

	<b>Richtlinie</b> <b>Schadstoffe bei Bränden</b>	<b>vfdb-Richtlinie</b> <b>10 / 03</b>
--	---	--

Der Verbrennungsprozeß bei einem Schadenfeuer liefert unterschiedlichste Reaktionsprodukte aus der Verbrennung, Verschwelung (bei Sauerstoffunterschuß), Zersetzung und Pyrolyse (bei Abwesenheit von Sauerstoff). Die Palette dieser Reaktionsprodukte umfaßt viele gesundheitsgefährdende Stoffe, die in den Rauchgasen, in Ruß, Aschen und den Verbrennungsrückständen enthalten sein können.

Für den optimalen Schutz der Einsatzkräfte vor Schadstoffen bei Bränden sind während der Brandbekämpfung und nach Abschluß der Löscharbeiten daher Vorgaben zur Schutzausrüstung und zum Verhalten im Einsatz zu beachten.

In der vorliegenden Richtlinie, die Ergebnisse einer Arbeitsgruppe der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren berücksichtigt, werden erforderliche Maßnahmen zum Schutz der Einsatzkräfte während der Brandbekämpfung und in der Abkühlungsphase fixiert und Möglichkeiten der Einschätzung von Gefahrenschwerpunkten bei Bränden und innerhalb der Brandobjekte aufgezeigt.

Die Richtlinie ist so gegliedert, daß die wichtigsten Punkte in einem Merkblatt (Teil 1) zusammengefaßt sind. In Teil 2 ("Feuerwehrteil") werden die einsatztaktischen Maßnahmen behandelt. Weiterführende Erläuterungen und wissenschaftliche Hintergrundinformationen sind dem 3. Teil zu entnehmen.

Die Richtlinie wurde mit dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft GDV (ehemals VdS) unter Einarbeitung der Inhaltsmerkmale der Leitlinie zur Brandschadensanierung des GDV abgestimmt.

Begründete Einsprüche zum Entwurf vom Mai 1996 wurden berücksichtigt. Am 19.05.1997 hat der Vorstand der vfdb der Richtlinie in der vorliegenden Fassung zugestimmt.

Referat 10 - Umweltschutz - des Technisch Wissenschaftlichen Beirates der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.  
Aidenbachstraße 7, 81379 München.

26.08.97

## 1 Inhaltsverzeichnis

1 Inhaltsverzeichnis	2
2 Merkblatt	3
3 Maßnahmen der Einsatzkräfte bei Bränden (Feuerwehrteil)	4
3.1 Taktische Maßnahmen	4
3.1.1 Tabelle: Einsatzbekleidung, Schutzmittel und Löschtaktik innerhalb der Brandphasen	5
3.2 Organisatorische und hygienische Maßnahmen an der Einsatzstelle	5
3.3 Maßnahmen nach Abschluß der Brandbekämpfung	6
3.3.1 Tabelle: Empfehlungen zur Brandschadensanierung und Brandentschuttung (aus Leitlinie zur Brandschadensanierung, VdS - Nr. 2357)	7
3.4 Organisatorische und hygienische Maßnahmen auf der Feuerwache	7
4 Beurteilung der Schadstoffe bei Bränden (weiterführende Erläuterungen)	9
4.1 Einteilung der im Brandfall anfallenden Stoffe in Kategorien	9
4.2 Brandphasen	10
4.3 Entstehung von Schadstoffen bei Bränden	12
4.3.1 Dampfbildung	12
4.3.2 Produkte unvollständiger Verbrennung	12
4.3.3 Verbrennungsprodukte	13
4.3.3.1 Tabelle: Oxidationsprodukte und Nebenprodukte bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit Heteroatomen	14
4.4 Zuordnung der Verbrennungs- und Zersetzungsprodukte zu Brandphasen und Brandstoffen	15
4.4.1 Tabelle: Mögliche Verbrennungs- und Brandfolgeprodukte in den verschiedenen Brandphasen	16
4.5 Organische Verbindungen bei Bränden	19
4.5.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	19
4.5.2 Polyhalogenierte Dibenzo-para-Dioxine und Dibenzofurane	19
4.5.3 Aromatische Kohlenwasserstoffe	22
4.5.4 Aliphatische Aldehyde	22
4.5.5 Amine und Nitrile	22
5 Anhang Tabellen zu Kennwerten	24
6 Literaturverzeichnis	33

## 2 Merkblatt

### Schadstoffe bei Bränden

Brandrauch enthält immer gesundheitsschädliche Stoffe, die über Mund, Atemwege oder die Haut in den Körper aufgenommen werden können. Bei Beachtung der nachstehenden Verhaltensregeln kann sich der Feuerwehrmann weitgehend schützen:

- ▶ Während der Brandbekämpfung und während der Aufräumarbeiten - solange die Brandstelle "warm" ist (1 bis 2 Stunden nach Feuer aus) - ist grundsätzlich Atemschutz zu tragen (FwDV 7 beachten)
- ▶ Einsatzfahrzeuge sind - soweit möglich - außerhalb der Rauchgaszone aufzustellen.  
Das Eindringen von Rauchgasen in das Innere der Mannschaftskabinen ist zu verhindern.  
Essen, Trinken und Rauchen bei Einsätzen sind nur nach gründlicher Reinigung von Gesicht und Händen und außerhalb der Bereiche von Rußniederschlag und Rauchgaswolke gestattet.
- ▶ Nach dem Einsatz ist an der Einsatzstelle eine Grobreinigung von Einsatzbekleidung und Gerät durchzuführen. Stark verschmutzte Geräte und Kleidungsstücke sollten gesondert in einem Plastiksack verwahrt werden.
- ▶ Das Betreten von Aufenthalts- und Sozialräumen sowie Verlassen der Wache mit verschmutzter Dienstbekleidung sind nicht gestattet.
- ▶ Einsatzpersonal, das Rauch und Ruß ausgesetzt war, sollte duschen und mit Ruß stark verschmutzte Einsatzbekleidung wechseln. An verschmutzten Geräten ist eine Feinreinigung durchzuführen, bevor eine Einsortierung in die Fahrzeuge erfolgt.

### **3 Maßnahmen der Einsatzkräfte bei Bränden (Feuerwehrteil)**

#### **3.1 Taktische Maßnahmen**

Bereits bei der Einsatzplanung kann durch Beurteilung der möglichen Brandbedingungen (Brandbild, Brandgut, bauliche Gegebenheiten etc.) eine Gefährdungseinschätzung von Objekten vorgenommen werden. Dabei sollten zunächst die zu erwartenden Rauchgase und die möglichen Konsequenzen abgeschätzt werden. Bei Brandeinsätzen ist grundsätzlich die vorgeschriebene Einsatzbekleidung einschließlich Unterbekleidung zu tragen. Die Einsatzkräfte vor Ort sind auf die erforderliche Mindestanzahl zu reduzieren. Nicht eingesetzte Kräfte sind außerhalb der Zone des Rußniederschlags und der Rauchgasausbreitung zu stationieren.

Rußexposition von Einsatzfahrzeugen und Gerät ist nach Möglichkeit zu vermeiden. Es ist auch darauf zu achten, daß mit Ruß beaufschlagtes Löschwasser von den Fahrzeugen ferngehalten wird. Stark verrußte Geräte müssen vor deren Abtransport an der Einsatzstelle vorgereinigt werden.

Beim Einsatz der Fahrzeuge im Bereich der Rauchgaszone ist zu prüfen, ob sich saure Produkte aus dem Rauchgas niedergeschlagen haben (pH-Wert). Durch Abspülen mit Wasser können die Niederschläge beseitigt werden.

Während der Brandbekämpfung und in der Nachlöschphase ist grundsätzlich Atemschutz zu tragen (FwDV 7 beachten), beim Innenangriff immer nur umgebungsluftunabhängiger Atemschutz! Die Einsatzbekleidung sollte in Verbindung mit der Schutzmaske einen vollständigen Schutz vor Rauchgasen und Ruß gewähren.

### 3.1.1 Tabelle: Einsatzbekleidung, Schutzmittel und Löschtaktik innerhalb der Brandphasen

Schutzausrüstung	Brandbekämpfung	Nachlösch- und Abkühlungsphase	Aufräumarbeiten auf der kalten Brandstelle
Feuerwehreinsatzbekleidung	immer	immer	immer
umgebungsluftunabhängiger Atemschutz	in Räumen immer, grundsätzlich bei Rauchgasexposition im Freien	grundsätzlich in Räumen, bei ausgasenden Stoffen im Freien mit erkennbarem Gefahrenpotential (Gefährdungsbereiche 2 und 3)	
umgebungsluftabhängiger Atemschutz Filter ABEK 2-P3	nur im Freien zulässig	in Räumen bei ausreichender Lüftung, bei ausgasenden Stoffen im Freien	
Staubschutzmaske	nicht zulässig	nicht zulässig	bei Ruß- und Staubaufwirbelung
Schutzhandschuhe	immer	immer	immer
Schutzhaube	empfohlen	empfohlen bei Rußexposition	empfohlen bei Rußexposition

### 3.2 Organisatorische und hygienische Maßnahmen an der Einsatzstelle

Die Brandstelle muß während des Feuerwehreinsatzes in jedem Fall gesichert und abgesperrt werden. Brandräume sind nach jedem Löschen des Brandes („Feuer aus“) über einen Zeitraum von mindestens 1 bis 2 h zu belüften, um flüchtige Verbindungen (z.B. Aromaten) zu entfernen.

Bei Nachlöscharbeiten und der Belüftung von Brandräumen sollte die Aufwirbelung von Ruß oder Asche vermieden werden; vor allem bei Flockenruß ist die Gefahr der Verschleppung groß.

Nach Beendigung der Löscharbeiten sollte die gesamte Ausrüstung einschließlich der persönlichen Einsatzbekleidung vor Ort grob von anhaftenden Rußspuren gereinigt werden. Anhaftende Rußteile und verschmutzte Stellen an Geräten und der persönlichen Ausrüstung (Helm, Stiefel, Atemschutzgerät) müssen mit Wasser vorgereinigt werden. Kriterium für den Reinigungserfolg ist die Entfernung sichtbarer Rußspuren. Teile der Einsatzbekleidung mit sichtbaren Rußspuren sollten abgelegt

und gesondert transportiert werden (Kunststoffbeutel). Die vorgereinigten Geräte sollten ebenfalls gesondert transportiert und erst nach erfolgter Reinigung auf den Löschfahrzeugen eingeordnet werden.

Die Kabinen der Löschfahrzeuge sollten während des Einsatzes geschlossen bleiben.

Nach dem Einsatz sind die Kabinen kurzzeitig gut zu durchlüften.

Die Einnahme von Einsatzverpflegung und das Rauchen sind nur nach gründlicher Reinigung von Gesicht und Händen zu gestatten. Kriterium für eine ausreichende Reinigung ist, daß keine sichtbaren Rußspuren nach der Reinigung vorhanden sind.

Die Einnahme der Verpflegung muß außerhalb des Brandbereiches, des Rußniederschlages und der Rauchgaswolke erfolgen.

Diese Grundsätze gelten auch bei Begehungen und Aufräumarbeiten sowie nach Beendigung der Brandbekämpfung.

### **3.3 Maßnahmen nach Abschluß der Brandbekämpfung**

Nach Abschluß der Brandbekämpfung sollte aus der Gesamtheit der am Brand beteiligten Stoffe (Brandgut) unter Berücksichtigung der Brandbedingungen (Brandbild) abgeschätzt werden, ob Schadstoffe in solcher Menge entstanden sein können, die eine analytische Untersuchung erforderlich machen [Anteile an Chloraromaten (Prädioxinen), Aromaten, Halogenverbindungen, Pflanzenschutzmittel].

Dazu kann die in der Leitlinie des GDV zur Brandschadensanierung getroffene Eingruppierung in Gefährdungsbereiche herangezogen werden.

Diese werden wie folgt definiert:

#### **Gefährdungsbereich 0**

Brände, bei denen nur relativ kleine Mengen verbrannt sind, z.B. Papierkorbbrand, Kochstellenbrand, mit räumlich begrenzter Ausdehnung und mit auf den Brandbereich beschränkter Verschmutzung.

#### **Gefährdungsbereich 1**

Ausgedehntere Brände im Wohnbereich, z.B. Küchen-, Zimmer-, Wohnungs-, Keller- und Dachraumbrände; Brände in Büros, öffentlichen Gebäuden, Schulen, Praxen, Läden, Gaststätten, Werkstätten sowie alle sonstigen Brände, bei denen keine größeren Mengen an chlor- oder bromorganischen Stoffen, insbesondere PVC (z.B. Ansammlung von Elektrokabeln), beteiligt waren oder bei denen aufgrund des Brandbildes eine nennenswerte Schadstoffkontamination nicht zu erwarten ist.

## Gefährdungsbereich 2

Brände, an denen größere Mengen an chlor- oder bromorganischen Stoffen, insbesondere PVC, beteiligt waren und bei denen aufgrund des Brandbildes eine nennenswerte Schadstoffkontamination auf der Brandstelle wahrscheinlich ist.

## Gefährdungsbereich 3

Brände im gewerblichen und industriellen Bereich mit Beteiligung von größeren Mengen der im folgenden aufgeführten kritischen Stoffe (z.B. als Roh-, Hilfs- oder Betriebsstoffe eingesetzt) sowie weiterer giftiger oder sehr giftiger Stoffe im Sinne der Gefahrstoffverordnung:

- Polychlorierte Biphenyle (PCB), derzeit noch enthalten in elektrischen Betriebsmitteln, wie Transformatoren und Kondensatoren,
- Pentachlorphenol (PCP) als Bestandteil von Holzschutzmitteln und Holzimprägnierungsmitteln, soweit größere Gebinde betroffen sind,
- Pflanzen- und Vorratsschutzmittel in größeren Gebinden.

Auf der Grundlage dieser Einteilung werden durch den GDV die in Tabelle 3.3.1 fixierten Maßnahmen empfohlen.

### 3.3.1 Tabelle: Empfehlungen zur Brandschadensanierung und Brandentschuttung (aus Leitlinie zur Brandschadensanierung, VdS - Nr. 2357)

Gefährdungsbereich	Hinzuziehung von Sachverständigen	Reinigung / Sanierung	Entsorgung
0	nein	Reinigung ohne besondere Maßnahmen	Hausmüll
1	grundsätzlich nein	Reinigung/Sanierung mit Schutzmaßnahmen*	Hausmüll oder Sondermüll
2	dringend empfohlen	Sanierung mit besonderen Schutzmaßnahmen*	Entsorgungskonzept
3	zwingend erforderlich	Sanierung mit besonderen Schutzmaßnahmen*	Entsorgungskonzept

\* geregelt in Leitlinie zur Brandschadensanierung VdS - Nr 2357 01.94 (01)

In den Gefährdungsbereichen 2 und 3 wird die Einschaltung eines Sachverständigen für die Brandschadensanierung dringend empfohlen bzw. zwingend erforderlich. In Tabelle 3.3.2 (Anhang) ist ein Ablaufschema für die Brandschadensanierung dargestellt.

### **3.4 Organisatorische und hygienische Maßnahmen auf der Feuerwache**

Nach jedem Einsatz erfolgt eine Feinreinigung der eingesetzten Geräte und Fahrzeuge sowie die persönliche Reinigung der Einsatzkräfte.

Die Stiefel sind gründlich zu reinigen. Schmutz- und Rußspuren (auch im Sohlenbereich) müssen gegebenenfalls durch wäßrige Seifenlösung abgewaschen werden. Erst nach Beseitigung der Ruß- und Schmutzspuren sollten die Stiefel gefettet werden, weil sich Schadstoffe im Fett lösen.

Stark verschmutzte Einsatzbekleidung (Ruß) sollte nach dem Brandeinsatz gewechselt werden. Eine Reinigung mit handelsüblichen Reinigungsmitteln ist möglich. Kriterium für eine ausreichende Reinigung ist, daß keine sichtbaren Rußspuren nach der Reinigung vorhanden sind.

Mit Ruß beaufschlagte Körperstellen sollten zunächst mit kaltem Wasser und Seife örtlich vorgereinigt werden. Dadurch bleiben die Poren der Haut geschlossen und der Ruß ist leicht zu entfernen. Erst nach Beseitigung der sichtbaren Spuren kann die gründliche Körperreinigung mit warmem Wasser erfolgen. Der Einsatz von Hautpflegemitteln darf erst nach der gründlichen Körperreinigung erfolgen. Ebenso ist die Reinigung mit organischen Lösungsmitteln oder fetthaltigen Stoffen zu vermeiden. In diesen Produkten können sich Schadstoffe lösen. Die Feinreinigung gilt als erfolgreich, wenn nach dem Waschvorgang mit handelsüblichen Körperreinigungsmitteln keine sichtbaren Rußspuren mehr vorhanden sind.

In der Feuerwache ist eine Trennung von Privat- und Einsatzbekleidung erforderlich. Das Verlassen der Wache in verschmutzter Dienstkleidung ist nicht zulässig.



## 4 Beurteilung der Schadstoffe bei Bränden (weiterführende Erläuterungen)

### 4.1 Einteilung der im Brandfall anfallenden Stoffe in Kategorien

Bei Bränden sind im wesentlichen sechs stoffliche Kategorien zu erwarten, die toxische oder in sonstiger Weise gefährliche Stoffe bilden bzw. enthalten können:

- **Brandstoff** : Ausgangsmaterial für den Brand und Brandfolgeprodukte  
Durch die thermische Belastung des brennbaren Stoffes kommt es zur Bildung von mineralisierten Oxidationsprodukten, Monomeren, linearen Kettenbruchstücken, deren Kondensation zu Aromaten und Vernetzung zu kondensierten Aromaten.
- **Asche**: nichtbrennbarer Rückstand des Brandgutes  
Die großen Oberflächen in den porösen Aschen besitzen adsorptive Eigenschaften. An ihnen können sich viele Stoffe (Aromaten, Chloraromaten, Kondensationsprodukte) anlagern. Adsorbierte Verbindungen bleiben über längere Zeiträume gebunden und sind daher nur in begrenztem Maße bioverfügbar. Die Aschen sind teilweise löslich in Wasser.
- **Schlacke**: geschmolzene und nachträglich erstarrte nichtbrennbare Anteile  
Die Schlacke kann Einschlüsse unverbrannter und zersetzter Produkte enthalten. Dabei können nahezu alle denkbaren Verbindungen, einschließlich Gase oder leichtflüchtige Produkte, eingeschlossen werden.
- **Ruß mit Kondensationsprodukten**  
An den Ruß ist die Mehrzahl der teerartigen Verbindungen, kondensierten Aromaten, vernetzten Verbindungen, PCDD/PCDF (PBrDD/PBrDF) und flüchtigen Kondensate gebunden. Besonders hohe Anteile flüchtiger Aromaten wie Benzol, Chlorbenzole, Phenole und andere leichtflüchtige Verbindungen mit nicht zu unterschätzender Toxizität sind vor allem unmittelbar nach dem Brand an den Rußoberflächen adsorbiert bzw. kondensiert. Schwerflüchtige Verbindungen bleiben über lange Zeiträume an Ruß gebunden und sind daher nur in begrenztem Maße bioverfügbar.
- **Löschmittel**  
Das gebrauchte Löschmittel enthält überwiegend Wasser, Tenside und Salze.

Im Löschwasser können Stoffe gelöst oder emulgiert vorliegen. Teilweise besteht durch Lösungsvermittler die Tendenz auch unlösliche Verbindungen mitzuschleppen.

– **Rauchgase**

**Heiße Rauchgase** enthalten neben dem Stickstoff der Luft Mineralisierungsprodukte, Dämpfe, Ruß und Flugaschen. Die Schädwirkung resultiert aus Oxidationsprodukten ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{P}_4\text{O}_{10}$ ), Nebenprodukten ( $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{COCl}_2$ , organische Oxidationsprodukte) sowie Pyrolyseprodukten.

**Kalte Rauchgase** enthalten kaum noch Dämpfe oder kondensierte flüssige Schadstoffe. Diese lagern sich überwiegend an Ruß und Flugaschen an. In kalten Rauchgasen besitzen vor allem die gasförmigen Verbindungen  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{COCl}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  und Halogenwasserstoffe schädigende Wirkungen.

## 4.2 Brandphasen

Brände können während ihres Ablaufs in 5 zeitlich verschiedene Phasen eingeteilt werden, die auch durch unterschiedliche Entstehungsraten und Emission von Schadstoffen gekennzeichnet sind. Während der Verbrennung gebildete Schadstoffe können in der heißen Brandphase dampfförmig oder adsorbiert an Ruß bzw. Flugasche aus der Brandstelle ausgetragen werden. Mit Abkühlen der Rauchgase findet eine zunehmende Adsorption der dampfförmigen Schadstoffe an die Rußpartikel bzw. Flugasche statt. An Ruß gebundene Schadstoffe manifestieren sich als sichtbare Verschmutzung.

Ziel aller Reinigungs- und Sanierungsmaßnahmen nach Brandschäden ist es, die Schadensstelle zu entschütten, baulich wiederherzustellen und alle brandbedingten Verschmutzungen zu entfernen. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, daß mit der Entfernung der brandbedingten Verschmutzungen auch die Schadstoffe beseitigt werden. Die Erfahrung aus vielen Brandschäden zeigt nämlich, daß hochtoxische Stoffe wie Dioxine und Furane nur dort nachweisbar waren, wo optisch deutlich wahrnehmbare Brandverschmutzungen (Ruß- bzw. Staubniederschlag) vorlagen.

– **Entstehungsbrand**

Die Brandentwicklung ist durch deutliche Flammenbildung und geringe Rußmengen in der Rauchgasfahne gekennzeichnet. Die Sauerstoffkonzentration im Brandbereich ist hoch. Es entstehen hauptsächlich Produkte der vollständigen Oxidation und als Nebenprodukte CO sowie NO<sub>x</sub>.

– **Vollbrand**

Für die vorhandenen Brandbedingungen hat sich ein stabiler Abbrand mit konstanten Temperaturen, Strahlungswerten und Masseströmen des verbrennenden Stoffes, der Zuluft und der Abgase eingestellt. Die Luftzufuhr und die Verbrennungstemperatur bestimmen die Art und Menge der entstehenden Schadstoffe. Ein Indikator für die Entstehung schädigender Stoffe ist die Rußbildung.

– **Brandbekämpfung**

Die Brandbekämpfung umfaßt den Zeitraum von Beginn der Löschmaßnahmen bis zum Ablöschen des Flammenbrandes. Glutnester und glimmendes Material können noch vorhanden sein. Mit zunehmender Wirkung des Löschmittels werden ungünstigere Brandbedingungen und damit mehr Schadstoffe entstehen. Niedrigere Temperaturen und geringe Sauerstoffkonzentrationen (Schwelbrandbedingungen) in den Flammen sind die Ursache. Eine schnelle Brandbekämpfung und die Abdeckung bzw. Kühlung der gelöschten Fläche sind damit auch aus der Sicht der Minimierung der Schadstoffmengen notwendig.

– **Nachlös- und Abkühlungsphase**

Unmittelbar nach dem Löschen werden infolge der noch herrschenden Temperaturen der Umgebung bzw. des Brandstoffes weiter Schadstoffe durch Verdampfung und/oder Zersetzung in die Umgebungsluft abgegeben. Die Konzentrationen dieser Stoffe können infolge des vorhandenen Temperaturniveaus erheblich sein. Durch Belüftung und Abkühlung sowie gezieltes Löschen der Glutnester kann diese Phase verkürzt werden, damit baldmöglichst mit den Aufräumarbeiten in den Brandobjekten begonnen werden kann.

#### – **Aufräumarbeiten auf der kalten Brandstelle**

Nach der Abkühlung (1 bis 2 Stunden nach „Feuer aus“) sind wesentliche Anteile von Schadstoffen verdampft und die organischen, meist wasserunlöslichen Schadstoffe sind adsorptiv an Ruß bzw. Aschen gebunden. Die Möglichkeit der Übertragung von Schadstoffen auf Personen sowie die biologische Verfügbarkeit dieser Stoffe im Körper sind gering. Eine Aufwirbelung von Stäuben und Ruß muß vermieden werden.

Nach bislang vorliegenden Erkenntnissen besteht bei der Begehung der erkalteten Brandstelle ohne Atemschutz zum Zweck einer ersten Übersicht grundsätzlich keine Gesundheitsgefährdung. Für die Brandursachenermittlung, Sanierungs- und Aufräumarbeiten sind dagegen wegen der längeren Aufenthaltszeiten konkrete Personenschutzmaßnahmen in Abhängigkeit des Gefährdungsbereiches einzuhalten.

### **4.3 Entstehung von Schadstoffen bei Bränden**

#### 4.3.1 Dampfbildung

Bei **brennbaren Flüssigkeiten** und einer großen Anzahl **niedermolekularer Feststoffe** (z.B. Naphthalin, Teer, Wachse und Fette) können sich leicht organische Dämpfe bilden, die insbesondere an den Rußanteilen angelagert werden. Es ist abzuschätzen, ob die im Brandfall anfallenden Stoffe oder Stoffgruppen eine erhöhte Gefährdung hervorrufen können.

Hierzu zählen:

- aromatische Verbindungen (Benzole, Phenole, Diphenylether, Biphenyle)
- Teer und Bitumen
- Halogenverbindungen

#### 4.3.2 Produkte unvollständiger Verbrennung

Durch **unvollständige Verbrennung** ist zu erwarten, daß in Abhängigkeit des Brandgutes

- aus Zwischenprodukten bei der Verbrennung eine Vielzahl organischer Verbindungen entstehen kann.

Ursachen für die unvollständige Verbrennung können sein:

- die Variation der Verbrennungstemperaturen und Verbrennungsbedingungen in weiten Bereichen und
- der Rückgang des für die Verbrennung notwendigen Sauerstoffs von 21 Vol.-% zu Brandbeginn an exponierten Brandorten bis auf weniger als 10 Vol.-% unter Glimmbrandbedingungen.

Bei Bränden ist stets mit der Bildung einer Vielzahl organischer Verbindungen als Nebenprodukte zu rechnen. Besonders hervorzuheben aus der Vielzahl der möglicherweise entstehenden Stoffe während des Brandes sind

- flüchtige **Aromaten** und **Chloraromaten**
- Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (**PAK**)
- Polychlorierte bzw. polybromierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (**PCDD/PCDF bzw. PBrDD/PBrDF**)
- Aliphatische **Aldehyde**

Eine Reihe weiterer **organischer Produkte** können sich bei höheren Temperaturen in ihre Ausgangsprodukte oder toxische Abbauprodukte zersetzen. Hier sind zu beachten:

- Pflanzenschutzmittel ( Isocyanate, Aromaten, Chlorverbindungen)
- Kunststoffe ( Amine, Nitrile, Cyanwasserstoff, Chlorwasserstoff und verschiedene Monomere)
- Naturprodukte (Cyanwasserstoff aus Haaren, Federn, Wolle und Eiweiß)
- Stickstoffverbindungen (Amine und Nitrile sowie Cyanwasserstoff)

#### 4.3.3 Verbrennungsprodukte

Brennbare Stoffe reagieren mit dem Sauerstoff der Luft unter Bildung von Oxiden. Im Brandfall muß zunächst davon ausgegangen werden, daß aus den **brennbaren organischen Verbindungen** anorganische **Oxidationsprodukte** entstehen. In Tabelle 4.3.3.1 sind die möglichen Oxidationsprodukte und wichtige Nebenprodukte aufgeführt.

#### 4.3.3.1 Tabelle: Oxidationsprodukte und Nebenprodukte bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit Heteroatomen

Element	Oxidationsprodukt	Reaktionsprodukte und Nebenprodukte bei unvollständiger Verbrennung
C	CO <sub>2</sub>	CO
H	H <sub>2</sub> O	
O	H <sub>2</sub> O , CO <sub>2</sub>	
N	N <sub>2</sub> ,	NO <sub>x</sub> NH <sub>3</sub> , NH <sub>2</sub> R (Stickoxide, Ammoniak, Amine)
S	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), H <sub>2</sub> S, HSR (Schwefeltrioxid, -wasserstoff, Mercaptane)
P	P <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	PH <sub>3</sub> (Phosphorwasserstoff)
Cl		HCl, Cl <sub>2</sub>
Br		HBr
F		HF
C, N		HCN
C, O , Cl		COCl <sub>2</sub> (Phosgen)

Die entstehenden Produkte sind in der Mehrzahl gas- oder aerosolförmig (Ausnahme Phosphorpentoxid oder H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) und befinden sich in der abströmenden Rauchgaswolke. **Wirkungen** auf Menschen treten in Folge hoher Konzentrationen am Entstehungsort **vor allem in geschlossenen Räumen und in der Rauchgaswolke** in unmittelbarer Nähe des Brandherdes auf. Wesentliche Auswirkungen von toxischen Gasen sind im Anhang (Tabellen 4.3.3.2 und 4.3.3.3) enthalten.

#### **4.4 Zuordnung der Verbrennungs- und Zersetzungsprodukte zu Brandphasen und Brandstoffen**

Eine Zuordnung von Verbrennungs- und Zersetzungsprodukten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Brandphasen und Brandstoffe kann sich nur auf wesentliche Stoffe beschränken. Aus dieser Tabelle 4.4.1 ist zu erkennen, daß bei fast allen Bränden mit Rußbildung auch PAK`s entstehen sowie halogenhaltige Verbindungen zu Chloraromaten und unter ungünstigen Brandbedingungen zu PCDD/PCDF`s führen können. Bei stickstoffhaltigen Verbindungen kann Blausäure (HCN) auftreten. Schwefel- und phosphorhaltige brennbare Stoffe, die vorzugsweise in Pflanzenschutzmitteln, Pharmazeutika und Insektenvernichtungsmitteln enthalten sind, liefern immer saure Rauchgase, die zu erheblichen Personen- und Sachschäden führen können. Besondere Schwerpunkte für die Entwicklung von Schadgasen sind die Vollbrandphase, die Brandbekämpfung und die Nachlösch- und Abkühlungsphase. In Tabelle 4.4.2 (Anhang) sind den in Tabelle 4.4.1 aufgeführten Brandstoffen wichtige chemische Verbindungen und technische Erzeugnisse zugeordnet.

#### 4.4.1 Tabelle: Mögliche Verbrennungs- und Brandfolgeprodukte in den verschiedenen Brandphasen

brennbarer Stoff	Brandphase:				Kalte Brandstelle Sanierung, Entschuttung, Entsorgung
	Entstehungsbrand	Vollbrand	Brandbekämpfung	Nachlöschen und Abkühlungsphase	
aliph. KW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, KW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Aromaten, PAK, gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, <b>Aldehyde</b> , Carbonsäuren	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Aromaten, PAK, gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, <b>Aldehyde</b> , Carbonsäuren	Aromaten, PAK, gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, <b>Aldehyde</b> , Carbonsäuren	(Aromaten), PAK, <b>Aldehyde</b>
aliph. CKW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>HCl</b> , <b>CKW</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>HCl</b> , COCl <sub>2</sub> , Aromaten, <b>Chlor(Brom)-aromaten</b> , PCDD/PCDF, gesättigte und ungesättigte KW, z.T. <b>CKW Vinylchlorid</b> , PBrDD/PBrDF	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>HCl</b> , Aromaten, <b>Chlor(Brom)-aromaten</b> , PCDD/PCDF gesättigte und ungesättigte KW, z.T. <b>CKW Vinylchlorid</b> , PBrDD/PBrDF	HCl, Aromaten, <b>Chlor(Brom)-aromaten</b> , PCDD/PCDF gesättigte und ungesättigte KW, z.T. <b>CKW Vinylchlorid</b> , PBrDD/PBrDF	<b>Chlor(Brom)-aromaten</b> , PCDD/PCDF PBrDD/PBrDF
Aromaten	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O <b>Aromaten, PAK</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> , <b>Aromaten, PAK</b> , Alkene, <b>Aldehyde</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O <b>Aromaten, PAK</b> , Alkene, <b>Aldehyde</b>	<b>Aromaten, PAK, Aldehyde</b>	<b>Aromaten, PAK, Aldehyde</b>
Chloraromaten	CO <sub>2</sub> , CO, HCl Chloraromaten	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCl, COCl <sub>2</sub> , <b>Chloraromaten, PCDD/PCDF</b> , gesättigte und ungesättigte KW, <b>CKW</b> , PBrDD/PBrDF	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCl, COCl <sub>2</sub> , <b>Chloraromaten, PCDD/PCDF</b> , gesättigte und ungesättigte KW, <b>CKW</b> , PBrDD/PBrDF	<b>Chloraromaten, PCDD/PCDF</b> , gesättigte und ungesättigte KW, <b>CKW</b> , PBrDD/PBrDF	<b>Chloraromaten, PCDD/PCDF</b> , CKW, PBrDD/PBrDF

1. Reihe

2. und folgende Reihen

fett

normal

( )

KW

CKW

Mineralisierungs- und Nebenprodukte

Schadstoffe der unvollständigen Verbrennung und Pyrolyse

Hauptanteile schädlicher Verbindungen

in den Rauchgasen, Ruß oder Flugaschen enthaltene schädliche Verbindungen

nur in geringeren Anteilen noch enthalten

Kohlenwasserstoffe

Chlorkohlenwasserstoffe



## Polymere

brennbarer Stoff	Brandphase:				Kalte Brandstelle Sanierung, Entschuttung, Entsorgung
	Entstehungs- brand	Vollbrand	Brandbe- kämpfung	Nachlös- und Abkühlungs- phase	
Polymer mit CH	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O  KW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O NO <sub>x</sub> , Aromaten, PAK, gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, <b>Aldehyde</b> Carbonsäuren	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O NO <sub>x</sub> Aromaten, PAK, gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, <b>Aldehyde</b> Carbonsäuren	Aromaten, PAK <b>Aldehyde</b>	Aromaten, PAK <b>Aldehyde</b>
Polymer mit Aromaten	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O  <b>Aromaten,</b> PAK	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O  <b>Aromaten,</b> <b>PAK,</b> Alkene, <b>Aldehyde,</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O  <b>Aromaten, PAK,</b> Alkene, <b>Aldehyde,</b>	<b>Aromaten, PAK,</b> Alkene, <b>Aldehyde,</b>	Aromaten, <b>PAK</b>
Polymer mit N	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O NO <sub>x</sub> ,Amine	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O <b>HCN, NO<sub>x</sub></b> <b>Ammoniak,</b> Aromaten, PAK, Amine, KW, Aldehyde, Carbonsäuren <b>Isocyanate</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O <b>HCN, NO<sub>x</sub></b> <b>Ammoniak,</b> Aromaten, PAK, Amine, KW, Aldehyde, Carbonsäuren, <b>Isocyanate</b>	Aromaten, PAK Amine, Aldehyde	Aromaten, PAK Amine, Aldehyde
Polymer mit Halogenen	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O <b>HCl, CKW</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O <b>HCl, COCl<sub>2</sub>,</b> <b>CKW,</b> <b>Chloraromaten</b> PCDD/DF, <b>Aromaten,</b> gesättigte und ungesättigte KW PBrDD/PBrDF	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O <b>HCl, COCl<sub>2</sub></b> <b>CKW,</b> <b>Chloraromaten</b> PCDD/DF, <b>Aromaten,</b> gesättigte und ungesättigte KW PBrDD/PBrDF	<b>CKW,</b> <b>Chloraromaten</b> PCDD/DF, <b>Aromaten,</b> gesättigte und ungesättigte KW PBrDD/PBrDF	<b>Chloraromaten</b> PCDD, PCDF, <b>Aromaten,</b> PBrDD/PBrDF

1. Reihe

2. und folgende Reihen

fett

normal

( )

KW

CKW

Mineralisierungs- und Nebenprodukte

Schadstoffe der unvollständigen Verbrennung und Pyrolyse

Hauptanteile schädlicher Verbindungen

in den Rauchgasen, Ruß oder Flugaschen enthaltene schädliche Verbindungen

nur in geringeren Anteilen noch enthalten

Kohlenwasserstoffe

Chlorkohlenwasserstoffe

## Naturprodukte, Schwefel- und Phosphorverbindungen

brennbarer Stoff	Brandphase:				Kalte Brandstelle Sanierung, Entschuttung, Entsorgung
	Entstehungsbrand	Vollbrand	Brandbekämpfung	Nachlöschen- und Abkühlungsphase	
Cellulose (Holz, Papier, Zellstoffe)	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>Aldehyde</b> , Aromaten, PAK, Alkohole, Essigsäure, KW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>Aldehyde</b> , Aromaten, PAK, Alkohole, Essigsäure, KW	<b>Aldehyde</b> , Aromaten, PAK, Alkohole, Essigsäure, KW	(Aromaten), PAK,
Eiweißprodukte (Wolle, Haare Federn)	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCN, SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>HCN</b> , <b>H<sub>2</sub>S</b> , <b>SO<sub>2</sub></b> , <b>Amine</b> , Aromaten, PAK, KW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>HCN</b> , <b>H<sub>2</sub>S</b> , <b>SO<sub>2</sub></b> , <b>Amine</b> , Aromaten, PAK	<b>Amine</b> , Aromaten, PAK	(Aromaten), PAK
org. Schwefelverbindungen	CO <sub>2</sub> , CO, <b>SO<sub>2</sub></b> Mercaptane	CO <sub>2</sub> , CO, <b>SO<sub>2</sub></b> , <b>H<sub>2</sub>S</b> Aromaten, PAK, KW	CO <sub>2</sub> , CO, <b>SO<sub>2</sub></b> , <b>H<sub>2</sub>S</b> Aromaten, PAK	Aromaten, PAK	(Aromaten), PAK
org. Phosphorverbindungen	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, P <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>P<sub>4</sub>O<sub>10</sub></b> , Aromaten, PAK	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, <b>P<sub>4</sub>O<sub>10</sub></b> , Aromaten, PAK	<b>Phosphorsäure</b> Aromaten, PAK	<b>Phosphorsäure</b> (Aromaten), PAK

1. Reihe

2. und folgende Reihen

fett

normal

( )

KW

CKW

Mineralisierungs- und Nebenprodukte

Schadstoffe der unvollständigen Verbrennung und Pyrolyse

Hauptanteile schädlicher Verbindungen

in den Rauchgasen, Ruß oder Flugaschen enthaltene schädliche

Verbindungen

nur in geringeren Anteilen noch enthalten

Kohlenwasserstoffe

Chlorkohlenwasserstoffe

## 4.5 Organische Verbindungen bei Bränden

### 4.5.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

**PAK** entstehen beim Verbrennen organischer Stoffe durch Kondensation von Kohlenstoffketten in der Flamme. Infolge der hohen Stabilität der Aromaten ist deren Bildung in Flammen mit hohem Brennstoffanteil begünstigt. Niedere Temperaturen bei der Verbrennung bewirken hohe PAK-Konzentrationen.

PAK sind weitgehend **unlöslich** in Wasser, **löslich** in Fetten und organischen Lösungsmitteln und gelten teilweise als **krebserzeugende** Stoffe. Die in geringsten Konzentrationen wirksame Leitsubstanz ist Benzo-(a)-pyren mit einem TRK-Wert von  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . PAK sind **seßhaft** und werden biologisch **schwer abgebaut**. Im Anhang ist eine Liste der wichtigsten PAK enthalten (Tabelle 4.5.1.1).

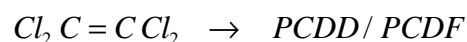
### 4.5.2 Polyhalogenierte Dibenzo-para-Dioxine und Dibenzofurane

**PCDD/PCDF (PBrDD / PBrDF)** sind kondensierte aromatische Verbindungen mit unterschiedlicher Zahl an Chloratomen im Molekül. Neben den PCDD/PCDF existieren auch PBrDD, deren kondensierte Ringe mit Bromatomen substituiert sind. Durch teilweise Oxidation organischer Zwischenprodukte während der Verbrennung entstehen Dibenzofurane (**PCDF bzw. PBrDF**) und Dibenzo-para-Dioxine (**PCDD bzw. PBrDD**). Die Bildung dieser Verbindungen ist durch folgende mehrstufige Reaktionen in Verbindung mit Sauerstoff denkbar:

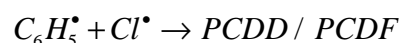
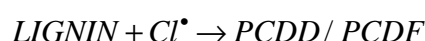
1. Direkte Vorstufen:



2. Aromatisierung von Chlororganika

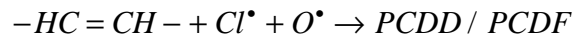


3. Pyrolyse und Chlorierung von natürlichen Aromateneinheiten



Chlorradikale aus Chloriden unter katalytischer Mitwirkung von Schwermetallionen.

#### 4. Aufbau von PCDD/PCDF aus C<sub>2</sub>-Einheiten



PCDD/PCDF sind weitgehend **unlöslich in Wasser, löslich in Fetten und organischen Lösungsmitteln**. Sie stellen **schwerflüchtige, hochsiedende Flüssigkeiten** oder bei Normaltemperatur **feste Stoffe** dar. Das bekannteste PCDD - Kongener, das 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin, ist ein fester Stoff mit einem Schmelzpunkt von 322 °C.

Der **Dampfdruck** dieser Verbindungen liegt **sehr niedrig**, so daß nur in heißen Rauchgasen oder in noch nicht abgekühlten Brandobjekten mit Dioxindämpfen zu rechnen ist. Bei PCDD/PCDF's sind bisher nur nach hohen Expositionen ein **humankanzerogenes Risiko und eine toxische Wirkung auf das Immunsystem** anzunehmen (BGA/UBA). Beobachtet wurden bisher bei Exposition:

- Reizungen der Schleimhäute, Rötung und Anschwellen des Gesichts,
- Chlorakne (Erkrankung des Follikel-Talgdrüsenapparates),
- Müdigkeit, Erregbarkeit, Muskelschmerzen,
- als Dauerfolgen werden Leberfunktionsstörungen, Hyperlipidämien, neurasthenische und depressive Syndrome, sensorische Beeinträchtigungen, Störungen des Kohlenhydratstoffwechsels, der Atemorgane, Störungen im Herz-Kreislauf-System, Harntrakt und Polyneuropathien angesehen.

Als Leitsubstanz und giftigster Vertreter gilt **2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin**. Im Anhang (Tabelle 4.5.2.1) sind vergleichsweise einige Dioxine und Furane in ihrer relativen Toxizität zur Leitsubstanz angegeben. Aus diesen Faktoren lassen sich dann sogenannte Toxizitätsäquivalente ( z. B. I-TE) berechnen.

Dioxine entstehen auch bei stofflichen **Umsetzungen im industriellen Bereich**. So erfolgt in der Bundesrepublik (alte Bundesländer) täglich eine Deposition von 12 pg I-TE/m<sup>2</sup>. Legt man diesen Wert zugrunde, so wird **jährlich ca. 1 kg I-TE** in die Umwelt eingetragen. In Tabelle 4.5.2.2 (Anhang) sind gemessene Werte für Böden, die als Hintergrundwerte verstanden werden müssen, aus Länderdaten zusammengestellt.

Die **Bioverfügbarkeit** der Dioxine wird in der Regel als relativ **gering** bezeichnet. Konkrete Zahlenwerte sind bisher kaum veröffentlicht. Die dargestellten Werte sind einer Auswertung des BGA/UBA anlässlich des internationalen Dioxin-Symposiums 1992 entnommen:

Für den Übergang der ungebundenen Stoffe durch Diffusion aus der Luft in die Pflanze wird ein Transferfaktor von 0,1 bis 0,4 (10 bis 40 %) bei oberirdischen und von 0,2 (19 %) bei unterirdischen Pflanzenteilen angegeben. Der Transfer vom bodengebundenen Schadstoff in die Pflanze ist demgegenüber um eine Zehnerpotenz (0,01 = 1 %) geringer. Bei der Aufnahme der Dioxine durch Tiere werden folgende Größenordnungen angegeben:

- Verfügbarkeit der **bodenassoziierten** PCDD/PCDF ca. 30 %
- Verfügbarkeit der **futtermittelassoziierten** PCDD/PCDF ca. 50 %.

Nach EINBRODT sind folgende Größenordnungen der PCDF/D- Konzentrationen bei Bränden zu erwarten:

- Wohnbereich, Dachräume, Büros, Schulen, Läden, Gaststätten, Werkstätten
- **Konz. < 200 ng I-TE/m<sup>2</sup>**(Gruppe 1)
- Brände in der Industrie ohne spezielle Stoffe im Brandgut  
**Konz. < 10.000 ng I-TE/m<sup>2</sup>** (Gruppe 2)
- Brände in Anlagen, bei denen **halogenierte** Phenole, Benzole, Biphenyle, Diphenylether und andere Prädioxine betroffen sind  
**Konz. > 100. 000 ng I-TE/kg** (Gruppe 3)

Gegenwärtig werden durch UBA/BGA Richtwerte und Handlungsempfehlungen zur Bodensanierung bei Dioxinbelastung angegeben (Tabelle 4.5.2.3).

Im Brandfall von Lengerich, bei dem ca. 1000 t Kunststoffe mit 50 % PVC-Anteil brannten, kam es zu Flächenbelastungen in einigen hundert Meter Entfernung bis zu 5 ng I-TE/m<sup>2</sup>.

Nach ROTARD ist bei einem PVC-Brand im Rauchgas unmittelbar am Brandherd eine Maximalbelastung von 1000 bis 10000 ng I-TE ableitbar. Die mit der Ausbreitung der Rauchgase einhergehende Verdünnung zeigt in der Modellrechnung, daß in Entfernungen von 100 bis 1000 m nur noch Konzentrationen von 10 bis 100 ng, im Extremfall 700 ng I-TE/m<sup>3</sup>, zu erwarten sind. In Entfernungen über 1000 bis 10000 m

sind dann nur noch Konzentrationen von 1 bis 10 ng/m<sup>3</sup> I-TE, im Extremfall 70 ng/m<sup>3</sup> I-TE, zu erwarten.

Dies zeigt, daß Dioxine und andere Schadstoffe bei jedem Brand entstehen können. Bei einer Gefahrenabschätzung müssen aber neben der störfallbedingten Zusatzbelastung stets auch die übrigen Eintragspfade und die immer vorhandene Grundbelastung berücksichtigt werden. Die Tatsache, daß Schadstoffe mit den verfeinerten Möglichkeiten der Spurenanalytik nachweisbar sind, rechtfertigt noch keinen Giftalarm.

Vergleichende Untersuchungen stark exponierter Feuerwehrleute mit nicht exponierten Personen in Deutschland (Feuerwehrstudie Nordrhein-Westfalen) und in Kanada (Carrier 1991) zeigen keine signifikanten Anreicherungen von PCDD/PCDF im Blut.

#### 4.5.3 Aromatische Kohlenwasserstoffe

Wesentliche Vertreter sind Benzol, Toluol, Styrol, aromatische Oxidationsprodukte (Phenol) und Halogenderivate (Chlorbenzol). **Niedere Aromaten** sind meist **flüssig** und besitzen bei Normaltemperatur einen **hohen Dampfdruck**. Die **Flüchtigkeit** der Verbindungen ist **hoch**. An Brandstellen kann auch nach dem Brand noch mit verdampfenden Aromaten aus Aschen oder Ruß gerechnet werden. Aromaten wirken in geringen Konzentrationen meist reizend, in höheren Konzentrationen narkotisch. Benzol ist ein Blut- und Nervengift. Die Auswirkungen wichtiger Aromaten auf den Menschen sind konzentrationsabhängig im Anhang in Tabelle 4.5.3.1 zusammengefaßt.

**Aromaten** können **chronische Erkrankungen** hervorrufen. Bleibende Schäden können im **Knochenmark, Blut und Nervensystem** entstehen. Bei Benzol konnten mutagene und karzinogene (kanzerogene) Wirkungen nachgewiesen werden.

#### 4.5.4 Aliphatische Aldehyde

Aliphatische **Aldehyde** sind **Oxidationsprodukte** organischer Verbindungen. Im wesentlichen entstehen **niedere Aldehyde**, insbesondere Form- und Acetaldehyd, die ungesättigten Aldehyde **Acrolein** und **Crotonaldehyd**.

Unmittelbare Gefahren sind vor allem innerhalb der Rauchgaswolke und in den Brandräumen während des Einsatzes zu sehen. Die Verbindungen besitzen starke

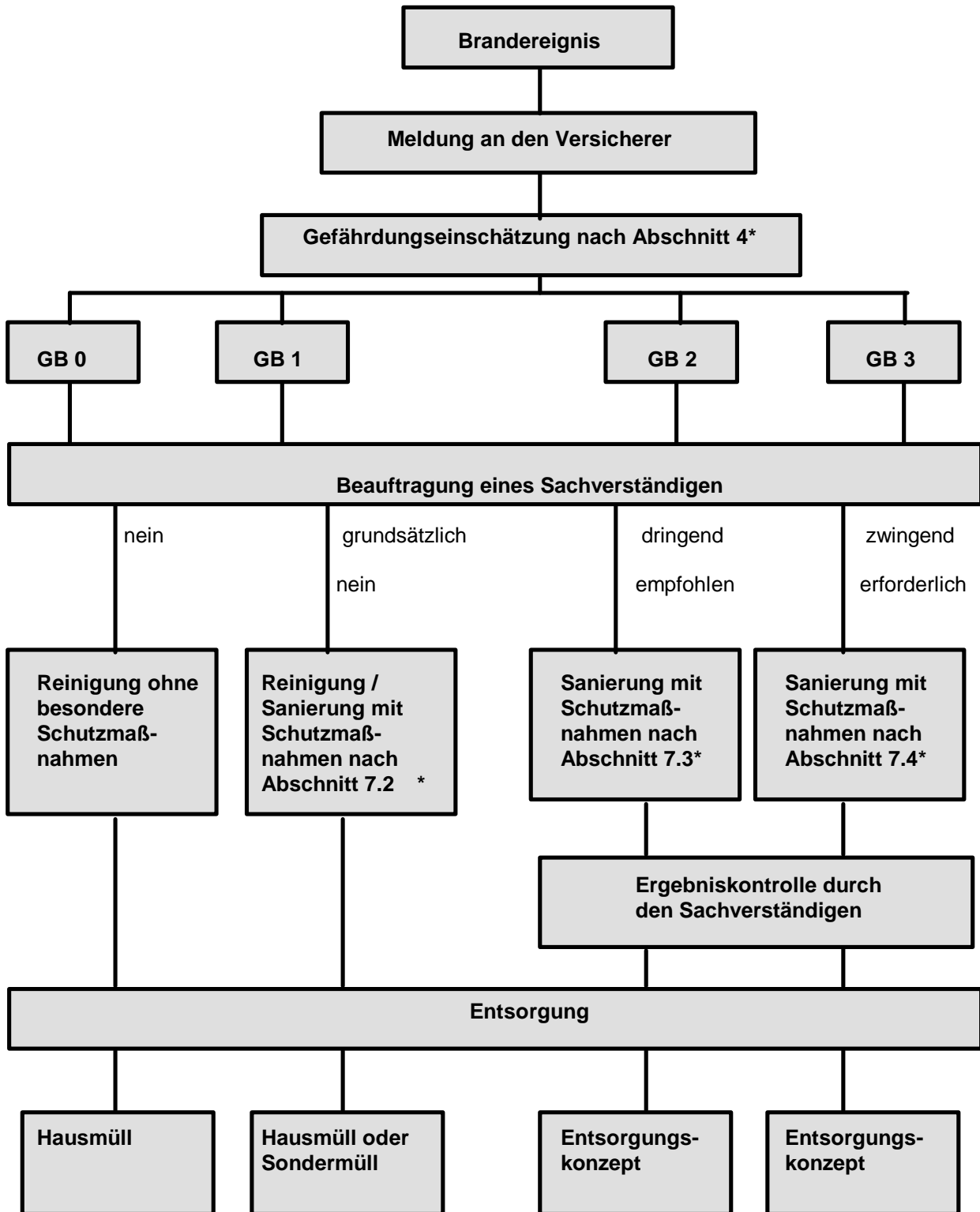
Reizwirkungen und wirken bereits in geringsten Konzentrationen auf Schleimhäute. Wesentliche Wirkungen der Aldehyde sind im Anhang in Tabelle 4.5.4.1 dargestellt. Die flüchtigen Verbindungen lassen sich durch gezieltes Belüften des Brandbereiches innerhalb von 1 bis 2 h entfernen.

#### 4.5.5 Amine und Nitrile

Amine und Nitrile sind organische Stickstoffverbindungen. Die größere Beständigkeit besitzen die Amine. Insbesondere höhere oder aromatische Amine können kanzerogene Wirkungen aufweisen. Amine sind teilweise in Wasser löslich.

## 5 Anhang: Tabellen zu Kennwerten

Tabelle 2.3.2: Ablaufschema für die Brandschadensanierung nach VdS 2357



\* Abschnitte nach VdS 2357



**Tabelle 4.3.3.2: Auswirkungen von Kohlenmonoxid und Chlorwasserstoff auf den Menschen**

Kohlenmonoxid, Konz. in ppm	Symptome	Chlorwasserstoff, Konz. in ppm	Symptome
30	MAK-Wert	1 ... 5	Geruchsschwelle
100	keine beobachtbaren Vergiftungserscheinungen	5	MAK-Wert
200	Kopfschmerzen nach 2 ... 3 h	5 ... 10	leichte, unangenehme Schleimhautreizungen
300	Ausgeprägte Vergiftungserscheinungen (Verlangsamung des Pulses, Ansteigen des Blutdruckes, Zittern)	35	Lungenreizung nach kurzer Inhalation, Bindehautreizung, Rachenreizung
400	Ausgeprägte Vergiftungserscheinungen nach 2 ... 3 h	50 ... 100	Atmung durch Lungenreizung unmöglich
500	Halluzinationen nach 20 ... 30 Minuten	1000	Gefahr von Lungenödem nach kurzer Inhalationszeit, Lebensgefahr
1000	Erschwerte Bewegung, Tod nach 2 stündiger Inhalation		
1 500	Tod nach 1 stündiger Inhalation		
3 000	Tödlich nach 30 Minuten		
> 8 000	sofortiger Tod		

**Tabelle 4.3.3.3: Auswirkungen von Schwefeldioxid, Cyanwasserstoff und nitrosen Gasen auf den Menschen**

Schwefeldioxid Konz. in ppm	Symptome	Cyanwasserstoff Konz. in ppm	Symptome	Nitrose Gase NOx Konz. in ppm	Symptome
0,5 ... 2,5	Geruchsschwelle	0,2 ... 5,1	Geruchsschwelle	5	MAK-Wert
2	MAK-Wert				
4 ... 8	Reizungen von Atemwegen und Lunge				
3 ... 5	milde Reizung von Haut und Atemwegen	10	MAK-Wert	10 ... 20	Reizungen von Augen und Atemwegen
8 ... 12	leichte Reizung von Haut und Atemwegen	18 ... 36	leichte Vergiftungen, Kopfschmerzen	25 ... 38	gefährlich, Husten und Erstickengefühl
10	erhöhter Atemwegswiderstand	45 ... 54	ohne Schwierigkeiten bis 1 h erträglich	50	deutliche Reizwirkungen
20	Husten, Augenreizung	100	Tod nach 1 h	80	Lungenbeklemmung nach 3 bis 5 Minuten
100 ... 250	lebensgefährlich	110 ... 135	lebensgefährlich, tödlich nach 30 bis 60 Minuten	90	Lungenödem nach 30 Minuten
600 ... 800	in wenigen Minuten tödlich	181	tödlich nach 10 Minuten	100 ... 200	lebensgefährlich nach 30 bis 60 Minuten
		280	sofort tödlich	250	tödlich innerhalb weniger Minuten

**Tabelle 4.4.2: Brandstoffgruppen**

Brandstoffgruppe	Verbindungen und technische Produkte	Weitere Verbindungen, die in den Brandeigenschaften zugeordnet werden können
aliph. KW	Benzine, Paraffine, Kerosin Dieselkraftstoff, Heizöl,	Alkohole, Ether, Ester, organische Säuren, pflanzliche und tierische Fette
aliph. CKW	Tetrachlorkohlenstoff, Chloroform Perchlorethylen, Chlor- und Bromparaffine, Hexachlorcyclohexan	Chlor- und bromhaltige Alkohole, Ester, Säuren
Aromaten	Benzol, Toluol, Naphthalin, (Erdöl), Diphenyl, Diphenylether	Phenol, Kresol, Dekalin, Terpene,
Chloraromaten	Chlorbenzol, PCB	Chlorphenol, PCP, chlorierte Kresole
Polymer mit CH	Polyethylen, Polypropylen, Polybutylen-1, Polyisobutylen, Poly-4-methyl-penten-1	Polyvinylalkohol, PMMA (Plexiglas), Polyethylenoxide, Polycarbonat, Alkyharz
Polymer mit Aromaten	Polystyrol	Phenolharz, ungesättigtes Polyester, lin. Polyester, Polyphenylenether, Polyacrylether
Polymer mit N	Polyamide, Polyacrylnitril, Polyurethane, Harnstoffharz, Melaminharz, Polyimide, Polyetherimid, Polybismaleinimid, Polyesterimid, Polyamidimid	Nitrocellulose
Polymer mit Halogenen Cellulose	Polyvinylchlorid, Polyvinylidenchlorid  Holz, Papier, Zellstoffe	Celluloseacetat, Cellulosepropionat, Celluloseacetobutyrat, Vulkanfiber, Stärkeprodukte (Getreide, Mehl), Zucker
Eiweißprodukte org. Schwefelver- bindungen	Wolle, Haare Federn, Nahrungsmittel, Mercaptane, Thiophene, Pharmazeutische Erzeugnisse, Pflanzenschutzmittel	
org. Phosphorver- bindungen	Pflanzenschutzmittel, Kampfstoffe,. Pharmazeutische Erzeugnisse	

**Tabelle 4.5.1.1: PAK mit kanzerogenen Eigenschaften**

Benzo (b) fluoranthen
Benzo (j) fluoranthen
Benzo (k) fluoranthen
Benzo (a) pyren
Chrysen
Dibenz (a,h) anthracen
Dibenzo (a,e) pyren
Dibenzo (a,h) pyren
Dibenzo (a,i) pyren
Dibenzo (a,l) pyren
Indeno (1,2,3-cd) pyren

**Tabelle 4.5.2.1: Relative Toxizitäten von PCDF/PCDD bezogen auf 2,3,7,8-TCDD**

Kongener	Bundesgesundheitsamt 1985	I-TE 1988
2,3,7,8-TCDD	1,00	1
übrige TCDD	0,01	-
1,2,3,7,8-Penta-CDD	0,1	0,5
übrige Penta-CDD	0,01	-
1,2,3,4,7,8-Hexa-CDD	0,1	0,1
1,2,3,7,8,9-Hexa-CDD	0,1	0,1
1,2,3,6,7,8-Hexa-CDD	0,1	0,1
übrige Hexa-CDD	0,01	-
1,2,3,4,6,7,8-Hepta-CDD	0,01	0,01
übrige Hepta-CDD	0,001	-
Octa-CDD	0,001	0,001
2,3,7,8 TCDF	0,1	0,1
andere Tetra-CDF	0,01	-
1,2,3,7,8-Penta-CDF	0,1	0,1
2,3,4,7,8-Penta-CDF	0,1	0,5
andere Penta-CDF	0,01	-
1,2,3,4,7,8-Hexa-CDF	0,1	0,05
1,2,3,7,8,9-Hexa-CDF	0,1	0,1
andere Hexa-CDF	0,01	-
1,2,3,4,6,7,8- Hepta-CDF	0,01	0,01
andere Hepta-CDF	0,001	-

**Tabelle 4.5.2.2: Bandbreite der Dioxinbelastung von Böden, zusammengestellt aus Länderdaten, Stand 15. 05. 91 (UBA/BGA) (TE-Berechnung nach BGA)**

Belastungsraum	Bodenart	Mittelwert der Dioxinbelastung in ng TE/kg TS	Anzahl der Proben	Probenahmetiefe in cm (maximal)
Boden in ländlichen Räumen	Wald	5	33	
	Waldstreu	35	41	0 - 30
	Grünland	3	95	0 - 2
	Acker	2	178	0 - 30
	sonstige	5 (1 Land)	34	0 - 15
	klärschlammbeaufschlagte Böden	5	46	
diffus belastete Böden in Ballungsräumen	Wald	2 (1 Land)	48	0 - 30
	Waldstreu	10	29	0 - 10
	Acker	2,8	98	0 - 30
	Grünland	3,8	223	0 - 10
	Wohngebiete	9 (1 Land)	10	
	Parkanlagen und Kinderspielplätze	> 5 und < 1594	126	0 - 40
	Kleingärten	12	86	0 - 40
Boden im Bereich definierter Emittenden	sonstige	32 (1 Land)		
	Müllverbrennungsanlagen	43	118	
	Deponien	>0,8 und < 188 (1 Land)	5	
	Altstandorte	>3 und < 200 000		0 - 40
	Chem. Ind.	8	57	0 - 40
	Metallverarb.	>0,07 und <4958	262	
	Straßenverkehr	10	30	0 - 30
	sonst. therm. Prozesse	65	47	
	sonst. chem. Prozesse	7	27	0 -10

**Tabelle 4.5.2.3: Richtwerte und Handlungsempfehlungen zur Bodennutzung und Bodensanierung**

PCDD/F Kontamination ng I-TE/kg Boden-Trockenmasse	Handlungsempfehlungen
< 5	Zielgröße, jegliche Nutzung ungeprüft möglich
5 - 40	Prüfaufträge und Handlungsempfehlungen für landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzung
> 40	Einschränkung auf bestimmte landwirtschaftliche und gärtnerische Bodennutzung- uneingeschränkte Nutzung bei minimalen Dioxintransfer
>100	Maßnahmen zur Bodensanierung auf Kinderspielplätzen
>1000	Maßnahmen zur Bodensanierung in Siedlungsgebieten
> 10000	Maßnahmen zur Bodensanierung unabhängig vom Standort

**Tabelle 4.5.3.1: Auswirkungen verschiedener Aromatenkonzentrationen auf den Menschen (EINBRODT)**

Benzol in ppm	Symptome	Styrol in ppm	Symptome
2 ...5 5	Geruchsschwelle TRK-Wert (techn. Richtkonzentration)	20 0,05 ... 60	MAK-Wert Geruchsschwelle
50 ... 150	Kopfweh, Schwindelgefühl	> 50	schleimhautreizend, ZNS- Störungen
700 900	nach 1 h Bewußtlosigkeit geringe Reizwirkung	100 ... 200 215	Brechreiz Allgemeinsymptome wie Übel- keit, Kopfschmerzen Gleichgewichtsstörungen
1500 bis 4000	lebensgefährlich bei mehrständiger Inhalation	375	Deutliche Symptome einer neurologischen Beeinträchtigung
8000	Tödlich nach 30 bis 60 Minuten	800	Sofortige Reizung der Augen, des Rachens, Schläfrigkeit und Schwäche
20000	Tödlich nach 5 Minuten		

**Tabelle 4.5.4.1: Auswirkungen unterschiedlicher Aldehydkonzentrationen auf den Menschen**

Konz. Formaldehyd in ppm	Symptome	Konz. Acetaldehyd in ppm	Symptome	Konz. Acrolein in ppm	Symptome
0,05 ... 1	Geruchsschwelle	0,07 ... 0,21	Geruchsschwelle	0,1	MAK-Wert
> 0,5	Nasen- und Rachenreizung				
0,08 ... 1,5	Leichte Reizung von Schleimhäuten	25 ... 50	Vorübergehende Augenreizung	0,8	Reizung der Schleimhäute Augentränen
0,5	MAK-Wert	50	MAK-Wert	1	Sofort wahrnehmbare Reizungen
10	Bindehaut-Nasenschleimhautentzündung Rachenkatarrh	135	Reizung der Atemwege	5,5	Starke Reizungen
10 ... 15	Husten, Lungenentzündung, Bronchitis Atemnot			>10	Stärkste Reizungen, tödlich in kurzer Zeit
50	Zerstörung der Schleimhäute, Kehlkopfkrampf Lungenödem				



**Literaturverzeichnis:**

Föhl, A.:

Entstehung von Dioxinen und Furanen im Brandfall und erforderliche Abwehrmaßnahmen;  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe, Forschungsbericht  
Nr. 77, Karlsruhe 1991

Dokumentation Schadstoffbelastung im Einsatzdienst der Feuerwehr; ÖTV Studie

Empfehlungen zur Reinigung von Gebäuden nach Bränden;

Bundesgesundheitsamt Berlin, Oktober 1989, Bundesgesundheitsblatt 1/90

Kieselrot-Studie:

Humanmedizinische Untersuchungen;

Bericht des Hygiene Instituts des Ruhrgebiets, Institut für Umwelthygiene und Umweltmedizin,  
September 1991

Dokumentation des PVC-Hearing:

Gefährden PVC Produkte die Umwelt;

Stellungnahme verschiedener Sachverständiger der Anhörung am 22.10.1986

Feuerwehrstudie: NRW PCDD- und PCDF-Konzentrationen im Blut von Feuerwehrleuten im  
Vergleich zu klinischen, klinisch-chemischen und anamnestischen Daten;

Bericht der Ruhr-Universität Bochum und der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 1992

Erste BGA/UBA-Auswertung des internationalen Dioxin-Symposiums und der fachöffentlichen  
Anhörung vom 09 bis 13.12.1992

Carrier, G.; Tremblay, C.G. u.a.:

Polychlorphenyl (PCB), Polychlorodibenzodioxin (PCDD) and Polychlorodibenzofuran (PCDF)  
exposure of firefighters involved in the PCB Fire at St.-Basile-le-Grand, Quebec, Kanada,  
in: Dioxin 90, Vol.3 S. 361 bis 368

Hutzinger, O.:

Dioxine - Ökochemie, Exposition, Risikoanalyse, Grenzwertermittlung;

Monographie Universität Bayreuth 1992

Engler, A.; Pieler, J.; Einbrodt, H.J.:

Gefährdungsabschätzung von Brandgasen und Brandrückständen aus humantoxikologischen Gesichtspunkten

in: Wissenschaft und Umwelt 3 und 4/1990 Sonderdruck

Lorenz, W.G.:

Organische Schadstoffe bei Bränden - Analytik und Umweltauswirkungen,  
Habilitationsschrift, Braunschweig 1996

Ballschmiter, K.; Bacher, R.:

Dioxine;

VCH Verlag Weinheim 1996

Greim, H.; Deml, E.:

Toxikologie;

Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Mediziner

VCH Verlag Weinheim 1996

Buff, K.:

Entwicklung von Verfahren zur Abschätzung der gesundheitlichen Folgen von Großbränden;

Bericht zum Forschungsvorhaben des Bundesamtes für Zivilschutz 4b/92, Oktober 1996

Bericht über den Großbrand in einem Kunststofflager in Lengerich am 04/05.10.1992

Rotard, F.:

Brände;

Vortrag Dioxin Congreß 09-11.11.1992 Berlin, Tox. Forum

Roßmann, D.:

Gefahrstoffe bei Bränden-Grenzwertproblematik- Monographie

VdS Köln, 1994

Weiß, A.:

Dioxine und Brandschäden; Arbeitstechnik aktuell;

Lieferung 23 12/88, Gustav Fischer Verlag Stuttgart

Wolf, P.H.:

Informationen zur Dioxin Problematik;

TÜV Norddeutschland, in GIT Fachzeitschrift Labor 36(1992)6, S.648 bis 654

Wichmann, H.; Zelinski, V.; Lorenz, W.; Bahadir, M.:

Chlorierte und bromierte Schadstoffe in Brandrückständen von Entstehungsbränden;

in :Wissenschaft und Umwelt 12/1992

Hutzinger, O.:

Untersuchung der möglichen Freisetzung von polybromierten Dibenzodioxinen und

Dibenzofuranen beim Brand flammgeschützter Kunststoffe;

Forschungsbericht Nr. 104 03 362 Universität Bayreuth 1990

Czerczak, S.; Stetkiewicz, J.:

Toxicity Classification of Thermal Degradation Products of Chemical Materials used in  
Construction;

Journal of Fire Sciences 14 (1996) S. 367 ff.

Pichler, M.; Guggenberger, G.; Hartmann, R.; Zech, W.:

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Different Forest Humus Types ;

ESPR-Environment Sci & Pollut. Res. 3 (1)24-31 (1996), ecomed publishers Landsberg

Literaturstudien zum PCDD/F-Transfer vom Boden in die Nahrungskette;

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen 1995

Fliegner, M.; Reinirkens P.:

Vorliegende Referenzwerte für PAK in Böden Nordrhein-Westfalen;

Ruhr Universität Bochum 1993, Bodenschutzzentrum des Landes Nordrhein-Westfalen

Geyer, H. ; Scheunert, I.; Lörinci, G. Korte, F.:

Bioakkumulation von Organohalogen-Verbindungen in Nutztieren am Beispiel Futter-Milch-  
Kuh;

in: VDI-Berichte Nr. 745, 1989, S.497 ff