

BK 1318 - Ermittlung der Benzoldosis

Dr. rer. nat. Wolfgang Pflaumbaum

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin

Arbeitsplätze mit Benzolexposition

Mineralölindustrie

Benzol ist ein natürlicher Bestandteil des Rohöls. Es enthält in Abhängigkeit von der Herkunft in der Regel zwischen 0,05 und 0,6 Gew.-% Benzol. Reines Benzol wird überwiegend aus dem Pyrolysebenzin von Crackanlagen der Petrochemie gewonnen. Benzol war und ist in unterschiedlichen Gehalten bis Spuren in den aus Erdöl gewonnenen komplexen Kohlenwasserstoffgemischen wie z. B. Spezialbenzin 80/110 (siehe Tabelle 2), Ottokraftstoffen (siehe Tabelle 1) sowie Dieselkraftstoff und Heizöl (2002 durchschnittlich 0,004 Vol.-%) zu finden.

Kohlechemie

Bei der Verkokung von Steinkohle in Kokereien und Gaswerken fallen bzw. fielen hauptsächlich Koks, Kokereigas und Steinkohlenteer an. Aus dem Kokerei- bzw. Stadtgas wurde das Benzol durch ein Waschöl herausgewaschen, während die Gewinnung aus Teer destillativ erfolgte. Das Kokereigas ist hierbei eine wesentlich ergiebigere Benzolquelle als der Steinkohlenteer. Das bei der Destillation von Steinkohlenteer anfallende Rohbenzol enthält zu 65 bis 80 % Benzol, 15 bis 18 % Toluol, 3 bis 6 % Xylol und 2 bis 9 % Lösungsbenzole. Die bei der Weiterverarbeitung gewonnenen komplexen Kohlenwasserstoffgemische enthielten ebenfalls in unterschiedlicher Höhe Benzol.

Bei der Pyrolyse, teilweise auch als Schwelung oder Verkokung bezeichnet, von Braunkohle entstehen ebenfalls Benzinkohlenwasserstoffe, Paraffine, Teer und Koks.

Chemische Industrie

Benzol ist Reaktionspartner für chemische Umsetzungen wie beispielsweise Halogenierungen, Nitrierungen, Alkylierungen oder Acylierungen und in der industriellen Chemie die wichtigste Basis für aromatische Zwischenprodukte sowie für cycloaliphatische Verbindungen. An die Produktion von Ethylbenzol, Cumol, Cyclohexan, Nitrobenzol, Maleinsäureanhydrid und Alkylbenzole sei hauptsächlich erinnert.

Verwendung als Lösemittel

Benzol ist jedoch nicht nur Synthes Ausgangsstoff, sondern wird auch als Lösungsmittel verwendet. Benzol kann also als Lösungs- oder Extraktionsmittel dienen, Lösungsmittelgemischen zugesetzt oder in diesen als Verunreinigung enthalten sein sowie in Spezialanwendungen zum Einsatz kommen (z. B. als Schleppmittel bei Azeotrop-Destillationen). Verwendung fand Benzol beispielsweise auch in Gummilösungen, Reinigungsmitteln, beim Vergällen (2 %) von Alkohol, Straßenbau, Bautenschutzmitteln, Schuhfarben, Porzellanfarben und in Klebstoffen für verschiedene Anwendungen sowie bei der Extraktion von Fetten. Dies gilt insbesondere für die 50er und 60er Jahre. Weitere Beispiele, welche die große Verbreitung des Benzols insbesondere in der Vergangenheit zeigen, sind verschiedenste Beschichtungsstoffe sowie Oberflächenbehandlungsmittel. Diese konnten Benzol oder benzolhaltige komplexe Kohlenwasserstoffgemische enthalten.

Darüber hinaus kann Benzol bei der Verbrennung organischer Verbindungen unbeabsichtigt entstehen. Dies gilt im besonderen Maße für Verbrennungsmotoren, jedoch auch für das Abgießen harzgebundener Formen sowie für das Laserschneiden spezieller Kunststoffe, um einige Beispiele zu nennen.

Ermittlung der Benzoldosis – erforderliche Grunddaten

Für die Ermittlung der kumulativen Benzolbelastung (inhalativ und dermal) müssen folgende Grunddaten für eine rechnerische Abschätzung ermittelbar sein:

- Expositionsdauer (inhalativ und dermal)
- Benzolgehalte der eingesetzten Materialien
- Expositionshöhe (inhalativ)
- Benetzte Hautfläche
- Art des Hautkontaktes
 - nicht okklusiv (offene Hautflächen) oder
 - okklusiv bzw. semi-okklusiv (z. B. getränkte Handschuhe oder Kleidung, mehrminütiges Eintauchen in Flüssigkeit)

Generelle Probleme bei der Expositionsermittlung

Die Aufklärung des Sachverhalts ist für die Ermittler mit zahlreichen Herausforderungen verbunden wie z. B.:

- Es liegen keine Messergebnisse aus dem Betrieb vor.
- Messdaten vergleichbarer Tätigkeiten liegen in der Regel erst ab ca. 1980 vor.
- Die Arbeitsplätze/Gebäude sind nicht mehr vorhanden.
- Keine Unterlagen zu den Räumlichkeiten vorhanden.
- Die Angaben über die Lüftungsverhältnisse sind unzureichend.
- Angaben zu den verwendeten Arbeitsstoffen unzureichend.
(Beispiel: Entfetten kann man mit Tri, Kaltreiniger über Nitroverdünnung, Waschbenzin bis Ottokraftstoff; Benzolgehalte liegen zwischen 0 bis einige Vol.-%)
- Angaben zur verbrauchten Menge und zu den Benzolgehalten sind nicht vorhanden.
- Angaben über die genauen Tätigkeiten zum Teil unzureichend.
- Zeugen sind nicht mehr ermittelbar.
- Die genaue Dauer der Exposition (inhalativ, dermal) ist nicht bekannt.

Generelle Erfahrungen bei der Ermittlung von Benzolgehalten

- Betriebliche Informationen zur Kohlenwasserstofffraktion, zum Benzolgehalt und zum Hersteller fehlen.
- Aus Handelsnamen lassen sich nur selten Benzolgehalte ableiten.

- Begriffe wie z. B. Homologenraffinat, Leichtöl, Solventnaphtha, Universal oder Waschbenzin können hohe Benzolgehalte verschleiern.
- Der Benzolgehalt in Kohlenwasserstoffgemischen ist abhängig vom Ausgangsmaterial (Braunkohle, Steinkohle, Erdöl, Restteer), Lagerstätte und Verfahrenstechnik.
- Die Angabe von Siedebereichen bei Kohlenwasserstoffgemischen lässt keinen sicheren Rückschluss auf den Benzolgehalt zu.

Ermittlung der Benzoldosis – Beispiel Kfz-Mechaniker

Der Versicherte hat folgende Tätigkeiten mit Benzolbelastung durchgeführt:

- 1971 bis 1976
Allgemeine Wartungsarbeiten (Grundbelastung im Arbeitsbereich)
Expositionsdauer: 36 h/Woche, insgesamt 5,4 Jahre
- 1971 bis 1976
Arbeiten an Ottokraftstoff führenden Teilen
Expositionsdauer: 2 h/Woche, insgesamt 0,3 Jahre
- 1971 bis 1972
Reinigung von Teilen mit Ottokraftstoff (2 h/Woche)
Expositionsdauer: 0,1 Jahre
- 1973 bis 1976
Reinigung von Teilen mit Waschbenzin (2 h/Woche)
Expositionsdauer: 0,2 Jahre
- 1971 bis 1976
Bei der Reinigung der Teile benetzte Hautfläche: Eine Hand und eine Handinnenfläche

Ottokraftstoffe – durchschnittlicher Benzolgehalt

Ottokraftstoffe (Siedebereich 25 bis 250 °C) sind Gemische von Kohlenwasserstoffen, die in Raffinerien über verschiedene Verarbeitungsverfahren aus Erdöl gewonnen werden. Sie gehören zur Klasse der Benzinkohlenwasserstoffe. Bis 1960 fand auch ein Großteil des aus Kokereien stammenden gereinigten Benzols als Treibstoff Verwendung und zwar als „Motorenbenzol“ oder in Mischung mit Benzin als „Aral“. Aral steht für **AR**omaten (Benzol) und **AL**iphaten (Benzin). Ein Benzin-Benzol-Gemisch (60:40) machte 1924 den ersten Superkraftstoff der Welt aus. Durch den hohen Benzolanteil im Kraftstoff konnte auf den Zusatz von Bleiverbindungen zur Erhöhung der Klopfestigkeit verzichtet werden. Die Anforderungen an Ottokraftstoffe nach Anordnung 22 A von 1939 sahen für ein Benzin-Benzol-Gemisch Benzolgehalte von 30 bis 35 % w/w und für Superbenzin von < 10 % vor. Benzin-Benzol-Gemische wurden nach Recherchen der Unfallversicherungsträger bis 1963 als bleifreie Ottokraftstoffe (Normal und Super) angeboten. Die nachstehende Tabelle 1 zeigt die zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Benzolgehalte in Ottokraftstoffen.

Tabelle 1: Durchschnittlicher Benzolgehalt im Ottokraftstoff

Zeitraum BRD	Gew.-%	Vol.-%	Zeitraum DDR	Gew.-%	Vol.-%
Vor 1963	12	10	Vor 1965	6	5
1963 bis 1969	6	5			
1970 bis 1979	4,2	3,5			
1980 bis 1989	3,4	2,8	1965 bis 1990	3,6	3
1990 bis 1999	2,5	2,1			
Nach 2000	0,8	0,7			

Waschbenzin

Als Waschbenzin wird in der Regel ein komplexes Kohlenwasserstoffgemisch im Bereich C6 bis C9 bezeichnet. Überwiegend handelt es sich hierbei um die Spezialbenzine 80/110 oder 100/140. Im Zuge der Ermittlungen sollte aber geprüft werden, ob im Betrieb ggf. ein anderes Kohlenwasserstoffgemisch eingesetzt wurde. Häufig wurde auch nur der Begriff „Benzin“ verwendet. Da zu Reinigungszwecken früher auch gerne Ottokraftstoff genutzt wurde, ist durch Ermittlungen zu klären, ob mit dem Begriff „Waschbenzin“ bzw. „Benzin“ ein Spezialbenzin oder Ottokraftstoff gemeint ist. Die nachstehende Tabelle 2 zeigt die zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Benzolgehalte im überwiegend als Waschbenzin verwendeten Spezialbenzin 80/110.

Tabelle 2: Durchschnittlichen Benzolgehalt im Spezialbenzin 80/110

Zeitraum	Gew.-%	Vol.-%	Zeitraum DDR	Gew.-%	Vol.-%
Vor 1960	3	2,5	Vor 1955	6	5
1960 bis 1964	2	1,7	1955 bis 1969	3,6	3
1965 bis 1971	0,3	0,25			
1972 bis 1977	0,2	0,17	1970 bis 1984	1,2	1
1978 bis 1982	0,03	0,025			
1983 bis 1986	0,0015	0,0013	1985 bis 1990	0,4	0,3
Ab 1987	< 0,001	< 0,0008			

Möglichkeiten der Expositionsermittlung (inhalativ)

Für die Ermittlung der Höhe der Benzolexposition können folgende Daten genutzt werden:

- Betriebliche Daten zur Expositionshöhe, sofern diese aussagekräftig sind.
- Ergebnisse von vergleichbaren Arbeitsplätzen oder Tätigkeiten, wenn keine betrieblichen Daten verfügbar sind.
- Ergebnisse von
 - nachstellenden Untersuchungen im Betrieb oder
 - in einer Prüfkabine sowie
 - Berechnungen.

Dies gilt insbesondere für Tätigkeiten vor 1980, für die keine anderen Arbeitsplatzdaten zur Verfügung stehen.

Ergebnisse von nachstellenden Untersuchungen in der Prüfkabine

Reinigung von Teilen im Sprühverfahren mit Ottokraftstoff:

Bei verschiedenen Luftwechselraten wurde eine Reinigungstätigkeit im Freien nachgestellt. Ermittelt wurde eine Benzolkonzentration von 15 bis 21 ppm (stationär) bei einem Benzolgehalt von ca. 4 Vol.-%.

Reinigung von Teilen im Pinselverfahren mit Ottokraftstoff:

Auf Basis der Ergebnisse von Modelluntersuchungen bei verschiedenen Luftwechselraten und Benzolgehalten kann die Benzolexposition im Atembereich bei Reinigungs- bzw. Entfettungstätigkeiten mit Ottokraftstoff in einem Reinigungsbad unter Verwendung eines Pinsels oder Lappens wie folgt tätigkeitsbezogen einfach abgeschätzt werden:

Benzol [ppm] = 8 • Benzolgehalt [Vol.-%] (Arbeitsplätze in Räumen)

Benzol [ppm] = 3 • Benzolgehalt [Vol.-%] (Arbeitsplätze im Freien)

Reinigung von Teilen im Pinselverfahren mit Nitroverdünnung:

Die Ergebnisse dieser Untersuchung stimmen gut mit den Ergebnissen von Modelluntersuchungen zur Benzolbelastung bei Beschichtungsarbeiten überein. Die Nitroverdünnung enthielt u. a. ein aliphatisches Kohlenwasserstoffgemisch mit einem Siedebereich von 145 bis 160 °C. Ausgehend von diesen Untersuchungen kann die Benzolexposition im Atembereich bei Reinigungs- bzw. Entfettungstätigkeiten mit Nitroverdünnung in einem Reinigungsbad auf Basis des o. g. Kohlenwasserstoffgemisches unter Verwendung eines Pinsels oder Lappens wie folgt tätigkeitsbezogen einfach abgeschätzt werden:

Benzolkonzentration [mg/m^3] = $-0,8 + 50,8 \cdot \text{Benzolgehalt} [\%]$.

Berechnung von Benzol-ppm-Jahren (inhalativ)

Die Berechnung von Benzol-ppm-Jahren für die inhalative kumulative Benzolbelastung erfolgt nach der Formel:

$$\text{ppm} - \text{Jahre} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot J_i$$

Mit:

K = durchschnittliche Expositionshöhe in ppm (ml/m³) während der

J = Dauer der Tätigkeit (Expositionsdauer) in Jahren

i = Die einzelne Tätigkeit, z. B. Teilereinigung mit Waschbenzin

Zu beachten ist, dass die Berechnung auf Basis der Expositionsdauer erfolgt und nicht die Arbeitszeit oder Beschäftigungszeit zu Grunde gelegt wird. Die Expositionsdauer stimmt in der Regel nicht mit der Arbeitszeit oder Beschäftigungszeit überein.

Für die Abschätzung der kumulativen Benzoldosis des o. g. Kfz-Mechanikers liegen keine betrieblichen Expositionsdaten vor. Die nachstehende Abschätzung erfolgt somit auf Basis von allgemein verfügbaren Daten vergleichbarer Tätigkeiten oder nachstellender Untersuchungen.

- Allgemeine Wartungsarbeiten
Für vergleichbare Tätigkeiten liegen Messergebnisse in Höhe von 0,8 ppm (90%-Wert) für die Grundbelastung in einer Kfz-Werkstatt vor. Die kumulative Benzoldosis für diese Tätigkeit errechnet sich wie folgt:
5,4 Jahre • 0,8 ppm = 4,3 ppm•Jahre
- Arbeiten an Ottokraftstoff führenden Teilen
Für vergleichbare Tätigkeiten liegen Messergebnisse in Höhe von 4 ppm (90%-Wert) vor. Die kumulative Benzoldosis für diese Tätigkeit beträgt somit:
0,3 Jahre • 4 ppm = 1,2 ppm•Jahre
- Reinigung von Teilen mit Ottokraftstoff
Auf Basis der o. g. nachstellenden Untersuchungen errechnet sich für diese Tätigkeit (Pinselverfahren) eine Benzolexposition von:
8 • 3,5 Vol.-% = 28 ppm
und eine kumulative Benzoldosis von:
0,1 Jahre • 28 ppm = 2,8 ppm•Jahre
- Reinigung von Teilen mit Waschbenzin
Auf Basis der o. g. nachstellenden Untersuchungen mit Nitroverdünnung errechnet sich für diese Tätigkeit (Pinselverfahren) eine Benzolexposition von:
= – 0,8 + 50,8 • 0,2 [%] = 9,4 mg/m³ / 3,2 mg/ml = 2,9 ppm
und eine kumulative Benzoldosis von:
0,2 Jahre • 2,9 ppm = 0,6 ppm•Jahre

Da bisher noch keine nachstellenden Untersuchungen mit Spezialbenzin 80/110

durchgeführt wurden, werden die Ergebnisse der nachstellenden Untersuchungen mit Nitroverdünnung für die Abschätzung herangezogen. Alternativ könnten auch die nachstellenden Untersuchungen mit Ottokraftstoff (Pinselverfahren) als Basis für eine Abschätzung dienen. Weitere nachstellende Untersuchungen mit Kohlenwasserstoffgemischen u. a. mit Spezialbenzin 80/110 sind jedoch geplant.

- Die kumulative Benzolgesamtdosis (inhalativ) wird auf dieser Basis mit 8,9 ppm•Jahre abgeschätzt.

Alternative Dosisermittlung über die Zuordnung zu den Belastungsgruppen nach BK 1318 (inhalativ)

In den Kapitel 3.2.2.1 bis 3.2.2.4 der wissenschaftlichen Begründung werden die in der nachstehenden Tabelle aufgeführten Belastungsgruppen genannt. Diese Kapitel enthalten Beispiele für Arbeitsbereiche und Tätigkeiten, bei denen es zu einer Exposition gegenüber Benzol kommt oder kommen kann. Die Aufzählung der Arbeitsbereiche und Tätigkeiten ist nicht abschließend. Bei der dort jeweils angegebenen Expositionsdauer bewegt sich die kumulative Benzoldosis bezogen auf die inhalative Aufnahme in der Regel zwischen 8 bis 12 ppm•Jahren, wenn der 90%-Wert der vorliegenden Messdaten bezogen auf eine Expositionsdauer von acht Stunden und 240 Arbeitstage zu Grunde gelegt werden. Den Belastungsgruppen liegen die in der Tabelle angegebenen Expositionsbereiche zu Grunde.

Extreme Belastungsintensität	Exposition > 8 ppm (Tätigkeit/Schicht) Expositionsdauer: ≤ 1 Jahr
Hohe Belastungsintensität	Exposition zwischen 2 bis 8 ppm (T/S) Expositionsdauer: 2 bis 5 Jahre
Mittlere Belastungsintensität	Exposition zwischen 1 bis 2 ppm (T/S) Expositionsdauer: 6 bis 10 Jahre
Geringe Belastungsintensität	Exposition < 1 ppm (Tätigkeit/Schicht) Expositionsdauer: mehr als 10 Jahre

Zuordnung der Tätigkeiten zu einer Belastungsgruppe (inhalativ)

- Allgemeine Wartungsarbeiten
Auf Basis einer Expositionshöhe von 0,8 ppm fällt die Tätigkeit unter die Belastungsgruppe „Geringe Belastungsintensität“.
Die in diesem Fall erforderliche Expositionsdauer von 12,5 Jahren wird mit 5,4 Jahren zu 43 % ausgeschöpft.
- Arbeiten an Ottokraftstoff führenden Teilen
Diese Arbeiten fallen auf Grund der Expositionshöhe von 4 ppm unter die Belastungsgruppe „Hohe Belastungsintensität“.
Die erforderliche Expositionsdauer von 2 Jahren wird mit 0,3 Jahren zu 15 % ausgeschöpft.

- **Reinigung von Teilen mit Ottokraftstoff**
Auf Basis der o. g. nachstellenden Untersuchungen fallen diese Arbeiten unter die Belastungsgruppe „Extreme Belastungsintensität“.
Auf Grund der hohen Exposition von 28 ppm verkürzt sich die erforderliche Expositions-dauer von einem Jahr auf 0,33 Jahre. Diese Expositions-dauer wird mit 0,1 Jahre zu 30 % ausgeschöpft.
- **Reinigung von Teilen mit Waschbenzin**
Diese Arbeiten fallen auf Grund der Expositionshöhe von 2,9 ppm auf Basis der o. g. nachstellenden Untersuchungen mit Nitroverdünnung unter die Belastungsgruppe „Hohe Belastungsintensität“. Die Tätigkeit entspricht von der Expositionshöhe den „Arbeiten im Kfz-Handwerk an Ottokraftstoff führenden Teilen bis 1985“. Bei einer erforderlichen Expositions-dauer von 4 Jahren wird mit 0,2 Jahren zu 5 % ausgeschöpft.

Fazit: Die erforderliche hinreichende Dosis (kumulative Benzoldosis im hohen einstelligen bzw. unteren zweistelligen Bereich der ppm•Jahre) wird zu 93 % erreicht.

Berechnung von Benzol-ppm-Jahren (dermal)

Die Abschätzung der dermalen Exposition erfolgt nach der im Abschnitt 3.1 der wissenschaftlichen Begründung zur BK 1318 zitierten Arbeit von Korinth et al. aus dem Jahr 2005.

Danach wird zunächst die pro Tag über die Haut aufgenommene Menge Benzol nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Resorptionsrate}_{\text{Reinbenzol}} \cdot \text{Benzolanteil}_{\text{Gemisch}} \cdot$$

$$\text{exponierte Hautoberfläche} \cdot \text{Expositions-dauer} = x \text{ mg Benzol}$$

Die aufgenommene Benzolmasse kann näherungsweise in „inhalative Äquivalente“ umgerechnet werden, wenn das im Laufe einer Schicht eingeatmete Luftvolumen, welches etwa 10 m^3 beträgt, berücksichtigt und eine 50 %ige Retention über die Lunge angenommen wird. Die während der Schicht über die Haut aufgenommene Benzolmenge lässt sich wie folgt in inhalative Äquivalente bezogen auf eine 8 h-Exposition umrechnen:

$$x \text{ mg} / (10 \text{ m}^3 \cdot 50/100) = y \text{ mg/m}^3 \text{ oder}$$

$$y \text{ mg/m}^3 / 3,2 \text{ mg/ml} = z \text{ ml/m}^3.$$

Durch diese Umrechnung wird der perkutane Aufnahmeweg in der Dosisberechnung berücksichtigt, die sich auf eine inhalative Exposition bezieht.

Für die Tätigkeiten des Kfz-Mechanikers mit umfangreichem Hautkontakt ergibt sich nach diesen Formeln folgende Benzolbelastung durch die dermale Exposition:

- **Reinigung mit Waschbenzin**

Benzolgehalt: 0,2 Gew.-%

Benetzte Hautfläche: Eine Hand und eine Handinnenfläche (750 cm^2)

Expositions-dauer: 2 h/Woche = 0,4 h/Tag

Abschätzung der durchschnittlich aufgenommenen täglich Benzolmenge:

$$1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 0,2/100 \cdot 750 \text{ cm}^2 \cdot 0,4 \text{ h} = \mathbf{0,6 \text{ mg Benzol}}$$

Umrechnung in inhalative Äquivalente (**Schichtwert**)

$$0,6 \text{ mg} / (10 \text{ m}^3 \cdot 50/100) = 0,120 \text{ mg/m}^3 / 3,2 \text{ mg/ml} = \mathbf{0,038 \text{ ml/m}^3}$$

$$\text{Benzoldosis: } 4 \text{ Jahre} \cdot 0,038 \text{ ppm} = 0,15 \text{ ppm} \cdot \text{Jahre}$$

- **Reinigung mit Ottokraftstoff**

Benzolgehalt: 4,2 Gew.-%

Benetzte Hautfläche: Eine Hand und eine Handinnenfläche (750 cm²)

Expositionsdauer: 2 h/Woche

$$\text{Benzoldosis: } 2 \text{ Jahre} \cdot 0,8 \text{ ppm} = 1,6 \text{ ppm} \cdot \text{Jahre}$$

- **Arbeiten an Ottokraftstoff führenden Teilen**

Zu diesen Arbeiten gehört u. a. auch das Reinigen von Düsen und Schwimmerkammer, das etwa ein Viertel der Gesamtzeit in Anspruch nimmt. Hierbei ist von einem über den üblicherweise vorliegenden Hautkontakt in geringem Umfang hinausgehenden Hautkontakt auszugehen, der zusätzlich berücksichtigt wird.

Benzolgehalt: 4,2 Gew.-%

Benetzte Hautfläche: Beide Handinnenflächen (500 cm²)

Expositionsdauer: 0,5 h/Woche = 0,1 h/Tag

$$\text{Benzoldosis: } 6 \text{ Jahre} \cdot 0,13 \text{ ppm} = 0,8 \text{ ppm} \cdot \text{Jahre}$$

- **Gesamtbeitrag der dermalen Benzolexposition:**

$$0,15 \text{ ppm} \cdot \text{Jahre} + 1,6 \text{ ppm} \cdot \text{Jahre} + 0,8 \text{ ppm} \cdot \text{Jahre} = 2,5 \text{ ppm} \cdot \text{Jahre}$$

- Sofern beim Hautkontakt semi-okklusiven oder okklusiven Verhältnissen vorliegen, ist bei der Abschätzung der dermalen Belastung eine Resorptionsrate von $2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ statt $1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ zu Grunde zu legen.

Die Gesamtbenzolbelastung (inhalativ und dermal) beträgt: 11 ppm•Jahre

Bei der Zuordnung über die Belastungsgruppen ist zusätzlich noch der dermale Beitrag durch die Reinigungstätigkeiten zu berücksichtigen. Die inhalativen Äquivalente von 0,8 ppm bei 2 Jahren Exposition und 0,038 ppm bei 4 Jahren Exposition entsprechen einer Ausschöpfung der hinreichenden Dosis von 16 % und 1,5 %. Bei den „Arbeiten an Ottokraftstoff führenden Teilen“ wurde dieser höhere dermale Beitrag bereits bei der Festlegung der erforderlichen Expositionsdauer in der Belastungsgruppe „Hohe Belastungsintensität“ berücksichtigt.

Die erforderliche hinreichende Dosis (kumulative Benzoldosis im hohen einstelligen bzw. unteren zweistelligen Bereich der ppm•Jahre) wird unter Berücksichtigung beider Expositionswege zu 110 % (93 % inhalativ + 18 % dermal) erreicht.