lagern oder im Freien	> 20 t Lagergut als Mono- und Mischfraktion, kompakt oder als Schüttgut, lose, in ortsfesten und ortsbeweglichen Behältern	> 200 m ³ Lagergut als Mono- oder Mischfraktion, kompakt oder als Schüttgut in ortsfesten oder ortsbeweglichen Behältern	alle Lager
Brandabschnitte - in Gebäuden	5000 m ² und >1600 m ² mit stat. LA < 1600 m ² und >800 m ² BMA	5000 m ² und > 2000 m ² mit stat. LA, RWA, BMA < 2000 m ² und >1600 m ² stat. LA und RWA <1600 m ² RWA	5000 m ² und >1600 m ² mit stat. LA < 1600 m ² RWA und BMA	5000 m ² und >1600 m ² stat. LA und BMA
Brandabschnitte - im Freien	2000 m ²	2-2000 m ² > 2000 m ² BMA	2-2000 m ² > 2000 m ² BMA	< 4000 m ² und >2000 m ² stat. LA und BMA
Lagerabschnitte - im Gebäude	300 m ² 5 m breite Freistreifen	300 m ² 5 m breite Freistreifen	300 m ² 5 m breite Freistreifen	200 bis 300 m ² 3 m breite Freistreifen
Lagerabschnitte - im Freien	400 m ² 5 m breite Freistreifen	400 m ² 5 m breite Freistreifen	300 m ² 5 m breite Freistreifen	200 bis 300 m ² 3 m breite Freistreifen
Lagerguthöhe	Schüttung 5 m Blocklagerung 4 m	Schüttung 5 m Blocklagerung 4 m	Schüttung 5 m Blocklagerung 4 m	Schüttung 5 m Blocklagerung 4 m

noch Tabelle 4.3.1.1

Schwerpunkt	Musterrichtlinie ARGEBAU	Richtlinie VKE 4/94	Richtlinie VDS 2513	Entwurf Entsorger
stationäre Löschanlagen	Sprinkler 12,5 mm/min	Sprinkler 12,5 mm/min	Schaumsprinkler 12,5 mm/min	Ballenlager: <ul style="list-style-type: none"> • Schaumsprinkler 12,5 mm/min auf 300 m² und 60 min (3750 l/min und 225 m³) • Sprühflutanlagen dto jedoch 200 bis 300 m² und 30 min (2500 - 3750 l/min und 75 - 112 m³) Schüttgutlager: <ul style="list-style-type: none"> • Sprinkler- und Sprühflutanlagen 12,5 mm/min auf 200 - 300 m² und 30 min
Löschwasser-versorgung	1600 l/min für 2 h (192 m ³)	je 100 m ² des größten Brandabschnittes mind. 200 l/min bei 3 bar Mindestmenge 1600 l/min über 2 h	je 100 m ² des größten Brandabschnittes mind. 200 l/min bei 3 bar. Mindestmenge von 1600 l/min über 2 h > 1600 m ² Brandabschnittsfläche mind. 3200 l/min bzw. Löschwasserreservoir von 400 m ³ .	-
Feuerweh-zufahrt	ja, in Abstimmung mit der Brandschutzdienststelle	ja, in Abstimmung mit der Brandschutzdienststelle, Flächen > 3000 m ² Feuerwehrumfahrt	ja, in Abstimmung mit der Brandschutzdienststelle	ja, in Abstimmung mit der Brandschutzdienststelle

LA = Löschanlage, BMA = Brandmeldeanlage, RWA = Anlage für Rauch- und Wärmeabzug

Der Geltungsbereich der Entwürfe ist ausgelegt für alle Formen der angelieferten, zu verarbeitenden, sortierten und gelagerten Sekundärstoffe. Eine Begrenzung wird über die Masse der Sekundärstoffe vorgenommen. Dabei wurden als untere Grenze eine Masse von 20 t und als obere Grenze ein Volumen von 200 m³ bzw. 100 t festgelegt, wenn eine Schüttdichte von ca. 0,5 t/m³ angesetzt wird.

Grundsätzlich enthalten die Entwürfe die Forderung, daß in Lagern von Sekundärstoffen Brandabschnitte und innerhalb derer entsprechende Lagerabschnitte zu bilden sind. Die obere Begrenzung der Brandabschnitte für Lager in Gebäuden liegt bei 5000 m², für Lager im Freien bei 2 · 2000 m². Innerhalb der Brandabschnitte werden Lagerabschnitte mit 300 bis 400 m² Grundfläche gefordert. Der Freistreifen zwischen den einzelnen Lagerabschnitten soll eine Breite von 3 bzw. 5 m haben.

Für gesprinklerte Brandabschnitte bzw. Brandabschnitte mit Sprühflutanlagen geht man grundsätzlich von einer Anwendungsrate von 12,5 l/min·m² aus, wobei die Wirkflächen zwischen 250 und 350 m² liegen. Damit ergeben sich für die Wasserversorgung der Sprinkleranlage insgesamt Mengen von 375 m³ bis 525 m³. Abweichend davon sieht der Entwurf der Entsorger für die Sprinklerung nur Wassermengen von 75 m³ bis 225 m³ vor.

Die Festlegungen bezüglich der Löschwasserversorgung für die mobile Brandbekämpfung beginnen bei 1600 l/min und reichen bis 3200 l/min. Die Volumenströme an Löschwasser sollen 30 min bis 120 min zur Verfügung stehen, so daß sich Gesamtwassermengen von 192 bis 400 m³ für die Brandbekämpfung in Lagern für Sekundärstoffe ergeben.

Zusätzlich fordern alle Entwürfe entsprechende Feuerwehrezufahrten sowie Flächen für die Feuerwehr.

4.3.2 Verhältnisse in Sekundärstofflagern

Die Schüttgutlagerung wird in den Sortieranlagen des DSD fast ausnahmslos im Bereich der Mischfraktionen angetroffen. Das sind vor allem der Anlieferungsbereich der Sekundärstoffe und der Bereich des nicht verwertbaren Abfalles. Die Schüttgutlager besitzen im Anlieferungsbereich meist größere Öffnungen für die Zuführung der Sekundärstoffe. Desweiteren führt aus dem Schüttgutlager eine mechanische Transporteinrichtung zur Sortierung der Sekundärstoffe. Im Bereich des Schüttgutlagers können Radlader, andere Fördergeräte und mechanische Fördereinrichtungen den Durchgang des Schüttgutes durch das Lager bewirken.

Das Schüttgut besitzt eine relativ geschlossene Oberfläche, die durch ein oder mehrere Schüttkegel gekennzeichnet ist. Größere Hohlräume sind aber vorhanden. Es kann davon ausgegangen werden, daß innerhalb der Schüttung eine ausreichende Menge an Luft vorhanden ist, welche für die Unterhaltung von verdeckten Bränden sorgen kann.

Berechnet man die Wärmestromdichte des Brandes nach der Gleichung

$$\dot{\Psi} = r \cdot \Delta H_H \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \dot{\Psi} \quad \text{Wärmestromdichte des Brandes in kJ/m}^2 \cdot \text{s bzw. kW/m}^2 \\ r \quad \text{Abbrandrate des Brandstoffes in kg/m}^2 \cdot \text{s} \\ \Delta H_H \quad \text{Heizwert des Brandstoffes in kJ/kg,} \end{array}$$

erreicht man unter Zugrundelegung eines mittleren Heizwertes von 35 000 kJ/kg für den Plastanteil im Sekundärstoff Wärmestromdichten von 875 bis 1460 kW/m².

Multipliziert man die Wärmestromdichte mit der Brandfläche, so erhält man die Leistung des Brandes:

$$\Psi_{\text{Brd}} = \dot{\Psi} \cdot A_{\text{Brd}} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \Psi_{\text{Brd}} \quad \text{Leistung des Brandes in kW bzw. MW} \\ A_{\text{Brd}} \quad \text{Brandfläche in m}^2 \end{array}$$

Eine Brandleistung von 10 MW erreichen bei Schüttgutlagern von Sekundärstoffen bereits Brandflächen von 7 bis 10 m².

Die brennende Fläche wird charakterisiert durch geschmolzene Plastanteile, die sich auf den Oberflächen nichtschmelzbarer Stoffe verteilen, so daß sich die gesteigerten Abbrandraten einstellen können. Durch die Bedeckung mit Plastschmelze können sich an der Oberfläche des Brandstoffes und im brennbaren Material keine Glutzonen ausbilden, so daß die Verbrennung ausschließlich in der Gasphase stattfindet. Erst zu einem späten Zeitpunkt, nachdem der Hauptanteil der schmelzbaren Plaststoffe verbrannt ist, besteht die Möglichkeit der Bildung von Glut im Brandstoff.

Die im Inneren der Schüttung vorhandene Luft kann zur Entstehung von verdeckten Bränden führen, die vom Löschwasser nicht oder nur schwer erreicht werden können. Die verdeckten Brände bilden bevorzugte Luftströmungen im Inneren der Schüttung aus, so daß sie auch als Flammenbrand über längere Zeiträume existent sein können. Derartige verdeckte Brände sind nur durch mechanische Beseitigung der überdeckenden Materialien zu beherrschen. Unbekannt ist gegenwärtig, ob die in der Schüttung vorhandene Luft beim Abtropfen von brennender Schmelze verdeckte Brände unterhält, oder ob zwangsläufig ein Glutbrand entsteht.

Die Ballenlagerung ist für sortierte Sekundärstoffe typisch. Nach dem Sortiervorgang werden die sortenreinen Sekundärstoffe in Ballenpressen verdichtet. In der Regel werden Ballen von etwa 1 bis 1,5 m³ Volumen gepreßt. Die Dichte der gepreßten Ballen liegt bei ca. 0,6 t/m³. Bei Kunststoffabfällen erreicht die Ballendichte etwa 75 % der Dichte des kompakten Kunststoffes. Innerhalb der Brandabschnitte erfolgt der Transport der Kunststoffballen mit Gabelstaplern, die mit hydraulischen Armen die Ballen von zwei Seiten erfassen. Damit ist der Umschlag auch ohne Paletten möglich. Die Ballen werden entsprechend der innerhalb der Brandabschnitte gebildeten Lagerabschnitte auf Flächen von 300 bis 400 m² bis zu einer Höhe von 4 m übereinander gestapelt. Infolge der vorherrschenden Technologie der Stapelung muß zumindest seitlich neben jeder Ballenreihe ein Zwischenraum von etwa 10 bis 20 cm verbleiben, da die hydraulischen Arme des Staplers nach Absetzen der Last seitlich gelöst werden müssen. Rechnet man mit einem Abstand von 0,1 m zwischen jedem Einzelstapel von 4 m Höhe, so enthält eine Lagerfläche von 400 m² etwa 1300 Ballen mit einer Kunststoffmasse von ca. 780 t und eine Lagerfläche von 300 m² etwa 1025 Ballen mit einer Kunststoffmasse von ca. 600 t. Diese Brandstoffmengen entsprechen einer Energiedichte von etwa 70 GW/m² und unter Berücksichtigung des Abbrandfaktors nach DIN 18320 von ca. 0,8 einer Brandlast von 55 GW/m².

Die gepreßten Ballen besitzen keine geschlossenen Außenflächen. Je nach Sortiergut befinden sich eine Vielzahl einzelner Plastkanten mit Schichtdicken bis ca. 1mm im Bereich der Außenflächen. Diese Kanten sind leicht zündbar und brennen nach Entfernung der Zündquelle selbständig weiter. Damit ist sowohl an der äußeren Oberfläche als auch im Inneren des Lagerstapels eine Zündung durch offene Flammen, heiße Flächen oder Funken möglich.

Nach der Zündung wird sich die Flamme je nach Zündort senkrecht nach oben oder über die Oberfläche des Lagerstapels ausbreiten. Die Flammenausbreitung senkrecht nach oben erreicht etwa den 2- bis 3-fachen Wert der Flammenausbreitung auf waagerechten Flächen. Damit kann angenommen werden, daß die Flammen eines am Ballenfuß gezündeten Stapels bereits nach etwa 0,5 bis 1 min dessen Oberkante erreichen und sich dann auf der Oberfläche mit den bekannten Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten ausbreiten.

Im Gegensatz zu den Lagerbereichen mit Schüttgütern bilden sich in Ballenlagern neben dem normalen Oberflächenbrand des Lagerstapels in den Bereichen der Einzelstapel zusätzlich verdeckte Brände aus, welche die inneren Oberflächen des Brandobjektes mit meist senkrechten Brandflächen erfassen. Als äußere Oberfläche eines Lagerstapels von 400 m² können maximal die Außenseiten mit insgesamt 720 m² in Erscheinung treten. Dagegen wird die innere Oberfläche durch die Summe der Seitenflächen jedes Einzelstapels gebildet. Bei rund 325 Einzelstapel ergibt sich maximal eine innere Brandfläche von ca. 5000 m². Die inneren Brände sind beim Vollbrand in dem nach außen sichtbaren Oberflächenbrand integriert. Durch die sich einstellenden Strömungsbedingungen begünstigt die Luftführung in den Kaminen den verdeckten Brand. Der Abbrand wird gesteigert und die Flammentemperatur in diesen Bereichen liegt höher. Die verdeckten Brände sind nach dem Ablöschen der Oberflächen des Lagerstapels Ursache für die sofortige Rückzündung. Die Abbildungen 4.3.2.1 und 4.3.2.2. zeigen die Verhältnisse am Beispiel eines verdeckten Brandes mit Blockbodenbeutel und Kleinladungsträgern [27].

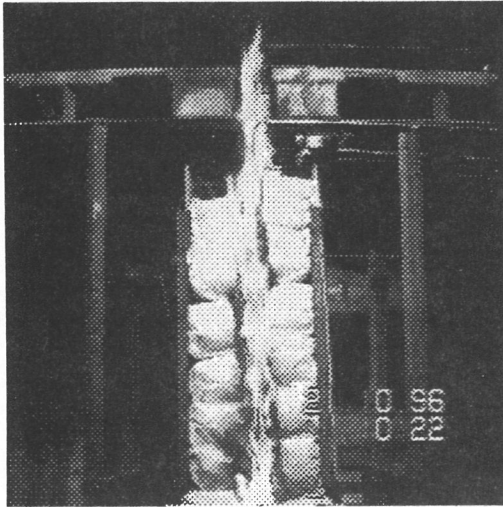


Abbildung 4.2.3.1:
Verdeckter Brand in einem Kanal
von Paletten mit Blockbodenbeuteln

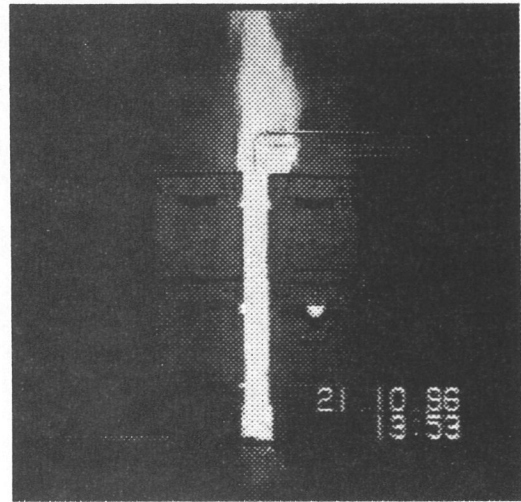


Abbildung 4.2.3.2:
Verdeckter Brand in einem Kanal
von Paletten mit Kleinladungsträgern

4.4 Altreifenlager

4.4.1 Allgemeine Aussagen zur Lagerung

Altreifen werden mittlerweile in verschiedenster Form verwertet. Damit besteht die Notwendigkeit, sie in größeren Mengen zu lagern. Potentielle Verwerter von Altreifen sind

- die Reifenindustrie durch Runderneuerung von Altreifen,
- die Zementindustrie durch Einsatz von Altreifen als Energielieferanten,
- die Ziegelindustrie durch Energienutzung und Einsatz als Zusatzstoff zur Porenbildung im Ziegel und
- der Straßenbau durch Einsatz als Zuschlagstoff zur Verbesserung der Haftfähigkeit des Straßenbelages.

Trotz des erkennbaren Bedarfs von Altreifen besteht ein erhebliches Überangebot an Altreifen. Ein relativ geringer Anteil wird in Deponien bzw. Zwischenlagern verwahrt. Der übrige Anteil von nahezu 100 000 t wird auf unterschiedlichsten Wegen entsorgt bzw. in Klein- oder Kleinstmengen gelagert.

Altreifenlager sind fast ausschließlich Freilager. Die Lagerflächen erreichen erhebliche Ausmaße. Brandabschnitte von 1500 m² bis 5000 m² sind nicht ungewöhnlich, wobei die erforderlichen Lagerabschnitte fehlen können. Die Lagerhöhen gestapelter Altreifen reichen von 3 bis 5 m.

Die Durchmesser von Reifen unterscheiden sich je nach Verwendungszweck. Pkw-Reifen besitzen Felgendurchmesser bis 0,35 m (Reifendurchmesser ca 0,5 m), während Lkw-Reifen Felgendurchmesser > 0,5 m (Reifendurchmesser ca. 1,0 m) besitzen. Die Breite der Reifen variiert bei Pkw zwischen 0,15 und 0,25 m und bei Lkw zwischen 0,2 und 0,4 m. In Tabelle 4.3.3.1.1 werden durchschnittliche Massen für Altreifen unterschiedlicher Verwendung zusammengestellt.

Tabelle 4.3.3.1.1: Durchschnittliche Altreifengewichte nach Hartung [5]

Bereifung	durchschnittliches Altreifengewicht in kg
Personenkraftwagen	7,0
Lastkraftwagen und Busse	
- Felgendurchmesser bis 19,5"	12,0
- Felgendurchmesser > 19,5"	56,0
Krafträder	2,5
Ackerschlepper und sonst.	36,0
Zugmaschinen	
Erdbewegungsmaschinen	140,0

Rechnet man mit den angegebenen Abmessungen für Pkw- und Lkw-Altreifen, so können je m² durchschnittlich 4 Pkw-Reifen bzw. 1 Lkw-Reifen gelagert werden. Bei Stapelhöhen von durchschnittlich 4 m und mittlerer Reifenbreite werden pro m²

- 80 Pkw-Reifen bzw. 560 kg und
- 10 Lkw-Reifen bzw. 560 kg

gelagert. Bei einem mittleren Heizwert von etwa 35 MJ/kg ergibt das eine Energiedichte von 196 GJ/m² und unter Berücksichtigung des Abbrandfaktors von 0,8 eine Brandlast von 157 GJ/m².

Die nicht ausreichenden Möglichkeiten der Verwertung von Altreifen sind Gründe für die Lagerung auf unterschiedlichsten Flächen ohne Maßnahmen für eine Branderkennung und Brandbekämpfung. Das betrifft Flächen

- auf Mülldeponien,
- in angemieteten Grundstücken,
- in alten Lagerhallen und
- in aufgegebenen Fabrikgeländen.

Neben diesen meist unbewachten und ungesicherten Lagern bestehen weitere Lagerflächen in den Recyclingbetrieben und in den Betrieben, in denen die Wiederverwertung stattfindet. Eine Erweiterung der vorhandenen Richtlinien für die Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoff auf Reifenlager wurde bisher nicht in Betracht gezogen, obwohl Gummi im weitesten Sinne ebenfalls als thermoplastischer polymerer Werkstoff angesehen werden kann.

4.4.2 Altreifen als Brandstoff

Reifen sind industrielle Erzeugnisse aus mehreren elastomeren Rohstoffen. Wesentliche Rohstoffe für die Erzeugung von Reifen sind

- Rohkautschuk unterschiedlichster Zusammensetzung, insbesondere Naturkautschuk (Isoprenkautschuk) und Synthetikautschuk (Butadienkautschuk, Chloroprenkautschuk, Copolymere aus Butadien und Acrylnitril, Butadien und Styrol),
- Schwefel und Schwefelverbindungen zur Vulkanisation der Polymerketten,
- Füllstoffe, wie Talkum oder Kreide,
- Füll- und Farbstoffe, wie Eisenoxid, Zinkoxid und Ruß,
- Zusatzstoffe für Licht- und UV-Beständigkeit, Abrieb- und Haftfestigkeit, Gleitfähigkeit, antistatische Ausrüstung u.ä.,
- Einlagematerial wie Stahldrähte bzw. -bänder und Kordmaterial aus natürlichen und synthetischen Fasern.

Je nach Anteil der unterschiedlichsten Abmischungen der einzelnen Kautschukkomponenten und nach dem Vulkanisationsgrad werden die unterschiedlichsten Eigenschaften des jeweiligen Reifens erzielt. Oftmals können die Wände der Reifen und die verschiedenen Laufflächen aus unterschiedlichem Ausgangsmaterial bestehen.

Die Brennbarkeit von Natur- und Synthetikgummi und der Copolymeren Butadien oder Isopren mit Acrylnitril oder Styrol ist sehr hoch. Durch die nichtschmelzbaren und teilweise auch nichtbrennbaren Anteile in den Reifenabmischungen wird die Brennbarkeit der schmelzbaren Polymeren gefördert (Dochtwirkung). Darüber hinaus bilden nichtschmelzbare brennbare Anteile (Ruß und Kordmaterial) Glutnester aus, die durch heterogene Reaktion mit Luftsauerstoff selbst Energie liefern können und als Zündquellen von Bedeutung sind.

Infolge der Formbeständigkeit der Einlagen, des Füllstoffanteils und des Vernetzungsgrades der Kautschukmischungen bleiben bei Bränden in Altreifenlagern die inneren Oberflächen des Brandstoffes über das Vollbrandstadium hinaus erhalten. Die nahezu vollständige Umhüllung der inneren Oberflächen (Reifeninnenflächen) durch die Form der einzelnen Reifen, der Hohlraum im Stapel und die entstehenden Kanäle zwischen den Stapeln bis zu Lagerhöhen von 4 m, lassen erwarten, daß die verdeckten Brandflächen für die Brandbekämpfung praktisch nicht zugänglich sind.

Die innere Strukturierung der Brandstoffoberfläche und die Möglichkeit der Luftzuführung im Stapelgut bringt für die Brandbekämpfung ein Höchstmaß an geschmolzener und Zersetzungsprodukte liefernder Brandoberfläche mit sich, die zusätzlich durch das Ausbilden von Glutnestern mit unterschiedlicher Einbrenntiefe eine räumliche Komponente besitzen kann. Die Zersetzungsprodukte treten an unterschiedlichsten Stellen in die Reaktionszone ein und verbrennen in räumlich strukturierten Flammenbereichen. In den Rauchgasen befinden sich, bedingt durch die Strukturierung der Brandfläche und damit auch der Flammen über der Brandfläche, hohe Anteile organischer Verbindungen und große Mengen an Ruß.

5. Brandbekämpfung in Sekundärstoff- und Altreifenlagern

5.1 Sekundärstofflager

Die Schüttgutlager von Sekundärstoffen enthalten neben Hohlräumen, Bechern, Blistern und Folien aus Thermoplaste vor allem metallische Verpackungsteile wie Büchsen, Dosen und Folien sowie Verbundstoffe von Thermoplaste mit Papier und Metallfolien. Obgleich es sich um lose Schüttungen handelt, kann bei einem Brand von einer einheitlichen Brandfläche, die gut erreichbar ist, ausgegangen werden. Die Brandbekämpfung an dieser Fläche ist mit wäßrigen Löschmitteln ohne wesentliche Schwierigkeiten zu realisieren. Besonders effizient können wäßrige Lösungen von AFFF-Schaummitteln eingesetzt werden. Die Verteilung der Löschmittel sollte durch Sprühdüsen oder durch bewegliche Sprüh- bzw. Vollstrahlrohre erfolgen. Die bekannten Anwendungsraten von 4 bis 6 l/min·m² sollten bereits zu Beginn des Löschangriffes verfügbar sein [19]. Kann die gesamte Oberfläche der Schüttung mit der Schaummittellösung beaufschlagt werden, dann ist der Löscherfolg sehr schnell zu erreichen. Zu beachten ist dabei die Heißgasströmung über der Oberfläche des Brandstoffes.

Stationäre Löschtechnik muß so installiert sein, daß die Oberflächen aller möglichen Schüttkegel im Lager vom Löschmittel erreicht werden und die Tropfen die Heißgasströmung über der Oberfläche ohne wesentliche Verluste durchdringen können.

Für die mobile Löschtechnik müssen entsprechende Angriffswege vorhanden sein, die ein schnelles, sicheres und vollständiges Erreichen der Schüttgutoberfläche gewährleisten und den Einsatzkräften einen guten Sichtkontakt garantieren.

Treten im Schüttgut Glimmbrände auf, dann sind besondere Maßnahmen für die Brandbekämpfung erforderlich. Glimmbrände sind vor allem dadurch gekennzeichnet, daß sie von nicht brennendem Material umgeben sind. Eine Reihe der durch den Glimmbrand gebildeten Reaktionsprodukte besitzen wasserabweisende Eigenschaften. In Verbindung mit der im Glimmbrandherd gespeicherten Wärme verhindern sie das Eindringen des Löschmittels in den Brandherd. Damit gestaltet sich ein entwickelter Glimmbrand innerhalb einer Abfallschüttung für die Brandbekämpfung als schwierige und langwierige Aufgabe. Bei kleinen

Reservoiren ist es deshalb immer günstiger, die Zufuhr von frischem Abfall zu stoppen und das Lager zu leeren, so daß die Glutnester gezielt bekämpft werden können [20].

Bei sehr großen Lagern ist diese Verfahrensweise zu aufwendig. Je nach Situation können folgenden Maßnahmen der Brandbekämpfung gewählt werden:

- Ausheben des Glimmbrandherdes und Löschen der vorhandenen glimmenden Materialien
Diese Maßnahme ist sehr aufwendig. Bei der Ausführung der Arbeiten können Hohlräume einstürzen und Aushub verpuffungsartig verbrennen. Außerdem sind die entstehenden Brandgase (Kohlenmonoxid) sowie die Zersetzungs- bzw. Reaktionsprodukte (Aromaten) in hohem Maße gesundheitsschädigend [14]. Mit der Methode des Aushebens von Glimmbränden ist der Löscherfolg immer gegeben.
- Injizieren unterschiedlichster Löschmittel in das Zentrum des Glimmbrandherdes
Der Erfolg dieser Methode hängt vor allem von der genauen Erkundung des Brandherdes und von der Auswahl der Löschmittel ab. Löschwasser ist für diesen Fall wegen geringer Netzwirkung ungeeignet. Zusätze zum Löschwasser sollten sowohl auf die Benetzung als auch auf eine retardierende Wirkung abzielen [21]. Beim Einsatz von Löschgasen ist darauf zu achten, daß ein Glimmbrand nur geringe stoffliche Umsätze zu seiner Erhaltung benötigt und die inertisierende Wirkung des Löschmittels solange anhalten muß, bis die gespeicherte Energie für die Reaktion des Sauerstoffes an der Grenzfläche nicht mehr ausreicht. Damit dürften Löscherfolge bei kleinen Bränden vorzugsweise auf die Kühlung der Glut und das Abführen der Energie aus dem Brandherd zurückzuführen sein.
- Verringern des Sauerstoffangebotes in der Schüttung durch Abdeckung der Eintragstellen
Mit dieser Methode lassen sich insbesondere bei großen Schüttungen sehr gute Erfolge ohne größeren Aufwand erzielen. Es ist aber anzumerken, daß der Glimmbrand nur langsam abklingt und die Reaktion über einen längeren Zeitraum beobachtet werden muß. Erst nach Absinken der Temperaturen auf Werte, die dem normalen Lebensbereich von Mikroorganismen entsprechen ($< 100\text{ °C}$), kann von einem Löscherfolg gesprochen werden. Als Abdeckmaterialien eignen sich großflächige Sperrschichten aus Plastfolien oder Abdeckungen mit bindigem Material [22]. Diese Methode ist vor allem für Deponiebrände geeignet.

Insgesamt ist anzumerken, daß die Bekämpfung von Glimmbränden einen erhöhten zeitlichen Aufwand erfordert und die Möglichkeiten der Feuerwehren in der Regel übersteigt. Das betrifft die exakte Erkundung der Brandherde, die Auswahl der optimalen Vorgehensweise, die erforderliche Technik sowohl für das Ausheben bzw. Ausfördern des Brandstoffes als auch für das Injizieren der Löschmittel und die Möglichkeiten für großflächige Abdeckungsarbeiten.

Die Brandbekämpfung in Ballenlagern sortierter Sekundärstoffe soll entsprechend den in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Vorgaben für Sekundärstofflager betrachtet werden. Für Lager, die diesen Vorschriften nicht entsprechen, kann eine mobile Brandbekämpfung durch eine örtliche Feuerwehr nicht erfolgreich aufgenommen werden. Die Entwicklung eines Großbrandes mit entsprechendem Schadenvolumen und Auswirkungen auf die Umwelt ist vorprogrammiert.

Entsprechend Abschnitt 4.3.1 ergeben sich Brandabschnitte definierter Größenordnungen und innerhalb der Brandabschnitte Lagerabschnitte mit festgelegten Zwischenabständen. Eine genauere Analyse der Technologie für die Einlagerung der gepreßten und sortierten Sekundärstoffe zeigte, daß mit der Bildung von Lagerabschnitten die innere Strukturierung des Lagers noch nicht abgeschlossen ist [32]. In den Abbildungen 5.1.1 und 5.1.2 ist der technologisch bedingte Abstand einzelner Stapel innerhalb der Lagerabschnitte zu erkennen.



Abbildung 5.1.1 Zwischenlagerung von Kunststoffballen



Abbildung 5.1.2 Technologisch bedingte Zwischenräume bei der Lagerung

Die äußeren Oberflächen innerhalb der Lagerabschnitte sind nochmals in sich strukturiert und begünstigen die Ausbildung verdeckter Brände.

Die geforderte Sprinklerung der Lagerflächen ermöglicht eine gleichmäßige Beaufschlagung der zugänglichen Oberflächen der Stapel. Je nach Entfernung der Löschdüse von der Brandstoffoberfläche werden auch die vorhandenen Kanäle mit Löschmittel beaufschlagt. Die geringen Öffnungsflächen der Kanäle reichen aber nicht aus, um eine löschtfähige Konzentration an Löschmittel in die Spalte einzubringen. Zusätzlich wirkt die Heißgasströmung dem Eindringen der Wassertropfen entgegen bzw. verleiht ihnen eine von der Gasströmung abhängige Richtung [19]. Das auf der zugänglichen Brandstoffoberfläche auftreffende wäßrige Löschmittel, welches dort für den Löscherfolg nicht benötigt wird und als überschüssiges Restwasser abläuft, erreicht die Kanäle. Beim Abfließen des überschüssigen Wassers werden sich immer bevorzugte Abflußrichtungen aufbauen, die eine vollständige Beaufschlagung der Oberflächen des verdeckten Brandes unmöglich machen [19]. Die Ausbildung bevorzugter Abflußrichtungen kann durch den Einsatz grenzflächenaktiver Stoffe, die Rezepturbestandteile in Mehrbereichs- und insbesondere in AFFF-Schaummitteln sind, unterdrückt werden. Trotzdem werden das abfließende überschüssige Wasser und die in den Kanal mittels Sprühstrahl eindringenden Wassertropfen nicht in der Lage sein, die Oberflächen der verdeckten Brände sicher zu löschen.

Durch den Einsatz von Schäumen mit abdeckender Wirkung im Bereich der Kanäle können die Strömungsrichtungen der von den verdeckten Bränden gebildeten Heißgasströmungen verändert werden. Gleichzeitig wird durch die Drainage des Schaumes die Abgabe des grenzflächenaktiven Löschwassers verzögert und günstiger verteilt [33]. Gelingt der Aufbau entsprechend löschtfähiger Schaumschichten im Bodenbereich, verbleiben für die mobile Brandbekämpfung dann vor allem jene Bereiche verdeckter Brände, die durch das Löschmittel noch nicht erreicht wurden.

Das erfordert eine auf das zu erreichende Ziel abgestimmte Löschtechnik und -taktik. Für ein vollständiges Ablöschen der äußeren Begrenzungsflächen des Brandes sollten vorzugsweise Schaumrohre und Sprühstrahlrohre eingesetzt werden, die die Oberflächenschicht des Brandstoffes abkühlen und damit die Nachlieferung brennbarer Stoffe schlagartig senken. Der Löschvorgang im Bereich der verdeckten Brände muß mit Auswurfvorrichtungen vorgenommen werden, die ein Erreichen der verdeckten Brandflächen ermöglichen. Dazu eignen sich vorzugsweise Schwerschäumrohre und Vollstrahlrohre unter der Voraussetzung, daß die Einsatzkraft die Löschmittelstrahlen gezielt in die Bereiche des verdeckten Brandes einbringen kann.

Ein Brand, der einen Lagerabschnitt mit 400 m² Grundfläche und einer inneren Oberfläche von ca. 5000 m² erfaßt hat, stellt für Feuerwehren einen Großbrand dar, der einen konzentrierten Einsatz der verfügbaren Technik erfordert. Ein effizienter Einsatz ist bei diesen Flächen nur denkbar, wenn die stationäre Löschanlage während der Brandbekämpfung weiter in Betrieb ist und die Feuerwehr nur die Brandbekämpfung der durch die Löschanlage nicht erreichbaren verdeckten Brände übernimmt. Dazu sind vor allem entsprechende Angriffswege und der taktisch richtige Einsatz des zur Verfügung stehenden Löschmittels erforderlich.

Bestehen keine Chancen, das Löschwasser an die Oberflächen des Brandstoffes zu bringen, muß ein mechanisches Ausräumen der Brandstoffe bis zum Brandherd erfolgen. Das erfordert ein Absichern einzelner Lagerflächen und unter dem Schutz der Löschmittel das Ausräumen bzw. Umsetzen des Brandgutes mit der Freilegung der verdeckten Brandflächen. Dazu muß gegebenenfalls auch entsprechende Räumtechnik vorhanden sein, mit der die Beräumung der Brandflächen vorgenommen werden kann. Die für den üblichen Umschlag in diesen Lagern eingesetzten Radlader und Gabelstapler müßten aus Sicherheitsgründen für solche Einsätze umgerüstet werden. Schwerpunkte für die Umrüstung sind

- mechanischer Schutz der Fahrerkabine,
- gasdichte Fahrerkabine und
- Schutz der Hydraulikelemente vor Wärme.

Größere Brandflächen bis hin zum Vollbrand eines Brandabschnittes bedingen den Einsatz mehrerer Feuerwehren und dürften nach dem gegenwärtigen Stand aufgrund der ungenü-

gend ausgebauten Angriffswege, die einen Innenangriff unmöglich machen, der damit nicht vollständigen Erreichbarkeit aller Oberflächen und der sich ausbildenden verdeckten Brandflächen immer zu Großbränden mit Totalverlust des Lagers führen.

5.2 Brandbekämpfung in Altreifenlagern

Kautschuk ist als thermoplastisches Hochpolymer aufgrund seiner dünnflüssigen Schmelze, die aus geringer Schichtdicke verdampft oder leicht abtropft, relativ leicht mit Löschmitteln abzulöschen. Bei guter Benetzung der Oberfläche der Schmelze durch tensidhaltiges Löschwasser, durch Schäume oder durch feinverteiltes Löschwasser können die Brände sicher gelöscht werden.

Wie unter 4.4.2 ausgeführt, bestehen Altreifen im Gegensatz zum Rohprodukt Kautschuk aus Mischungen verschiedener Einzelkomponenten. Der Kautschuk wurde mit Schwefel bzw. Schwefelverbindungen bis zu einem für die Anwendung erforderlichen Grad vernetzt. Füllstoffe und weitere Komponenten wurden dem Reifen zugesetzt. Damit entstehen veränderte Bedingungen an den Brandstoffoberflächen. Wesentliche Veränderungen sind:

- höhere Viskosität der Schmelze
- höherer Anteil von nichtschmelzbaren Stoffen mit Dochtwirkung für die Schmelzen
- Ausbildung von Glut an der Phasengrenzfläche und im Brandgut

Trotzdem lassen sich die durch vorzugsweise tensidhaltige Löschmittel erreichbaren Oberflächen von Altreifen unter Berücksichtigung der bekannten Anwendungsraten löschen. Für Altreifenlager besteht die Beherrschbarkeit eines Brandes damit nicht in der Lösbarkeit des Brandstoffes durch das Löschmittel, sondern in der Erreichbarkeit aller Oberflächen der verdeckten Brände innerhalb des Brandobjektes mit dem Löschmittel. Über ausdauernde Brände im Stapelinnern von Altreifen berichteten Flausaus [39] und Züll [40].

Werden die Oberflächen mit dem wäßrigen, oberflächenaktiven Löschmittel nicht erreicht, wird ein großer Anteil des Löschwassers ungenutzt abfließen. Es muß letztendlich ein schrittweises Beräumen der Lager mit Einzelablöschung der Reifen erfolgen.

Unter Berücksichtigung dieser inneren Strukturen von Reifenlagern sollten die Strategien für eine effiziente Brandbekämpfung schrittweise auf nachfolgende Teilziele ausgerichtet werden:

- Brandbekämpfung auf der erreichbaren Oberfläche des Lagerbrandes mit weitreichenden Strahlrohren
Die erreichbare Oberfläche ist nur dann sicher abzulöschen und vor Rückzündung durch die verdeckten Brände zu schützen, wenn das Löschmittel über einen längeren Zeitraum an der Oberfläche verweilen kann oder wenn ständig neues Löschmittel zugeführt wird. Die genannten Randbedingungen werden durch den Einsatz von Schwerschäum erfüllt.
- Bekämpfung der ausgedehnten verdeckten Brände innerhalb der Brandfläche
Die erreichbaren inneren Oberflächen sind gezielt mit Löschmittel zu beaufschlagen. Dazu eignen sich Vollstrahlen, die in die größeren Hohlräume eingebracht werden und Schäume, welche die Hohlräume verschließen und eine Luftzuführung zu den verdeckten Bränden verringern oder unmöglich machen. In Verbindung mit den für die Oberflächenlöschung eingesetzten Schwerschäumen können damit die großräumigen verdeckten Brände gelöscht werden. Vorteile können auch durch den Einsatz von Mittel- und Leichtschäum erzielt werden.
- Rückhaltung des ablaufenden Löschwassers im Bereich der Brandflächen
Das kommt den Forderungen zur Rückhaltung von kontaminiertem Löschwasser entgegen und löscht darüber hinaus brennend abtropfende Polymerschmelze sicher ab. Außerdem sorgt es für ein besseres Fließen von Schäum auf der Grundfläche des Lagers und hält aufgeschwemmte Rußanteile zurück.

- **Restablöschung kleinerer verdeckter Brände und Glutnester**
Nach Ablöschen der größeren verdeckten Brände geben sich kleinere verdeckte Brände und Glutnester durch örtlich begrenzte Konvektionssäulen zu erkennen. Diese Stellen können nur durch schrittweises Aufnehmen oder Umsetzen des Brandstoffes und Ablöschen der Glut an den dadurch erreichbaren Oberflächen abgelöscht werden.
- **Nachsorge**
Da bei Altreifenbränden fast immer mit Glutnestern zu rechnen ist und diese durch geeignete Erkennungstechnik (Infrarot- oder Sensorarraytechnik) nur schwer zu orten sind, muß für eine Zeit von 5 bis 10 h, jedoch mindestens solange noch sichtbare Emissionen von Wasserdampf an der gelöschten Oberfläche zu beobachten sind, ausreichend Löschwasser für die Bekämpfung von Rückzündungen vorhanden sein.

Im Fall des Eindämmens eines Brandes durch Abdecken mit Erde muß berücksichtigt werden, daß trotzdem weiterhin Pyrolyseprozesse ablaufen und Glutbrände fortbestehen können. Es bilden sich Cracköle und Reaktionsprodukte aus der unvollständigen Verbrennung. Die Cracköle enthalten hohe Anteile aromatischer Verbindungen, die leicht flüchtig und mobil sein können.

Reaktionsprodukte der unvollständigen Verbrennung enthalten vorzugsweise Kohlenmonoxid und je nach Zusammensetzung des Brandstoffes auch Cyanwasserstoff und toxische Aldehyde. Züll berichtete z. B. über das Auftreten von Cyanwasserstoff beim Großbrand in einer Reifenfirma [40]. Die akut toxischen gasförmigen Produkte, die leicht flüchtigen und mobilen Zersetzungsprodukte und die umweltgefährdenden (Boden- und Grundwasserkontamination) schwerflüchtigen Verbindungen machen es notwendig, den eingedämmten Brand restlos abzulöschen und die Brandrückstände vollständig zu entsorgen.

5.3 Bedingungen für die optimale Brandbekämpfung

5.3.1 Stationäre Anlagen

Stationäre Anlagen für die Bekämpfung von Sekundärstoffbränden in Gebäuden oder im Freien sollten garantieren, daß an der Schnittfläche des Wasserstrahls mit der Oberfläche des Lagergutes die Anwendungsrate von 4 bis 6 l/min·m² nicht unterschritten wird. Das bedeutet, die Auswahl der Löschdüsen entsprechend der tatsächlichen Entfernung der Löschdüsen zur vorhandenen Brandstoffoberfläche vorzunehmen. Es muß garantiert werden, daß eine lückenlose Beaufschlagung der erreichbaren Oberfläche mit der erforderlichen Anwendungsrate möglich wird.

Der Einsatz von Schaummitteln oder einer Kombination von Fluor- und Kohlenstoffensiden sollte vorzugsweise gewählt werden. Er ermöglicht die Erzeugung eines Sprühschaumes aus Sprinkler bzw. Sprühwasserdüsen, der auf der Oberfläche des Brandstoffes infolge Drainage für eine zeitlich verzögerte Wasserabgabe sorgt und gleichzeitig für das Eindringen des Löschwassers in die Kanäle der verdeckten Brände auf breiter Front sorgt. Bei engen Kanälen können diese sogar mit Schaum verschlossen werden.

Die Brandabschnitte in den Lagern sollten in jedem Fall auf der gesamten Grundfläche für die Löschwasserrückhaltung ausgelegt sein. Es wird eine löschwirksame und beim Einsatz von grenzflächenaktiven Stoffen auch benetzungsfähige, sowie zum Teil verschäumte Schicht gebrauchten Löschwassers aufgebaut, die brennend abtropfende Plastschmelze aufnehmen, benetzen und ablöschen kann. Da sich das gebrauchte Löschwasser auf alle freien Bereiche der vorhandenen Grundfläche ausbreitet, werden auch die Grundflächen von Kanälen mit dem erforderlichen Löschwasser beaufschlagt und damit das Ausbilden von Lachenbränden am Boden verhindert.

Entstandene Brände mit Hilfe der stationären Anlagen vollständig zu löschen, ist infolge des Ausbildens verdeckter Brandflächen innerhalb der Kanäle zwischen den gepreßten Sekundärstoffballen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht möglich. Bei vollentwickelten verdeckten

Bränden innerhalb einzelner Abschnitte kann die stationäre Anlage nur eine Einschränkung der Brandausbreitung garantieren. Ebenso wird die Löschwasserrückhaltung nur im Bodenbereich wirksam werden können.

5.3.2 Mobile Brandbekämpfung

Ist das Lager durch eine stationäre Anlage geschützt und hat diese angesprochen, dann besteht die Möglichkeit unter dem Schutz der stationären Anlage die vorhandenen verdeckten Brände und die Oberflächen, die durch die Anlage nicht erreicht werden, zu löschen. Ein Abschalten der stationären Anlage zu Beginn des mobilen Löscheinsatzes ist auszuschließen, weil durch Rückzündungen von gasförmigen Stoffen sehr schnell die ursprünglichen Brandflächen wieder aktiviert werden.

Wesentliche Voraussetzungen für den Löscherfolg sind ausreichende Sichtbedingungen und frei zugängliche Angriffswege im Bereich des lokalen Brandes. Es muß garantiert sein, im Bereich der Angriffswege die mobile Löschtechnik so aufbauen zu können, daß die wesentlichen, im Brandobjekt erkennbaren Oberflächen des Brandstoffes mit dem Löschmittel erreicht werden können. Kann das nicht realisiert werden, ist die installierte Löschtechnik unwirksam und muß umgesetzt werden. Sind keine entsprechenden Angriffswege vorhanden, so müssen sie geschaffen werden. Ohne die gezielte Vorbereitung günstiger Angriffswege führt die unkontrollierte Aufgabe großer Mengen Löschwasser nur durch Nutzung bereits vorhandener Öffnungen möglicherweise nicht zum Löscherfolg.

Um das wäßrige Löschmittel an die Oberfläche des Brandstoffes zu bringen, wird es erforderlich, die Strahlrohre so zu stationieren, daß der Löschmittelstrahl die Brandstoffoberflächen erreicht. Das bedingt die Entscheidung für einen Innenangriff mit den entsprechenden Angriffstrupps vor Ort oder die Stationierung mobiler Auswurfvorrichtungen mit entsprechender mechanischer Strahlführung vor Ort, wobei der Angriffstrupp in diesem Fall nur Überwachungsfunktionen aus sicherer Entfernung wahrnehmen muß. Nach Erreichen entsprechender Löscherfolge kann das Umsetzen der Geräte erfolgen. Im Schutz der stationierten Auswurfvorrichtung kann dann die gezielte Bekämpfung verdeckter Brände mit der jeweils günstigsten Löschtechnik erfolgen. Sind die verdeckten Brände mit der mobilen Technik nicht erreichbar, muß das Beräumen des Lagers erfolgen.

Für Reifenlager ergibt sich durch die Besonderheit der starken Rußbildung und der nicht erreichbaren inneren Oberflächen in jedem Fall die Notwendigkeit der gezielten Brandbekämpfung an diesen Flächen nach mechanischer Beräumung und ihrer Freilegung.

Je nach Zielstellung für den jeweiligen zu bekämpfenden brennenden Teilabschnitt ist die Auswahl der einzusetzenden Strahlform vorzunehmen. Sprühstrahlen sind dann geeignet, wenn damit nach Überwinden der Entfernung zum Brandobjekt noch eine löschtfähige Konzentration an der Oberfläche des Brandstoffes aufzubauen ist oder wenn es überhaupt möglich ist, die Wassertropfen auf die erreichbare Oberfläche zu bringen. Werden größere Reichweiten erforderlich, dann müssen Vollstrahlen unterschiedlicher Formen eingesetzt werden. Gleichzeitig ist durch gezielte Strahlführung für eine Verteilung des Löschwassers zu sorgen. Für den gezielten Einsatz von Vollstrahlen ist immer eine ausreichende Sicht erforderlich.

5.4. Gefahrenschwerpunkte bei der Brandbekämpfung

5.4.1 Energieflußdichte

Altreifen und sortierte Kunststoffe besitzen einen sehr hohen Heizwert, welcher im Mittel mit 35 bis 40 MJ/kg angesetzt werden kann. Die Abbrandraten der Kunststoffe und Altreifen bezogen auf eine definierte Grundfläche des Brandstoffes betragen 0,8 bis 1,5 kg/m²·min. Für Brände von Sekundärstoffen ergeben sich damit Energieflußdichten von 460 bis 750 kW/m². Unter Berücksichtigung der geschätzten Brandfläche kann die Brandleistung berechnet werden.

Die hohen Energieflußdichten bedingen

- die Aufheizung der Reaktionsprodukte in der Reaktionszone bis auf 1200 °C und der Brandgase in den Flammenzone auf 700 bis 900 °C,
- die Emission von Wärmestrahlung aus der Flammenzone als schwarzer Strahler mit einem Emissionsfaktor von $\epsilon \approx 1$ und
- die Ausbildung einer Konvektionszone mit heißen Rauchgasen oberhalb der Flammenzone.

Sowohl von der Wärmestrahlung als auch von der Konvektionszone können Gefahren für Einsatzkräfte und Löschtechnik ausgehen.

Die Wärmestrahlung wird durch Luft nicht absorbiert, so daß sie direkt auf die Kräfte und Mittel sowie die Umgebung wirken kann.

Durch Rußteilchen wird die Strahlung in hohem Maß absorbiert und kann entsprechend der Temperatur wieder abgegeben werden, so daß die Energie im Gasvolumen verbleibt. In geschlossenen Lagern hat das eine schnellere Aufheizung des Gasraumes zur Folge. Erreicht die Temperatur der heißen Konvektionszone an der Lagerdecke Werte von 600 °C, muß mit einer schlagartigen Brandausbreitung über die gesamte durch die Strahlung erreichbare Oberfläche des Brandstoffes gerechnet werden (flash over).

Die vom Brand erzeugte Energie heizt die Umgebung des Brandobjektes schnell auf. Dafür sind sowohl die Wärmestrahlung als auch die Konvektion der heißen Rauchgase verantwortlich. Zum Schutz der baulichen Umhüllung muß ein möglichst hoher Anteil der durch den Brand produzierten Energie schnell in die Umgebung abgeleitet werden. Das ist durch entsprechende Rauch- und Wärmeabzugseinrichtungen realisierbar.

Die im Brandobjekt verbleibende Wärme kann die Lagerform des Brandstoffes wesentlich verändern. Durch schmelzenden Brandstoff können sich viskose Flüssigkeitspools am Lagerboden ausbilden, deren Flammenzonen die vorhandenen Brandstoffe direkt aufheizen. Es kommt zur Zerstörung der vorhandenen Lagerform mit der teilweisen Neuausbildung verdeckter Brände.

Die Einsatzkräfte müssen berücksichtigen, daß sowohl Wärmestrahlung als auch die im Brandraum vorhandene Energie der heißen Gase zu einer Aufheizung der Bekleidung führen können. Wärmestrahlung kann durch Wärmestrahlschutzbekleidung oder durch entsprechende Deckung reflektiert werden. Einmal von der Einsatzbekleidung an der Oberfläche aufgenommene Energie wird abhängig von der Wärmedämmung der Bekleidung in endlicher Zeit den Körper der Einsatzkraft erreichen.

In nahezu vollständig abgeschotteten Räumen verbleibt die gesamte produzierte Energie im Raum. Die Flammen über den brennenden Oberflächen initiieren Strömungen im Raum, die dafür sorgen, daß der vorhandene Sauerstoff ausgenutzt wird. Mit zunehmender Verringerung der Sauerstoffkonzentration geht der Flammenbrand in einen Glimmbrand über, der für eine nahezu vollständige Umsetzung des Sauerstoffs sorgt [9]. Gleichzeitig werden Brandstoffanteile in die Gasphase überführt, die nicht mehr verbrannt werden können. Der Glimmbrand und die steigende Konzentration brennbarer Gase im Raumvolumen sorgen

bei Öffnung des geschlossenen Raumes für verpuffungsartige Rückzündungen mit schlagartiger Ausbildung eines entwickelten Flammenbrandes.

5.4.2 Schadstoffe

Bei Bränden wird der wesentliche Teil des Brandstoffes durch die Reaktion mit Sauerstoff umgesetzt. Dabei entstehen typische Oxidationsprodukte und eine Anzahl toxischer Nebenprodukte. Typische Oxidations- und Nebenprodukte von in organischen Verbindungen enthaltenen Elementen sind in Tabelle 6.2.1 zusammengefaßt.

Tabelle 6.2.1: Oxidations- und Nebenprodukte bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit Heteroatomen

Element	Oxidationsprodukt	Reaktions- und Nebenprodukte bei unvollständiger Verbrennung
C	CO ₂	CO
H	H ₂ O	
O	H ₂ O, CO ₂	
N	N ₂	NO _x , NH ₃ , NH ₂ R (Stickoxide, Ammoniak, Amine)
S	SO ₂ (H ₂ SO ₄)	H ₂ S, HSR (Schwefelwasserstoff, Mercaptane)
P	P ₄ O ₁₀ (H ₃ PO ₄)	PH ₃ (Phosphorwasserstoff)
Cl	HCl	Cl ₂ (nicht in Gegenwart von Doppelbindungen), R-Cl
Br	HBr	
F	HF	
C, N		HCN
C, O, Cl		COCl ₂ (Phosgen)

Die wesentlichen Verbrennungsprodukte sind Wasser und Kohlendioxid. Kohlendioxid kann nur in hohen Konzentrationen erstickend wirken. Durch die bei Bränden entstehenden Konvektionsströme wird das Kohlendioxid verdünnt. Das trifft auch auf die als Nebenprodukte entstehenden Verbindungen Kohlenmonoxid, Cyanwasserstoff (Blausäure) und Phosgen zu. Von diesen Verbindungen besitzt das Kohlenmonoxid eine besondere Bedeutung, weil die Bildung von Kohlendioxid immer über die Zwischenstufe des Kohlenmonoxides führt und der Reaktionsschritt vom CO zum CO₂ aus kinetischer Sicht langsam abläuft. Entsprechend der Gleichung



muß mit zunehmender Reaktionstemperatur das Gleichgewicht der Reaktion zu Gunsten der Bildung von Kohlenmonoxid verschoben sein. In gleicher Weise muß bei geringen Sauerstoffkonzentrationen das Kohlenmonoxid bevorzugt entstehen. Damit wird deutlich, daß bei jeder Verbrennung in den Verbrennungsgasen Kohlenmonoxid vorhanden sein muß. Das CO in den Rauchgasen ist hauptsächlich verantwortlich für die Toxizität der Rauchgase. In Tabelle 6.2.2 wird die Wirkung von Kohlenmonoxid bei verschiedenen Konzentrationen zusammengefaßt.

Tabelle 6.2.2: Toxizität von Kohlenmonoxid

Konzentration an Kohlenmonoxid in ppm	Symptome
30	MAK-Wert
100	keine beobachtbaren Vergiftungserscheinungen
200	Kopfschmerzen nach 2 - 3 h
300	Ausgeprägte Vergiftungserscheinungen (Verlangsamung des Pulses, Ansteigen des Blutdruckes, Zittern)
400	Ausgeprägte Vergiftungserscheinungen nach 2 - 3 h
500	Halluzinationen nach 20 - 30 Minuten
1 000	Erschwerte Bewegung, Tod nach 2-stündiger Inhalation
1 500	Tod nach 1-stündiger Inhalation
3 000	Tödlich nach 30 Minuten
> 8 000	sofortiger Tod durch Erstickten

Das Auftreten der toxischen Nebenprodukte Cyanwasserstoff und Phosgen ist zunächst an das Vorhandensein der entsprechenden Heteroatome Stickstoff und Chlor gebunden und erfordert zusätzlich Verbrennungsbedingungen mit geringer Sauerstoffzuführung.

Aus Tabelle 6.2.1 ist weiterhin ersichtlich, daß die von den Heteroatomen Schwefel, Phosphor, Chlor, Fluor und Brom erzeugten Reaktionsprodukte vor allem Verbindungen darstellen, die die Atemwege reizen. Die im Molekül des Brandstoffes vorhandene Masse des jeweiligen Heteroatoms findet sich je nach Verbrennungsbedingungen zu 90 bis 95 % bezogen auf den Ausgangsgehalt in den Oxidationsprodukten wieder [28]. Dabei ist die verbrannte Gesamtmasse des Brandstoffes zugrundegelegt. Bei organischen Verbindungen, die die genannten Heteroatome im Molekül tragen, ist grundsätzlich mit toxischen Wirkungen der Rauchgase zu rechnen. Die Konzentration der Reaktionsprodukte von Heteroatomen im Rauchgas wurde für verschiedene Verbindungen unter der Voraussetzung einer vollständigen Verbrennung berechnet (Tabelle 6.2.3).

Tabelle 6.2.3: Berechnung der Rauchgaszusammensetzung verschiedener Verbindungen bei vollständiger Verbrennung

Stoff	Konzentration in %					
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HCl	SO ₂	P ₂ O ₅
Methan	9,5	19,0	71,5	-	-	-
Methylchlorid	11,5	11,5	65,5	11,5	-	-
Methylenchlorid	15,0	-	55,0	30,0	-	-
Polyvinylchlorid	15,5	4,0	72,5	8,0	-	-
Polyvinylidenchlorid	17,4	-	65,2	17,4	-	-
Chlorbenzol	17,0	6,0	74,0	3,0	-	-
Thiophen	13,4	6,7	66,5	-	3,4	-
Parathion	7,3	5,1	86,5	-	0,7	0,4

Die Konzentrationen der durch die Verbrennungsreaktion aus den Heteroatomen gebildeten Reaktionsprodukte können in der Rauchgaszone erhebliche Gefährdungen hervorrufen. Es gilt aber auch hier, daß die Konvektion der heißen Rauchgase durch Vermischung mit der Luft zu einer wesentlichen Verdünnung der Rauchgase führt und damit die Gefährdung nur am unmittelbaren Brandort im Bereich der Rauchgasfahne zu erwarten ist.

Weitere Reaktionsprodukte bei Bränden sind Ruß und Zwischenprodukte der möglichen Reaktionen in den Flammen, die infolge von Kettenabbrüchen innerhalb der Reaktionsfolge die Reaktionszonen unverändert verlassen.

Ruß ist das Endprodukt der durch bevorzugte Oxidation des Wasserstoffes gebildeten Radikale unterschiedlicher Kohlenstoffketten. Durch diese bevorzugte Oxidation des Wasserstoffes läuft in den Flammen zusätzlich eine Synthese mit Kohlenstoffradikalen ab, die über ringförmige Verbindungen (Aromaten, Cycloverbindungen, kondensierte Aromaten) bis hin zum Ruß führt. Diese radikalische Synthese in Flammen wird allgemein als de-Novo Synthese bezeichnet. Hauptprodukt dieser Reaktion ist der Ruß.

Ruß und Kondensate, insbesondere Wasser und die Reaktionsprodukte der sauren Gase HCl, SO₂ und P₂O₅ mit Wasser verringern insbesondere in Gebäuden sehr schnell die Sichtweite für die Einsatzkräfte. Erschwerend kommt hinzu, daß Wasserdampf auch für Infrarotsichtgeräte nur schwer durchdringbar ist. Die wichtigste Methode zur Verbesserung der Sichtbedingungen besteht im Öffnen der Rauch- und Wärmeabzugseinrichtungen, da mit dem Konvektionsstrom der Rauchgase auch Rußanteile abgeführt werden.

Eine weitere Möglichkeit bieten Belüftungsgeräte der Feuerwehr, mittels derer Frischluft in die Brandräume geblasen wird, die die Rauchgase mit den Ruß- und Kondensatanteilen erfassen und aus dem Raum führen soll. Da für jede Zuführung von Luft auch entsprechende Abluftöffnungen vorhanden sein müssen, kann ein Belüftungsgerät erst nach der Schaffung entsprechender Abluftöffnungen eingesetzt werden. Sollten sich Anteile brennbarer Gase und Dämpfe im Raum befinden, so ist bereits zu diesem Zeitraum mit dem Durchzünden der Gase zu rechnen. Der Zusatz geringer Anteile versprühten Netzwassers

sorgt für das Niederschlagen von Ruß und Aufnehmen der am Ruß gebundenen Energie. Durch das Wasser im zugeführten Luftstrom kann Wärmestrahlung aus den Flammen absorbiert werden.

Neben dem Aufbau kondensierter organischer Verbindungen erfolgt natürlich auch die Oxidation des Kohlenstoffs in den Molekülketten. Dementsprechend entstehen Alkohole, Aldehyde, Säuren, Ketone und weitere Oxoverbindungen.

Eigene Untersuchungen zur Identifizierung der Zusammensetzungen der organischen Komponenten von Rauchgasen bei Bränden von Thermoplasten [19] zeigten, daß im Rauchgas von Kautschuk ebenso wie bei anderen Hochpolymeren

- Oxidationsprodukte wie Alkohole, Aldehyde, Säuren, Ketone, Ether und Oxoverbindungen,
- typische Kohlenwasserstoffe wie Alkane, Alkene und Alkine,
- Aromaten wie Benzol, Styrol, Naphthalin und kondensierte Aromaten,
- Cycloalkane und
- lineare, ringförmige und heterocyclische Verbindungen mit unterschiedlicher Anzahl von Heteroatomen

entstehen können. Eine Zuordnung typischer Verbindungen im Rauchgas zum Brandstoff ist kaum möglich. Es bestand bei unterschiedlichen Beprobungshöhen und -zeiten bei gleichem Brandstoff keine Identität der qualitativen Zusammensetzung. Das bezieht sich vor allem auf Homologe bestimmter Verbindungstypen. Die Grundstrukturen der entstehenden Verbindungen sind dagegen bei allen untersuchten Verbrennungsprozessen nahezu identisch. Das betrifft vor allem aromatische und cyclische Verbindungen.

Die direkten Oxidationsprodukte der Verbrennung, die Reaktionsprodukte der de-Novo-Synthese und deren Oxidationsprodukte bilden die Palette organischer Verbindungen in den Rauchgasen, deren Anteil am Gesamtumsatz bei ca. 1 % liegt. Damit sind diese Produkte für die Bewertung der akuten Toxizität der Rauchgase von geringer Bedeutung, was durch die Analyse der Todesursachen bei Brandtoten eindeutig bestätigt wird. Einhorn [29] gibt den prozentualen Anteil von Brandtoten durch CO-Vergiftung in den USA mit 95 % an.

Durch die de-Novo-Synthese werden eine Reihe sehr toxischer Verbindungen erzeugt, die in Spuren bei nahezu allen Bränden auftreten. Zu diesen Verbindungen gehören vor allem die polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) mit ihrem bekanntesten Vertreter, dem α -Benzopyren, und die polychlorierten Dibenzodioxine und -furane (PCDD ; PCDF) mit ihrem toxischsten Vertreter, dem 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin. Diese sehr toxischen Verbindungen sind kondensierte Ringverbindungen, die im Normalfall feste Stoffe mit geringem Dampfdruck und geringer Wasserlöslichkeit sind. Sie sind nur im Nahbereich der Flammen und in den heißen Rauchgasen als Gas zu finden. Infolge ihrer hydrophoben Eigenschaften kondensieren und adsorbieren diese Stoffe am gebildeten Ruß und setzen sich mit diesem in der Umgebung ab. Da diese Verbindungen nur schwer biologisch abbaubar sind (z.B. besitzt das 2,3,7,8- Tetrachlordibenzodioxin eine Halbwertszeit von ca. 10 Jahren), können sie über die Nahrungskette in den Körper gelangen. Damit wirken diese Verbindungen über einen langen Zeitraum permanent toxisch und müssen deshalb ebenfalls Beachtung finden. In der VdS-Leitlinie zur Brandschadensanierung [30] werden Maßnahmen unter Berücksichtigung dieser permanent toxischen Wirkungen von Brandstoffen empfohlen. Für die Einsatzkräfte gelten die Empfehlungen der VFDB-Richtlinie 10/03 [31].

6. Versuche mit Recyclingmaterialien

Um die Verhältnisse bei der Ausbildung verdeckter Brände zwischen gelagerten Kunststoffballen einschätzen zu können, wurden mehrere Versuche durchgeführt [27]. Die Ballen wurden in einem Abstand zueinander aufgestellt, wie er sich aus der Technologie des Umschlags in Recyclinglagern zwangsläufig ergibt. Die Zündung wurde auf der Grundfläche des Spaltes zwischen den Ballen mit offener Flamme vorgenommen. Im Spalt wurden die sich einstellenden Temperaturen und Auftriebsgeschwindigkeiten der Rauchgase und der Flamme mit Thermoelementen bzw. Prandtl-Rohren bestimmt.

Es war zu beobachten, daß sich im Spalt eine stabile Flamme ausbildete, die bereits nach etwa 60 s die gesamte Fläche bis zur Höhe von 1 m vollständig erfaßte. Die Ausbreitung des Brandes im Spalt erfolgte nach der Zündung durch den Abbrand einzelner Folien und Kanten von Plastikteilen sehr schnell über die gesamte Oberfläche. Die zu Beginn des Brandes vorhandene geringe Breite des Spaltes vergrößerte sich infolge Abschmelzen des Kunststoffes sehr schnell. Die Abbildungen 6.1 und 6.2 zeigen die Versuchsanordnung vor dem Brand und nach dem Ablöschen.

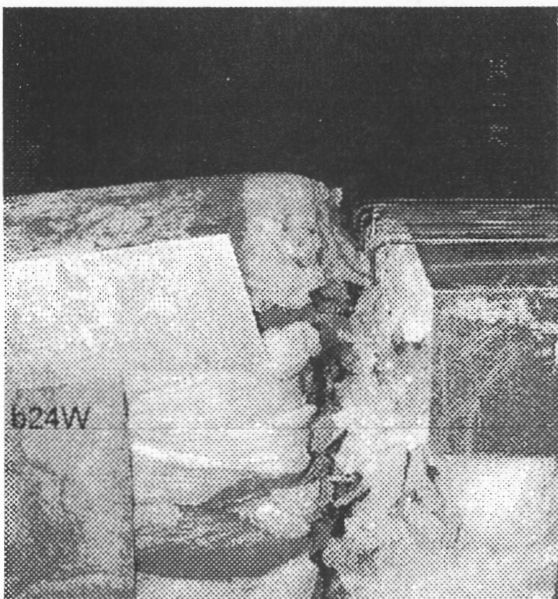


Abbildung 6.1: Versuchsanordnung vor dem Brand (Bleche als Sicherung vor einer flächigen Ausbreitung)



Abbildung 6.2: Versuchsanordnung nach dem Brand

Die Geschwindigkeiten der Brandgase beim Austritt aus der oberen Öffnung des Ballenspaltes (Spaltmitte) während der Versuche hatten die in Abbildung 6.3 gezeigten Werte.

Der Verlauf der Temperaturen der Gase im Ballenspalt ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

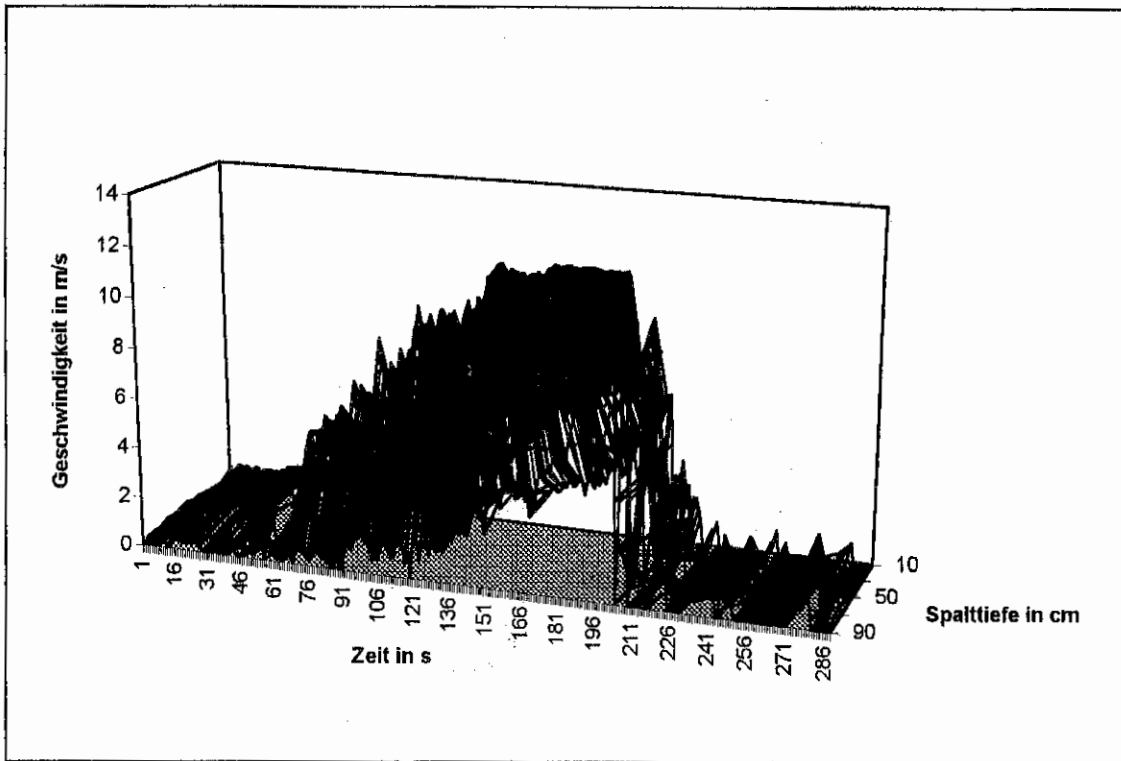


Abbildung 6.3 Geschwindigkeit der Gase im Ballenspalt

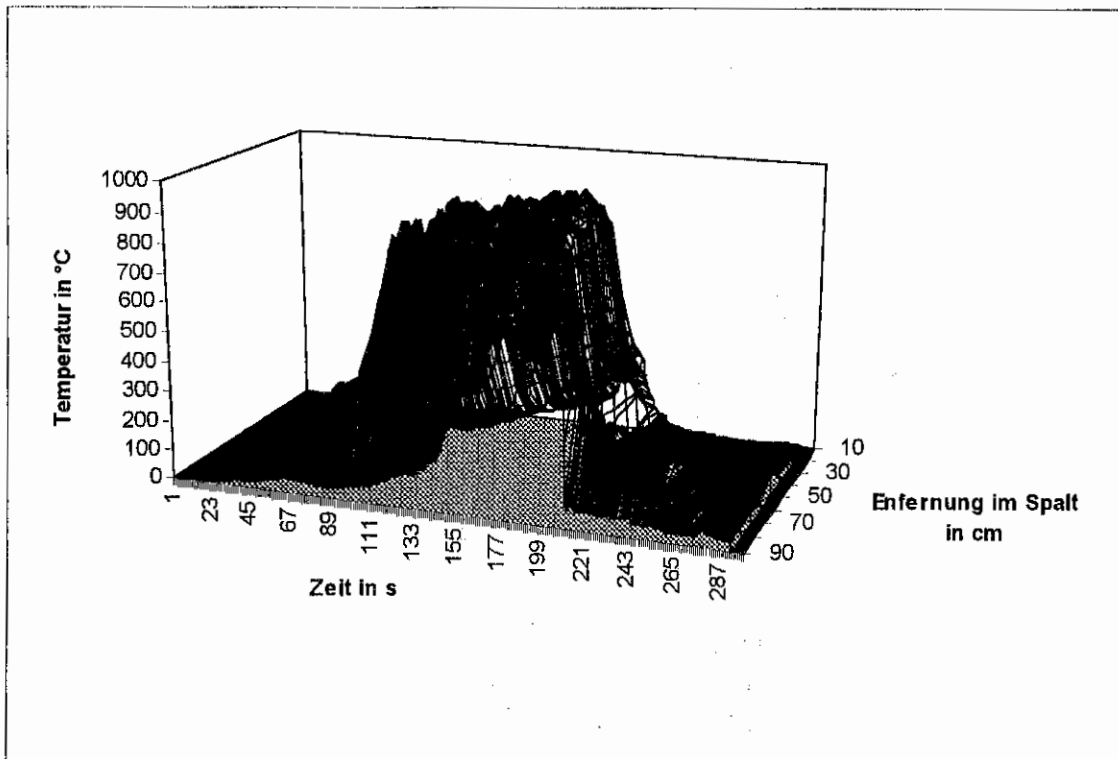


Abbildung 6.4 Temperaturen der Gase im Ballenspalt

Die Ergebnisse der Brandversuche zeigten, daß sich bereits in Kanälen geringer Länge eine gerichtete Strömung ausbildet, die für eine intensive Verbrennung sorgt. Die gemessenen Temperaturen erreichten Werte, die bei der Verbrennung brennbarer Flüssigkeiten aus großen Lachen üblich sind. Die Flamme innerhalb des Spaltes wurde durch die senkrechten Flächen des Brandstoffes mit brennbaren Gasen versorgt. Die Luftzuführung erfolgte

te über die Kanalöffnungen. Die Verbrennung im Spalt war damit unabhängig von dem sich ausbildenden Oberflächenbrand und blieb auch nach dem Ablöschen der Oberfläche erhalten. Die Geschwindigkeiten der aus dem Spalt abströmenden Rauchgase erreichten bei 1m Spaltlänge Werte von 12 m/s bis 43 km/h.



Abbildung 6.5: Verdeckter Brandherd im Stapel

Versuche mit stationären Löschdüsen zeigten, daß die Oberflächen eines Brandes von gestapelten Kunststoffballen leicht und sicher löschar sind. Die sich im Inneren des Stapels ausbildenden verdeckten Brände, die von dem Löschwasser nicht erreicht wurden, blieben erhalten und führten nach Abstellen der Löschanlage zu erneuten Zündungen im Stapelbereich. Die Abbildung 6.5 zeigt einen typischen verdeckten Brandherd innerhalb eines Stapels, dessen Oberflächenbrand mit einer Beaufschlagung von $15,5 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$ AFFF-Schaummittellösung sicher abgelöscht wurde [34].

Hier wird deutlich, daß die stationären Löschanlagen vorzugsweise für das Ablöschen der erreichbaren Oberfläche eines Brandes geeignet sind, jedoch verdeckte Brände im Inneren von Lagerstapeln auch mit hohen Anwendungsraten nicht sicher bekämpfen können. Für diese Brände müssen mobile Löscharfahren unter Nutzung mechanischer Methoden der Beräumung eingesetzt werden.

7. Auswertung großer Brände

Die in der Literatur beschriebenen Brände sind ausschließlich Großbrände, bei denen die Brandbekämpfung erst nach mehreren Einsatzstunden erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Grundsätzlich ist zu erkennen, daß die zuerst an der Einsatzstelle eintreffende Feuerwehr einen Vollbrand vorgefunden hat, der mit den mitgeführten Kräften und Mitteln nicht mehr beherrschbar war. Die Brandflächen hatten Ausdehnungen erreicht, die über das Maß der in den Entwürfen für die Lagerung von Kunststoffen vorgeschlagenen Flächen von Brandabschnitten hinausgingen.

Die typische Strukturierung eines Brandes von Kunststoffballen wird in den Dokumenten zum Brand in Miesbach 1996 [38] deutlich. Das Lager wurde im Rahmen einer Übung verbrannt. Dabei erfolgte aus bisher nicht geklärten Gründen die Zündung der Kunststoffballen. Durch die geladenen Vertreter der Medien wurde die gesamte Brandentwicklung bis zum Vollbrand dokumentiert. Die nachfolgenden Abbildungen 7.1 bis 7.3 zeigen typische Strukturen innerhalb der Stapel.



Abbildung 7.1: Videobild vom Großbrand in Miesbach 1996



Abbildung 7.2: Videobild vom Großbrand in Miesbach 1996

Fazit dieser Auswertung ist, daß Brände in Recyclinglagern nach der Zündung sehr schnell das Vollbrandstadium erreichen. Durch stationäre Löschanlagen wird der erreichbare Oberflächenbrand gelöscht und die Brandausbreitung der verdeckten Brände im Stapel verhindert. Die mobile Brandbekämpfung kann nur erfolgreich sein, wenn eine stationäre Löschanlage die Brandausbreitung bis zum Vollbrand verhindert. Der mobile Einsatz muß grundsätzlich parallel zur stationären Berieselung erfolgen. Wird die stationäre Löschanlage zu Beginn des mobilen Löschangriffes ausgeschaltet, ist mit einer Rückzündung der gesamten Oberfläche zu rechnen.

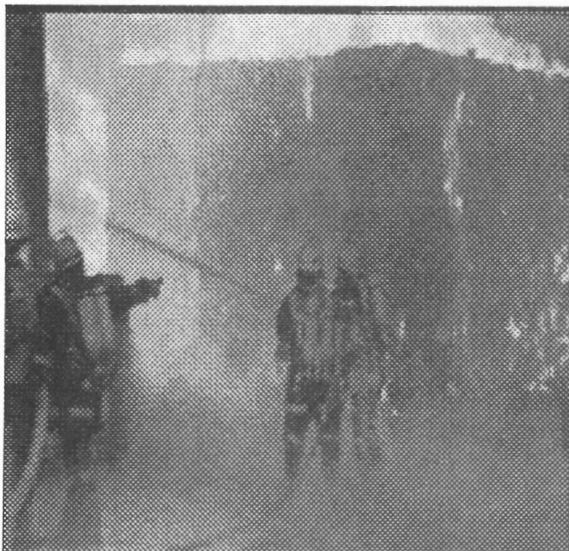


Abbildung 7.3: Videobild vom Großbrand in Miesbach 1996

Der mobile Löschangriff ohne Unterstützung durch eine stationäre Löschanlage erfordert sowohl das Ablöschen der erreichbaren brennenden Oberflächen als auch die Bekämpfung der verdeckten Brände. Die Löschtaktik ist damit nicht mehr nur auf die gezielte Bekämpfung verdeckter Brände zu orientieren, sie muß auf die Beherrschung des entwickelten Vollbrandes ausgerichtet sein. Das bedeutet zunächst, eine erfolgversprechende Angriffsrichtung für einen konzentrierten Löschmitteleinsatz auszuwählen. Nach dem Ablöschen der erreichbaren Oberflächen muß dann mit geänderter Taktik das Löschen der verdeckten Brände erfolgen. Die Brände in Lengerich 1992 und Düsseldorf 1995 belegen diese Aussagen.

Besitzt das Lager keine stationäre Löschanlage, ist bei Beginn des Löschangriffes durch die Feuerwehr mit hoher Wahrscheinlichkeit ein strukturierter Vollbrand zu erwarten. Gleichzeitig wird aber deutlich, daß vollentwickelte Brände auf Flächen $> 500 \text{ m}^2$ nur durch den gezielten und konzentrierten Einsatz mehrerer Feuerwehren mit optimaler Löschtaktik beherrscht werden können.

8. Schlußfolgerungen für die Weiterführung der Arbeiten

Die Analyse der Brandschutzkonzepte für die Sekundärrohstoffverarbeitung zeigte aus der Sicht des abwehrenden Brandschutzes folgende offenen Probleme, für die Forschungsbedarf vorhanden ist:

- Untersuchung der Ausbildung von verdeckten Bränden in Schüttungen als Folge eines offenen Flammenbrandes und infolge von Selbstentzündungsreaktionen innerhalb der Schüttung
- Schaffung von Voraussetzungen für eine sichere, mobile Erkennung und Bekämpfung derartiger Brandherde
- Untersuchung der Gefahren, die von brennbaren Treibgasen aus Sprayflaschen bezüglich der Zündung von Sekundärrohstoffen und der Steigerung der Brandausbreitung nach der Zündung ausgehen
- Erarbeitung einer Grundtaktik für die mobile Brandbekämpfung in Lagern von Sekundärrohstoffen und Altreifen mit Berücksichtigung der Anforderungen an Lageerkundung, Angriffswege, Einsatz und Kombination unterschiedlicher Löschverfahren und Nutzung von Hilfstechnik
- Schaffung verallgemeinerungswürdiger Aussagen zur akuten Toxizität der Rauchgase unter Berücksichtigung der anorganischen und organischen Bestandteile, Ableitung von Kriterien zur Beurteilung permanent wirkender toxischer Stoffe nach Bränden und Erarbeitung von Empfehlungen für einzuleitende Maßnahmen

9. Literaturverzeichnis

- [1] TÖPFER, K.-H., Kreislaufwirtschaft statt Abfallbeseitigung, Umwelt, Information des Bundesministers f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 9(1992)
- [2] THOME-KOZMIENSKY, S., Die Verpackungsverordnung, Schriften der Umwelt Band 42, Dunker & Humboldt Verlag- Berlin 1994
- [3] TILLMANN, K.-O., Handbuch Abfall, Wirtschaft und Recycling, Vieweg-Verlag 1993
- [4] LANGER, H.;SIEF, K., Mengen und Zusammensetzung von Abfällen, Zeitschrift f. Behandlung und Beseitigung von Abfällen 14, Beiheft zu Müll und Abfall 1992
- [5] HARTUNG, H.; KOCH, D., Mengen, Verwertung und Entsorgung von Altreifen in der BRD, Forschungsbericht 103 03 220/01 UBA 89-149, 1991
- [6] GLATHE, H.; KÜSTER, E.; NIESE, G.; KLOPOTEK, A., Biologie der Rotteprozesse bei der Kompostierung von Siedlungsabfällen, Müll-Handbuch, Erich Schmidt Verlag 1989
- [7] PLEß, G., Studie über Brandentstehung und Glimmbrände in Mülldeponien, IdF-Bericht, Heyrothsberge 1992
- [8] AUTORENKOLLEKTIV, Handbuch der Branduntersuchung, Ministerium des Innern der UVR, Gruppenkommando für Unterricht und Propaganda, Budapest 1972
- [9] KIERZEK, K., Versuche zur Bestimmung der Parameter von Glimmbränden, Laborprotokolle des IdF, unveröffentlicht, Heyrothsberge 1995
- [10] Versuche zur Zündung von Sprayflaschen bei Belastung mit Radladern, unveröffentlichte Beobachtungen, Porta Wasfalica 1994
- [11] AUTORENKOLLEKTIV, Brandschutz- und Sicherheitstechnische Kennwerte gefährlicher Stoffe, Staatsverlag der DDR, Berlin 1988
- [12] RIETZ, G., Chemie der Brandstoffe und Löschmittel, Lehrmaterial für die Vorlesung, Heft 5, Technische Hochschule Magdeburg, 1979
- [13] HEDERMANN, D., Stoff- und Energieumsätze bei der Ausbreitung von Schwel- und Glimmbränden an Probekörpern aus Cellulose, Sicherheitswissenschaftliche Monographien Band 16, Gesellschaft für Sicherheitswissenschaft, Wuppertal 1993
- [14] PLEß, G.; KIRCHWITZ, K.-D., Glimmbrandbekämpfung auf einer Mülldeponie, Brandschutz Deutsche Feuerwehr Zeitung 3(1993), S. 222-225
- [15] AUTORENKOLLEKTIV, Abbrandgeschwindigkeiten fester Stoffe, Arbeitshinweis des Leiters der Hauptabteilung Feuerwehr der DDR, Berlin 1986.
- [16] PLEß, G.; SELIGER, U., Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten, Teil 1: Beurteilung der Phasengrenzfläche und Löschversuche an ebenen Flächen, IdF - Forschungsbericht Nr. 316, Heyrothsberge 1994
- [17] PLEß, G.; STEINBACH, K., Bewertung der Brandentstehungsursache beim Brand der Kirche St. Laurentius, Halle, unveröffentlicht, IdF 1986
- [18] PLEß, G. WIENECKE, F. HERRMANN, H., Brand- und Löschversuche an Polypropylen-Kleinladungsträgern, IdF-Forschungsbericht Nr. 301, Heyrothsberge 1992
- [19] PLEß, G.; SELIGER, U.; WIENECKE, F., Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten, Teil 3: Wechselwirkung zwischen Löschwassertropfen und Plastoberflächen, Einbringung von Wassertropfen in Kanäle verdeckter Brände und organische Schadstoffe bei Plastbränden, IdF -Forschungsbericht Nr. 348, Heyrothsberge 1996

- [20] HELMDACH, J., Taktische Maßnahmen der Brandbekämpfung in Kohlebunkern, unveröffentlichter Bericht zum Einsatz in Kohlebunkern, Schwarze Pumpe 1982
- [21] RIETZ, G.; BUSSE, U., Entwicklung und Prüfung von Flammenschutzmitteln für zellulosehaltige Materialien, Brandschutz Explosionsschutz, Aus Forschung und Praxis, Heft 14, S.102, Staatsverlag der DDR 1986
- [22] LEIDT, K.H.; KIRCHWITZ, K. D.; PLEß, G., Ergebnisbericht und Gutachten zur Glimmbrandbekämpfung auf der Deponie Magdeburg Hängelsberge, unveröffentlichter Ergebnisbericht und Gutachten der Deutec GmbH, Magdeburg 1994
- [23] Brandschutztechnische Richtlinien für die Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff, Verband der Kunststoffherzeugenden Industrie e.V. Frankfurt, 06/1994
- [24] Musterrichtlinie über den Brandschutz bei der Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoffen (Kunststoff-Lager-Richtlinie) der ARGEBAU, 11/1995
- [25] VdS-Richtlinie 2513, Brandschutztechnische Richtlinien für die Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff, Verband der Schadensversicherer e. V., Nr. 06/96(01), Köln
- [26] Entwurf eines Brandschutzkonzeptes für DSD-Sortierbetriebe, Verband der Entsorger, 1996
- [27] GLAWE, M., Untersuchung möglicher Brandflächen innerhalb von Brandabschnitten verschiedener Lager im Verhältnis zur Lagerfläche und Ableitung wesentlicher Bedingungen zur Ausbildung verdeckter Brandflächen, Diplomarbeit 1996 Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
- [28] GRAND, A. F., Steady State Combustion of Polymeric Materials in Characterisation and Toxicity of Smoke, J. ASTM Committee E-5 on Fire Standards, Philadelphia 1990
- [29] Einhorn, F., Toxic products in Nehorlavost polymernich materialov, Dom techniky SVTS; Bratislava 1976, S.122ff
- [30] VdS-Leitlinie zur Brandschadensanierung, VdS-Nr. 2357 01/94 (01), Köln
- [31] VFDB Richtlinie 10/03 Schadstoffe bei Bränden Entwurf 1996, VFDB-Zeitschrift 09(1996) S. 134-142
- [32] Auswertung einer Besichtigung des Recyclingprozesses bei der Firma Tönsmeier Porta Westfalica, September 1996, IdF-Protokoll unveröffentlicht
- [33] KRETZSCHMAR, A.; PLEß, G. u.a., Verfahren zur Erzeugung einer Filmströmung großer Lauflänge und großer Filmdicke, WP DD 266030, A62C 3/08 vom 24.07.87
- [34] Löschversuche an Kunststoffballen im Auftrag des VdS und verschiedener Entsorgungsunternehmen, Minimax AG Bad Oldesloe 1996, unveröffentlichtes Material
- [35] KUNKELMANN, J., Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind, Teil 11: Großbrandversuche 6 - Brandausbreitung in Palettenlagern und Vergleich mit Gitterbox- und Blocklagerung, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Forschungsbericht Nr. 88, 09/1994
- [36] Großbrand eines Kunststofflagers in Lengerich im Oktober 1992, Dokumentation, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft, Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen, Stadt Lengerich
- [37] CIMOLINO, U., Einsatzbericht, Der Feuerwehrmann 12(1995), S. 383
- [38] KINDLER, W.; MUHS, A., Feuerwehr legt Feuer, Video für Explosiv Magazin, RTL Studio Köln 1996
- [39] FLAUSAUS, H., Gernsheim am Rhein: Reifenlagerbrand, Einsatzbericht, Brandschutz Deutsche Feuerwehr-Zeitung 1(1993), S. 40-47
- [40] ZÜLL, R., Großbrand bei Reifenfirma, Der Feuerwehrmann, 4(1993), S. 128-129