



Hochschule für Angewandte  
Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*



**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**Fakultät Life Sciences**

Kontaminationsverschleppung über Ausrüstungsgegenstände von Feuerwehrleuten  
von der Brandstelle in die Feuerwehrfahrzeuge

Bachelorthesis  
im Studiengang Gefahrenabwehr / Hazard Control

vorgelegt von

**Pascal Marcel Thomas**

**Matrikelnummer:** ██████████

HAW Hamburg Fakultät Life Sciences

Ulmenliet 20, 21033 Hamburg

am 17. Januar 2019

- 1. Gutachterin:** Prof. Dr. Susanne Heise (HAW Hamburg)
- 2. Gutachter:** Dipl.-Ing. (FH) Matthias Freudenberg, M.DM. (Feuerwehr Hamburg)

## Vorwort/Danksagung

Seitdem ich mich im aktiven Dienst der Freiwilligen Feuerwehr engagiere und an einigen Einsätzen beteiligt war, habe ich mich gefragt, ob die vorgenommenen Reinigungsmaßnahmen nach einem Brandeinsatz ausreichen, um alle Schadstoffe, die wir dabei an uns aufgenommen haben zu entfernen. Nachdem ich mich in der Findungsphase des Themas für diese Arbeit mit Marcus Bätge (Geschäftsführer Feuerkrebs gUG) unterhalten habe, ist diese Frage noch präsenter für mich gewesen und ich habe mich dazu entschlossen, dieses Thema mit dieser Arbeit näher zu beleuchten, da es in Deutschland bisher nur wenige Arbeiten auf diesem Gebiet gibt.

Leider war es zu Beginn der Arbeit sehr schwer, finanzielle Unterstützer aus dem Bereich der Gefahrenabwehr, der Ausstatter und der Unfallkassen und weitere zu finden, die die Laborkosten übernehmen konnten oder wollten. Diese Umstände haben die Fertigstellung der Arbeit herausgezögert. Hier würde ich mir für weitere Arbeiten dieser Art eine engagiertere Unterstützung für alle Studentinnen und Studenten wünschen, um die Gesundheit der Feuerwehrleute in Deutschland verbessern zu können.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich insbesondere beim Labor für Rückstandsanalytik Bremen GmbH bedanken, die die Analyse überhaupt erst möglich gemacht haben.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinen Betreuern und Gutachtern Frau Prof. Dr. Susanne Heise und Herrn Dipl.-Ing. Matthias Freudenberg M. DM. für die große Hilfe, die Unterstützung und die Begleitung bis zur Fertigstellung der Arbeit bedanken.

Weiterhin gilt auch Herrn Marcus Bätge und der gemeinnützigen Gesellschaft Feuerkrebs gUG sowie der Deutschen Feuerwehr Gewerkschaft für die finanzielle Unterstützung und die wertvollen Anregungen und Kontakte, ein großer Dank.

Ferner möchte ich mich bei der Feuerwehr Hamburg für die Genehmigung der Probennahme an den Fahrzeugen und den Geräten bedanken. Auch die beteiligten Wachabteilungen und Kollegen sowie die Abteilung Technik und Logistik haben mich bei der Probennahme sehr unterstützt und standen mir mit Rat und Tat zur Seite. Das hat mir zusätzlich gezeigt, dass die Feuerwehrleute selbst auch ein großes Interesse daran haben, die Einsatzhygiene zu verbessern und die Kontaminationsverschleppung zu vermeiden.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben.

Hamburg, 16.01.2019



Pascal M. Thomas

## Kurzzusammenfassung/Abstract

Feuerwehrleute sind bei der Brandbekämpfung vielen unterschiedlichen Schadstoffen ausgesetzt, zu denen auch die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) gehören. Diese entstehen in jeder Phase eines Brandes durch unvollständige Verbrennungen. Internationale Studien haben ergeben, dass Feuerwehrleute PAK ausgesetzt sind und ein Krebsrisiko für Feuerwehrleute, zumindest für einige Krebsarten, besteht. So erhält das Thema Einsatzhygiene und Kontaminationsverschleppung in der deutschen Feuerwehr und der Feuerwehr weltweit einen immer größeren Stellenwert. Um dieses Thema näher zu beleuchten, wurden in dieser Arbeit PAK, die bei der Verbrennung entstehen, ermittelt und die Taktik der Feuerwehr untersucht. Ausrüstung und Innenausstattung der Mannschaftskabinen wurden mit Hilfe einer Wischprobennahme über einen Zeitraum von vier Wochen mehrfach auf PAK-Ablagerungen beprobt und analysiert. Es wurden Handlampen, Faustmikrofone der Handfunkgeräte und die Einstiegriffe von zwei Hamburger Löschfahrzeugen beprobt, eines davon jeweils vor und nach einer Reinigungsprozedur. Die Ergebnisse zeigen, dass die beschriebenen Ausrüstungsgegenstände von Feuerwehrleuten sowie die Einstiegriffe der Feuerwehrfahrzeuge durch die Brandbekämpfung unterschiedlich stark mit PAK belastet wurden. Dabei waren die Handlampen in allen Fällen am stärksten kontaminiert (im Mittel: Handlampen: 13,75 pg/cm<sup>2</sup>, Faustmikrofone der Handfunkgeräte: 9,26 pg/cm<sup>2</sup>, Einstiegriffe: 1,04 pg/cm<sup>2</sup>). Nach einem intensiven Brandeinsatz (HLF A Woche zwei) war die PAK-Konzentration kurzfristig mehr als das Vierfache erhöht. Es konnte auch ermittelt werden, dass die Reinigung des Löschfahrzeuges und der Ausrüstung die PAK-Menge um bis zu 50 % reduzierte (Handlampen) und somit, insbesondere an den Handlampen nach einem Brandereignis, ein gutes Vorgehen sein kann, um die Exposition gegenüber PAK zu verringern. Unterschiedliche Reinigungsverfahren sollten in weiteren Studien untersucht werden, um das effektivste Verfahren zu finden. Die PAK-Menge der Faustmikrofone der Handfunkgeräte konnten durch die Reinigung nicht signifikant reduziert werden, was vermutlich an der rauen Oberfläche liegt. Deshalb sollten auch weitere Ausrüstungsgegenstände untersucht werden, um zu ermitteln, bei welchen eine Reinigung effektiv ist, bzw. ob ein anderes Reinigungsverfahren eingesetzt werden muss. Mit der Reinigung konnten insbesondere auch die PAK mit kanzerogener Aktivität um 11 (Benzo(a)pyren) bis 75 % (Benzo(a)anthracen) reduziert werden. In Kombination mit Konzepten, wie dem Skellefteå Modell (schwedisches Konzept zur Verbesserung der Einsatzstellenhygiene und der Schwarz-Weiß-Trennung), dem Concord Modell (amerikanisches Konzept der Initiative „Healthy Fire Fighters“ zur Verbesserung der Einsatzstellenhygiene und der Schwarz-Weiß-Trennung), der Vor-Ort-Dekontamination oder der Trennung von kontaminierter und nicht-kontaminierter Einsatzkleidung und Ausrüstung kann so eine effektive Einsatzstellenhygiene eingeführt und die Gefahr der Kontaminationsverschleppung reduziert werden. Dennoch sollten auch in diesem Bereich in weiteren Studien neue Konzepte entwickelt oder bestehende überarbeitet werden, um für das deutsche Feuerwehrsystem, auch für kleine Feuerwehren, eine funktionierende Einsatzstellenhygiene zu etablieren.

## Inhalt

Vorwort/Danksagung .....	2
Kurzzusammenfassung/Abstract .....	3
Tabellenverzeichnis .....	6
Abbildungsverzeichnis .....	7
Abkürzungsverzeichnis .....	10
1. Einleitung .....	11
1.1 Fragestellung .....	11
1.2 Ziel der Arbeit .....	13
2. Brandablauf und Schadstofffreisetzung .....	14
2.1 Verbrennungsvorgang .....	14
2.1.1 Vorbedingungen .....	14
2.1.2 Ablauf eines Brandes .....	16
2.2 Schadstoffe/ Verbrennungsprodukte Brandstelle .....	17
2.2.1 Verbrennungs-/ Zersetzungsprodukte .....	17
2.2.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe .....	22
2.2.3 Eigenschaften von PAK .....	23
3. Krebserkrankungen .....	26
3.1 Entstehung von malignen Tumoren .....	26
3.2 Auslöser und Karzinogene .....	27
3.3 Zusammenhang von Krebs und der Tätigkeit in der Feuerwehr .....	29
4. Potentielle Exposition von Feuerwehrleuten .....	31
4.1 Feuerwehr in der Brandbekämpfung .....	31
4.1.1 Grundlagen .....	31
4.1.2 Taktik/ Schutzmaßnahmen .....	31
4.2 Feuerwehrfahrzeuge .....	35
4.2.1 Löschfahrzeuge .....	35
4.2.2 Aufbau / Sitzplätze / Ausrüstungsgegenstände .....	38
4.3 Kontamination von Feuerwehreinsatzkräften .....	39
4.3.1 Heiße Brandstelle .....	39
4.3.2 Kalte Brandstelle .....	39
4.3.3 Potentielle Kontaminationsverschleppung .....	40
5. Untersuchung der Kontaminationsverschleppung und der Schadstoffbelastung der Mannschaftskabine – Methodik .....	42

5.1	Probennahme .....	42
5.2	Analysemethode .....	45
6.	Ergebnisse und Diskussion .....	46
6.1	Darstellung der Ergebnisse .....	46
6.2	Ersteinschätzung der PAK-Mengen und Zusammenhang Einsätze .....	52
6.3	Diskussion der hohen Naphtalinmengen .....	53
6.4	Diskussion der Blindproben ohne Naphtalin .....	54
6.5	Vergleich und Diskussion der PAK-Mengen an Handlampen, Funkgeräten und Einstieggriffen .....	54
6.6	Vergleich der Probenräger bei HLF A und HLF B .....	58
6.7	Analyse der Entwicklung der PAK-Mengen im zeitlichen Verlauf .....	59
6.8	Diskussion der Reinigungsmaßnahmen .....	61
6.9	Diskussion brandspezifisches Muster der PAK .....	63
6.10	Darstellung und Diskussion der kanzerogen aktiven PAK .....	65
6.11	Diskussion der vier Thesen .....	72
7.	Maßnahmen/Konzepte zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppung .....	78
8.	Fazit und Ausblick .....	82
	Literaturverzeichnis .....	84
	Anhang .....	89

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Mögliche Verbrennungs- und Brandfolgeprodukte niedermolekularer Stoffe in verschiedenen Brandphasen – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 197 ff.), bearbeitet durch P. Thomas .....	19
Tabelle 2 – log KOW-Werte der 16 EPA-PAK - Niklas Kükelhahn. Schadstoffbelastung der Ausbilder von feststoffbefeueten Brandübungsanlagen [Bachelorthesis]. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg; 2018. ....	23
Tabelle 3 - 16 EPA-PAK und ihre mutagene und kanzerogene Aktivität – Technische Informationsbibliothek. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [Internet]. Hannover; aufgerufen 8. August 2018. Verfügbar unter: <a href="https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf">https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf</a> .....	25
Tabelle 4 – Mutagene Kanzerogene des Menschen – Wagener C. Einführung in die molekulare Onkologie: Veränderung und Wirkung von Tumorgenen und Tumorproteinen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1996.....	29
Tabelle 5 – Exposition von Einsatzkräften während eines Brandeinsatzes .....	33
Tabelle 6 – Flächen zur Normierung der genommenen Wischproben.....	45
Tabelle 7 – Bestimmungsgrenzen der analysierten PAK und in der Arbeit weiter verwendete Werte für PAK-Mengen unterhalb der Bestimmungsgrenze .....	46
Tabelle 8 – Ergebnisse der Laboranalyse, ohne Blindwerte, normiert und angegeben in $\text{pg}/\text{cm}^2$ ; Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit einem „+“ markiert, dunkelrot = HLF A vor Reinigung, hellrot = HLF A nach Reinigung, grün = HLF B, HL = Handlampe, FM = Faustmikrofon, EG = Einstieggriffe.....	47
Tabelle 9 – Ergebnisse der Blidwertanalyse, normiert und angegeben in $\text{ng}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit einem „+“ markiert, HL = Handlampe, FM = Faustmikrofon, EG = Einstieggriffe.....	48
Tabelle 10 – Ausreißer der Abbildungen 20 bis 23 (Boxplots), angegeben in $\text{pg}/\text{cm}^2$ .....	57
Tabelle 11 – Schnittmenge der 16 EPA-PAK und der 8 EU-PAK und ihre mutagene und kanzerogene Aktivität – Technische Informationsbibliothek. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [Internet]. Hannover; aufgerufen 8. August 2018. Verfügbar unter: <a href="https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf">https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf</a> , von P. Thomas bearbeitet....	65

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Voraussetzungen für die Verbrennungsreaktion .....	14
Abbildung 2 – Energiediagramm einer gehemmten exothermen Reaktion - Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 188).....	15
Abbildung 3 – Darstellung der realen Brandtemperatur in verschiedenen Phasen eines Brandes – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 186) .....	16
Abbildung 4 – Verbrennungsprodukte – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 196).....	18
Abbildung 5 – Benzol – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 140).....	22
Abbildung 6 - Strukturen der 16 PAK-Leitsubstanzen nach US-EPA – Technische Informationsbibliothek. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [Internet]. Hannover; [Zugriff am 8. August 2018]. Verfügbar unter: <a href="https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf">https://www.oc- praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf</a> .....	24
Abbildung 7 – Metabolisierung eines proximalen Karzinogens zu einem ultimalen Karzinogen - Wagener C. Einführung in die molekulare Onkologie: Veränderung und Wirkung von Tumorgenen und Tumorproteinen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1996. ....	28
Abbildung 8 – Die Gruppe nach FwDv 3 - Ausschuss für Feuerwehrrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV). Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz. Stuttgart: Dt. Gemeindeverl.; 2008.....	31
Abbildung 9 – Hamburger Löschfahrzeug (HLF) 6. Generation.....	36
Abbildung 10 – Sitzordnung beim Ausrücken oder nach dem Kommando „Absitzen“ – Ausschuss für Feuerwehrrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV). Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz. Stuttgart: Dt. Gemeindeverl.; 2008. (S. 12).....	38
Abbildung 11 – möglicher Weg der Kontaminationsverschleppung, von der Brandstelle, bis in private Bereiche.....	41
Abbildung 12 – Handlampe ELSPRO Akkuhandleuchte LYR-50 .....	42
Abbildung 13 – Faustmikrofon Sepura IP 67 Ultra RSM .....	43

Abbildung 14 – Einstieggriffe Mannschaftskabine Hamburger Löschfahrzeug.....	43
Abbildung 15 – Zentrifugenröhrchen mit Wischprobe .....	44
Abbildung 16 – Ergebnisse der Blindproben normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze und Naphtalin wurden nicht betrachtet.....	49
Abbildung 17 – Ergebnisse der Naphtalinwerte in den Blindproben normiert auf $\text{ng}/\text{cm}^2$ .....	50
Abbildung 18 – Ergebnisse der eigentlichen Wischproben, ohne die Betrachtung von Naphtalin, normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden.....	51
Abbildung 19 – Ergebnisse der Naphtalinwerte aus den eigentlichen Wischproben normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ .....	53
Abbildung 20 – Vergleich, der bei HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung und HLF B gefundenen PAK-Mengen in allen Wischproben der Handlampen ( $n = 60$ ) mittels Boxplot, Naphtalin wurde nicht berücksichtigt und Ausreißer sind nicht dargestellt .....	55
Abbildung 21 – Vergleich, der bei HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung und HLF B gefundenen PAK-Mengen in allen Wischproben der Faustmikrofone der Handfunkgeräte ( $n = 60$ ) mittels Boxplot, Naphtalin wurde nicht berücksichtigt und Ausreißer sind nicht dargestellt .....	56
Abbildung 22 – Vergleich, der bei HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung und HLF B gefundenen PAK-Mengen in allen Wischproben der Einstieggriffe ( $n = 60$ ) mittels Boxplot, Naphtalin wurde nicht berücksichtigt und Ausreißer sind nicht dargestellt .....	56
Abbildung 23 – Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF A vor der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden.....	59
Abbildung 24 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF A nach der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden.....	60
Abbildung 25 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF B im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden .....	60



Abbildung 26 - Vergleich der PAK-Mengen des HLF A jeweils vor und nach der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden .....	62
Abbildung 27 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF A vor der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, bezogen auf die einzelnen PAK, ohne Naphtalin dargestellt normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden .....	63
Abbildung 28 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF B im wöchentlichen Vergleich, bezogen auf die einzelnen PAK, ohne Naphtalin dargestellt normiert auf $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden .....	64
Abbildung 29 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(a)anthracen im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	66
Abbildung 30 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Chrysen im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	66
Abbildung 31 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(b)fluoranthen im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	67
Abbildung 32 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(k)fluoranthen im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	67
Abbildung 33 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(a)pyren im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	68
Abbildung 34 – Boxplot der Belastung der Faustmikrofone der Handfunkgeräte mit Chrysen im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	68
Abbildung 35 – Boxplot der Belastung der Faustmikrofone der Handfunkgeräte mit Benzo(b)fluoranthen im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	69
Abbildung 36 – Boxplot der Belastung der Faustmikrofone der Handfunkgeräte mit Benzo(a)pyren im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	69
Abbildung 37 – Boxplot der Belastung der Einstieggriffe der Löschfahrzeuge mit Benzo(a)anthracen im Probennahmezeitraum von vier Wochen ( $n = 4$ ) .....	70

## Abkürzungsverzeichnis

PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
aliph.	aliphatisch(e)
KW	Kohlenwasserstoffe
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
EPA	Environmental Protection Agency (US-Umweltbehörde)
org.	organisch(e)
DNS	Desoxyribonukleinsäure
B[a]P	Benzo(a)pyren
AFKzV	Ausschusses für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung
FwDv	Feuerwehr Dienstvorschrift
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Deutschland
HLF	Hamburger Löschfahrzeug oder Hilfeleistungslöschfahrzeug
ABC	atomar, biologisch, chemisch
PSA	persönliche Schutzausrüstung

## 1. Einleitung

### 1.1 Fragestellung

Seit geraumer Zeit wird das Thema „Krebs bei Feuerwehrleuten“, oder auch „Feuerwehrekrebs“ bzw. „Feuerkrebs“ genannt, immer stärker diskutiert und gerät auch immer wieder durch potentiell im Zusammenhang mit der Arbeit der Feuerwehr stehende Krebserkrankungen in den Fokus der Feuerwehren und Unfallkassen (1,2). Langsam wird das Thema auch in der Öffentlichkeit publik (3,4). Innerhalb der Feuerwehr haben sich Organisationen, wie Feuerkrebs gUG gebildet, um das Thema bekannter zu machen und Betroffene zu unterstützen und ihnen eine Plattform zu geben. Mittlerweile bilden sich immer mehr Initiativen in Feuerwehren, die die Einsatzhygiene verbessern und so das potenziell vorhandene Krebsrisiko senken möchten.

Feuerwehrleute sind bei Brandeinsätzen von Schadstoffen umgeben, das ist allgemein bekannt. Nicht ohne Grund tragen Feuerwehrleute Atemschutz und Schutzzüge bei der Brandbekämpfung. Der Brandrauch enthält viele toxische und gesundheitsgefährdende Stoffe (5). Die Aufnahme des Rauches und der Schadstoffe über die Atemwege wird bei der Feuerwehr durch Atemschutz vermieden. An der Brandstelle sind aber auch weitere Schadstoffe zu finden, die zum Beispiel an Rußpartikel gebunden vorkommen können. Bei diesen Schadstoffen handelt es sich unter anderem um Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die teilweise als krebserregend eingestuft sind oder im Verdacht stehen Krebs zu erregen (6). Sie kommen in jeder Phase eines Brandes vor (7) (S.197 ff.). Das legt den Verdacht nah, dass Feuerwehrleute einem erhöhten Krebsrisiko ausgesetzt sind.

Ob Feuerwehrleute einem höheren Krebsrisiko als die Durchschnittsbevölkerung ausgesetzt sind, ist beispielsweise in den USA, Kanada, Südamerika und Australien durch Studien untersucht worden (8–14). In Alberta, einer Provinz in Kanada, sind aufgrund der durchgeführten Studie und deren Ergebnisse einige Krebsarten, die im Zusammenhang mit der Tätigkeit bei der Feuerwehr stehen, als Berufskrankheit anerkannt worden. Die Feuerwehrleute erhalten dort pauschal eine Entschädigung, wenn sie eine gewisse Zeit bei der Feuerwehr tätig waren und an einer der aufgenommenen Krebsarten erkrankten (15,16). Durch die globalisierte Welt und dem damit verbundenem Warenaustausch liegt der Verdacht nahe, dass Brandprodukte, wie sie in den USA, Kanada oder anderen Staaten entstehen, auch in Europa und Deutschland vorkommen können. Das kann an ähnlichen Baumaterialien und insbesondere der ähnlichen Innenausstattung von Räumen liegen, aber auch an einer ähnlichen Vegetation und den gleichen Autos, die in Brand geraten können. Das würde wiederum bedeuten, dass Feuerwehrleute hierzulande auch einem erhöhten Krebsrisiko ausgesetzt sind.

In Europa und Deutschland gibt es derzeit noch sehr wenige Studien zu diesem Thema. Aber gerade durch immer häufiger vorkommende Krebserkrankungen bei Feuerwehrangehörigen scheint es möglich, dass ein erhöhtes Krebsrisiko durch die Aufnahme von karzinogenen Stoffen vorhanden ist (1,17). Dennoch gibt es noch keine Anerkennung als Berufskrankheit wie es bei anderen Berufsgruppen der Fall ist (18–20).

Mittlerweile hat eine Biomonitoring Studie unter der Federführung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) in Zusammenarbeit mit den Feuerwehren in Berlin und Hamburg begonnen. In dieser Studie werden Blut- und Urinproben von Feuerwehrangehörigen nach Brandeinsätzen auf Schadstoffe analysiert, die in Folge des Einsatzes inkorporiert wurden. Außerdem werden Stoffausschnitte von unter der Schutzkleidung getragenen Baumwollanzügen auf Belastungen analysiert (1). Diese Studie untersucht aber nicht, wie groß die Belastung durch Schadstoffe in den Mannschaftskabinen und an den Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehrleute nach einem Brandeinsatz ist. Es wird also keine Analyse der Umgebung und der Möglichkeit der Kontaminationsverschleppung durchgeführt.

Um diese Lücke in der Analyseketten zu schließen, soll diese Arbeit die potentielle Kontaminationsverschleppung der Schadstoffe, die im Verdacht stehen Krebs zu erzeugen, von der Einsatzstelle über die Gerätschaften der Feuerwehrleute bis in die Mannschaftskabinen der Feuerwehrfahrzeuge betrachten. Die Schadstoffbelastung in der Mannschaftskabine und der Gerätschaften ist deshalb so interessant, da sich dort auch Feuerwehrleute aufhalten bzw. die Gerätschaften nutzen, die nicht in der eigentlichen Brandbekämpfung aktiv waren und somit wahrscheinlich schadstofffrei sind, bis sie auf die potentielle Kontamination in den Fahrzeugen und an den Gerätschaften treffen. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass Feuerwehrleute sich bei einem nachfolgenden Einsatz, der möglicherweise kein Brandeinsatz, sondern eine technische Hilfeleistung oder ein anderer Notfall ist, erneut kontaminieren.

Als Schadstoffe, die Krebs verursachen können, gelten beispielsweise PAK. Die PAK stehen im Verdacht, da sich bei diversen beruflichen Tätigkeiten wie in der Aluminiumproduktion, der Koksproduktion, den Gießereien, der Ölgewinnung, beim Dachdecken, beim Straßenasphaltieren und der Schornsteinreinigung, aber auch Arbeiten, die häufig Dieselabgasen ausgesetzt sind, gezeigt hat, dass das Risiko, an Krebs zu erkranken, erhöht ist. Alle diese Tätigkeiten haben die Gemeinsamkeit, dass hier in größeren Mengen PAK vorkommen (21). In anderen Studien zur Schadstoffaufnahme, bzw. zum Krebsrisiko, wurden ebenfalls PAK analysiert (9,11). Daher werden auch in dieser Arbeit PAK analysiert.

Um herauszufinden, ob eine Schadstoffbelastung durch eine potentielle Kontaminationsverschleppung vorhanden ist, werden mit dieser Arbeit das Verhalten von Feuerwehrereinsatzkräften sowie deren Taktik und die damit verbundene potentielle

Kontaminationsverschleppung in die Fahrzeuge herausgearbeitet. Außerdem sollen die Schadstoffbelastungen auf Ausrüstungsgegenständen und in den Mannschaftskabinen, insbesondere auf PAK hin, beprobt, analysiert und diskutiert werden.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit soll Aufschluss darüber geben, welchen Schadstoffbelastungen Feuerwehrleute in ihren Einsatzfahrzeugen nach einer Brandbekämpfung ausgesetzt sind. Hierbei werden insbesondere das Vorgehen der Einsatzkräfte, sowie deren Taktik und das Verhalten nach einem Brandeinsatz reflektiert und diskutiert. Darauf basierend wird ermittelt, welche möglichen Wege es gibt, auf denen eine Kontamination von der Brandstelle in die Feuerwehrfahrzeuge verschleppt werden kann.

Außerdem wird anhand der Arbeitsweise der Feuerwehren in Deutschland herausgearbeitet, welche im Einsatz wahrgenommenen Funktionen zu einer starken Kontamination führen können und somit auch das größte Potential zur Verschleppung der Schadstoffe in die Fahrzeuge bieten. Dabei wird auch anhand der Sitzplatzverteilung, die in der Regel bei den genormten Feuerwehrfahrzeugen identisch ist, geschaut, in welchen Bereichen eine hohe Schadstoffbelastung zu erwarten ist.

Um zu erschließen, welche Schadstoffe am ehesten in den Mannschaftskabinen und an den Ausrüstungsgegenständen erwartet werden können, wird die Zusammensetzung des Brandrauches sowie die anfallenden Schadstoffe dargelegt und aufgezeigt, zu welchem Zeitpunkt eines Brandes welche Schadstoffe vorliegen können.

Um die tatsächliche Exposition zu untersuchen, werden bei zwei Feuerwehrfahrzeugen, die mit ihren Besatzungen regelmäßig an Brandereignissen beteiligt sind, an vordefinierten Gerätschaften und Innenausstattung in der Mannschaftskabine Wischproben entnommen und in einem Labor auf PAK analysiert. Das übergeordnete Ziel besteht darin, zu ermitteln, ob eine Kontaminationsverschleppung von der Brandstelle über Ausrüstungsgegenstände in die Feuerwehrfahrzeuge erfolgt. Im Falle einer Kontaminationsverschleppung sollte das Ausmaß der Schadstoffbelastung der Fahrzeuginnenräume abgeschätzt und ein potentielles Risiko für die Gesundheit der Feuerwehrleute diskutiert werden. Anhand der Vergleichsproben eines der beiden Fahrzeuge, das in wöchentlichem Turnus von innen gewischt wird, wird die Wirksamkeit einer Reinigung als effiziente Maßnahme zur Verringerung der Gesundheitsgefährdung untersucht.

## 2. Brandablauf und Schadstofffreisetzung

### 2.1 Verbrennungsvorgang

#### 2.1.1 Vorbedingungen

Damit eine Verbrennungsreaktion stattfinden kann, müssen gewisse Vorbedingungen erfüllt sein. Hierbei handelt es sich einerseits um die stofflichen und andererseits um die energetischen Voraussetzungen (s. Abbildung 1) (7) (S. 127).

Bei den stofflichen Voraussetzungen müssen der brennbare Stoff, Sauerstoff und das Verhältnis der beiden zueinander „stimmen“. Es ist also ausreichend Brandstoff, wie zum Beispiel die Inneneinrichtung einer Wohnung, aber auch genügend Sauerstoff innerhalb des Brandraumes nötig.

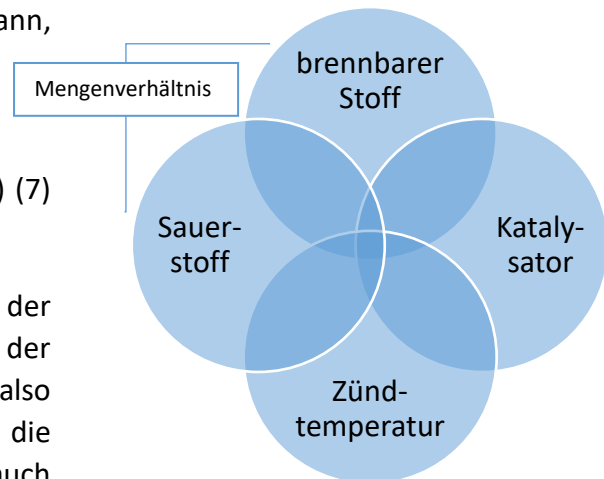


Abbildung 1 – Voraussetzungen für die Verbrennungsreaktion

Der brennbare Stoff wird in einer Redox – Reaktion oxidiert. Das bedeutet, er gibt Elektronen ab und die Oxidationszahl steigt, er wird als Elektronendonator bezeichnet. Der brennbare Stoff kann aus anorganischen oder organischen Verbindungen bestehen. Die Reaktion kommt daher zu Stande, dass die Elemente aus denen der brennbare Stoff aufgebaut ist, zum Beispiel Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel, Phosphor, einige Metalle und weitere, eine geringere Elektronegativität als Sauerstoff haben. Das bewirkt, dass diese Elemente ihre Elektronen nicht so stark anziehen wie das Oxidationsmittel und so kommt es zu einer Reaktion, in der wie beschrieben Elektronen abgezogen und aufgenommen werden (7) (S. 119 ff.).

Dem brennbaren Stoff gegenüber steht der Sauerstoff. Er fungiert in der Redox – Reaktion als Oxidationsmittel bzw. Elektronenakzeptor, seine Oxidationszahl sinkt (7) (S. 119 ff.). Der Sauerstoffanteil an der trockenen Luft beträgt 20,94 Vol.-%. Durch eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration steigt unter anderem die Entzündbarkeit an, was teilweise zu einer Selbstentzündung führen kann. Außerdem hat eine höhere Sauerstoffkonzentration eine gesteigerte Verbrennungsgeschwindigkeit und Brandtemperatur zur Folge. Eine Kerze beispielsweise brennt mit großer, heller und rauschender Flamme, sobald die Sauerstoffkonzentration nur um einige Vol.-% erhöht ist. Bei einer Reduzierung der Sauerstoffkonzentration um nur 1 % sinkt die Lichtausbeute einer Kerze um 30 %, was die Folge der gesunkenen Verbrennungsgeschwindigkeit und Brandtemperatur ist. Damit der Verbrennungsvorgang stattfinden kann, ist eine Mindestsauerstoffkonzentration notwendig. Bei vielen Stoffen liegt diese bei < 17 Vol.-%. Es gibt einige Ausnahmen wie Butan (< 12 Vol.-%) und Wasserstoff (< 5 Vol.-%) (7) (S. 162). Damit die Verbrennung stattfinden kann müssen

Sauerstoffradikale vorliegen, die entweder durch Energieeinwirkung oder durch die Radikalreaktion entstehen (7) (S. 166).

Das richtige Mengenverhältnis des brennbaren Stoffes und des Sauerstoffes hat Auswirkungen auf die Verbrennungsgeschwindigkeit. Liegt das richtige Verhältnis nicht optimal vor, ist eine Verbrennungsreaktion zwar möglich, läuft jedoch deutlich langsamer ab. Ist die Verbrennungsgeschwindigkeit einer bestimmten Konzentration, die abhängig von dem brennbaren Stoff ist, gleich null, kann ein eigenständiges Verbrennen nicht mehr stattfinden (7) (S. 167).

Um die energetischen Voraussetzungen zu erfüllen, sind die Zündtemperatur und die Katalysatoren von entscheidender Bedeutung. Wenn die stofflichen Voraussetzungen gegeben sind, benötigt es einen energetischen Anstoß, um die Verbrennungsreaktion zu starten. Da die Temperatur mit der Bewegung der Atome gekoppelt ist und eine schnellere Bewegung der Atome auch eine höhere Temperatur mit sich bringt und damit auch ein höheres energetisches Niveau vorliegt, wird über die Temperatur angegeben, welcher energetische Anstoß notwendig ist, um eine Verbrennungsreaktion zu starten. Diese Temperatur ist die Zündtemperatur. Die vorhandenen Katalysatoren sind als Radikalstarter wichtig für den energetischen Ablauf der Verbrennung (7) (S. 176 ff.).

Die Zündtemperatur wird durch den Wärmezustand bzw. das Wärmeniveau des Stoffes bestimmt. Diese Temperatur ändert sich je nach Dauer der thermischen Aufbereitung. In der Zeit vor dem Entzünden (sichtbare Flammenerscheinung) werden Startradikale als Voraussetzung für die dann selbständig ablaufende Kettenreaktion gebildet (7) (S. 179 ff.).

Katalysatoren helfen einem gehemmten System dabei die Aktivierungsenergie aufzubringen, indem sie z. B. Verbindungen mit mindestens einem der Ausgangsstoffe eingehen und so eine reaktionsfähigere Zwischenverbindung bilden (s. Abbildung 2) (7) (S. 187).

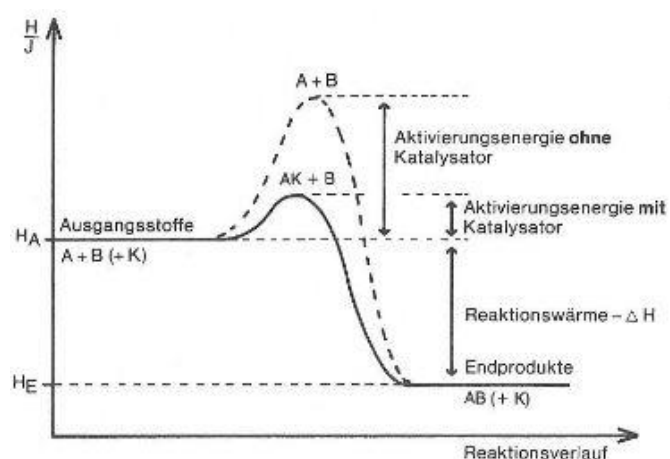


Abbildung 2 – Energiediagramm einer gehemmten exothermen Reaktion - Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 188)



### 2.1.2 Ablauf eines Brandes

Ein Brand wird in unterschiedliche Phasen eingeteilt. Das ist wichtig, da in den unterschiedlichen Brandphasen verschiedene Schadstoffe eine Rolle spielen. Außerdem ist der Brandverlauf entscheidend, um die Taktik der Feuerwehr zu erläutern und so herauszufinden, mit welchen Schadstoffen Feuerwehrangehörige bei der Brandbekämpfung kontaminiert werden können.

Um einen Brandverlauf grafisch zu beschreiben, kann die Brandverlaufskurve verwendet werden. Auf der Y-Achse werden hier die realen Brandtemperaturen und auf der X-Achse die verschiedenen Brandphasen im zeitlichen Verlauf dargestellt (s. Abbildung 3). Es handelt sich bei dem dargestellten Brandverlauf um einen natürlichen Brandverlauf, der durch die vorhandene Brandlast gesteuert wird. Das bedeutet, dass der Brand nicht durch eine unzureichende Sauerstoffmenge limitiert ist, sondern sich abhängig vom vorhandenen Brandgut entwickelt.

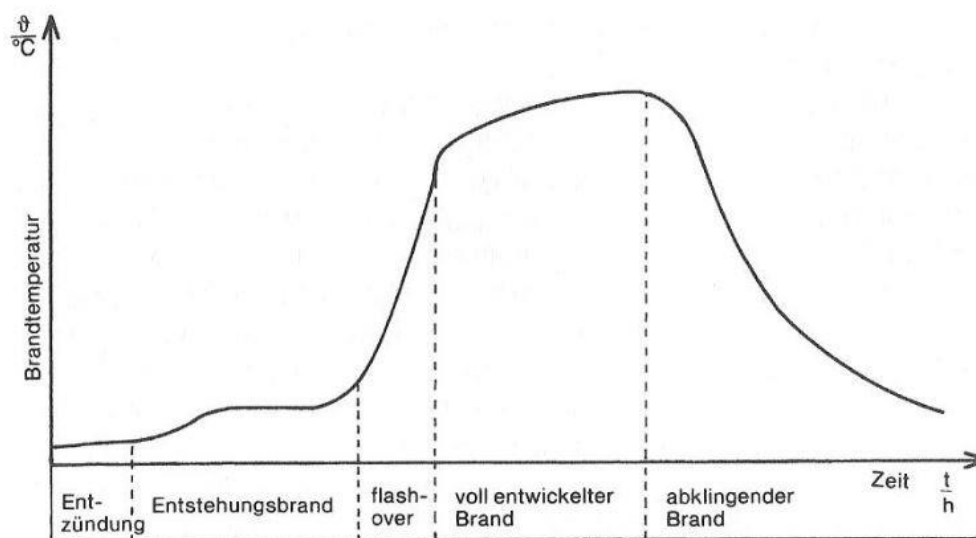


Abbildung 3 – Darstellung der realen Brandtemperatur in verschiedenen Phasen eines Brandes – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 186)

Bei der Entzündung müssen die in Kapitel 2.1.1 genannten Faktoren zutreffen. In dieser Phase werden Startradikale durch Energieeinwirkung gebildet, bis die Verbrennungsreaktion als Kettenreaktion anläuft. Eine sichtbare Flammeneerscheinung ist die Folge. Das bedeutet, dass die Entzündung in den Entstehungsbrand übergegangen ist. Dieser Entstehungsbrand dauert je nach vorhandenem Brandstoff und Sauerstoff unterschiedlich lange. Bei einem Entstehungsbrand steigen die Temperaturen langsam an. Durch diese Temperaturen werden andere brennbare Stoffe in der Umgebung des Brandes thermisch aufbereitet. Es findet eine Pyrolyse statt. Es bilden sich so genannte Pyrolysegase, die sich aus getrennten chemischen Stoffen des Brandgutes mit den in der Umgebung vorhandenen Gasen bilden. Diese Gase sind brennbar. Nach einer gewissen Zeit der thermischen Aufbereitung liegen die Pyrolysegase und der Sauerstoff in einer Konzentration vor, die zulässt, dass sie sich von selbst durch die



Hitzeeinwirkung des Brandes entzünden. Durch diese Kettenreaktion entzünden sich alle im Brandraum gesammelten Pyrolysegase schlagartig. Aufgrund des hohen Hitzeanstiegs entzünden sich alle anderen Oberflächen der brennbaren Stoffe innerhalb des Brandraumes in kürzester Zeit. Dieser Prozess nennt sich Flash-Over (22). Steht nun der gesamte Raum in Vollbrand ist die Phase des voll entwickelten Brandes erreicht. Die Temperaturen können zu dieser Zeit mehr als 1000 °C betragen. Wenn die Brandlast überwiegend verbrannt ist und somit immer weniger brennbare Stoffe vorhanden sind, nehmen der Brand und die Temperatur ab. Es handelt sich nun um einen abklingenden Brand. Dieser wird immer geringer, bis die in Kapitel 2.1.1 genannten Voraussetzungen nicht mehr erfüllt sind und die Verbrennungsgeschwindigkeit gleich null ist und die Verbrennungsreaktion zum Erliegen kommt.

Feuerwehrtaktisch lässt sich ein Brandverlauf in fünf Brandphasen einteilen. Phase 1 ist der Entstehungsbrand, wobei eine deutliche Flammenbildung, aber ein geringer Rußanteil im Rauchgas vorhanden ist. Darauf folgt der Vollbrand, der sich durch einen stabilen Abbrand und konstante Temperaturen, Strahlungswerte und Massenströme auszeichnet. Anhand der Stärke der Rußbildung lässt sich in dieser Phase der Anteil von Schadstoffen im Rauchgas abschätzen. In der Phase der Brandbekämpfung entstehen durch die Wirkung des Löschmittels ungünstige Brandbedingungen, wie niedrige Temperaturen und eine geringe Sauerstoffkonzentration, die zur Folge haben, dass vermehrt Schadstoffe durch unvollständige Verbrennung entstehen. Während der Nachlösch- und Abkühlungsphase sind die Temperaturen des Brandgutes immer noch sehr hoch, deshalb können in dieser Phase Schadstoffe über Verdampfungs- und Zersetzungsprozesse in die Luft gelangen. In der letzten Phase, den Aufräumarbeiten auf der kalten Brandstelle, sind viele Schadstoffe schon verdampft oder an Ruß und Aschen gebunden (7) (S. 193 f.).

## 2.2 Schadstoffe/ Verbrennungsprodukte Brandstelle

### 2.2.1 Verbrennungs-/ Zersetzungsprodukte

Bei einem Brand können Stoffe gebildet werden, die andere Stoffe mit einer toxischen oder anderweitig gefährlichen Auswirkung enthalten können, nachfolgend werden einige dieser Verbindungen beschrieben: Zu den toxischen Stoffen können Oxidations- und Zwischenprodukte, aber auch Monomere und lineare Kettenbruchstücke des Brandstoffes, die zu Aromaten kondensieren können, gehören. Die Asche, als nichtbrennbarer Rückstand des Brandgutes, an deren poröse große Oberflächen, Stoffe wie Aromaten, Chloraromaten und Kondensationsprodukte anlagern können. Diese Stoffe sind aufgrund der festen und langfristigen Bindung nicht bioverfügbar, jedoch sind die enthaltenen anorganischen Stoffe teilweise in Wasser löslich. Ebenfalls kann Schlacke vorhanden sein, also geschmolzene und nachträglich erstarrte, nichtbrennbare Produkte, in deren Einschlüssen unverbrannte bzw. zersetzte Stoffe gebunden sein können. Im Ruß können teerartige Verbindungen sowie kondensierte Aromaten, vernetzte Verbindungen, Polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD)/Polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und flüchtige Kondensate gebunden sein.

Besonders flüchtige Aromaten wie Benzol, Chlorbenzol und Phenole können unmittelbar nach einem Brand an der Rußoberfläche adsorbiert bzw. kondensiert werden. Dadurch kann man mit diesen Stoffen bei den Aufräumarbeiten leicht in Kontakt kommen. Im Löschmittel selbst sind in der Regel Wasser, Tenside und Salze enthalten. Nach dem Löschvorgang können hier emulgiert oder gelöst andere Stoffe vorliegen und sogar durch Lösungsvermittler unlösliche Verbindungen mitgeschleppt werden. Beim Rauchgas wird zwischen heißem und kaltem Rauchgas unterschieden. In heißen Rauchgasen können nichtbrennbare Verbrennungsprodukte, Dämpfe, Ruß und Flugaschen enthalten sein. Die schädigende Wirkung kommt aufgrund von Oxidationsprodukten wie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$  oder  $\text{P}_4\text{O}_{10}$ , Nebenprodukten wie  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{COCl}_2$  oder organischen Oxidationsprodukten und Pyrolyseprodukten zustande. Kalte Rauchgase enthalten vor allem noch gasförmige Verbindungen wie  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{COCl}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  und Halogenwasserstoffe (7) (S. 192 f.).

Um zu erschließen, welchen Schadstoffen die Feuerwehrangehörigen potenziell ausgesetzt sind, kann die Schadstoffbildung in drei Gruppen unterteilt werden. Die Dampfbildung, Produkte der unvollständigen Verbrennung und Verbrennungsprodukte. Aromatische

Element	Oxidationsprodukt	Reaktionsprodukte und Nebenprodukte bei unvollständiger Verbrennung
C	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$
H	$\text{H}_2\text{O}$	
O	$\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$	
N	$\text{N}_2$	$\text{NO}_x$ , $\text{NH}_3$ , $\text{NH}_2\text{R}$ (Stickoxide, Ammoniak, Amine)
S	$\text{SO}_2$	$\text{SO}_3$ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), $\text{H}_2\text{S}$ , HSR (Schwefeltrioxid, -wasserstoff, Mercaptane)
P	$\text{P}_4\text{O}_{10}$ ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )	$\text{PH}_3$ (Phosphorwasserstoff)
Cl		$\text{HCl}$ , $\text{Cl}_2$
Br		$\text{HBr}$
F		$\text{HF}$
C, N		$\text{HCN}$
C, O, Cl		$\text{COCl}_2$ (Phosgen)

Abbildung 4 – Verbrennungsprodukte – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 196)

Verbindungen wie

Benzole, Phenole, Diphenylether und Biphenyle sowie Teer und Bitumen und Halogenverbindungen können durch Verdampfen Schadstoffe bilden, die sich leicht an Rußteilen anlagern können (7) (S. 195 f.). Das Verdampfen ist das Überführen einer Flüssigkeit oder Feststoffes in den gasförmigen Zustand. Der Stoff verdampft sobald der Dampfdruck über dem System gleich dem Druck des Systems selbst ist (23). Eine unvollständige Verbrennung ist dadurch charakterisiert, dass zu wenig Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht und so der Abbau der Kohlenwasserstoffe nicht vollständig erfolgt. Die Zwischenprodukte lagern sich als Rußpartikel zusammen. Das ist dann der Fall, wenn deutlich mehr Kohlenstoff als Wasserstoff vorhanden ist, da pro Kohlenstoffatom 4-mal so viel Sauerstoff verbraucht wird, wie bei dem Wasserstoffatom (7) (S. 136). Diese entstandenen niedermolekularen monomeren Abbauprodukte sind teilweise hochtoxisch. Dazu gehören Aromaten und Halogenaromaten, PAK, polyhalogenierte Dibenzo-p-dioxine, und Dibenzofurane (PCDD/ PCDF) und aliphatische Aldehyde. Da die brennbaren Stoffe mit dem Luftsauerstoff reagieren, entstehen dadurch Oxide und dabei insbesondere anorganische Oxidationsprodukte. Entstehende Produkte können der Abbildung 4 entnommen werden.

Um zu ermitteln, welche potentiell vorhandenen Schadstoffe einer Brandstelle zu welcher feuerwehrtaktischen Phase eines Brandes aus Abschnitt 2.2.1 zugeordnet werden können, lässt sich die folgende Tabelle verwenden:

Tabelle 1 - Mögliche Verbrennungs- und Brandfolgeprodukte niedermolekularer Stoffe in verschiedenen Brandphasen – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 197 ff.), bearbeitet durch P. Thomas

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

		Chloraromaten, PCDD/ PCDF, gesättigte und ungesättigte KW, CKW, PBrDD/ PBrDF	Chloraromaten, PCDD/ PCDF, gesättigte und ungesättigte KW, CKW, PBrDD/ PBrDF	gesättigte und ungesättigte KW, CKW, PBrDD/ PBrDF	CKW, PBrDD/ PBrDF
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>2</sub> , Aromaten, <b>PAK</b> , gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, Aldehyde, Carbon- säuren	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, NO <sub>2</sub> , Aromaten, <b>PAK</b> , gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, Aldehyde, Carbon- säuren	Aromaten, <b>PAK</b> , Aldehyde	Aromaten, <b>PAK</b> , Aldehyde
Polymer mit Aromaten	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Aromaten, <b>PAK</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Aromaten, <b>PAK</b> , Alkene, Aldehyde	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Aromaten, <b>PAK</b> , Alkene, Aldehyde	Aromaten, <b>PAK</b> , Alkene, Aldehyde	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, HCN, NO <sub>x</sub> , Ammoniak, Aromaten, <b>PAK</b> , Amine, KW, Aldehyde, Carbon- säuren, Isocyanate	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCN, NO <sub>x</sub> , Ammoniak, Aromaten, <b>PAK</b> , Amine, KW, Aldehyde, Carbon- säuren, Isocyanate	Aromaten, <b>PAK</b> , Amine, Aldehyde	Aromaten, <b>PAK</b> , Amine, Aldehyde
Polymer mit Halogenen	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCl, CKW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCl, COCl <sub>2</sub> , CKW, Chloraromaten, PCDD/ PCDF, Aromaten, gesättigte und	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCl, COCl <sub>2</sub> , CKW, Chloraromaten, PCDD/ PCDF, Aromaten, gesättigte und	CKW, Chloraromaten, PCDD/ PCDF, Aromaten, gesättigte und ungesättigte	Chloraromaten, PCDD/ PCDF, Aromaten, PBrDD/ PBrDF

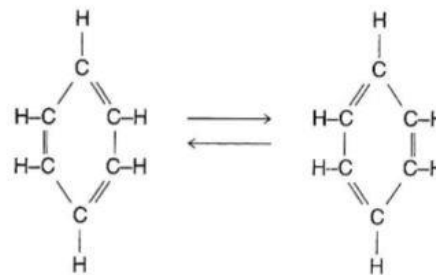
		ungesättigte KW, PBrDD/ PBrDF	ungesättigte KW, PBrDD/ PBrDF	KW, PBrDD/ PBrDF	
Cellulose (Holz, Papier, Zellstoffe)	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Aldehyde, Aromaten, <b>PAK</b> , Alkohole, Essigsäure, KW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Aldehyde, Aromaten, <b>PAK</b> , Alkohole, Essigsäure, KW	Aldehyde, Aromaten, <b>PAK</b> , Alkohole, Essigsäure, KW	(Aromaten), <b>PAK</b>
Eiweißpro- dukte (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, HCN, H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , Amine, Aromaten, <b>PAK</b> , KW	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HCN, H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , Amine, Aromaten, <b>PAK</b> , KW	Amine, Aromaten, <b>PAK</b>	(Aromaten), <b>PAK</b>
org. Schwefelver- bindungen	CO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , Mercaptane	CO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, Aromaten, <b>PAK</b> , KW	CO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, Aromaten, <b>PAK</b> , KW	Aromaten, <b>PAK</b>	(Aromaten), <b>PAK</b>
org. Phosphor- verbin- dungen	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, P <sub>4</sub> O <sub>10</sub> , Aromaten, <b>PAK</b>	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, P <sub>4</sub> O <sub>10</sub> , Aromaten, <b>PAK</b>	Phosphor- säure, Aromaten, <b>PAK</b>	Phosphor- säure, (Aromaten), <b>PAK</b>
PAK sind <b>fett/kursiv</b> markiert ( ) – Stoffe, die nur noch in geringen Anteilen vorhanden sind					

Wie die Tabelle zeigt, entstehen bei fast jedem Brandstoff und nahezu jeder Phase eines Brandes PAK als Brandfolgeprodukt. Das bedeutet, dass eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass bei einer potentiellen Kontaminationsverschleppung durch die Feuerwehrangehörigen ein Anteil von PAK in der Kontamination mit Brandschadstoffen enthalten sein sollte. Somit können die PAK bei verstärktem Vorhandensein als Indikator für eine Kontaminationsverschleppung gesehen werden. Voraussetzung dafür ist, dass Blindproben keine erhöhten Grundwerte der zu beprobenden Flächen im Vorhinein aufzeigen. Des Weiteren wurden PAK in anderen Studien untersucht, um eine Aufnahme der Schadstoffe nach Brandeinsätzen und somit ein potentielles Krebsrisiko festzustellen. So unter anderem bei Keir et al. (11) bei der Untersuchung von Feuerwehrleuten des Ottawa Fire Service. Aufgrund dieser Tatsachen wird sich die später folgende Analyse auf PAK konzentrieren. Auf welche PAK sich die Analyse bezieht und aus welchen Gründen, wird in Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 eingegangen. Um herauszustellen, warum PAK für Feuerwehrangehörige schädlich sein können, werden die Eigenschaften und die Schädwirkung von PAK in den folgenden Abschnitten erläutert.

## 2.2.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe oder PAK bestehen aus Kohlenstoffatomen mit verbundenen Seitenketten, die aus Wasserstoffatomen oder anderen Stoffen bestehen können, und sind zu Ringen zusammengefügt. Diese Ringe bestehen in der Regel aus sechs Kohlenstoffatomen. In den unterschiedlichen PAK sind die Ringe zu zwei bis sieben Stück zusammengelagert (6). PAK bilden also eine Klasse von organischen Substanzen, die in komplexen Gemischen in der eben beschriebenen Grundstruktur von mehreren hundert chemischen Verbindungen (Kongeneren) vorliegen (24). Die PAK entstehen durch unvollständige Verbrennungen, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, also auch im Falle eines Brandes bzw. bei den Löscharbeiten. Durch die spezielle Anordnung der Elektronen in diesen Gebilden, zählen die PAK in der Chemie zu den Aromaten. Diese Anordnung ist für die besonderen chemischen Eigenschaften verantwortlich, auf die in Kapitel 2.2.3 eingegangen wird (6).

Ein Beispiel für einen Aromaten mit einem charakteristischen Sechsring ist Benzol. In Abbildung 5 kann die besondere Elektronenanordnung gezeigt werden. Die Summenformel ist  $C_6H_6$  und die Verbindung weist drei Doppelbindungen auf. Diese Doppelbindungen haben keinen festen Platz, sondern sind variabel im Ring angeordnet.



Man stellt deshalb den Benzolring durch folgende abgekürzte Schreibweise dar:



Abbildung 5 – Benzol – Rodewald G. Brandlehre. 6., überarb. Aufl.  
Stuttgart: Kohlhammer; 2007. (S. 140)

Es können sich mehrere dieser Benzolringe zu kondensierten Aromaten zusammenlagern. Bei der unvollständigen Verbrennung entstehen viele solcher Zusammenlagerungen wie beispielsweise Ruß- bzw. Graphitteilchen, diese können bis zu 100.000 C-Atome enthalten. Ebenso entstehen während der thermischen Zersetzung niedermolekulare kondensierte aromatische Verbindungen, die eigentlichen PAK (7) (S. 139 ff.) (s. Abb 7).

Da PAK häufig als Gemische auftreten, werden bei PAK – Analysen meistens die „Stellvertreter“ für diese Gruppe untersucht. Bei diesen „Stellvertretern“ handelt es sich um 16 PAK, die als besonders giftig und leicht nachweisbar gelten. Sie wurden 1977 durch die US-Umweltbehörde (EPA) in die Gruppe der „Priority Pollutants“ des „US-Clean Water Acts“ aufgenommen. Sie werden in Analysen deshalb häufig als die 16 EPA-PAK bezeichnet (6). Die 16 EPA-PAK sind von vielen Wissenschaftlern als repräsentativ für alle PAK anerkannt, obwohl es schwierig ist, eine Gruppe von tausenden Stoffen durch ein paar wenige darzustellen. Andersson und Achten diskutieren in einer Veröffentlichung, ob die Nutzung dieser 16 EPA-PAK noch zeitgemäß ist. Dabei gibt es einige Vorteile, die zu beachten sind. Es handelt sich um



einen begrenzten Analyseaufwand, da nur 16 PAK analysiert werden. Sie sind in der Regel weltweit vergleichbar, da die meisten Wissenschaftler diese 16 EPA-PAK analysieren. Auch Veränderungen über Jahrzehnte können gut verglichen werden, da schon seit langem diese Gruppe von PAK analysiert werden (25). Unter anderem aufgrund dieser Vorteile werden auch in dieser Arbeit diese 16 EPA-PAK analysiert.

### 2.2.3 Eigenschaften von PAK

Tabelle 2 – log KOW-Werte der 16 EPA-PAK - Niklas Kükelhahn. Schadstoffbelastung der Ausbilder von feststoffbefeuereten Brandübungsanlagen [Bachelorthesis]. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg; 2018.

EPA-PAK	Log Kow-Wert
<b>Naphthalin</b>	3,35
<b>Acenaphthylen</b>	4,07
<b>Acenaphthen</b>	3,92
<b>Fluoren</b>	4,18
<b>Phenanthren</b>	4,52
<b>Anthracen</b>	4,5
<b>Fluoranthen</b>	5,2
<b>Pyren</b>	5
<b>Benzo(a)anthracen</b>	5,91
<b>Chrysen</b>	5,86
<b>Benzo(b)fluoranthen</b>	5,78
<b>Benzo(k)fluoranthen</b>	6,11
<b>Benzo(a)pyren</b>	6,35
<b>Dibenz(a,h)anthracen</b>	6,75
<b>Benzo(g,h,i)perylen</b>	6,9
<b>Indeno(1,2,3,c,d)pyren</b>	6,7

Zu einem großen Teil hängen die Eigenschaften von PAK von der Anzahl der Ringe in den kondensierten Aromaten ab. PAK verhalten sich lyophil, je mehr Ringe zusammengelagert sind, desto lipophiler ist der Aromat. Daher reichern sich die PAK gut in Fettgeweben von Organismen an (6). In der Tabelle 2 ist der log K<sub>OW</sub>-Wert der einzelnen PAK dargestellt. Der Wert beschreibt den Verteilungskoeffizienten zwischen 1-Octanol und Wasser und dient somit als Parameter für die Lipophilie. Bei Werten bis 4 kann von einer gesteigerten Aufnahme ausgegangen werden und ab einem Wert von 3 wird mit einer Bioakkumulation gerechnet. Bei Werten zwischen 4 und 6 oder höher ist die Bioakkumulation wieder geringer (26) (S. 205-207). Die EPA-PAK weisen Werte zwischen 3,35 und 6,9 auf. Dementsprechend können sie sich in den Fettgeweben der Haut anreichern, werden

aber nicht in die Blutgefäße (hydrophil) gelangen. In den Fettgeweben der Haut werden PAK metabolisiert und gelangen auf diesem Weg weiter in den Körper. Die PAK wurden dann über die Haut absorbiert. Eine inhalative Aufnahme der PAK kann zumindest bei Feuerwehrleuten, die Atemschutz tragen (umluftunabhängig oder Filter), in der Phase der Brandbekämpfung ausgeschlossen werden. Jedoch ist die inhalative Aufnahme nach dem Absetzen des Atemschutzes und beim Ausziehen der Schutzkleidung möglich. Ein weiterer Aufnahmeweg für PAK ist die Ingestion, also die orale Aufnahme, die beispielsweise aufgrund einer Kontaminationsverschleppung passieren kann. Das ist der Fall, wenn ein Feuerwehrangehöriger seine Schutzkleidung auszieht und danach, ohne sich zu reinigen, etwas isst. Gerade bei länger andauernden Einsätzen kann diese Form der Aufnahme in den Verpflegungsbereichen an der Einsatzstelle passieren.

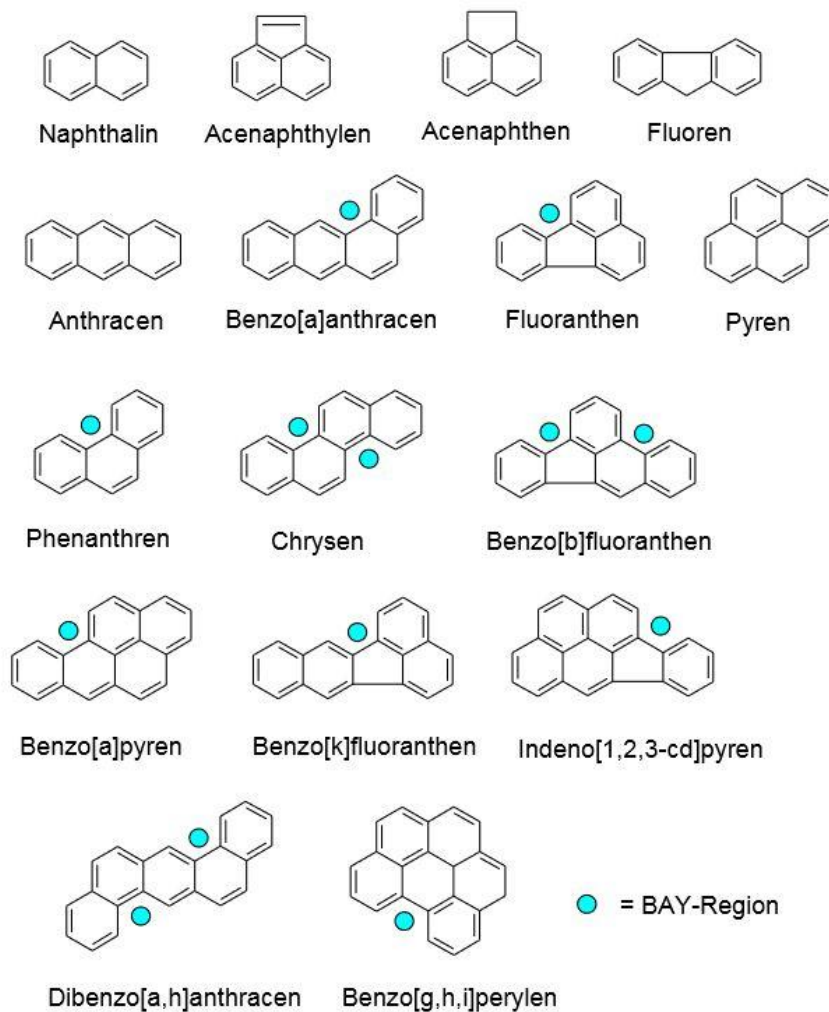


Abbildung 6 - Strukturen der 16 PAK-Leitsubstanzen nach US-EPA – Technische Informationsbibliothek. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [Internet]. Hannover; [Zugriff am 8. August 2018]. Verfügbar unter: [https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH\\_de.pdf](https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf)

solcher Studien zusammengefasst. Hier wurde der Zusammenhang zwischen dem Kontakt mit PAK und Krebserkrankungen bestätigt. Bei einer hohen Konzentration von PAK am Arbeitsplatz können mögliche Krebsherde im Bereich der Lunge, der Haut und der Blase auftreten. Weitere Krebserkrankungen können im Kehlkopf und der Niere in Erscheinung treten (21). Einige PAK wurden in Tierversuchen als eindeutig krebserzeugend eingestuft. Durch sie können, wie oben beschrieben, Lungenkarzinome und Hautkrebs verursacht werden. Die kanzerogenen Eigenschaften gehen mit dem Vorhandensein einer so genannten BAY – Region einher. Diese Region ist in einigen PAK, auch einigen der 16 EPA – PAK, zu finden (s. Abb 6). Als Indikator für die Kanzerogenität wird Benzo[a]pyren als Leitparameter genutzt, da dieser Stoff eine gute Nachweisbarkeit besitzt, genotoxisch und stark kanzerogen ist (27,28). Die kanzerogene bzw. mutagene Aktivität der 16 EPA-PAK unterscheidet sich teils erheblich voneinander (s. Tabelle 3) (27). Die EU hat 8 PAK bestimmt, die besonders krebserregend bzw. mutagen aktiv sind (29). Die Schnittmenge dieser 8 EU-PAK und der 16 EPA PAK sind Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen,

Die Gefahr durch PAK ist in der Vergangenheit bereits in mehreren Studien untersucht worden. Meistens ging es um berufliche Tätigkeiten, die viel in Kontakt mit PAK stehen, bzw. im Verdacht stehen, mit PAK in Kontakt zu kommen. Hier lassen sich beispielsweise die Aluminiumproduktion, Koksproduktion, Arbeit in den Gießereien, Arbeit in der Ölgewinnung, Dachdeckerei, Straßenasphaltierungen und

Schornsteinreinigung, aber auch Arbeiter, die häufig Dieselabgasen ausgesetzt sind, anführen. In einer Studie von Bofetta et al. (1997) wurden Ergebnisse



Benzo(a)pyren und Dibenzo(a,h)anthracen. Da diese sechs PAK eine besondere mutagene bzw. kanzerogene Aktivität aufweisen, sind diese wichtig, um das Krebsrisiko einschätzen zu können und werden in den Ergebnissen genauer betrachtet.

*Tabelle 3 - 16 EPA-PAK und ihre mutagene und kanzerogene Aktivität – Technische Informationsbibliothek. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [Internet]. Hannover; aufgerufen 8. August 2018. Verfügbar unter: [https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH\\_de.pdf](https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf)*

Substanz	Mutagenität	Kanzerogenität
Naphthalin (NAP)	Inaktiv	Inaktiv
Acenaphthylen (ACY)	k. A.	k. A.
Acenaphthen (ACE)	Aktiv	k. A.
Fluoren (FLE)	Inaktiv	k. A.
Phenanthren (PHE)	Inaktiv	Inaktiv
Anthracen (ANT)	Inaktiv	Aktiv
Fluoranthen (FLA)	Inaktiv bis schwach aktiv	Inaktiv
Pyren (PYR)	Inaktiv	Inaktiv
Benzo(a)anthracen (BaA)	Schwach bis mäßig aktiv	Schwach aktiv
Chrysen (CHR)	Mäßig aktiv	Schwach aktiv
Benzo(b)fluoranthen (BbF)	Mäßig aktiv	Mäßig bis stark aktiv
Benzo(k)fluoranthen (BkF)	Mäßig aktiv	Schwach aktiv
Benzo(a)pyren (BaP)	Sehr stark aktiv	Sehr stark aktiv
Dibenzo(a,h)anthracen (DahA)	Mäßig bis stark aktiv	Stark bis sehr stark aktiv
Benzo(g,h,i)perylen (BghiP)	Schwach aktiv	Inaktiv bis schwach aktiv
Indeno(1,2,3,c,d)pyren (IcdP)	Mäßig aktiv	Mäßig aktiv

## 3. Krebserkrankungen

### 3.1 Entstehung von malignen Tumoren

Eine Zelle kann sich teilen, um nach Verletzung oder Absterben von Zellen das geschädigte Gewebe zu ersetzen und zu reparieren. Dies geschieht im Normalfall aber nur, wenn der Bedarf dazu da ist, ansonsten wird die Vermehrung der Zellen eingestellt. Verantwortlich für diesen „Ein-Aus-Mechanismus“ sind zwei Genarten. Einerseits die Protoonkogene, die auf Wachstumssignale reagieren und andererseits die Tumorsuppressorgene, bei denen die Reaktion auf dem Nichtvorhandensein von Wachstumssignalen basiert (30) (S. 5).

Im Allgemeinen fungieren die Protoonkogene als positive Regulatoren der Zellproliferation (Zellteilung und –wachstum) (30) (S. 5). Die aus den Protoonkogenen entstehenden Produkte, zu denen eine Vielzahl an unterschiedlichen Proteinen gehören, sind in verschiedenste Prozesse, beispielsweise bei Signalweiterleitung, Gentranskription, Wachstumsfaktoren, Proteinbiosynthese und weiteren Vorgängen, eingebunden.

Die Tumorsuppressorgene sorgen mit ihren Produkten dafür, dass der korrekte Ablauf des Zellzyklus kontrolliert wird, er also zum Beispiel angehalten wird, wenn ein Defekt in der Desoxyribonukleinsäure (DNS) vorliegt und repariert werden muss, oder sie können den kontrollierten Zelltod (Apoptose) auslösen (31).

Kommt es dazu, dass die beschriebenen Protoonkogene mutieren und es zum Zellwachstum auch ohne Wachstumssignale kommt, sind sie zu Onkogenen (Gene, die das Tumorstadium fördern) geworden. Wie Mutationen entstehen können, wird in Abschnitt 3.2 beschrieben. Verlieren zusätzlich bestimmte Tumorsuppressorgene ihre Aktivität funktioniert der „Bremsmechanismus“ für die Zellproliferation nicht mehr und es findet ein unkontrolliertes und anormales Wachstum der Zellen statt (30) (S. 5). Dadurch entsteht ein Zellhaufen, der keine Aufgaben der Ursprungszellen mehr wahrnimmt, sondern sich nur noch durch die Ziele Zellteilung und Überleben der Zellen auszeichnet. Ein sogenannter Tumor (lat. tumor – Schwellung) ist entstanden.

Als zusätzlichen Kontrollmechanismus zu den regulierenden Mechanismen gibt es die Apoptose der Zelle. Sie kommt zum Einsatz, wenn alle Schutzmechanismen vor Tumorbildung nicht gegriffen haben. Die Apoptose bezeichnet den programmierten Zelltod, den Suizid der Zelle (30) (S.9). Die Apoptose wird unter anderem durch das Protein „p53“ ausgelöst. Dieses wird daher auch als „Wächter des Genoms“ bezeichnet. Kommt es zu einem sehr starken Anstieg von p53 – Proteinen, aufgrund von nicht reparierbaren Defekten an der DNA, wird der programmierte Zelltod eingeleitet und die Zelle zerstört sich selbst (30) (S. 18 f.). Ist ein Defekt bzw. eine Mutation im Bereich des p53 – Gens vorhanden, fällt dieser Kontrollmechanismus weg. Ein weiterer Mechanismus, um die Tumorentwicklung zu hemmen oder aufzuhalten, ist die Bildung von einer Zellschicht um das Tumorgewebe, um die Sauerstoffversorgung zu unterbinden. Sogenannte angiogenetische Faktoren der Tumorzellen können aber die Bildung neuer Kapillaren durch das Tumorgewebe fördern (30) (S.8). So gelangt trotz der Zellschicht

um das Tumorgewebe Sauerstoff zu den Tumorzellen und es besteht die Möglichkeit des Weiterwachsens des Tumors und der Metastasierung.

Es gibt zwei Arten von Tumoren. Die benignen (lat. *benigne* – gutartig) und die malignen (lat. *maligne* – bösartig) Tumore. Bei einem benignen Tumor handelt es sich um ein begrenztes Zellwachstum. Das Wachstum hat zwar keinen erkennbaren Zweck, dennoch sind die Zellen hier reifer und ähneln stark den Zellen, von denen sie abstammen. Oftmals wachsen diese Tumore langsamer, wenn sie eine bestimmte Größe erreicht haben und bilden eine Kapsel oder eine Schicht aus fibrösem Gewebe und breiten sich nicht in andere Bereiche des Körpers aus. Maligne Tumore hingegen sind den ursprünglichen Zelltypen nicht mehr ähnlich. Sie haben ihre charakteristischen Merkmale verloren und werden als anaplastisch bezeichnet. Hinzu kommt, dass sich ihre Vermehrung unkontrolliert fortsetzt. Diese malignen Tumore werden als „Krebs“ bezeichnet. Sie werden gefährlich, wenn sie umgebendes Gewebe schädigen bzw. verdrängen oder metastasieren. Beim Metastasieren lösen sich einzelne Krebszellen vom Ort der Entstehung ab und wandern über die Blutbahn bzw. Lymphe in andere Gewebe und infiltrieren diese (30) (S. 7 f.). Die Ausbildung und Entwicklung dieser Tumore ist erst nach Überwinden der oben genannten Schutzvorgänge des Körpers möglich.

### 3.2 Auslöser und Karzinogene

Wie beschrieben, geht der Ausbildung von Krebszellen die Mutation bzw. der Defekt bestimmter Gene voraus (Protoonkogene und Tumorsuppressorgene), wodurch verschiedene Schutzmechanismen des Körpers (Reparaturmechanismen, Apoptose und Zellkapsel) nicht mehr effektiv sind (30). Bei der Art der Mutation kann es sich zum Beispiel um eine Punktmutation handeln, die in unterschiedlichen Formen auftreten kann. Es kann sich dabei um eine Mutation ohne Veränderung der Aminosäuresequenz („silent mutation“), einen Aminosäureaustausch („missense“) oder eine Generierung eines Stop-Codons („nonsense“) handeln. Diese Möglichkeiten werden durch eine Deletion, eine Substitution oder eine Insertion von einzelnen oder mehreren Basen hervorgerufen (32) (S. 5).

Stoffe, die so eine Mutation auslösen können, werden als Mutagene bezeichnet. Als Karzinogene werden Stoffe bezeichnet, die unter definierten experimentellen Bedingungen Krebs erzeugen. Mutagene Karzinogene führen also zu Veränderungen in der DNS und in der Folge zu einem Krebsleiden (32) (S. 6).

Chemische Karzinogene sind krebsauslösende Stoffe. Sie können die benannten Mutationen auslösen, durch die unterschiedliche Arten von Krebs entstehen können (30) (S. 9). Es gibt viele weitere Auslöser, die Krebs zur Folge haben können. Dazu zählen unter anderem Strahlung (UV, Röntgen, Radioaktivität), Hormone, Viren, Bakterien, vorhandene Gewebeanomalien, Mangelzustände und Gewohnheiten in der Ernährung, aber auch die genetische Vorbelastung oder das zunehmende Alter spielen eine Rolle (30) (S. 8 – 33). Alle diese Faktoren können ein erhöhtes Risiko für die Entstehung von Tumorgewebe darstellen. Im Weiteren wird hauptsächlich auf chemische Karzinogene bzw. Karzinogene in Bezug auf berufliche Tätigkeiten eingegangen, da sich PAK dieser Gruppe zuordnen lassen.

Der Krebs am Scrotum (Hodensack) beispielsweise ist die erste Krebserkrankung, die nachweislich durch eine chemische Substanz verursacht wurde. Diese Krebsart wurde im 18. Jahrhundert bei Schornsteinfegern in Großbritannien diagnostiziert. Die Ursache dafür ist Ruß, der sich im Bereich des Scrotum ansammelt (30) (S. 11). Ruß ist, wie in Abschnitt 2 aufgezeigt, ein möglicher Ort einer Ansammlung von einer Vielzahl unterschiedlicher PAK, was für die spätere Betrachtung in Bezug auf Feuerwehrleute festzuhalten ist.

Beispielhaft soll an Benzo(a)pyren (B[a]P) gezeigt werden, wie durch die Metabolisierung Produkte entstehen können, die eine Mutation hervorrufen können. B[a]P ist als Karzinogen der Stufe 1 B eingestuft (33) (S. 453). Dabei ist das B[a]P nur eine Vorform des ultimalen Karzinogens, ein sogenanntes Prokarzinogen. Die Metabolisierung von B[a]P zu Benzo(a)pyren 7, 8-diol, -9, 10-epoxid (BPDE), dem ultimalen Karzinogen, ist in Abbildung 7 dargestellt. B[a]P und weitere PAK sind in ihrer Ausgangsform eher reaktionsträge. Erst nach der Aufnahme in den Körper werden sie zu hochreaktiven Zwischenprodukten verstoffwechselt. B[a]P wird unter anderem durch die Enzyme Cytochrom P450 1A1 und 1B1 und Epoxidhydrasen metabolisch aktiviert. Neben zahlreichen unterschiedlichen Metaboliten kann, wie oben beschrieben, BPDE metabolisiert werden. BPDE ist hochreaktiv und kann so mit der DNS Addukte bilden, die daraufhin Mutationen in der DNS auslösen können, wenn sie nicht vorher repariert werden. Generell wirken die meisten chemischen Mutagene über metabolisierte Produkte des Ausgangsstoffes (32,34).

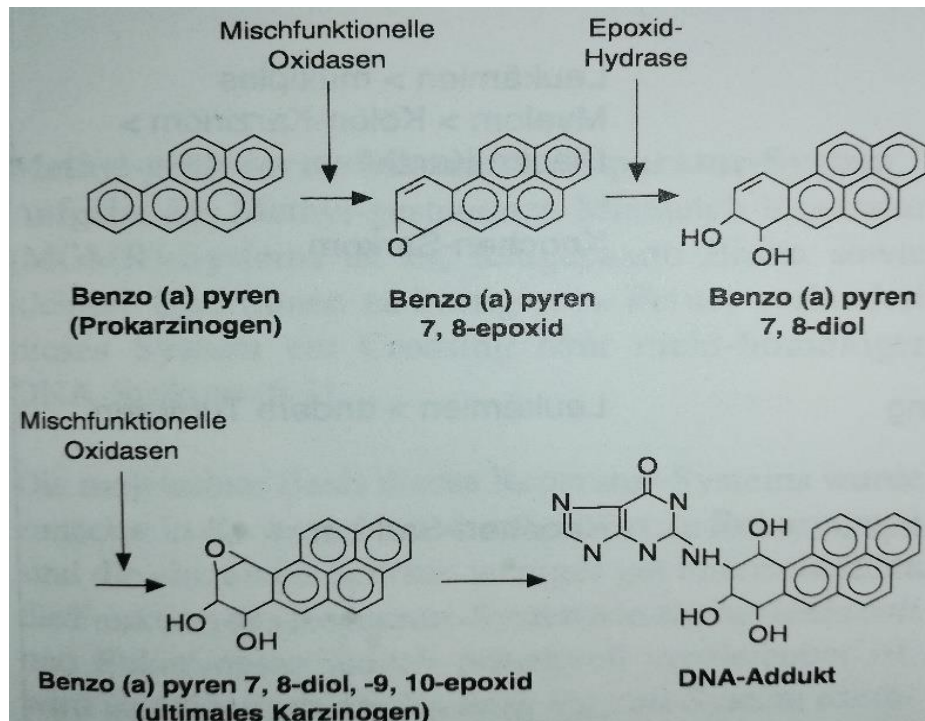


Abbildung 7 – Metabolisierung eines proximalen Karzinogens zu einem ultimalen Karzinogen -  
Wagener C. Einführung in die molekulare Onkologie: Veränderung und Wirkung von  
Tumorgenen und Tumorproteinen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1996.

### 3.3 Zusammenhang von Krebs und der Tätigkeit in der Feuerwehr

In Tabelle 4 sind chemische Mutagene zu sehen, die über epidemiologische Untersuchungen als sicher an der Karzinogenese beteiligt angesehen werden und die Lokalisation der durch diese Stoffe entstehenden Tumore.

*Tabelle 4 – Mutagene Kanzerogene des Menschen – Wagener C. Einführung in die molekulare Onkologie: Veränderung und Wirkung von Tumorgenen und Tumorproteinen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1996.*

Kanzerogen	kanzerogene(r) Inhaltsstoff(e)	Tumorlokalisation
Tabak	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe Nitrosamine	Mund, Pharynx, Larynx, Ösophagus, Lunge, Blase
Schimmel-Pilz	Aflatoxine	Leber
Ruß	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	Skrotum (Karzinom bei Schornsteinfegern)
Anilinfarben	aromatische Amine	Blase (Karzinom bei Arbeitern in Anilinfarbenwerken)

In der Tabelle ist das Karzinogen Ruß verortet, mit PAK als kanzerogene Inhaltsstoffe. Wie oben bereits beschrieben, konnte der Tumor am Scrotum (insbes. bei Schornsteinfegern) auf die dortigen Rußablagerungen während der beruflichen Tätigkeit zurückgeführt werden (30,32). Das deutet daraufhin, dass es auch bei anderen Tätigkeiten, bei denen Menschen mit PAK in Kontakt kommen können, zu einem erhöhten Krebsaufkommen kommen kann.

Das wird durch eine Studie von Bofetta et al. unterstützt. Hier konnte ermittelt werden, dass Menschen, die beruflich mit hohen PAK-Konzentrationen in Kontakt kommen, einem erheblichen Risiko ausgesetzt sind, an Lungen-, Haut- oder Blasenkrebs zu erkranken (21). Wie die Tabelle 1 in Abschnitt 2.2.1 zeigt, liegen in allen Phasen eines Brandes PAK vor (7) (S.196-199). Das legt nahe, dass auch Feuerwehrleute bei einer Brandbekämpfung in einer Umgebung arbeiten, die stark mit PAK belastet ist.

Diese These wird durch unterschiedliche Studien im Bereich der Feuerwehr, insbesondere in Nordamerika, gestützt. Bei Feuerwehrleuten des Ottawa Fire Service wurden in einer Studie von Keir et al. Urin- und Wischproben von der Haut und Luftproben von der direkten Umgebungsluft und deren Schadstoffe eines jeden Feuerwehrmannes während der Brandbekämpfung genommen. Die Probennahmen wurden an den am meisten durch Feuermeldungen frequentierten Wachen in Ottawa durchgeführt. Die Feuerwehrleute waren in fünf aufeinander folgenden 24-Stunden-Diensten tätig und es wurden Proben vor jeder Schicht und nach einem Brandeinsatz genommen. Die Menge an PAK in den Urinproben nach einem Feuer waren im Vergleich zu den Proben zu Schichtbeginn signifikant erhöht (35). Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass PAK in den Körper aufgenommen werden. Es konnte ebenfalls in der Studie festgestellt werden, dass die erhöhten PAK-Werte in Wischproben mit

den PAK-Werten in den Urinproben korrelieren (35) (S. 12751). Diese Studie zeigt dadurch auf, wie wichtig es ist, die Belastung durch PAK zu reduzieren.

Trotz alledem ist ein Grund für die Problematik der Anerkennung von Krebs als Berufskrankheit bei Feuerwehrleuten ebenfalls in der Tabelle 2 verortet. PAK sind als kanzerogener Inhaltsstoff in Tabak zu finden. Sie können hier für Tumore in Mund, Pharynx, Larynx, Ösophagus, Lunge und Blase ursächlich sein. Dementsprechend nimmt ein Mitglied der Feuerwehr, welches raucht, einerseits möglicherweise Schadstoff (PAK) während des Einsatzes auf und andererseits während des Rauchens. Somit ist nicht zweifelsfrei zu bestimmen, ob ein Krebsleiden aus der Tätigkeit als Feuerwehrmitglied oder aufgrund des Rauchens entstanden ist. Dieses eine Beispiel kann man auf weitere Krebsauslöser projizieren. Es kann nicht zweifelsfrei herausgestellt werden, dass ein Krebsleiden aus der Tätigkeit bei der Feuerwehr entstanden ist, es kommen immer weitere potentielle Auslöser dazu, auf die Feuerwehrleute nicht während des eigentlichen Feuerwehrdienstes treffen. Dennoch ist hier festzuhalten, dass Feuerwehrleute aufgrund der Brandeinsätze punktuell sehr hohen PAK-Konzentrationen ausgesetzt sind und dadurch möglicherweise mehr Karzinogene in kürzerer Zeit aufgenommen werden, als es bei der Allgemeinbevölkerung der Fall ist.



## 4. Potentielle Exposition von Feuerwehrleuten

### 4.1 Feuerwehr in der Brandbekämpfung

#### 4.1.1 Grundlagen

Um bei Einsatzlagen der Feuerwehr eine koordinierte und strukturierte Abarbeitung eines Einsatzes, z. B. Hilfeleistung oder einer Brandbekämpfung zu gewährleisten, werden durch die Projektgruppe Feuerwehr-Dienstvorschriften des Ausschusses für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV) die Feuerwehr Dienstvorschriften (FwDv) entwickelt. Sie definieren Standards im Bereich der feuerwehrtechnischen Einsatzabwicklung. Der AFKzV gehört dem Arbeitskreis V der Innenministerkonferenz an. Die FwDv werden den Bundesländern zur Einführung empfohlen und durch die Länder über einen Erlass in Kraft gesetzt. Sie haben somit keinen bindenden Charakter. Sie können durch die Länder auch abgeändert oder gänzlich nicht eingeführt werden (36,37). Dennoch sind die FwDv eine Grundlage, auf der die meisten in Deutschland durchgeführten Feuerwehrtätigkeiten beruhen, auch wenn einzelne Feuerwehren andere oder zusätzliche Einsatztaktikstandards haben.

Zusätzlich zu den FwDv gibt es das durch die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Deutschland (AGBF Bund) definierte Schutzzielszenario, in dem ebenfalls die Aufgabenverteilung bei dem angenommenen Szenario „kritischer Wohnungsbrand“, nachfolgend AGBF – Schutzziel genannt, dargestellt wird. Das AGBF – Schutzziel baut in seinen Grundzügen der Aufgabenbeschreibung auf der FwDv 3 auf. Es wird durch viele Berufsfeuerwehren, aber auch Kommunen mit kleineren Feuerwehren angewendet (38).

Somit bilden die FwDv, wie auch die Aufgabenverteilung im AGBF – Schutzziel die Grundlage dieser Arbeit, um das Vorgehen der Einsatzkräfte und somit die Funktionen mit der potentiell größten Kontamination herauszuarbeiten.

#### 4.1.2 Taktik/ Schutzmaßnahmen

Nach FwDv 3 gliedert sich eine Gruppe in Gruppenführer, Melder, Maschinist, einen Angriffstrupp, einen Wassertrupp und einen Schlauchtrupp. Die drei Trupps bestehen jeweils aus zwei Personen, dem Truppführer und dem Truppmann. Somit besteht die taktische Einheit einer Gruppe aus 9 Personen (s. Abbildung 8) und dem Einsatzmittel, im Normalfall handelt es sich hierbei um ein Löschgruppenfahrzeug, welches über alle nötigen



Abbildung 8 – Die Gruppe nach FwDv 3 - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV). Einheiten im Lös- und Hilfeleistungseinsatz. Stuttgart: Dt. Gemeindeverl.; 2008.

Mittel und Geräte für einen Löschangriff verfügt. Die Gruppe ist die taktische Grundeinheit, eine weitere in der Brandbekämpfung eingesetzte taktische Einheit ist die Staffel. Sie besteht aus Staffelführer, Maschinist, Angriffstrupp und Wassertrupp (S. 6 f.) (39). Beide Einheiten verfügen über ausreichend Kräfte, um eine Brandbekämpfung durchzuführen oder bei Bedarf eine Menschenrettung vorzunehmen. Die Gruppe und die Staffel sind die Einheiten, die in der Regel bei Berufs- und Freiwilligen Feuerwehren zum Einsatz kommen bzw. an der Einsatzstelle aus kleineren Untereinheiten zusammengeführt werden.

Der grundsätzliche Einsatzablauf ist bei der Brandbekämpfung in jeder Form und bei der Menschenrettung identisch. Nachfolgend werden die Aufgaben der einzelnen Funktionen aufgeführt.

Der Einheitsführer (Gruppen- bzw. Staffelführer) führt die Einheit. Zu seinen Aufgaben gehört somit auch die Erkundung in allen Phasen eines Einsatzes. Hierbei überprüft der Einheitsführer das Schadenobjekt von außen und ggf. auch von innen. Der Melder bzw. Führungsassistent unterstützt den Einheitsführer bei seinen Aufgaben, insbesondere bei der Übermittlung von Informationen oder der Übernahme von alleine durchführbaren Aufgaben. Somit ist der Melder im Einsatz den gleichen Gefahren ausgesetzt wie der Einheitsführer. Der Maschinist fährt das Fahrzeug, er bedient Aggregate (z. B. Stromerzeuger) und die Feuerlöschkreiselpumpe bzw. die Tragkraftspritze. Da er sich in der Regel rund um das Fahrzeug aufhält, ist er insbesondere Abgasen der Aggregate und des Fahrzeuges und der Pumpe ausgesetzt. Der Angriffstrupp wird im Normalfall als erster vorgehender Trupp eingesetzt. Er begibt sich direkt in den Gefahrenbereich, um erste Brandbekämpfungsmaßnahmen bzw. eine Menschenrettung einzuleiten, hierbei ist der Trupp Rauchgasen und Hitze ausgesetzt. Außerdem fasst der Trupp verrußte bzw. angebrannte Teile an, um sie aus dem Weg zu räumen, um Platz zu schaffen oder abgelöschtes Brandgut aus der Brandstelle zu bringen. Der Wassertrupp baut die Wasserversorgung von einer Wasserentnahmestelle aus auf. Nachdem er diese Aufgabe erledigt hat, wird er vorerst zum Sicherheitstrupp. Dieser sichert die eigenen unter Atemschutz und im Gefahrenbereich vorgehenden Kräfte ab. Wenn es sich um einen längerfristigen Einsatz handelt, oder die Lage es erfordert, ist es möglich, dass der Wassertrupp den Angriffstrupp ablöst bzw. parallel zum Angriffstrupp vorgeht und als zweiter angreifender Trupp fungiert. Tritt dieser Fall ein, ist der Wassertrupp im gleichen Maße wie der Angriffstrupp im Gefahrenbereich aktiv. Der Schlauchtrupp verlegt die Schlauchleitungen für die vorgehenden Trupps, dabei befindet er sich grundsätzlich nicht im Gefahrenbereich. Bei einem Löschzug, mit den zehn Funktionen, wie sie im AGBF – Schutzziel vorgesehen sind, wird der Schlauchtrupp meistens durch die Drehleiterbesatzung gebildet. Hier ist dann die Aufgabe des Trupps, Menschen über die Drehleiter zu retten. Bei dieser Tätigkeit können sich die Einsatzkräfte im unmittelbaren Gefahrenbereich aufhalten, wenn Personen von den Fenstern gerettet werden.

Bei den in dieser Arbeit untersuchten Einheiten handelt es sich in beiden Fällen um eine Staffel. Die Berufsfeuerwehr Hamburg besetzt die Löschfahrzeuge grundsätzlich mit einer Staffel. Bei anderen Feuerwehren kann das Konzept abweichen. Bei manchen



Berufsfeuerwehren kann die Besatzung auch kleiner sein, z. B. vier bzw. fünf Personen, bestehend aus Einheitsführer, Maschinist und einem Angriffstrupp aus zwei oder drei Personen. Gerade bei freiwilligen Feuerwehren handelt es sich oftmals um die Einheit „Gruppe“ bestehend aus den oben beschriebenen Funktionen.

Tabelle 5 – Exposition von Einsatzkräften während eines Brandeinsatzes

Funktion	heiße Brandstelle		kalte Brandstelle	
	langer Aufenthalt im Gefahrenbereich* <sup>1</sup>	kurzer Aufenthalt im Gefahrenbereich* <sup>2</sup>	langer Aufenthalt im Gefahrenbereich* <sup>1</sup>	kurzer Aufenthalt im Gefahrenbereich* <sup>2</sup>
Einheitsführer		X* <sup>3</sup>	X	
Melder / Führungsassistent		X* <sup>3</sup>		
Maschinist		X* <sup>4</sup>		
Angriffstrupp	X		X	
Wassertrupp	X* <sup>5</sup>	X* <sup>4</sup>	X* <sup>5</sup>	
Schlauchtrupp		X* <sup>4</sup>		

\*<sup>1</sup> – größer 4 Minuten (Erfahrungswert)

\*<sup>2</sup> – wenige Sekunden bzw. Minuten (Erfahrungswert)

\*<sup>3</sup> – Exposition durch Erkundungsmaßnahmen (kurzzeitig)

\*<sup>4</sup> – Exposition durch ungünstige Verhältnisse (z. B. drehender Wind)

\*<sup>5</sup> – Exposition durch Einsatz als zweiter angreifender Trupp

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich aufgrund der angewendeten Taktik und Aufgabenverteilung nach FwDv 3 primär der Angriffstrupp im verrauchten Bereich aufhält und im Gefahrenbereich Arbeiten durchführt. Dementsprechend ist der Angriffstrupp, bzw. im weiteren Einsatzverlauf auch der Wassertrupp, bestehend aus Truppführer und Truppmann, den Rauchgasen und Rußpartikeln an der heißen Einsatzstelle die längste Zeit über und am intensivsten ausgesetzt.

Der Einheitsführer, der Melder/Führungsassistent, der Maschinist sowie Wasser- und Schlauchtrupp sind den Rauchgasen an der heißen Einsatzstelle in der Regel nur kurzzeitig ausgesetzt, außerdem führen sie meist keine Arbeiten durch, bei denen das Brandgut angefasst wird, somit sind diese Funktionen nicht so stark exponiert.

An der kalten Brandstelle führt der Angriffstrupp meistens Aufräumarbeiten durch und ist hierbei den Rauchgasen und Rußpartikeln längere Zeit exponiert. Des Weiteren ist es die Regel, dass der Einheitsführer die Einsatzstelle überprüft, bevor die Einsatzstelle an die Polizei oder Eigentümer übergeben wird. In dem Zuge hält sich der Einheitsführer im Bereich der Brandstelle auf und ist ebenfalls den Rauchgasen ausgesetzt. Weitere Einsatzkräfte halten sich normalerweise nicht an der kalten Einsatzstelle auf, außer es müssen unterstützende Maßnahmen durchgeführt werden, dann sind die Einsatzkräfte ebenfalls den Rauchgasen oder dem Brandgut ausgesetzt.

Die einzelnen Funktionen schützen sich durch unterschiedliche Maßnahmen gegen Kontamination mit Partikeln bzw. der Inhalation der Rauchgase. Es gibt dennoch Schutzmaßnahmen, die für alle zutreffen, die nachfolgend beschrieben werden. Jeder Feuerwehrmann trägt im Einsatz die persönliche Schutzausrüstung. Diese beinhaltet laut FwDv 1 im Mindestschutz den Feuerwehrschanzanzug, den Feuerwehrhelm mit Nackenschutz, Feuerwehrschanzhandschuhe und das Feuerwehrschanzschuhwerk (S. 8) (40).

Zusätzlich zu diesem Mindestschutz gibt es nach FwDv 1 eine Ergänzung für den Löscheinsatz. Bei diesen Ausrüstungsgegenständen handelt es sich um Teile, die je nach Erfordernis getragen werden. Hierzu zählen der Feuerwehr-Haltegurt mit Feuerwehrbeil, der Gesichtsschutz, die Feuerwehrleine mit Feuerwehrleinenbeutel, das Atemschutzgerät, die Warnkleidung und die Hitzeschutzkleidung (S. 10) (40).

Die folgende Betrachtung der Schutzmaßnahmen bezieht sich auf die heiße Einsatzstelle:

Entscheidend für die Betrachtung der Kontamination sind hier die Atemschutzgeräte. Im ersten Angriff bei einer Brandbekämpfung bzw. der Menschenrettung trägt nur der Angriffstrupp ein Atemschutzgerät, welches den Träger des Gerätes umluftunabhängig mit Luft versorgt. Der Angriffstrupp ist im Gefahrenbereich und innerhalb des verrauchten Bereichs tätig und durch das umluftunabhängige Atemschutzgerät vor einer Inhalation und der damit verbundenen Inkorporation der Rauchgase und Rußpartikel geschützt. Dieser Schutz entspricht der Körperschutzform 1 aus der FwDv 500 „Einheiten im ABC-Einsatz“.

Im weiteren Verlauf eines Einsatzes rüstet sich in der Regel auch der Wassertrupp mit einem Atemschutzgerät aus, da er als zweiter angreifender Trupp vorgeht oder als Sicherheitstrupp in Bereitstellung bleibt. Wenn der Trupp als Sicherheitstrupp in Bereitstellung ist, legt der Trupp das Atemschutzgerät nicht vollständig an, sondern atmet weiter die Umgebungsluft, bis es zum Einsatz kommt, um im Vorhinein keine Atemluft aus der Pressluftflasche zu verbrauchen. Er ist in dieser Bereitstellungsphase somit nicht vor Inhalation und damit der Inkorporation geschützt. Da der Wassertrupp sich bei der Bereitstellung im sicheren Bereich aufhalten sollte, ist das Szenario nicht weiter zu betrachten.

Bei der Feuerwehr Hamburg wurden alle Löschfahrzeuge der Feuerwehr mit einem Warngerät für Kohlenmonoxid ausgestattet. Dieses Gerät soll im Einsatz der Einheitsführer tragen. Somit wird er, auch bei seiner ersten Erkundung, durch das Warngerät auf eine Belastung durch Rauchgase hingewiesen und kann den Gefahrenbereich wieder verlassen.

Nachfolgend werden die Schutzmaßnahmen an der kalten Einsatzstelle beschrieben:

Die Funktionen, die Nachlöscharbeiten durchführen, tragen meistens auch umluftunabhängigen Atemschutz, in der Regel der Angriffs- oder Wassertrupp. Ziehen sich die Nachbereitungsarbeiten an der Einsatzstelle länger hin, kommt es vereinzelt dazu, dass Atemschutz mit Filter getragen wird. Hierfür muss eine ausreichende Sauerstoffkonzentration vorhanden sein und die Filter müssen für die vorhandenen Schadstoffe ausgelegt sein.

Der Einheitsführer überprüft die kalte Einsatzstelle, um den Erfolg der Maßnahmen zu kontrollieren. Hierbei trägt er normalerweise keinen Atemschutz. In Hamburg verfügt der Einheitsführer wie oben beschrieben, über die Warngeräte, die ihn auf gefährliche Konzentrationen von Kohlenmonoxid aufmerksam machen.

Wie beschrieben, sind die Funktionen, die aktiv im verrauchten Bereich tätig sind, durch die Atemschutzgeräte vor Inhalation geschützt. Aufgrund der Mindestschutzkleidung sind alle an der Einsatzstelle tätigen Feuerwehrleute in einem gewissen Maße gegen eine Kontamination mit festen Stoffen geschützt. Dennoch gelangt ein gewisser Teil von Schadstoffen, insbesondere PAK bis auf die Haut der Feuerwehrleute. In der Bachelorarbeit „Schadstoffbelastung der Ausbilder von feststoffbefeuerten Brandübungsanlagen“ wurde festgestellt, dass einzelne PAK einerseits durch die Nässesperre der Schutzkleidung dringen können und andererseits über den Kamineffekt von unten zwischen Feuerwehrschielwerk und Feuerwehrüberhose hineinziehen, aber auch an Überlappungen (z. B. an den Handgelenken) bis auf die Haut durchdringen können (41) (S. 48-58).

Abschließend lässt sich sagen, dass die Schutzkleidung der Feuerwehr einen Schutz gegen thermische und mechanische Gefahren bietet und die Atemschutzgeräteträger durch das Atemschutzgerät vor Inhalation und der damit verbundenen Inkorporation geschützt sind. Dennoch dringen Rußpartikel und andere Schadstoffe unter die Schutzkleidung bzw. durch sie hindurch und kontaminieren die Haut der Feuerwehrangehörigen. Des Weiteren bleiben Schmutz- und Rußpartikel an der Kleidung und an Ausrüstungsgegenständen haften und werden auf diese Weise von der eigentlichen Brandstelle verschleppt.

## 4.2 Feuerwehrfahrzeuge

### 4.2.1 Löschfahrzeuge

Nach DIN EN 1846-1 handelt es sich bei Feuerwehrfahrzeugen um Kraftfahrzeuge, die zur Bekämpfung von Bränden, zur Durchführung technischer Hilfeleistung und/oder für Rettungseinsätze benutzt werden. Bei Löschfahrzeugen im Speziellen handelt es sich um Feuerwehrfahrzeuge, die mit einer Feuerlöschpumpe und im Regelfall mit einem Wasserbehälter und anderen zusätzlichen Geräten für die Brandbekämpfung ausgerüstet sind (42).

Bei dem von der Berufsfeuerwehr Hamburg verwendeten und in dieser Arbeit untersuchten Fahrzeug handelt es sich um ein Hamburger Löschfahrzeug (HLF). Diese Fahrzeuge sind der

Kategorie der Hilfeleistungslöschfahrzeuge zuzuordnen. Sie verfügen über eine Ausstattung zur Brandbekämpfung und technischen Hilfeleistung sowie für andere Notfälle.



Abbildung 9 – Hamburger Löschfahrzeug (HLF) 6. Generation

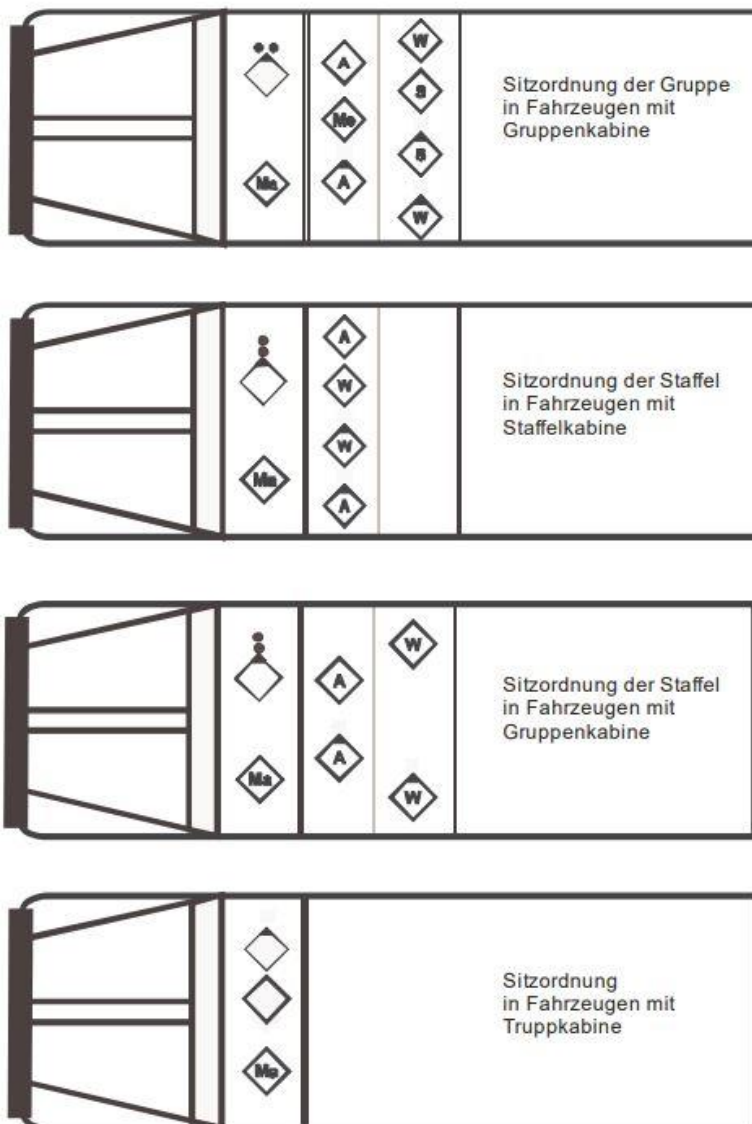
An einer Brandstelle ist das Löschfahrzeug der zentrale Punkt der Brandbekämpfungsmaßnahmen. Von hier entwickelt die Mannschaft den Löschangriff, dazu werden Geräte und Schläuche entnommen und das Wasser mit Hilfe der im Fahrzeug verbauten Feuerlöschkreiselpumpe an die Strahlrohre der vorgehenden Trupps gefördert. Schon während eines Einsatzes, aber insbesondere nachdem ein Trupp unter Atemschutz, bzw. die gesamte Mannschaft den Einsatz beendet hat, wird das Fahrzeug als Erholungsort genutzt, oder auch um die Schutzkleidung und Ausrüstungsgegenstände abzulegen. Dabei werden zum Beispiel verschmutzte Handschuhe und Einsatzjacken in die Mannschaftskabine gelegt. Bei grober Verunreinigung werden Ausrüstungsgegenstände, die Schuhe und oftmals auch die Hände vor Betreten oder dem Zurücklegen gesäubert. Dafür gibt es aber zurzeit noch kein einheitliches Konzept. Einige Fahrzeuge sind bereits mit sogenannten Hygieneboards ausgestattet oder diese wurden nachgerüstet. An ihnen kann man eine erste Reinigung der Haut durchführen. Trotzdem wird oftmals die kontaminierte Einsatzkleidung angelassen und die Ausrüstungsgegenstände wie Handlampe und Funkgerät werden nur notdürftig oder gar nicht gereinigt bevor sie wieder in die Halterung gestellt werden.

Während dieser Vorgänge kommt es dazu, dass mit Rußpartikeln kontaminierte Ausrüstungsteile sowie Schutzkleidung in die Mannschaftskabine gelangen, ohne vorher

dekontaminiert worden zu sein. Die Feuerwehrleute legen die Kleidung in der Kabine ab und bringen teilweise die verschmutzten Atemschutzgeräte wieder zurück in die Halterung. Teilweise führen die Fahrzeuge ein wenig Verpflegung und Getränke mit, die nach dem Einsatz genutzt werden, ohne sich vorher die Hände, die Arme oder das Gesicht zu waschen. Hierbei besteht die Gefahr der Ingestion. Nachdem der Einsatz abgeschlossen ist, fährt das Fahrzeug mit der Mannschaft wieder an den Stützpunkt und ist für weitere Einsätze bereit, sofern keine Defekte an Ausrüstungsgegenständen vorliegen. Das Fahrzeug kann entweder am Stützpunkt oder auf der Rückfahrt dorthin zu einem nachfolgenden Einsatz gerufen werden. Ist dies der Fall, werden die gleichen noch vom vorherigen Einsatz kontaminierten Ausrüstungsgegenstände und Schutzkleidungen wiederverwendet und die Feuerwehrleute kontaminieren sich erneut, obwohl es sich nicht um einen Brandeinsatz handelt. Auch das Duschen nach dem vorherigen Einsatz schafft dafür keine Abhilfe, da die erneute Kontamination durch die nach wie vor kontaminierte Ausrüstung und die Schutzkleidung in der Mannschaftskabine erfolgt. Außerdem tragen die Feuerwehrleute bei einem Nicht - Brandeinsatz in der Regel kein umluftunabhängiges Atemschutzgerät und sind somit auch nicht vor der Inhalation der potentiell noch vorhandenen Rußpartikel geschützt. Festzuhalten ist hier, dass ein Risiko für eine dermale Exposition der Feuerwehrleute besteht, wenn Ausrüstungsgegenstände und Schutzkleidung nicht gereinigt bzw. luftdicht verpackt werden.



4.2.2 Aufbau / Sitzplätze / Ausrüstungsgegenstände



Grob lässt sich ein Löschfahrzeug räumlich in die Mannschaftskabine, bei einigen Fahrzeugaufbauten getrennt in Fahrerraum und Mannschaftsraum und die Gerätefächer unterteilen. In dieser Arbeit werden nur Ausrüstungsgegenstände und Abläufe im Bereich der Mannschaftskabine, also dem Aufenthaltsort der Feuerwehrleute beschrieben.

In der FwDv 3 „Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz“ ist eine Sitzordnung beschrieben, die sich nach der Auslegung der

Abbildung 10 – Sitzordnung beim Ausrücken oder nach dem Kommando „Absitzen“ – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV). Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz. Stuttgart: Dt. Gemeindeverl.; 2008. (S. 12)

Legende:

- |  |                  |  |                 |
|--|------------------|--|-----------------|
|  | - Einheitsführer |  | - Melder        |
|  | - Maschinist     |  | - Angriffstrupp |
|  | - Wassertrupp    |  | - Schlauchtrupp |

Mannschaftskabine, sowie der tatsächlich darauf befindlichen Einheit richtet. Die Betrachtung ist wichtig, um nachvollziehen zu können, wo eine Kontamination aufgrund der dort Platz nehmenden Funktion zu erwarten ist.

Die Sitzordnung der untersuchten Fahrzeuge lässt sich am treffendsten mit der dritten abgebildeten Variante „Sitzordnung der Staffel in Fahrzeugen mit Gruppenkabine“ beschreiben (s. Abbildung 10). Neben den Plätzen des Angriffstrupps, im Bereich der B – bzw. C – Säule befinden sich elementare Ausrüstungsgegenstände, wie Handlampen (Knickkopflampen) und Funkgeräte (s. Abbildung 12 und 13). An den Türen befinden sich Haltegriffe, um sich beim Ein- oder Aussteigen aus der Mannschaftskabine festhalten zu können (s. Abbildung 14). Aufgrund der Anordnung der Sitzpositionen ist im Bereich der Angriffstrupps bzw. seitlich davon bei den Handlampen und Funkgeräten eine erhöhte Schadstoffbelastung zu erwarten.

## 4.3 Kontamination von Feuerwehreinsatzkräften

### 4.3.1 Heiße Brandstelle

In heißem Brandrauch sind Schadstoffe in hoher Konzentration gasförmig vorhanden und aus diesem Grund leicht aufzunehmen (43) (S. 2). Hauptsächlich werden die Schadstoffe hierbei in Form von Rauchgasen ausgetragen. Es können hierbei unter anderem Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Chlorwasserstoff, Acrolein und Cyanwasserstoff freigesetzt werden (43) (S. 9). Wie oben beschrieben, tragen die Feuerwehrleute, die in direktem Kontakt zum Brand stehen, umluftunabhängigen Atemschutz. Das schützt vor der inhalativen Aufnahme der Schadstoffe. Die Feuerweherschutzkleidung bietet jedoch nur einen gewissen mechanischen bzw. thermischen Schutz, es besteht die Möglichkeit, dass die Schadstoffe durch den Kamineffekt an Überlappungen oder teilweise durch die Nässesperre der Schutzkleidung auf die Haut gelangen (41) (S. 48-58). In welchen Mengen die Schadstoffe über die Haut in den Körper aufgenommen werden, soll in der Studie der DGUV mittels Biomonitoring und Untersuchung der Schutzkleidung ermittelt werden (1).

Fent et al. haben festgestellt, dass der Grad der Kontamination mit PAK auf der Schutzkleidung von Feuerwehrleuten mit jedem Brandereignis ansteigt (9) (S. 809). Diese Studie legt somit den Schluss nahe, dass nicht nur die Schutzkleidung selbst, sondern auch Ausrüstungsgegenstände, wie Handlampen und Funkgeräte, die an der Schutzkleidung angebracht sind, unter anderem mit PAK kontaminiert werden. Ist dies der Fall, besteht die Möglichkeit, sich an diesen Ausrüstungsgegenständen bei einem weiteren Einsatz oder einer Übung erneut zu kontaminieren, obwohl es sich nicht um ein Brandereignis handelt.

### 4.3.2 Kalte Brandstelle

Das Brandgut ist hier auf Umgebungstemperatur abgekühlt. In dieser Phase stellen die organischen Schadstoffe, die sich an Oberflächen befinden und adsorptiv an Rußpartikel gebunden sind, eine große Gefahr dar (S.9) (43). Hierbei kann es sich beispielsweise um PAK handeln. Die Gefahr ist dadurch gegeben, dass die Feuerwehrleute an der kalten Brandstelle Aufräumarbeiten durchführen und dabei immer wieder Brandgut in die durch Handschuhe geschützten Hände nehmen. Über die Schadstoffe an der Schutzausrüstung und insbesondere an den Handschuhen gelangen diese potentiell an die Ausrüstungsgegenstände wie Handlampe und Funkgerät. Neben der Schutzkleidung werden auch diese Ausrüstungsteile wieder in das Fahrzeug gebracht und oftmals nicht dekontaminiert. Diese nun kontaminierte Ausrüstung wird im Falle der Handlampen und Funkgeräte zurück in die Ladehalterung verbracht. Bei einem erneuten Einsatz ergibt sich auch hier die Problematik, dass die noch kontaminierten Ausrüstungsgegenstände wieder in die Hand genommen werden und wieder in den Einsatz gehen, auch wenn es sich nicht um ein Brandereignis handelt.

Neben der Gefahr durch die organischen Schadstoffe ist auch in dieser Phase immer noch die Gefahr durch die flüchtigen Schadstoffe im Brandrauch vorhanden (S. 9) (43). Aus eigener Anschauung lässt sich sagen, dass nicht alle Feuerwehrleute an der kalten Brandstelle

Atemschutz tragen. Insbesondere die Einheitsführer legen bei der Kontrolle der Einsatzstelle in der Regel keinen Atemschutz an.

#### 4.3.3 Potentielle Kontaminationsverschleppung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt, gibt es einige Hauptwege der Kontamination mit Schadstoffen bei Feuerwehrleuten:

1. Erstkontamination im Innenangriff
2. Kontamination beim Ablegen und Ausziehen der Schutzausrüstung
3. Kontamination beim erneuten Anfassen nicht dekontaminierter Gegenstände
4. Kontamination beim erneuten Anfassen von nicht dekontaminierter PSA
5. Kontamination beim Setzen auf mit kontaminierter PSA genutzten Sitzen
6. Kontamination durch im kontaminierten Zustand angefasste Kontaktflächen

Von diesen Möglichkeiten der Kontamination lässt sich die erste nicht oder nur sehr schwer vermeiden. Die PSA müsste so konzipiert sein, dass keine Schadstoffe durch Spalten oder Öffnungen eindringen, was technisch bei dem Zweck, den die PSA erfüllen soll, nur schwer umsetzbar ist. Außerdem befinden sich auf der PSA selbst ebenfalls Schadstoffe. Aus diesem Grund muss man direkt nach dieser Kontaminationsmöglichkeit ansetzen, um eine Verschleppung der Schadstoffe und so eine erneute Kontamination zu vermeiden. Die Punkte zwei bis sechs stellen alle eine Kontamination aufgrund der mitgeschleppten Schadstoffe dar.



Der Weg der Kontaminationsverschleppung kann wie folgt dargestellt werden:

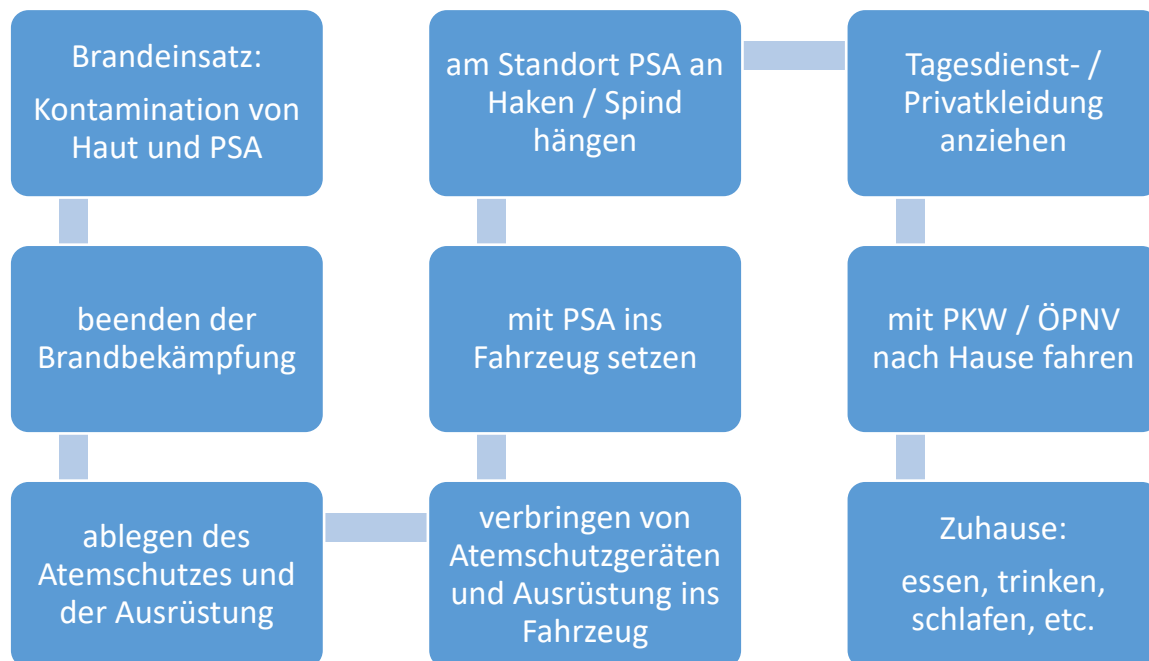


Abbildung 11 – möglicher Weg der Kontaminationsverschleppung, von der Brandstelle, bis in private Bereiche

Wie hier dargestellt, zieht sich die Verschleppung bis in den privaten Bereich hinein. Somit kommen nicht nur die ursprünglich in der Brandbekämpfung tätigen Feuerwehrleute mit den Schadstoffen in Kontakt, sondern auch weitere Personen wie Kollegen/Kameraden, Mitfahrer, Freunde und die Familienmitglieder. Diese Verschleppungskette gilt es mit geeigneten Maßnahmen zu unterbrechen bzw. die Menge der in der Kette mitgeführten Schadstoffe auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

Zusätzlich zu der Verschleppung der in der Brandbekämpfung eingesetzten Feuerwehrleute kommt es potentiell zur Kontamination der unterstützenden Feuerwehrkräfte, die z. B. beim Ablegen der Ausrüstung und der PSA helfen. Diese tragen die Schadstoffe dann in einer ähnlichen Kette weiter.

Um herauszufinden, ob es eine Verschleppung bis in die Einsatzfahrzeuge und darüber hinaus gibt, werden in dieser Arbeit die Handlampen und die Funkgeräte untersucht, da diese immer wieder von den Feuerwehrleuten, teilweise auch ohne Handschuhe, angefasst werden und somit für eine fortwährende Neukontamination sorgen und so die Kette der Verschleppung jedes Mal neu in Gang setzen. Außerdem ist zu erwarten, dass die Belastung dieser Geräte am größten sein wird, da diese Geräte vom Angriffstrupp, der vermutlich am stärksten belastet ist, verwendet werden und diese sich direkt neben den Sitzplätzen des Angriffstrupps befinden.

## 5. Untersuchung der Kontaminationsverschleppung und der Schadstoffbelastung der Mannschaftskabine – Methodik

### 5.1 Probennahme

Mit der Probennahme wurden primär vier Thesen verfolgt, die aufgrund der vorangegangenen Überlegungen entstanden sind. Die erste These (I.) besagt, dass die Ausrüstungsgegenstände, die Feuerwehrleute bei einem Brandeinsatz bei sich tragen, mit Schadstoffen kontaminiert werden. Die zweite These (II.) besagt, dass die Schadstoffe, die während der Brandbekämpfung an die Ausrüstungsgegenstände gelangt sind, bis in die Fahrzeuge verschleppt werden. Die dritte These (III.) besagt, dass das Reinigen dieser Ausrüstungsgegenstände eine Absenkung der Schadstoffmenge zur Folge hat. Mit der vierten These (IV.) wird angenommen, dass die Höhe der Schadstoffbelastung abhängig von der Intensität der Brandeinsätze ist und sich je nach Einsatzaufkommen im zeitlichen Verlauf verändert.

Als Marker für eine Schadstoffbelastung wurden wie in anderen Studien, zum Beispiel bei Keir et al. (35) und bei Fent et al. (9), PAK untersucht, da einige davon im Verdacht stehen, Krebs zu erzeugen bzw. als krebserzeugend eingestuft sind.

Um die oben genannten Thesen zu untersuchen, wurden an unterschiedlichen Gegenständen und zu bestimmten Zeiten Wischproben genommen. I.: Um die erste These zu prüfen wurden Wischproben von den Knickkopflampen (Handlampen) vom Typ ELSPRO Akkuhandleuchte LYR-50 (s. Abbildung 12) sowie den Faustmikrofonen der Handfunkgeräte vom Typ Sepura IP 67 Ultra RSM (s. Abbildung 13), die im Einsatz direkt an der Schutzjacke der Feuerwehrleute angebracht sind, genommen. Da, wie herausgearbeitet, der Angriffstrupp im Brandeinsatz die höchste Exposition erfährt, wurde durch geeignete Markierung an den Ausrüstungsteilen sowie anhand der Gerätenummern bei jeder Probennahme die Geräte beprobt, die der Angriffstrupp in der Regel bei sich trägt.



Abbildung 12 – Handlampe ELSPRO Akkuhandleuchte LYR-50

II.: Die Prüfung der zweiten These erfolgte über eine Wischprobennahme an den Einstieggriffen an den Türen der Feuerwehrfahrzeuge (s. Abbildung 14), an denen sich die Feuerwehrleute festhalten, um in das Fahrzeug zu gelangen.

III.: Um die dritte These zu prüfen, wurden bei einem HLF, welches einmal die Woche gereinigt wird, jeweils vor und nach der Reinigung Wischproben von den Handlampen, den Faustmikrofonen und den Einstieggriffen genommen. Um einen Vergleich zu einem Fahrzeug zu bekommen, welches nicht regelmäßig gereinigt wird, wurden Proben eines zweiten HLF genommen, welches keine wöchentliche Reinigung erfährt. Um keine Rückschlüsse auf beteiligte Feuer- und Rettungswachen und Personen ziehen zu können, werden die Bezeichnungen der HLF in dieser Arbeit anonymisiert. Das Fahrzeug, welches wöchentlich gereinigt wird, wird nachfolgend als HLF A und das ohne wöchentliche Reinigung als HLF B bezeichnet. Bei HLF A und B handelt es sich jeweils um den gleichen Typ von Löschfahrzeug und in beiden Fällen wurden Fahrzeuge gewählt, die in einem innerstädtischen Bereich zum Einsatz kommen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. HLF A ist in den Jahren 2016, 2017 und 2018 zu 3236 Brandeinsätzen und HLF B zu 3317 Brandeinsätzen ausgerückt. Auch hier sind die Zahlen vergleichbar.



Abbildung 13 – Faustmikrofon Sepura IP 67 Ultra RSM

IV.: Die vierte These wurde geprüft, indem einmal wöchentlich Wischproben jeweils bei HLF A und B über einen Zeitraum von vier Wochen von den Handlampen, den Faustmikrofonen und den Einstieggriffen genommen wurden und diese Datenlage mit den in diesem Zeitraum abgearbeiteten Einsätzen verglichen wurde.

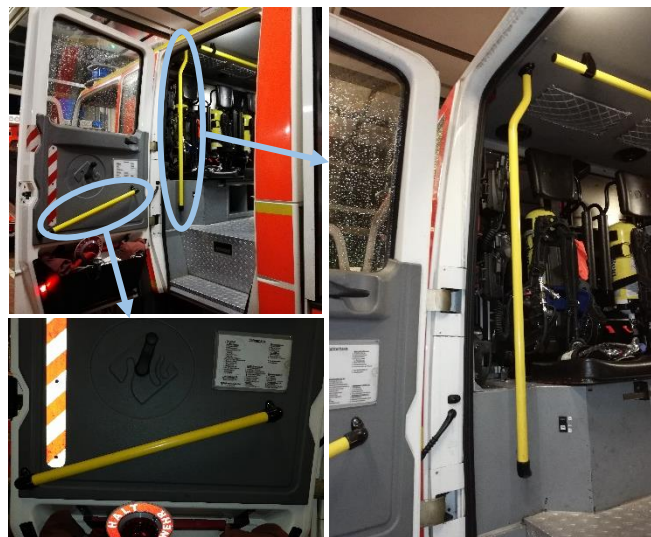


Abbildung 14 – Einstieggriffe Mannschaftskabine Hamburger Löschfahrzeug

Um eine Grundbelastung mit PAK ausschließen bzw. ermitteln zu können, wurden Blindwertproben von Handlampen, Faustmikrofonen und Einstieggriffen genommen. Bei den

Handlampen war es möglich, alle Blindwerte von werkneuen Geräten zu nehmen. Die beiden analysierten Faustmikrofone waren ebenfalls noch nicht in Gebrauch, aber nicht mehr verpackt. Bei den Einstieggriffen musste auf ein Fahrzeug aus dem Einsatzdienst zurückgegriffen werden, da es nicht möglich war, ein werkneues Fahrzeug zu beproben. Die Einstieggriffe wurden vorher durch gründliches Wischen und Brennspritus gereinigt, um möglichst wenige Verunreinigungen an den Griffen zu haben.

Die eigentlichen Probennahmen wurde unter den nötigen Vorkehrungen durchgeführt, um die Qualität der Proben zu sichern. Unter anderem wurden während der gesamten Probennahme Einmalhandschuhe getragen. Die Wischproben wurden mit einem Kimwipe genommen, welches auf Aluminiumfolie für die Probennahme präpariert wurde. Dazu wurde das Kimwipe mit Hilfe einer Glaspipette (1mL) mit Gummisauger mit Cyclohexan beträufelt. Die Kimwipes stammen von der Firma Kimberly-Clark Professional und sind als Präzisionswischtücher für den professionellen Gebrauch ausgelegt. Das Cyclohexan fungiert als Lösungsmittel für die PAK. Mit dem beträufelten Kimwipe wurde der entsprechende Gegenstand, unter der Nutzung von Einmalhandschuhen, einmalig abgewischt. Beim Abwischen der Probenträger wurde darauf geachtet, immer die gleiche Fläche der einzelnen Probenträger zu wischen. Anschließend wurde das Kimwipe in ein 50 ml Zentrifugenröhrchen gesteckt (s. Abbildung 15). Dieses wurde verschlossen und anschließend kühl gelagert. Die Röhrchen stammen von der Firma UKCOCO und sind aus Kunststoff gefertigt.

Die Wischproben wurden beginnend mit dem 11.09.2018 genommen. Darauffolgend wurden weitere Wischproben im Abstand von ca. einer Woche genommen, endend mit dem 02.10.2018. Blindproben wurden jeweils am 11.09.2018 und am 02.11.2018 genommen. Es wurden bei HLF A jeweils vor und nach der wöchentlichen Reinigung Wischproben von den Handlampen, den Faustumikrofonen und den Einstieggriffen genommen. Bei HLF B wurde von allen drei Gegenständen jeweils nur einmalig je Probentag eine Probe genommen. Die Probe der Handlampen setzt sich aus zwei Handlampen zusammen, die mit einem Kimwipe gewischt wurden. An jeder der beiden Handlampen wurden jeweils alle Flächen abgewischt, bis auf die Linse, aus der der Lichtkegel austritt. Die gewischte Fläche beträgt hier somit 1573,72 cm<sup>2</sup> (s. Tabelle 6). Die Probe der Faustumikrofone setzt sich aus zwei Faustumikrofonen inklusive Anschlusskabel zusammen, die mit einem Kimwipe abgewischt wurden. An jedem der beiden Faustumikrofone inklusive Kabel wurden alle Flächen, bis auf die Fläche unter dem Trageclip und der Trageclip selbst, abgewischt. Die gewischte Fläche beträgt hier somit 797,08 cm<sup>2</sup> (s. Tabelle 6). Die Probe der Einstieggriffe setzt sich aus den Einstieggriffen auf beiden Fahrzeugseiten im Bereich der Mannschaftskabine in Fahrtrichtung und an der Tür zusammen, die je Seite mit einem Kimwipe abgewischt wurden. Somit wurden in dieser Probe zwei Kimwipes verwendet. Die gewischte Fläche beträgt hier somit 3883,76 cm<sup>2</sup> (s. Tabelle 6). So wurden insgesamt 43 Proben, aufgeteilt in 7 Blindproben und 36 Wischproben, genommen und analysiert.



Abbildung 15 –  
Zentrifugen-  
röhrchen mit  
Wischprobe

Tabelle 6 – Flächen zur Normierung der genommenen Wischproben

Probenträger	Fläche einzeln (in cm <sup>2</sup> )	gewischte Fläche (in cm <sup>2</sup> )
Handlampe	786,86	1573,72
Faustmikrofon (Funkgerät)	398,54	797,08
Einstieggriff	1941,88	3883,76

## 5.2 Analysemethode

Die Proben wurden vom Labor für Rückstandsanalytik Bremen GmbH analysiert. Dabei wurden die Proben in einem ersten Schritt mittels n-Hexan extrahiert. Danach wurde das Extrakt eingeeengt, also das Lösungsmittel entzogen. Im Anschluss wurde eine Gaschromatografie mit Massenspektrometrie-Kopplung durchgeführt. Die Analyse beschränkt sich auf die 16 PAK, die durch die US – Umweltbehörde EPA in die Liste der Priority Pollutants aufgenommen wurden und so als Stellvertreter für die Gruppe der PAK fungieren (6,25):

- Naphtalin
- Acenaphthylen
- Acenaphten
- Fluoren
- Phenanthren
- Anthracen
- Fluoranthen
- Pyren
- Benzo(a)anthracen
- Chrysen
- Benzo(b)fluoranthen
- Benzo(k)fluoranthen
- Benzo(a)pyren
- Dibenz(a,h)anthracen
- Benzo(g,h,i)perylene
- Ideno(1,2,3-cd)pyren

Durch die Gaschromatografie werden die einzelnen Probenbestandteile aufgetrennt und anschließend werden im Massenspektrometer mit Hilfe einer zugrunde liegenden Datenbank die gesuchten Bestandteile identifiziert und deren Quantität bestimmt. Die Ergebnisse dieser Analyse befinden sich im Anhang und werden in Kapitel 6 erläutert.



## 6. Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Darstellung der Ergebnisse

Die gewonnenen Daten sind in der Tabelle 8 (S. 48) aufgeführt. Die gezeigten Werte der 16 EPA-PAK sind in Pikogramm (pg) angegeben und auf die Fläche eines Quadratcentimeters (cm<sup>2</sup>) normiert. So sind alle Werte in pg/cm<sup>2</sup> dargestellt. Die dunkelrot hinterlegten Zeilen zeigen die Daten von HLF A vor der Reinigung, die hellroten die Daten von HLF A nach der Reinigung. Die Daten des HLF B sind hellgrün hinterlegt. Wo ein „+“ zu sehen ist, konnten keine PAK-Menge erfasst werden, da sie unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. In Tabelle 7 sind

*Tabelle 7 – Bestimmungsgrenzen der analysierten PAK und in der Arbeit weiter verwendete Werte für PAK-Mengen unterhalb der Bestimmungsgrenze*

Substanz	Bestimmungsgrenze in ng	verwendeter Wert in ng
Naphthalin (NAP)	10	5
Acenaphthylen (ACY)	10	5
Acenaphthen (ACE)	10	5
Fluoren (FLE)	5	2,5
Phenanthren (PHE)	5	2,5
Anthracen (ANT)	5	2,5
Fluoranthren (FLA)	5	2,5
Pyren (PYR)	5	2,5
Benzo(a)anthracen (BaA)	5	2,5
Chrysen (CHR)	5	2,5
Benzo(b)fluoranthren (BbF)	5	2,5
Benzo(k)fluoranthren (BkF)	5	2,5
Benzo(a)pyren (BaP)	5	2,5
Dibenzo(a,h)anthracen (DahA)	10	5
Benzo(g,h,i)perylen (BghiP)	10	5
Indeno(1,2,3,c,d)pyren (IcdP)	10	5

die vom Labor angegebenen Bestimmungsgrenzen der 16 EPA-PAK aufgeführt. In der weiteren Arbeit ist für PAK-Mengen, die nicht nachgewiesen werden konnten, die Hälfte der vom Labor angegebenen Bestimmungsgrenze betrachtet worden. Diese weiterverwendeten Werte sind ebenfalls in der Tabelle 7 aufgeführt. In der ersten Spalte der Tabelle 8 ist die Probennummer BA-007 bis BA-042 und in der zweiten Spalte die Woche, in der die Probenahme stattgefunden hat, abgebildet. Die Proben BA-000 bis BA-006 sind Blindproben und werden in Kapitel 6.4 diskutiert. Welche Probe in Tabelle 8 den einzelnen Probenträgern zugeordnet ist, ist in der Spalte „Probenträger“ abgekürzt gezeigt. HL steht dabei für Handlampe, FM für Faustmikrofon des Handfunkgerätes und EG für die Einstieggriffe.

Die Ergebnisse der Blindproben sind in Tabelle 9 auf die gleiche Weise dargestellt, wie die Ergebnisse der eigentlichen

Wischproben in Tabelle 8. Es handelt sich um sieben Blindproben, wovon in allen Proben Naphtalin vorhanden ist. In den Proben BA-004, -005 und -006 konnten Phenanthren, Fluoranthren und Pyren festgestellt werden. Von anderen PAK konnten in den Blindproben keine Werte oberhalb der Bestimmungsgrenzen (s. Tabelle 7) nachgewiesen werden. Wie mit den Ergebnissen der Blindproben umgegangen wurde, ist auf Seite 50 erläutert.

Tabelle 8 – Ergebnisse der Laboranalyse, ohne Blindwerte, normiert und angegeben in pg/cm<sup>2</sup>; Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit einem „+“ markiert, dunkelrot = HLF  
A vor Reinigung, hellrot = HLF A nach Reinigung, grün = HLF B, HL = Handlampe, FM = Faustmikrofon, EG = Einstiegsgriffe

Nummer	Woche	Proben- träger	Naphthalin	Acenaphthalen	Acenaphthalen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthen	Pyren	Benzo(a)- anthracen	Chrysen	Benzo(b)- fluoranthen	Benzo(k)- fluoranthen	Benzo(a)pyren	Dibenz(a,h)- anthracen	Benzo(a,h,i)- perylene	Ideno(1,2,3-cd)- pyren
BA-007		HL	2902,72	+	+	3,88	24,15	3,62	29,23	26,05	12,07	15,89	14,62	3,56	+	+	+	+
BA-008		FM	1691,27	+	+	+	+	+	7,15	7,28	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-009		EG	303,33	+	+	+	2,45	+	2,83	3,35	4,12	+	+	+	+	+	+	+
BA-010		HL	1066,31	+	+	3,75	17,79	4,26	23,51	29,23	16,52	10,17	14,62	3,37	3,24	+	8,90	+
BA-011		FM	3410,05	+	+	+	12,55	+	12,42	17,56	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-012	1	EG	35,55	+	+	1,65	5,41	+	6,69	8,50	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-013		HL	875,68	+	+	3,24	10,80	+	10,80	10,80	6,99	8,90	8,26	+	+	+	+	+
BA-014		FM	1603,45	+	+	+	9,03	+	7,65	8,15	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-015		EG	161,72	+	+	+	-0,19	1,70	-0,22	-2,57	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-016		HL	1415,80	+	10,80	24,78	275,78	75,62	110,57	94,04	32,41	34,31	45,12	7,63	14,62	6,99	9,53	13,34
BA-017		FM	3962,07	+	+	12,29	45,17	13,80	87,82	82,80	40,15	27,60	30,11	+	15,06	+	+	+
BA-018		EG	7,23	+	+	+	2,57	+	2,55	-0,99	2,45	+	+	+	+	+	+	+
BA-019		HL	240,24	+	+	4,07	22,24	5,08	19,70	25,42	9,53	8,90	17,16	+	7,63	+	7,63	6,35
BA-020		FM	2356,20	+	+	+	10,54	+	+	8,41	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-021		EG	151,42	+	+	+	2,50	+	3,09	4,12	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-022		HL	189,40	+	+	16,52	134,08	39,40	58,46	52,11	17,16	18,43	24,15	3,24	7,63	+	+	6,35
BA-023		FM	411,59	+	+	9,41	38,89	12,55	77,78	94,09	+	22,58	23,84	+	12,42	+	+	+
BA-024		EG	125,67	+	+	+	-0,19	+	-0,76	-1,13	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-025		HL	685,05	+	+	7,63	36,86	8,90	13,34	13,34	3,49	+	+	+	+	+	+	+
BA-026		FM	1038,89	+	+	+	13,80	+	17,56	21,33	+	6,77	10,91	+	+	+	+	+
BA-027		EG	-59,72	+	+	+	3,09	+	3,09	3,35	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-028		HL	221,18	+	+	3,62	22,88	4,38	22,24	29,23	13,98	7,63	14,62	+	4,26	+	8,26	+
BA-029		FM	1001,25	+	+	6,52	16,31	+	15,06	18,82	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-030		EG	-95,77	+	+	2,57	15,45	+	5,66	6,18	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-031		HL	913,80	+	+	6,99	22,88	3,49	8,26	9,53	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-032		FM	1691,27	+	+	12,04	27,60	+	20,07	26,35	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-033		EG	117,95	+	+	+	2,45	+	-1,74	-1,06	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-034		HL	920,16	+	+	5,91	35,58	9,53	37,49	38,13	13,98	13,98	12,07	+	5,72	+	+	6,35
BA-035		FM	1314,89	+	+	+	21,33	+	16,31	20,07	+	8,78	+	+	+	+	+	+
BA-036		EG	424,35	+	+	1,36	3,09	+	2,83	3,60	2,50	+	+	+	+	+	+	+
BA-037		HL	786,72	+	+	4,00	33,04	8,90	39,40	47,66	20,97	17,16	9,53	5,21	9,53	+	9,53	9,53
BA-038		FM	2782,76	+	+	+	10,16	+	+	8,78	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-039		EG	269,86	+	+	+	2,83	+	-0,06	-0,13	2,37	+	+	+	+	+	+	+
BA-040		HL	977,35	+	+	3,24	9,53	+	7,63	9,53	4,58	+	+	+	+	+	+	+
BA-041		FM	2945,86	+	+	+	10,41	+	+	8,66	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-042		EG	321,36	+	+	+	-0,19	+	-1,74	-1,31	+	+	+	+	+	+	+	+



Tabelle 9 – Ergebnisse der Blindwertanalyse, normiert und angegeben in ng/cm<sup>2</sup>, Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit einem „+“ markiert, HL = Handlampe, FM = Faustmikrofon, EG = Einstiegsgriffe

Nummer	Proben- träger	Naphthalin	Acenaphtha- len	Acenaphthen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthren	Pyren	Benzo(a)- anthracen	Chrysen	Benzo(b)- fluoranthren	Benzo(k)- fluoranthren	Benzo(a)- pyren	Dibenz(a,h) nithracen	Benzo(g,h,i) peren	Ideno(1,2,3- cd)pyren
BA-000	Kimwipe, Cyclohexan, Zentrifugenr öhrchen	17,7553	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-001	HL	1,9762	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-002	HL	1,4297	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-003	FM	6,6168	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-004	FM (Kabel)	2,3463	+	+	+	0,0059	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-005	EG	1,4162	+	+	+	0,0044	+	0,0046	0,0062	+	+	+	+	+	+	+	+
BA-006	EG	1,4676	+	+	+	0,0037	+	0,0049	0,0067	+	+	+	+	+	+	+	+

In den Blindproben BA-005 und -006 zeigen sich geringe Mengen von Phenanthren, Fluoranthren und Pyren (s. Abbildung 16). In der Probe BA-004 ist Phenanthren nachweisbar. Es handelt sich hier um die Blindprobe der zum Faustmikrofon gehörenden Kabel. In allen Blindproben gibt es hohe Werte von Naphtalin (s. Abbildung 17). Bei den Blindproben der Handlampen (BA-001, -002) sowie der Faustmikrofone (BA-003) konnten keine PAK über der Bestimmungsgrenze festgestellt werden. Um die Werte von Naphtalin trotzdem darstellen und analysieren zu können, wurde der Median der in den Blindwerten festgestellten Mengen ermittelt und von allen Rohdaten abgezogen. Die generell hohen Mengen von Naphtalin werden in Kapitel 6.3 diskutiert. Bei Phenanthren, Fluoranthren und Pyren wurde der Mittelwert der Blindproben genommen und bei den Proben der Einstieggriffe abgezogen, da hier die drei PAK in den Blindproben gefunden wurden. Die Bedenken bei den Blindproben werden in Kapitel 6.4 diskutiert. Die Ergebnisse wurden auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$  normiert. So sind die negativen Werte von Naphtalin in den Proben 27 und 30 und die negativen Werte bei Phenanthren, Fluoranthren und Pyren in den Proben der Einstieggriffe entstanden (s. Tabelle 8). Diese negativen Werte wurden für die weitere Betrachtung als null angenommen.

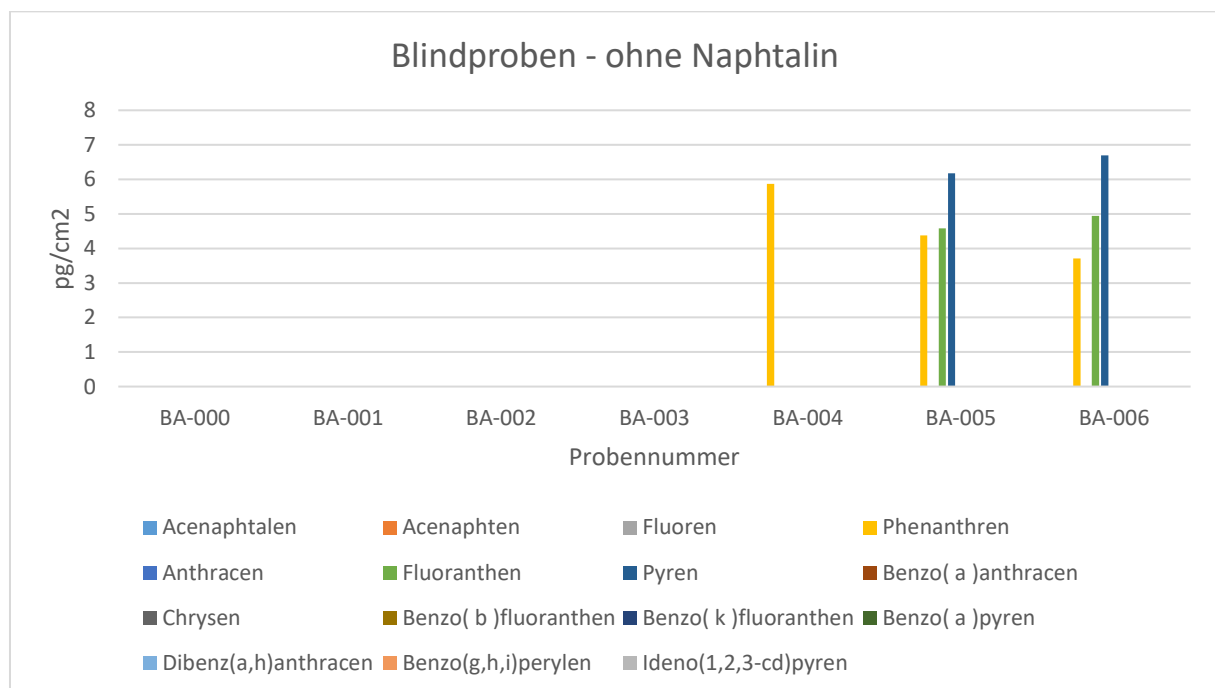


Abbildung 16 – Ergebnisse der Blindproben normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze und Naphtalin wurden nicht betrachtet

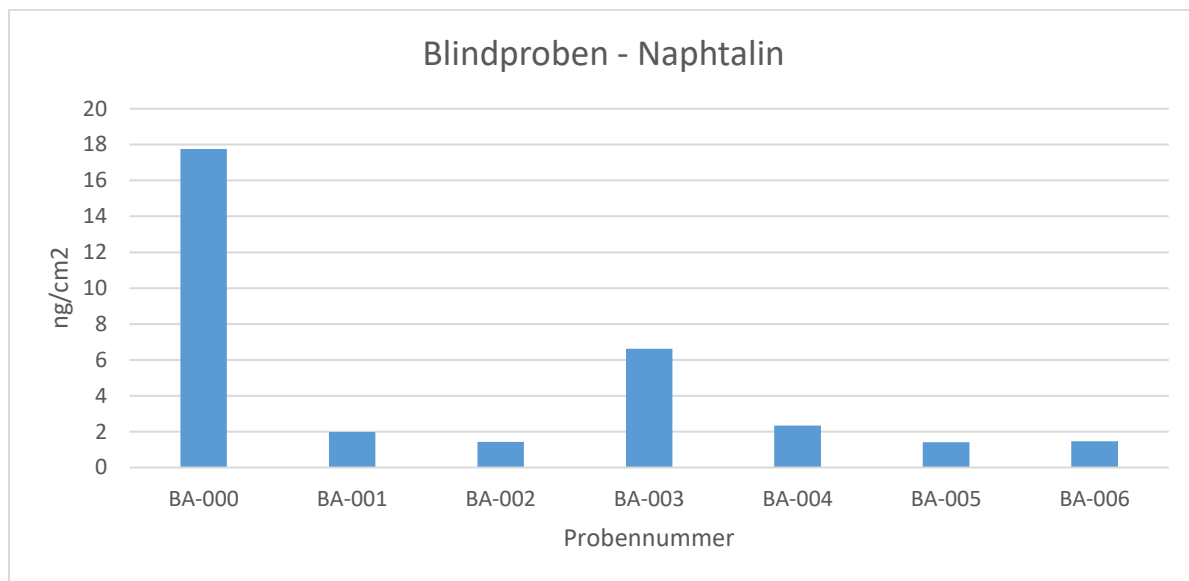


Abbildung 17 – Ergebnisse der Naphtalinwerte in den Blindproben normiert auf  $\text{ng/cm}^2$

In Abbildung 18 sind die einzelnen Ergebnisse der Wischproben ohne Naphtalin und ohne die Blindproben dargestellt. Die PAK sind gestapelt abgebildet und bilden so aufsummiert die Höhe der Säule ab. So lässt sich erkennen, in welchen Proben insgesamt eine große Menge an PAK vorhanden ist. Die Ergebnisse sind ohne Naphtalin abgebildet, da die Menge hiervon in jeder Probe sehr hoch war und somit die gewählte Darstellung nicht mehr anzuwenden wäre. Naphtalin wird später separat dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass es innerhalb der Proben, in der Höhe der analysierten Werte, deutliche Unterschiede gibt. Einerseits sind damit die generell sehr hohen Werte von Naphtalin gemeint, auf die in Kapitel 6.3 eingegangen wird. Der Mittelwert von Naphtalin über alle Proben ohne Blindwerte liegt bei  $1036,73 \text{ pg/cm}^2$  der Mittelwert aller anderen analysierten PAK ohne Naphtalin liegt bei  $8,01 \text{ pg/cm}^2$ . Andererseits gibt es auch über die vier Wochen gesehen deutlich erhöhte PAK-Mengen in Woche zwei der Probennahme. Dabei können besonders bei HLF A deutlich höhere Werte als in den anderen Wochen festgestellt werden. Der Mittelwert der PAK-Mengen in Woche zwei ohne die Betrachtung von Naphtalin liegt bei  $15,74 \text{ pg/cm}^2$ , wogegen die Mittelwerte der Wochen eins (Mittelwert:  $5,01 \text{ pg/cm}^2$ ), drei (Mittelwert:  $5,51 \text{ pg/cm}^2$ ) und vier (Mittelwert:  $5,80 \text{ pg/cm}^2$ ) um ca.  $10 \text{ pg/cm}^2$  kleiner sind.

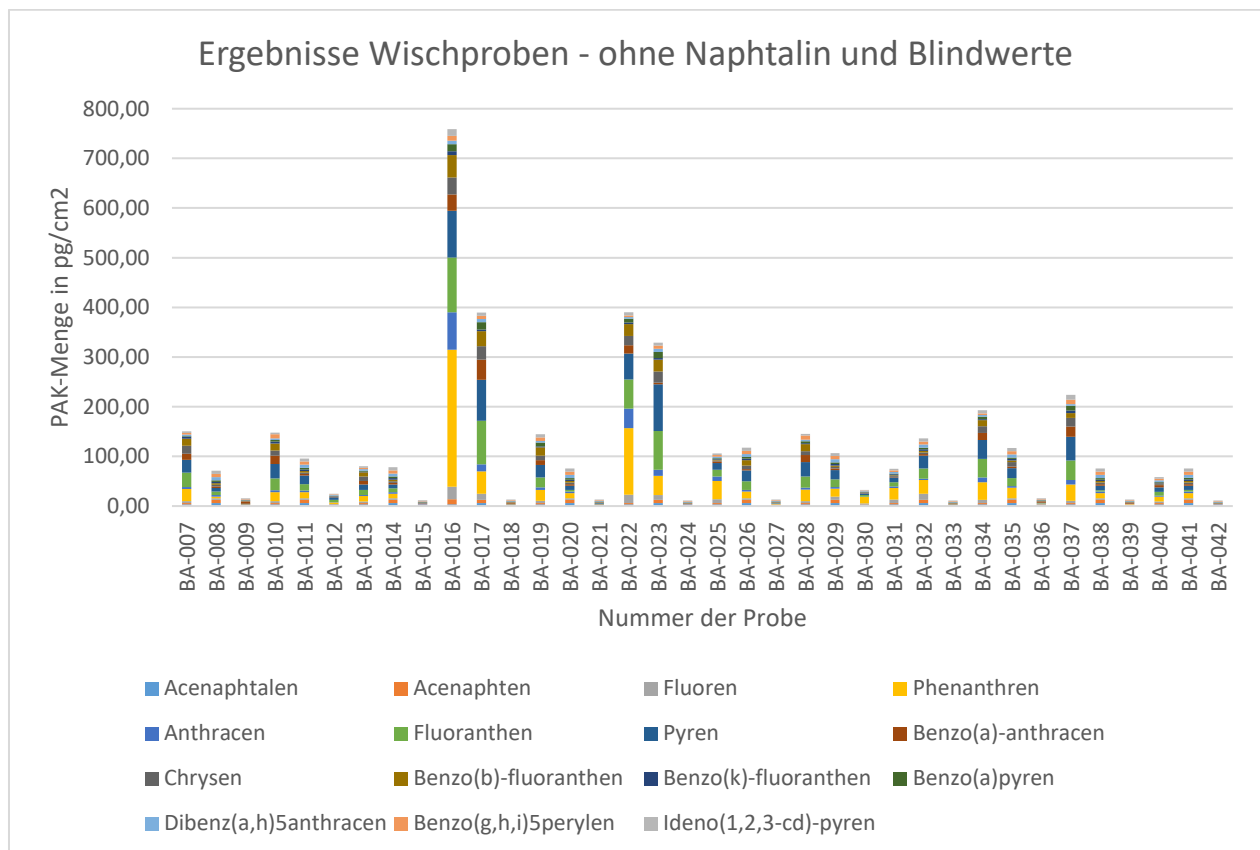


Abbildung 18 – Ergebnisse der eigentlichen Wischproben, ohne die Betrachtung von Naphtalin, normiert auf pg/cm<sup>2</sup>, Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden

Die PAK Acenaphtalen, Acenaphten und Dibenz(a,h)anthracen konnten gar nicht bzw. nur einmal von 36 möglichen Wischproben oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen werden (entspricht etwa 0 bis 2,8 % der Proben). Benzo(k)fluoranthen, Benzo(g,h,i)perylene und Ideno(1,2,3-cd)pyren konnten jeweils nur fünf Mal von 36 Wischproben oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen werden (entspricht etwa 13,9 % der Proben). Benzo(a)pyren konnte in den 36 Wischproben neun Mal nachgewiesen werden (entspricht 25 % der Proben). Alle anderen PAK wurden in mindestens 12 der 36 Wischproben oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen (entspricht einem Drittel der Proben). Naphtalin konnte in 100% der Proben gefunden werden, danach folgen Phenanthren und Pyren mit 35 von 36 Proben über der Bestimmungsgrenze (etwa 97,2 %), Fluoranthen mit 31 von 35 Proben oberhalb der Bestimmungsgrenze (etwa 86,1 %) und Fluoren mit etwa 52,8 % der Proben oberhalb der Bestimmungsgrenze (19 von 36 Proben).

Der Mittelwert des HLF A vor der Reinigung in Woche zwei über alle PAK ohne Naphtalin liegt bei 25,81 pg/cm<sup>2</sup>. Im Vergleich dazu sind die Mittelwerte aus Woche eins (Mittelwert: 5,26 pg/cm<sup>2</sup>) und drei (Mittelwert: 5,25 pg/cm<sup>2</sup>) etwa fünf Mal geringer als in Woche zwei. Der entsprechende Mittelwert aus Woche vier liegt mit 7,23 pg/cm<sup>2</sup> leicht über den Werten von Woche zwei und drei (ca. 2 pg/cm<sup>2</sup> darüber) und immer noch deutlich unterhalb des Mittelwertes aus Woche zwei (ca. 18 pg/cm<sup>2</sup> darunter).

Der Mittelwert von allen PAK-Mengen, ohne Naphtalin, des HLF A vor der Reinigung liegt bei  $10,89 \text{ pg/cm}^2$ , nach der Reinigung beträgt der Mittelwert  $7,05 \text{ pg/cm}^2$ .

Die höchsten Werte über alle PAK, ausgenommen Naphtalin, lassen sich bei Phenanthren (Mittelwert:  $24,62 \text{ pg/cm}^2$ ), Fluoranthen (Mittelwert:  $18,39 \text{ pg/cm}^2$ ) und Pyren (Mittelwert:  $19,92 \text{ pg/cm}^2$ ) feststellen. Die Mittelwerte der anderen PAK, ohne Naphtalin, bewegen sich zwischen  $2,21 \text{ pg/cm}^2$  (Benzo(k)fluoranthen) und  $7,38 \text{ pg/cm}^2$  (Benzo(b)fluoranthen).

Die PAK-Mengen an den Handlampen zeigen im Vergleich ohne Naphtalin große Werte (Mittelwert:  $13,75 \text{ pg/cm}^2$ ). Die Mittelwerte der Faustmikrofone der Handfunkgeräte ( $9,26 \text{ pg/cm}^2$ ) und der Einstieggriffe ( $1,04 \text{ pg/cm}^2$ ) liegen etwas bzw. deutlich unterhalb der Mittelwerte der Handlampen. Die PAK-Mengen aller drei Probenträger sind bei HLF A vor der Reinigung in der Regel höher als nach der Reinigung. Bei den Handlampen ist der Mittelwert nach der Reinigung des HLF A halb so groß wie vor der Reinigung (Mittelwert Handlampen vor, nach Reinigung:  $20,13 \text{ pg/cm}^2$ ,  $10,07 \text{ pg/cm}^2$ ). Die PAK-Mengen an den Faustmikrofonen sind nach der Reinigung nur geringfügig kleiner, als vorher (Mittelwert Faustmikrofone vor, nach Reinigung:  $11,57 \text{ pg/cm}^2$ ,  $10,32 \text{ pg/cm}^2$ ). Die PAK-Mengen der Einstieggriffe sind nach der Reinigung im Mittel  $21,05 \%$  geringer als vor der Reinigung (Mittelwert Einstieggriffe vor, nach Reinigung:  $0,95 \text{ pg/cm}^2$ ,  $0,75 \text{ pg/cm}^2$ ).

## 6.2 Ersteinschätzung der PAK-Mengen und Zusammenhang Einsätze

In der Abbildung 18 ist zu erkennen, dass in Probe 16 und 22 sowie 17 und 23 die größten Mengen an PAK nachzuweisen waren. Bei Probe 16 und 22 handelt es sich jeweils um die Handlampen und bei Probe 17 und 23 um die Faustmikrofone der Handsprechfunkgeräte des HLF A vor und nach der Reinigung. Allgemein ist die Menge der PAK am 18.09.2018 bei allen untersuchten Proben des HLF A deutlich höher als an den anderen Tagen. Dieses Ergebnis lässt auf einen Brandeinsatz vor der Probennahme schließen. Bei der Analyse der Einsatzdaten des HLF A konnte festgestellt werden, dass am Tag vor der Probennahme, dem 17.09.2018, zwei Einsätze zu verzeichnen waren, die die deutlich erhöhten Werte am 18.09.2018 erklären können. Das HLF A war am Morgen des 17.09.2018 bei den Brandbekämpfungsmaßnahmen in einem S-Bahn Tunnel beteiligt. Hier brannten auf einer Strecke von ca. 200 Metern 14 Glutnester mit Abrieb und Unrathaufen (44). Am Abend des 17.09.2018 war das HLF A an der Brandbekämpfung und Menschenrettung bei einem Wohnungsbrand mit starker Rauchentwicklung im Einsatz (45). Diese beiden Einsätze, insbesondere der Wohnungsbrand, sind vermutlich ursächlich für die deutlich erhöhten PAK-Mengen in den Proben vom 18.09.2018 (Woche zwei). Der Mittelwert von HLF A vor der Reinigung in Woche vier der Probennahme liegt im Vergleich zu Woche eins (Mittelwert:  $5,26 \text{ pg/cm}^2$ ) und drei (Mittelwert:  $5,25 \text{ pg/cm}^2$ ), mit einem Mittelwert von  $7,23 \text{ pg/cm}^2$ , etwas höher. Die Auswertung der Einsatzdaten hat ergeben, dass die Brandbekämpfungseinsätze im Zeitraum vom 25.09.2018 (Woche drei) bis zum 02.10.2018 (Woche vier) im Vergleich etwas erhöht waren (8 Brandbekämpfungseinsätze). Dabei handelte es sich jeweils um Kleinbrände. Das erklärt den leicht erhöhten Mittelwert der PAK-Mengen bei HLF A in Woche vier.

### 6.3 Diskussion der hohen Naphtalinmengen

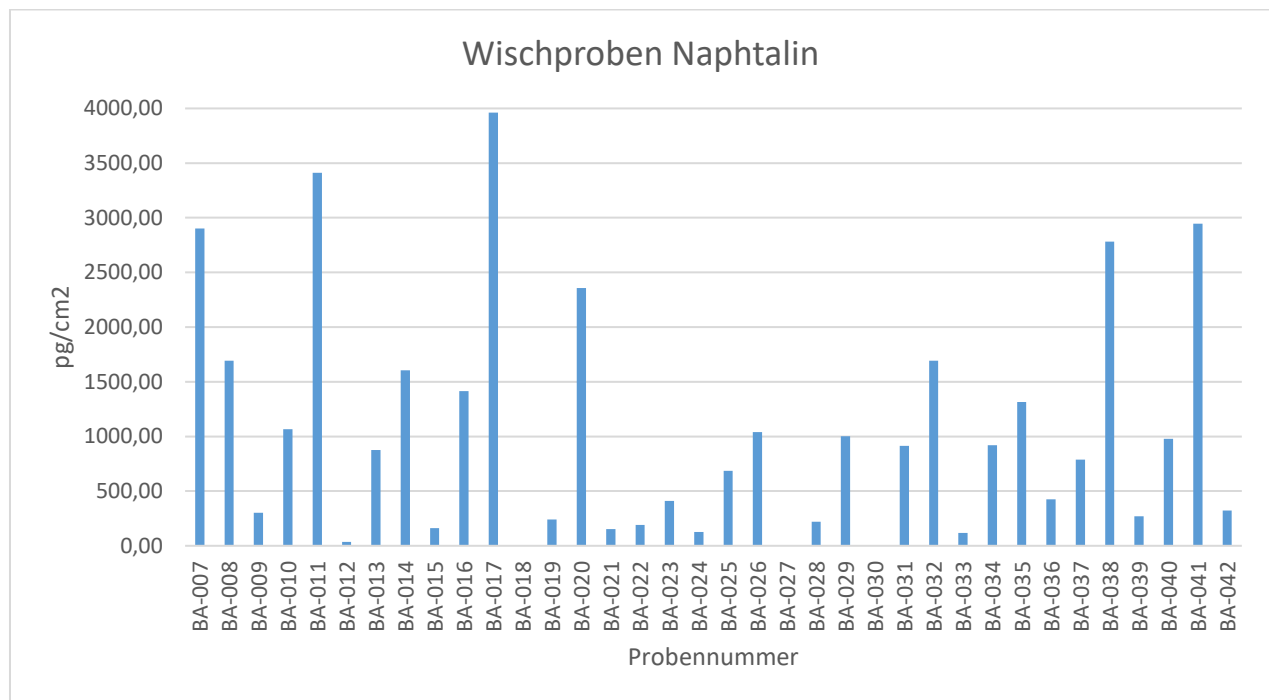


Abbildung 19 – Ergebnisse der Naphtalinwerte aus den eigentlichen Wischproben normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$

Die nachgewiesenen Mengen von Naphtalin (s. Abbildung 19) sind im Vergleich zu den anderen Mengen der PAK aus Abbildung 18 sehr hoch. Die Vermutung ist, dass in dem Lösungsmittel Cyclohexan, den Behältnissen oder an den benutzten Instrumenten zur Analyse größere Mengen Naphtalin vorhanden sein könnten. Diese Vermutung deckt sich mit den Ergebnissen der Blindproben, insbesondere der Blindprobe BA-000. In dieser wurde nur das Kimwipes mit den bei den anderen Probennahmen genutzten Instrumenten mit Cyclohexan beträufelt und im Zentrifugenröhrchen zur Analyse gegeben. Es könnte sich ebenfalls um eine Verunreinigung bei der laborseitigen Analyse handeln. Die Menge von Naphtalin betrug in dieser Blindprobe  $4390 \text{ ng}/\text{cm}^2$ , hierbei handelt es sich mit über  $1000 \text{ ng}$  Abstand um den höchsten Wert innerhalb der Blindproben (s. Abbildung 17). Der Trend von Naphtalin ist dabei anders als bei den anderen PAK. Da sind die höchsten Werte in der Regel bei den Handlampen zu finden, bei Naphtalin sind die größten Mengen in den Wischproben der Funkgeräte vorhanden (Mittelwert:  $2017,46 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ). Im Vergleich dazu haben die Handlampen einen Mittelwert der Naphtalinmenge von  $932,87 \text{ pg}/\text{cm}^2$  und die Einstieggriffe einen Mittelwert von  $159,87 \text{ pg}/\text{cm}^2$ . Eine Vermutung ist, dass sich in dem Material der Handfunkgeräte (Faustmikrofone und Kabel) Mengen von Naphtalin befinden, das lässt sich jedoch nicht durch die Blindproben bestätigen, diese bewegen sich mit  $6,62 \text{ ng}/\text{cm}^2$  (BA-003) und  $2,35 \text{ ng}/\text{cm}^2$  (BA-004) im Schwankungsbereich von  $2,5 \text{ ng}$  um den Mittelwert von Naphtalin ( $4,72 \text{ ng}/\text{cm}^2$ ) in den Blindproben und geben so keinen Hinweis auf ein deutlich erhöhtes Vorkommen von Naphtalin in den Faustmikrofonen oder den Kabeln. Somit muss es daran liegen, dass Naphtalin sich in größerem Maße an den Oberflächen der Funkgeräte ansammelt als die anderen PAK. Bei Naphtalin zeigt sich keine kanzerogene oder mutagene Aktivität (27) (S. 11),

weshalb eine Auswirkung auf das Krebsrisiko bei Menschen, zu derzeitigem Stand, nicht gegeben ist.

#### 6.4 Diskussion der Blindproben ohne Naphtalin

Die folgende Diskussion basiert auf Abbildung 16 auf Seite 50. Es liegt der Verdacht nahe, dass es sich bei den Proben BA-004, -005 und -006 um eine Kontamination von Außen handelt. Bei der Blindprobe -004 handelt sich um die Blindprobe der zum Faustmikrofon gehörenden Kabel. Hier wurden Mengen von Phenanthren festgestellt. Da die Kabel von einem bereits ausgepackten Faustmikrofonen stammen, besteht der Verdacht, dass es sich hier um eine Kontamination von Außen handeln könnte. Bei den Blindproben -005 und -006 handelt es sich um die Einstieggriffe auf beiden Seiten des Löschfahrzeuges. Diese weisen ein sehr ähnliches Muster an Phenanthren, Fluoranthren und Pyren auf. Hier besteht ebenfalls der Verdacht, dass es sich hier um eine Kontamination von Außen handelt, da für diese Blindproben keine werkneuen Fahrzeuge untersucht werden konnten, sondern auf ein Fahrzeug aus dem Einsatzdienst zurückgegriffen werden musste, bei dem die Einstieggriffe vor der Probennahme gründlich mit Brennspritus gereinigt wurden. Möglicherweise handelt es sich auch um das Muster von PAK aus dem Brennspritus, mit dem die Einstieggriffe kurz zuvor gereinigt wurden. Die drei gefundenen PAK sind alle jeweils weder kanzerogen noch mutagen aktiv, nur Fluoranthren gilt in der Mutagenität als inaktiv bzw. schwach aktiv. Somit lässt sich, ohne auf Naphtalin einzugehen, festhalten, dass in den Blindproben der Handlampen und der Faustmikrofone keine PAK zu finden sind und die PAK Spuren in den Blindproben der Kabel und der Einstieggriffe vermutlich mit Kontaminationen von außen zu erklären sind und nicht vom Material stammen, da es sich hierbei nicht um werkneue bzw. verpackte Probenträger handelt. Um das zu untersuchen, müssten in weiteren Studien mehr Blindproben von den entsprechenden Kabeln und Einstieggriffen von werkneuen Fahrzeugen genommen werden.

#### 6.5 Vergleich und Diskussion der PAK-Mengen an Handlampen, Funkgeräten und Einstieggriffen

Im Folgenden werden die Ergebnisse, bezogen auf die einzelnen Probenträger, also Handlampen, Faustmikrofone der Handsprechfunkgeräte und Einstieggriffe mit Hilfe von Boxplots dargelegt. Der obere und untere Whisker (Antenne) steht dabei für den maximalen und den minimalen Wert innerhalb der Proben. Der untere Whisker kann in der Abbildung verschwinden, wenn er, aufgrund der teilweise sehr geringen Werte, mit dem 25 % Perzentil zusammenfällt. Eine logarithmische Darstellung der Y-Achse und der damit verbundenen verbesserten Darstellung der geringen Werte, war aufgrund des verfügbaren Datenauswertungsprogramms nicht möglich. Die Ausreißer, also Werte oberhalb bzw. unterhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands (Abstand vom oberen bis zum unteren Ende der Box), werden in diesen Abbildungen nicht dargestellt, da sie die Abbildung unübersichtlich machen. Die Ausreißer werden stattdessen im Text genannt. Die obere Grenze der Box bildet das 75 % Perzentil ab. Unterhalb dieser Grenze liegen 75 % der untersuchten Werte. Die untere Grenze der Box bildet das 25 % Perzentil ab. Unterhalb dieser Grenze liegen 25 % der



untersuchten Werte. Das Kreuz stellt das arithmetische Mittel der Verteilung dar und der horizontale Strich in der Box bildet den Median ab. Dieser kann in der Abbildung verschwinden, wenn er mit der oberen oder unteren Box-Grenze zusammenfällt.

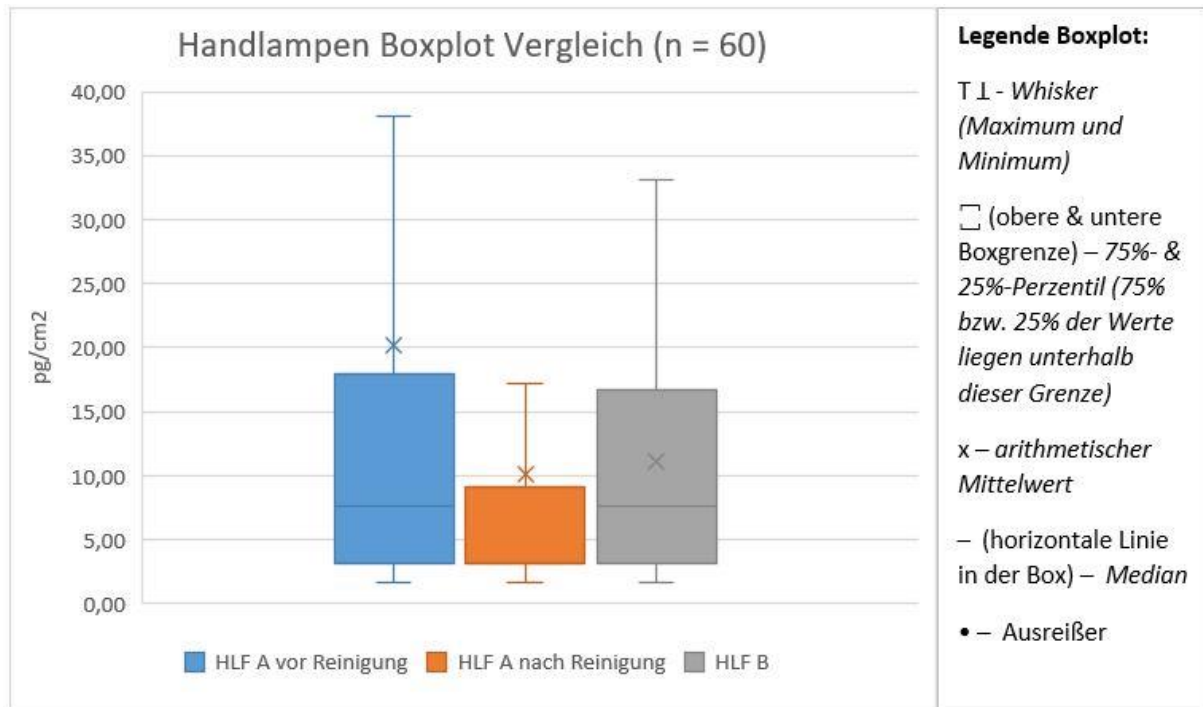


Abbildung 20 – Vergleich, der bei HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung und HLF B gefundenen PAK-Mengen in allen Wischproben der Handlampen (n = 60) mittels Boxplot, Naphtalin wurde nicht berücksichtigt und Ausreißer sind nicht dargestellt

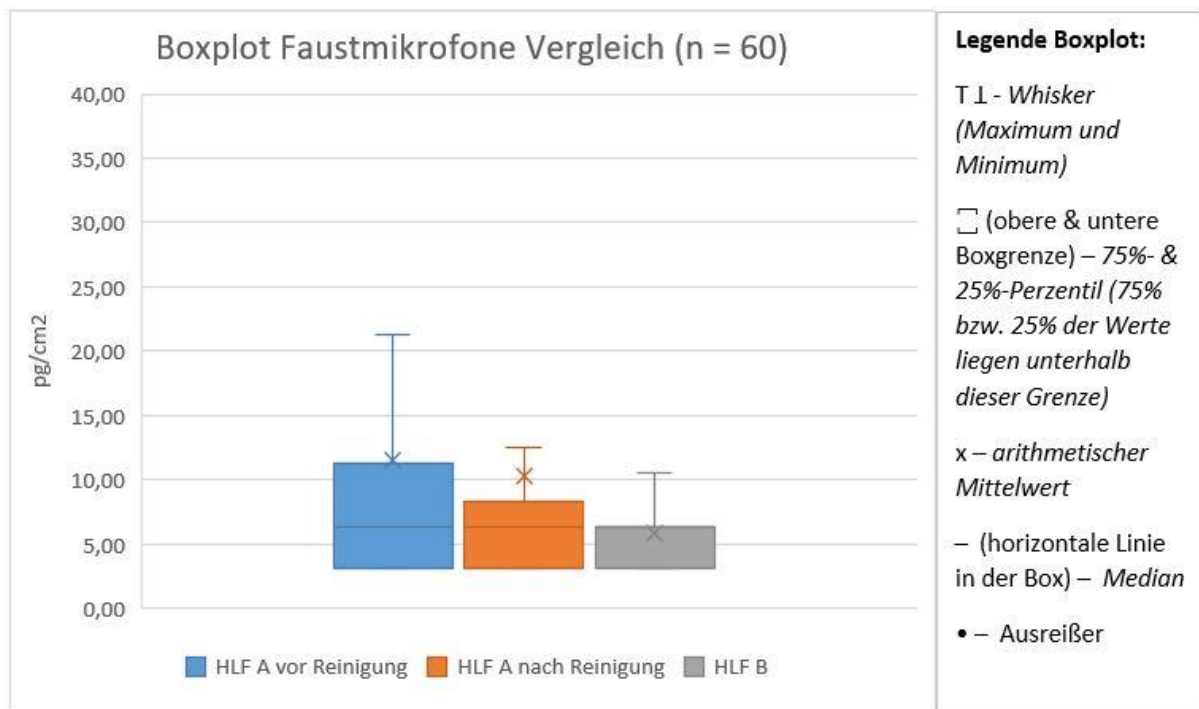


Abbildung 21 – Vergleich, der bei HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung und HLF B gefundenen PAK-Mengen in allen Wischproben der Faustmikrofone der Handfunkgeräte (n = 60) mittels Boxplot, Naphtalin wurde nicht berücksichtigt und Ausreißer sind nicht dargestellt

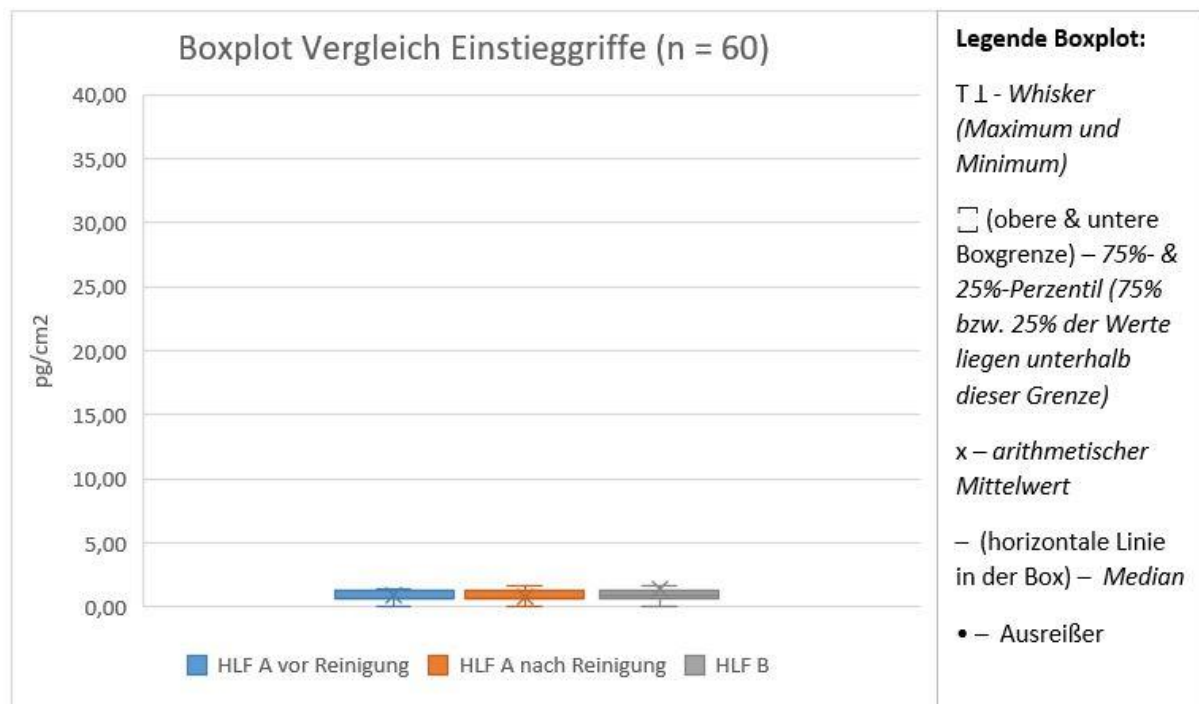


Abbildung 22 – Vergleich, der bei HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung und HLF B gefundenen PAK-Mengen in allen Wischproben der Einstieggriffe (n = 60) mittels Boxplot, Naphtalin wurde nicht berücksichtigt und Ausreißer sind nicht dargestellt

In Abbildung 20 bis 22 wurde die Gesamtheit aller gefundenen PAK in den jeweiligen Fahrzeugen (HLF A und B), bzw. vor und nach der Reinigung des HLF A, miteinander verglichen. Die nicht mit abgebildeten Ausreißer sind in der folgenden Tabelle gezeigt:

Tabelle 10 – Ausreißer der Abbildungen 20 bis 23 (Boxplots), angegeben in  $\text{pg}/\text{cm}^2$

Abbildung/Boxplot	HLF A vor Reinigung ( $\text{pg}/\text{cm}^2$ )	HLF A nach Reinigung ( $\text{pg}/\text{cm}^2$ )	HLF B ( $\text{pg}/\text{cm}^2$ )
<b>Abbildung 20/Handlampen</b>	275,78/110,57/ 94,04/75,62/45,12	134,08/58,46/ 52,11/39,4/22,88/ 18,43	47,66/39,40
<b>Abbildung 21/Faustmikrofone</b>	87,82/82,8/45,17/ 40,15/30,11/27,6	94,09/77,78/38,89/ 26,35/22,58/20,07	18,82/17,56/ 16,31/15,06/ 12,42
<b>Abbildung 22/Einstieggriffe</b>	4,12/2,45	---	13,43/5,28/4,31/ 3,28/2,96/2,57/2,37

Es zeigt sich, dass die Menge der gefundenen PAK insgesamt, nach der Reinigung des HLF A (Mittelwert:  $6,89 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ) im Vergleich zum Boxplot vor der Reinigung des HLF A (Mittelwert:  $10,88 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ), geringer ausfällt. Diese Beobachtung ist unabhängig vom jeweiligen Probenträger (Handlampe, Funkgerät und Einstieggriff) zu machen. Das bedeutet, dass die Reinigung, die am HLF A durchgeführt wird, eine Reduktion der vorhandenen PAK im Mittel um ca. 35,85 % bewirkt. Somit kann an dieser Stelle unterstellt werden, dass die Reinigung ihren Zweck in einem gewissen Rahmen erfüllt und zu einer Reduzierung der PAK-Menge innerhalb der Mannschaftskabine und insbesondere an den Ausrüstungsgegenständen um mehr als ein Drittel führt. Im Vergleich von HLF A vor der Reinigung zu HLF B kann man feststellen, dass die Menge von PAK bei HLF A insgesamt größer (Mittelwert HLF A vor Reinigung:  $10,88 \text{ pg}/\text{cm}^2$ , Mittelwert HLF B:  $6,11 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ) ist. Eine Erklärung hierfür ist möglicherweise die höhere Zahl an tatsächlichen Brandeinsätzen (ohne Fehlalarmierungen), die das HLF A (18 Einsätze von 08/18 bis 09/18) im Vergleich zu HLF B (5 Einsätze von 08/18 bis 09/18) absolviert hat. Auffällig ist auch, dass die Menge der PAK von den Probenträgern des HLF A nach der Reinigung zumindest bei den Handlampen und den Einstieggriffen geringer ist als die Menge der PAK von den Probenträgern des HLF B (s. Abb 20 und 22). Auch das zeigt, dass eine Reinigung ein effektives Mittel ist, um die Menge der vorhandenen PAK auch im Vergleich zu nicht regelmäßig gereinigten Fahrzeugen zu reduzieren. Dennoch ist beim Vergleich der Funkgeräte von HLF A nach der Reinigung und HLF B keine geringere Menge von PAK zu verzeichnen. Das liegt in dem Fall auch daran, dass insgesamt beim HLF B nur sehr geringe Mengen bei den Funkgeräten zu verzeichnen waren. Das könnte ebenfalls an der geringeren Zahl von Brandeinsätzen des HLF B im Probennahmezeitraum (s. oben) liegen.

## 6.6 Vergleich der Probenräger bei HLF A und HLF B

Nachfolgend werden die Probenräger im Hinblick auf die Mengen bei HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung, und HLF B verglichen. Die Auswertung bezieht sich auf die Boxplots auf Seite 55 und 56 (Abbildung 20 bis 22).

Bei HLF A wird ersichtlich, dass an den Handlampen jeweils die größte Menge an PAK nachgewiesen werden konnte (Mittelwert: 13,75 pg/cm<sup>2</sup>), am zweitgrößten war die Menge der PAK an den Funkgeräten (Mittelwert: 9,26 pg/cm<sup>2</sup>) und in einem sehr geringen Maße wurden PAK an den Einstiegriffen gefunden (Mittelwert: 1,04 pg/cm<sup>2</sup>). Das Ergebnis ist sehr interessant, da das Funkgerät (Faustmikrofon) und die Handlampe des Feuerwehrangehörigen in der Regel nur etwa 15 bis 20 cm auseinander an der Einsatzkleidung getragen werden und man damit annehmen könnte, dass die Kontamination mit PAK ähnlich sein sollte. Das dies nicht der Fall ist, kann unterschiedliche Gründe haben. Es kann sein, dass die Oberflächen von Handlampe und Faustmikrofon unterschiedlich gut für die Anhaftung von Rußpartikeln und somit auch PAK geeignet sind. So scheint die Oberfläche der Handlampe im Gegensatz zu der Oberfläche der Funkgeräte sehr gut für Rußanhaftungen beschaffen zu sein. Beide Oberflächen bestehen aus Thermoplasten, die Oberfläche des Faustmikrofons besteht genauer gesagt aus Polycarbonat. Für die Oberfläche der Handlampe ließen sich im Bearbeitungsumfang der Arbeit keine genaueren Angaben herausarbeiten. Ein Unterschied von der Oberfläche der Handlampe zu dem Faustmikrofon besteht darin, dass bei der Lampe jeweils am Fuß und am Kopf der Lampe Gummiringe angebracht sind, die einen Sturz dämpfen sollen. Möglicherweise ist das der Grund für die größeren PAK-Anhaftungen an der Handlampe. Eine andere Möglichkeit ist, dass die PAK über die Handschuhe der Feuerwehrleute an die Gegenstände gelangen und die Handlampe häufiger angefasst wird als das Faustmikrofon, und so dort größere Mengen PAK zu finden sind. Das ist eine plausible Möglichkeit, da die Feuerwehr in den letzten Jahren vermehrt zu kleineren Bränden, wie zum Beispiel brennendem Essen auf Herdplatten, oder Kleinfuern ausrücken. In diesem Fall findet das Funkgerät nur wenig Verwendung beim Angriffstrupp. Der Grund dafür ist, dass diese Art von Einsätzen recht schnell abgearbeitet werden können und nur eine geringe Kommunikation notwendig ist oder die Kommunikation im direkten Gespräch mit dem Einheitsführer, ohne die Nutzung der Funkgeräte, stattfindet. Die Handlampen kommen in diesem Fall öfter zum Einsatz, bzw. müssen bei Bedarf mindestens ein- und ausgeschaltet werden. Sie werden also bei der Nutzung mindestens zwei Mal mit dem Feuerwehrhandschuh angefasst. Mit den Feuerwehrhandschuhen selbst werden möglicherweise verkohlte und angebrannte Stoffe oder auch der Feuerwehrschauch und andere Ausrüstungsgegenstände angefasst und danach auch wieder die Handlampe, die dann mit den vorhandenen Schadstoffen kontaminiert wird. Um diese These zu prüfen sollte in weiteren Arbeiten insbesondere der Weg der Kontamination nachvollzogen werden. Dabei ist zu prüfen, ob die Schadstoffe (PAK) hauptsächlich über die Luft bzw. die Brandgase oder eher über die Handschuhe, also einen mechanischen Übertrag, auf die Ausrüstung gelangen.

## 6.7 Analyse der Entwicklung der PAK-Mengen im zeitlichen Verlauf

In den Abbildungen 23 bis 25 ist die vierwöchige Probennahme im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die Mengen der PAK von den drei Probenrägern (Handlampe, Faustmikrofon und Einstieggriff) sind für diese Abbildungen aufsummiert worden. In den Säulendiagrammen sind die Säulen der 16 EPA-PAK ohne Naphtalin, jeweils nebeneinander zu der entsprechenden Woche zugeordnet, dargestellt.

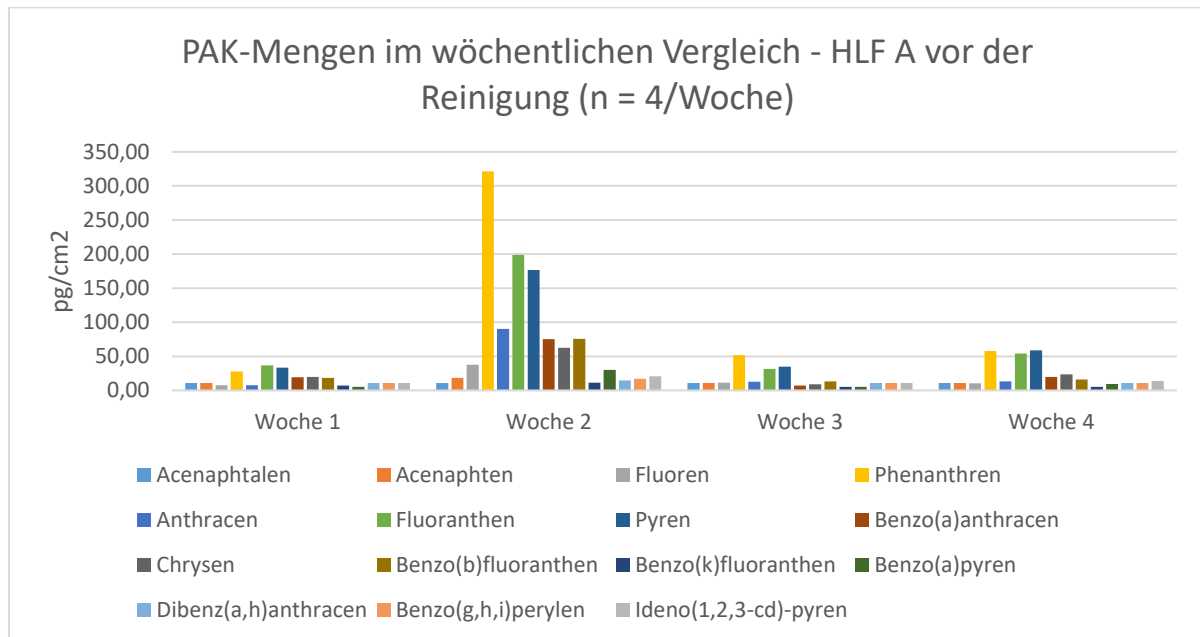


Abbildung 23 – Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF A vor der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden

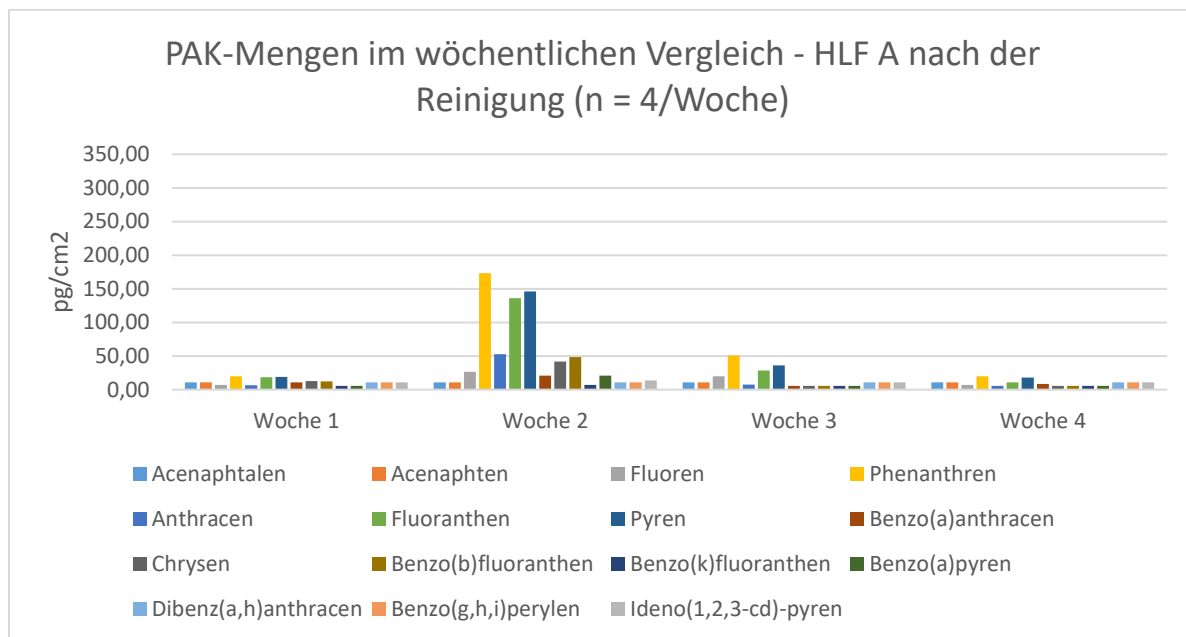


Abbildung 24 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF A nach der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden

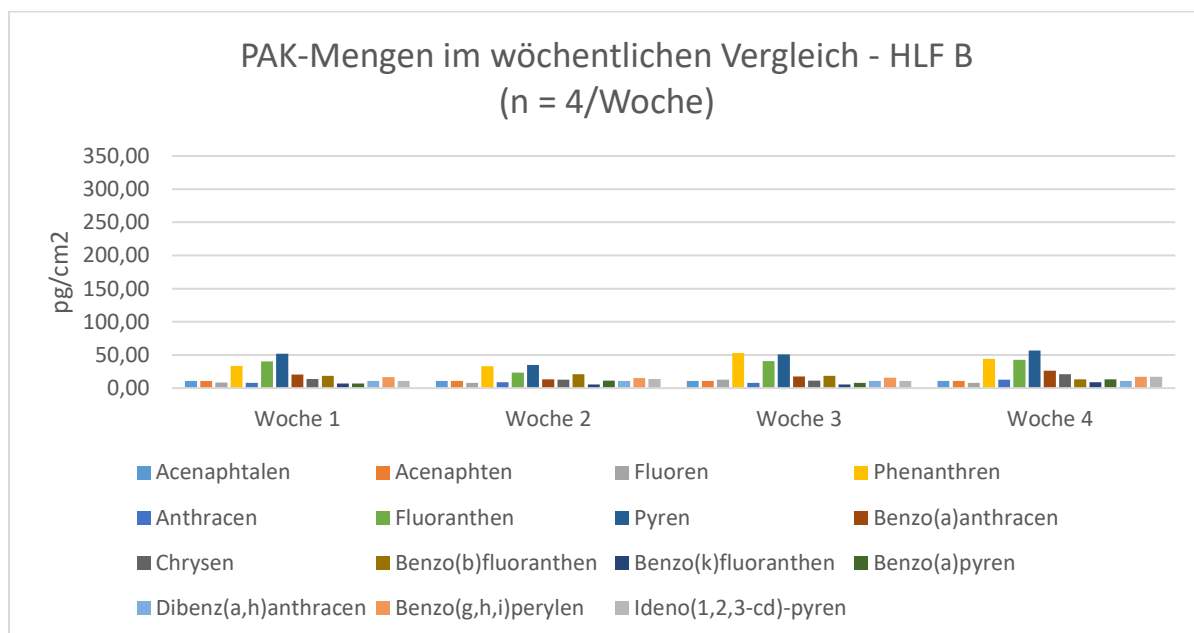


Abbildung 25 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF B im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden

Auffällig beim HLF A (s. Abbildung 23 und 24) ist die zweite Woche, in der nahezu alle gemessenen PAK deutlich angestiegen und höher als in den anderen Wochen sind. Eine Erklärung hierfür stellt der Wohnungsbrand am 17.09.2018 dar, da, wie in Kapitel 2 dargelegt, in jeder Brandphase PAK entstehen und so die Möglichkeit besteht, mit diesen kontaminiert zu werden. Hierbei ist auch zu bemerken, dass die Menge von PAK in der dritten Woche (Mittelwert Woche drei:  $5,25 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ), also der Woche nach der starken Kontamination durch

das Brandereignis (Mittelwert Woche zwei: 25,81 pg/cm<sup>2</sup>), wieder ein durchschnittliches Niveau erreicht hat. Dieses durchschnittliche Niveau kann man daran erkennen, dass sich die einzelnen Mengen der PAK bei Abbildung 23 und 24 in Woche 1, 3 und 4 auf einem ähnlichen Niveau befinden (Mittelwert HLF A vor Reinigung über Woche eins, drei und vier: 5,91 pg/cm<sup>2</sup>). Auch bei HLF B lässt sich beobachten (Abbildung 25), dass sich die PAK-Mengen immer auf einem ähnlichen Niveau halten und nur geringfügigen Schwankungen ausgesetzt sind (Mittelwert HLF B über Woche eins, zwei, drei und vier: 6,11 pg/cm<sup>2</sup>). Beim Vergleich von HLF A und B fällt jedoch auf, dass sich dieses durchschnittliche Niveau der PAK-Mengen in unterschiedlichen Größenordnungen bewegt. Die PAK-Mengen des HLF A liegen bei nahezu allen PAK etwas höher als bei HLF B, obwohl das HLF A regelmäßig gereinigt wird. Eine Erklärung hierfür ist möglicherweise, wie weiter oben bereits beschrieben, die etwas höhere Zahl an tatsächlichen Brandeinsätzen, die das HLF A (18 Einsätze von 08/18 bis 09/18) im Vergleich zu HLF B (5 Einsätze von 08/18 bis 09/18) absolviert hat, die für ein insgesamt höheres durchschnittliches Niveau an PAK verantwortlich sind. Das würde bedeuten, dass die Mannschaft eines Fahrzeuges, welches an einer größeren Zahl von Brandeinsätzen beteiligt ist, auch einer größeren Grundbelastung durch PAK bzw. Schadstoffe ausgesetzt ist. Sollte sich das bestätigen, besteht für die Besatzung auf Fahrzeugen mit einer höheren Zahl an Brandeinsätzen auch ein größeres potentielles Krebsrisiko, da die Menge der vorhandenen kanzerogenen PAK, wie beispielsweise Benzo(a)pyren größer ist, als bei Fahrzeugen mit weniger Brandeinsätzen.

## 6.8 Diskussion der Reinigungsmaßnahmen

Es ist aus den Abbildungen 23 bis 25 ebenfalls erkennbar, dass die Menge der PAK nicht im zeitlichen Verlauf akkumuliert und somit nicht stetig mit jeder dazukommenden Schadstoffbelastung ansteigt. Das wird auch durch die Werte des HLF A von Woche zwei und drei bestätigt. Hier ist die PAK-Menge in Woche drei, trotz der deutlich höheren Kontamination in Woche zwei, nicht größer oder gleich den Werten in Woche zwei, sondern wieder auf das durchschnittliche Niveau gefallen. Auch bei HLF B ist die Beobachtung zu machen, dass die PAK Werte im vierwöchigen Verlauf nicht ansteigen, sondern auf einem durchschnittlichen Niveau stagnieren. Das bedeutet aber auch, dass das Reinigen der Fahrzeuge immer nur einen kurzzeitigen Effekt mit sich bringt (< 1 Woche). Die PAK-Mengen wachsen immer wieder auf das durchschnittliche Niveau an bzw. akkumulieren in diesem Fall, aber eben nicht über ein gewisses Niveau hinaus. Deutlich zu sehen ist diese Beobachtung in der folgenden Abbildung. Dort sind wieder die PAK-Mengen beim HLF A im zeitlichen Verlauf dargestellt, jeweils vor und nach dem Reinigen.



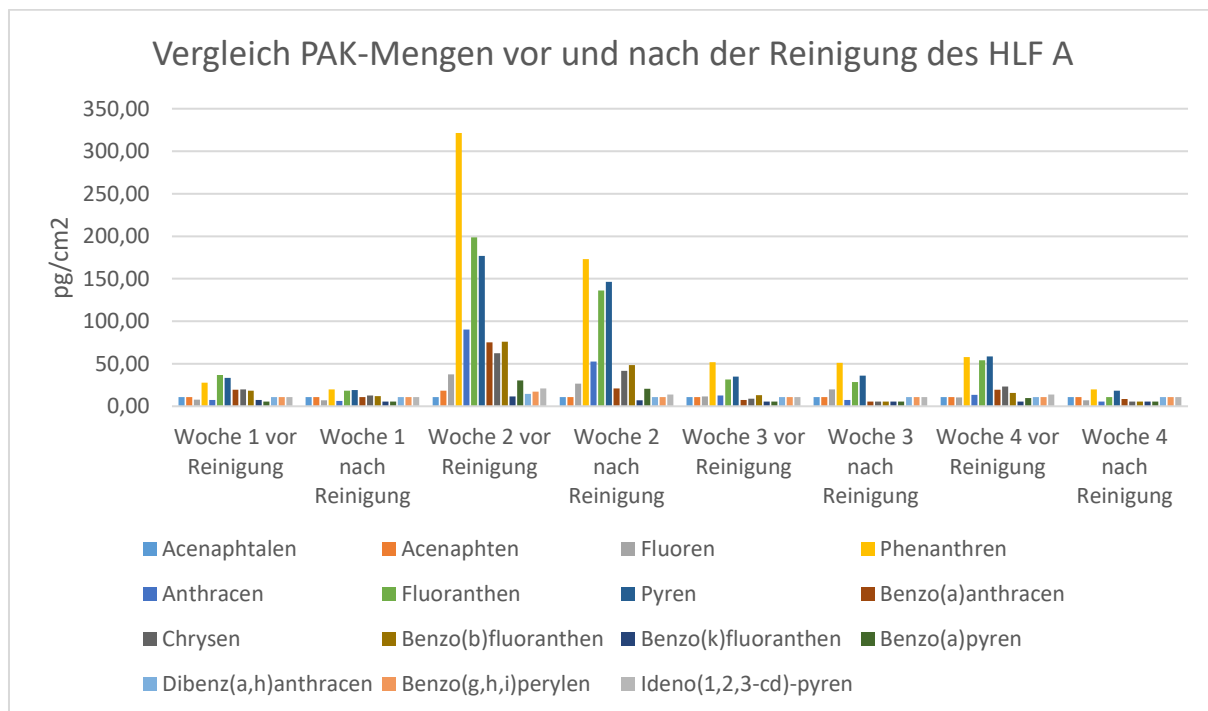


Abbildung 26 - Vergleich der PAK-Mengen des HLF A jeweils vor und nach der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, je Woche sind die 16 EPA-PAK ohne Naphtalin dargestellt normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden

In Abbildung 26 sind die PAK-Mengen des HLF A, jeweils vor und nach der Reinigung in dem Säulendiagramm dargestellt, um die Effektivität der Reinigung direkt beurteilen zu können. Hier kann man den Effekt der Reinigung in der zweiten Woche deutlich erkennen. Es findet eine deutlich sichtbare Reduktion der PAK-Mengen mit der Reinigung statt. In Woche eins wird die PAK-Menge im Mittel um 27,95 % reduziert, in Woche zwei um 37,12 %, in Woche drei um 5,71 % und in Woche vier um 55,46 %. Das bedeutet wiederum, dass die Reinigung nach einem intensiven Brandereignis effektiv ist, um eine Reduzierung der PAK-Menge zu erwirken (Reduzierung um 37,12 %). Wenn jedoch die durchschnittliche Belastung vorliegt findet eine geringere Reduktion der PAK-Mengen durch die Reinigung statt (Woche eins und drei).

Fraglich ist noch, aus welchem Grund die PAK-Menge ein bestimmtes durchschnittliches Niveau im begrenzten Zeitfenster der Probenahme nicht übersteigt. Auch wenn dieses Niveau bei den untersuchten Fahrzeugen unterschiedlich hoch ist, pendelt sich die PAK-Menge immer wieder auf dieses ein. Möglich ist, dass zwischendurch auf Eigeninitiative kleinere Reinigungen von einzelnen Ausrüstungsgegenständen bzw. Fahrzeugteilen durchgeführt werden und somit ein Grundniveau nicht überschritten wird. Eine weitere Möglichkeit ist, dass sich die PAK nur langsam an den Probenträgern akkumulieren und die PAK dann aber auch sehr stark an den Probenträgern angelagert sind und sich nicht lösen. Diese Anlagerung nimmt dann möglicherweise über lange Zeit zu. Oberflächlich angelagerte PAK, die nach einem Brandereignis kurzfristig durch die Reinigung wieder abgewischt werden, können leicht gelöst werden. Das würde auch die effektive Reinigung nach den erhöhten

Werten beim HLF A in Woche zwei erklären. Auch denkbar wäre, dass etwa so viele PAK durch Nutzung der Probenträger abgewischt bzw. weitergeschleppt werden, wie PAK durch Brandereignisse wieder an die Probenträger gelangen und so das durchschnittliche Niveau beibehalten wird. Das bedeutet auch, dass eine regelmäßige Reinigung stattfinden muss, insbesondere nach intensiven Brandeinsätzen, um die Kontamination wieder zu reduzieren und das durchschnittliche Niveau der PAK-Menge niedrig zu halten. Um die Akkumulation der PAK effektiv erfassen zu können, bedarf es einer auf einen längeren Zeitraum angelegten Studie. Im Rahmen dieser Arbeit war eine umfangreichere Probennahme nicht möglich.

## 6.9 Diskussion brandspezifisches Muster der PAK

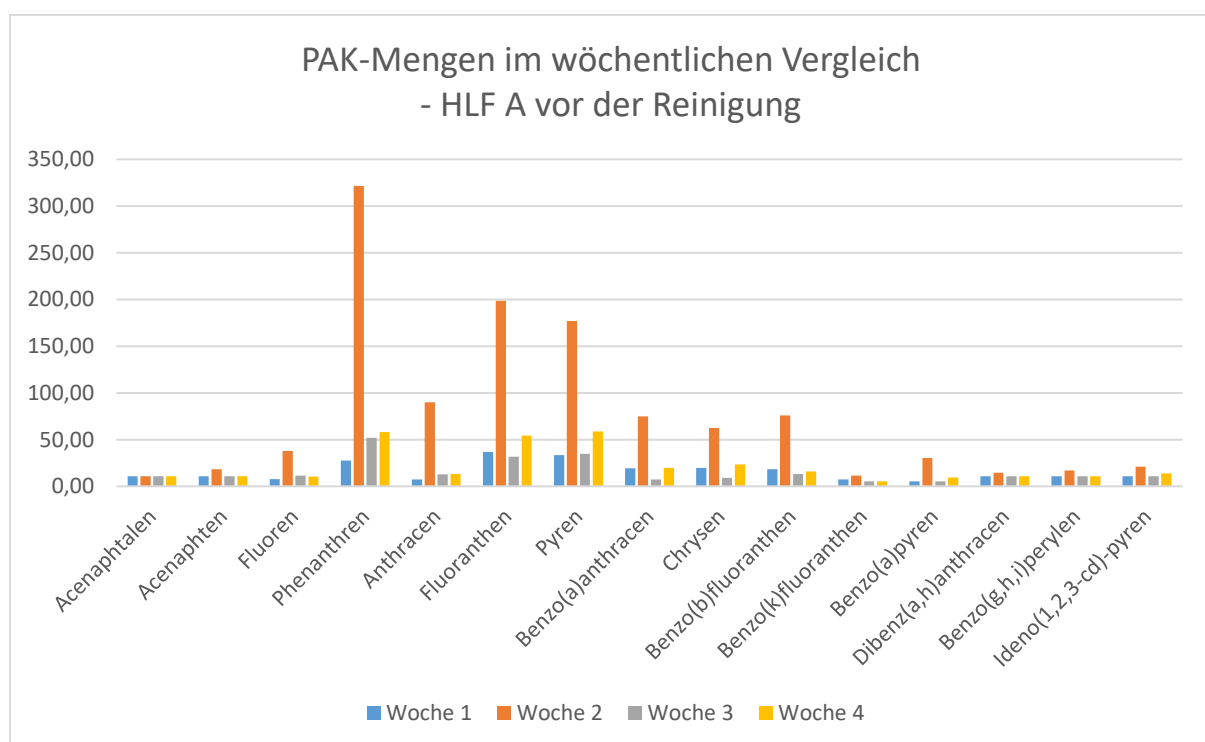


Abbildung 27 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF A vor der Reinigung im wöchentlichen Vergleich, bezogen auf die einzelnen PAK, ohne Naphtalin dargestellt normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden

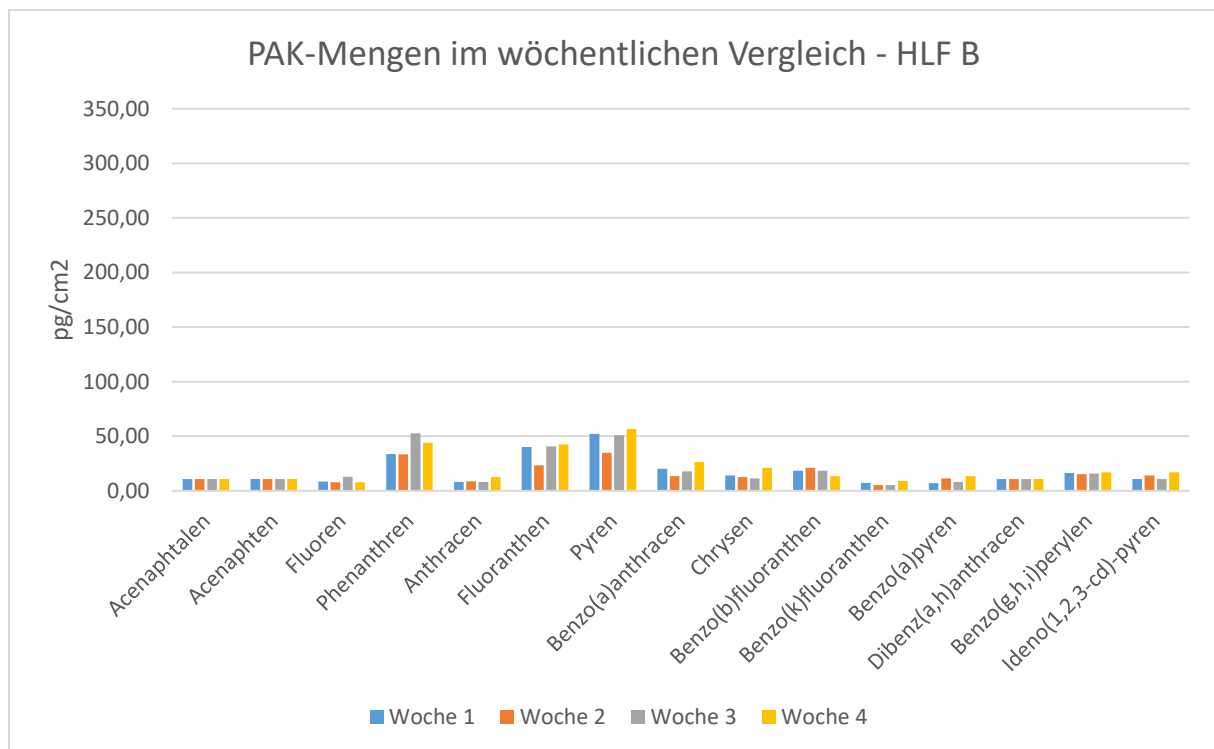


Abbildung 28 - Ergebnisse der PAK-Mengen des HLF B im wöchentlichen Vergleich, bezogen auf die einzelnen PAK, ohne Naphtalin dargestellt normiert auf  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind mit der Hälfte der jeweiligen Bestimmungsgrenze betrachtet worden

Die Abbildungen 27 und 28 stellen wieder den zeitlichen Verlauf der Probenahme dar, diesmal bezogen auf die einzelnen PAK. Naphtalin wird in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Zu erkennen ist hier, dass in jeder der vier Wochen und jeweils bei HLF A und HLF B in der Regel Phenanthren (Mittelwert:  $24,62 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ), Fluoranthren (Mittelwert:  $18,39 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ) und Pyren (Mittelwert:  $19,92 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ) am häufigsten vorkommen (Vergleich Mittelwerte restliche PAK, außer Naphtalin:  $2,21$  bis  $7,38 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ). Allgemein sehen die Diagramme von HLF A und B in ihrer Struktur sehr ähnlich aus und zeigen ein gleiches Bild. Das könnte darauf hindeuten, dass dieses Bild der PAK-Ansammlung mit den größten Mengen bei Phenanthren, Fluoranthren und Pyren charakteristisch für das Vorkommen der 16 EPA-PAK bei einem Brandereignis ist. Es handelt sich hierbei vermutlich um ein brandspezifisches Muster der 16 EPA-PAK. Zur Prüfung dieser Annahme sollten weitere Versuche durchgeführt werden. Zhang et al. haben in einer Studie die PAK Emissionen eines Strohbrandes im Innenbereich untersucht. Ihre Analysen beziehen sich ebenfalls auf die 16 EPA-PAK. In ihrer Studie haben sie PAK in der gasförmigen und der festen Form untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Phenanthren ( $22,7 \text{ mg}/\text{kg}$ ), Fluoranthren ( $24,1 \text{ mg}/\text{kg}$ ) und Pyren ( $24,4 \text{ mg}/\text{kg}$ ) in der festen Form am häufigsten vorkommen (46). Das unterstützt die Annahme, dass es sich bei dem in dieser Arbeit nachgewiesenen PAK-Muster um ein brandspezifisches Muster handelt. In der Studie wurde ebenfalls festgestellt, dass Naphtalin in der Partikelform kaum vorkommt ( $0,1 \text{ mg}/\text{kg}$ ), dafür gasförmig am meisten davon vorliegt ( $108,9 \text{ mg}/\text{kg}$ ). In der gasförmigen Phase sind zumindest Fluoranthren ( $2,3 \text{ mg}/\text{kg}$ ) und Pyren ( $1,8 \text{ mg}/\text{kg}$ ) nicht so stark ausgeprägt. Phenanthren ist in der Gasphase nur am viertstärksten ( $18,0 \text{ mg}/\text{kg}$ ) ausgeprägt (46). In den

Blindproben der Einstieggriffe wurden, wie beschrieben, ebenfalls Phenanthren, Fluoranthren und Pyren nachgewiesen. Die Blindproben stammen von schon im Einsatz befindlichen Fahrzeugen, bei denen die Griffe gründlich gereinigt wurden. Da diese drei spezifischen PAK schon innerhalb der Blindproben, wenn auch in deutlich geringeren Mengen (3,7 bis 6,7 pg/cm<sup>2</sup>), gefunden wurden, bestätigt das die erste Annahme, dass diese PAK durch Brandeinsätze vorkommen und nicht durch die Reinigung durch den Brennspritus oder das beprobte Material. Wie schon beschrieben, besteht bei den drei am häufigsten vorkommenden PAK keine mutagene oder kanzerogene Aktivität. Nur Fluoranthren weist maximal eine schwache mutagene Aktivität auf (27) (S. 11).

## 6.10 Darstellung und Diskussion der kanzerogen aktiven PAK

Auf den folgenden Seiten werden einzelne PAK analysiert und verglichen. Hierbei beschränken sich die Ausführungen auf die Schnittmengen der 16 EPA-PAK mit den 8 EU-PAK. Darunter fallen Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren und Dibenzo(a,h)anthracen. Diese PAK sind bei Mutagenität und Kanzerogenität, wie in Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 beschrieben wurde, von schwach aktiv bis sehr stark aktiv einzuordnen (s. Tabelle 11) (27) (S. 11). Somit erweisen sich diese 6 PAK als äußerst relevant für die Betrachtung, da sie potentielle Krebsauslöser sind. Besonders Benzo(a)pyren ist hier als sehr stark aktiv hervorzuheben.

*Tabelle 11 – Schnittmenge der 16 EPA-PAK und der 8 EU-PAK und ihre mutagene und kanzerogene Aktivität – Technische Informationsbibliothek. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [Internet]. Hannover; aufgerufen 8. August 2018. Verfügbar unter: [https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH\\_de.pdf](https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf), von P. Thomas bearbeitet*

Substanz	Mutagenität	Kanzerogenität
Benzo(a)anthracen	schwach bis mäßig aktiv	schwach aktiv
Chrysen	mäßig aktiv	schwach aktiv
Benzo(b)fluoranthren	mäßig aktiv	mäßig bis stark aktiv
Benzo(k)fluoranthren	mäßig aktiv	schwach aktiv
Benzo(a)pyren	sehr stark aktiv	sehr stark aktiv
Dibenzo(a,h)anthracen	mäßig bis stark aktiv	stark bis sehr stark aktiv

In der folgenden Analyse werden Boxplots zur grafischen Darstellung genutzt. Die Erklärung in Kapitel 6.5 trifft hier ebenfalls zu. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass in diesen Grafiken die Ausreißer als Punkt dargestellt sind. Whisker fallen teilweise, aufgrund des geringen Wertebereiches (n = 4), mit dem 75%- bzw. 25%- Perzentil zusammen.

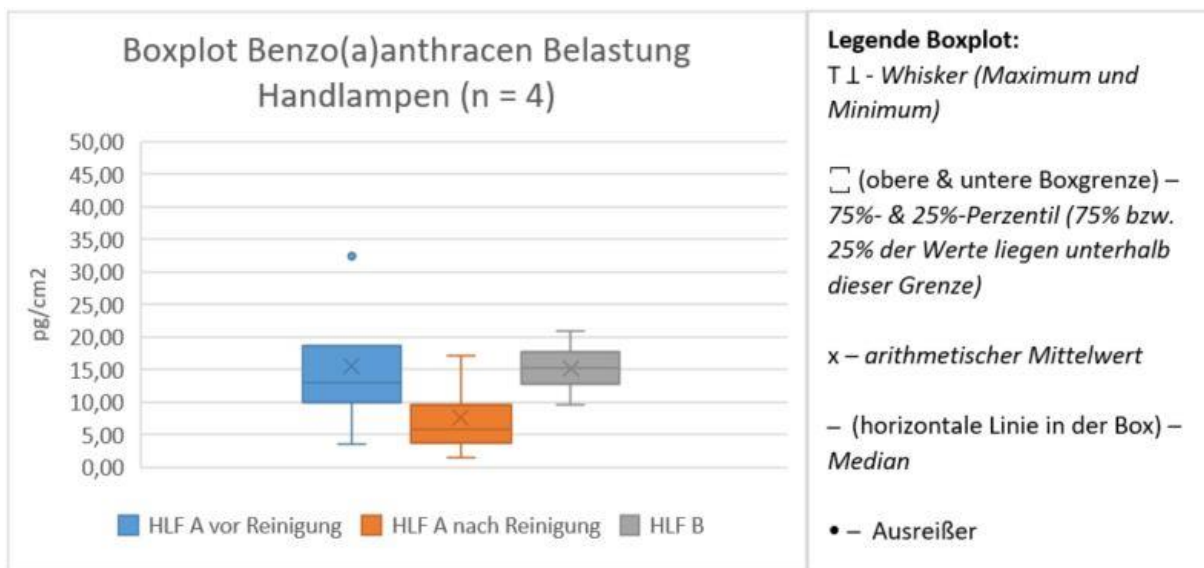


Abbildung 29 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(a)anthracen im Probennahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

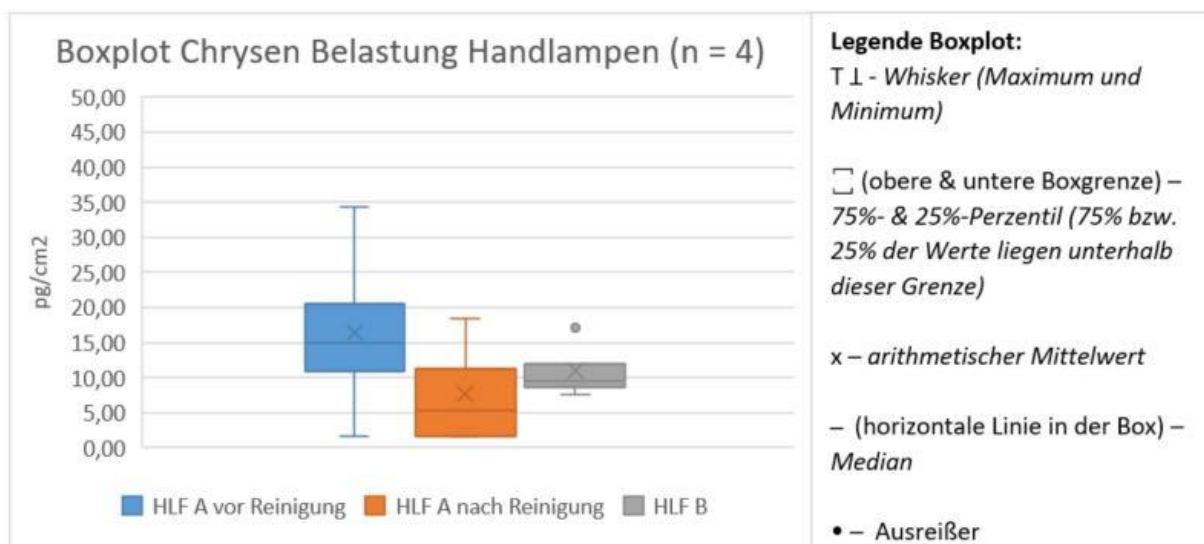


Abbildung 30 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Chrysen im Probennahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

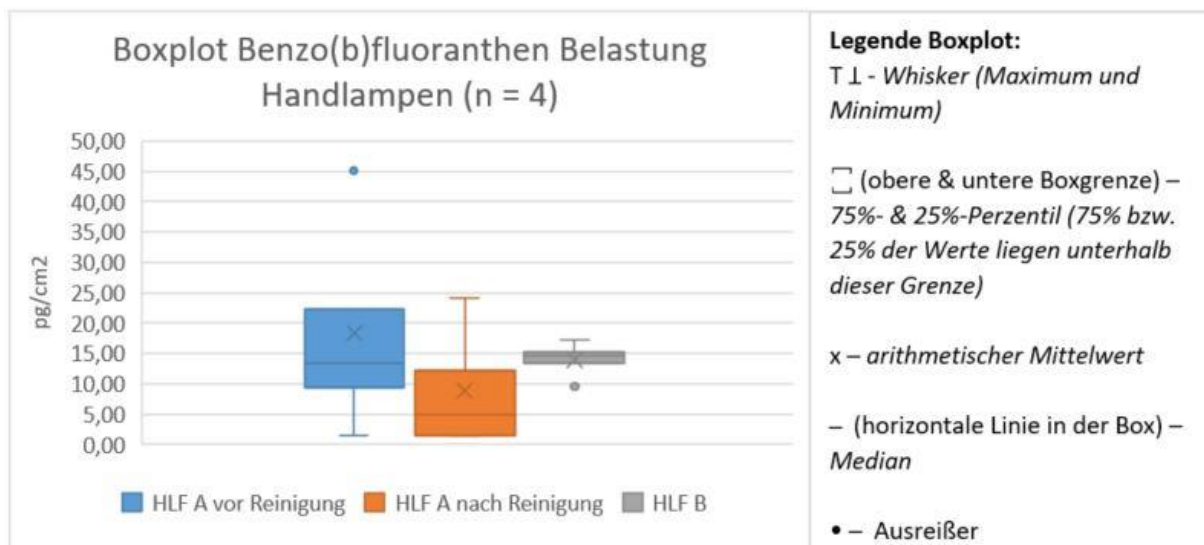


Abbildung 31 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(b)fluoranthen im Probennahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

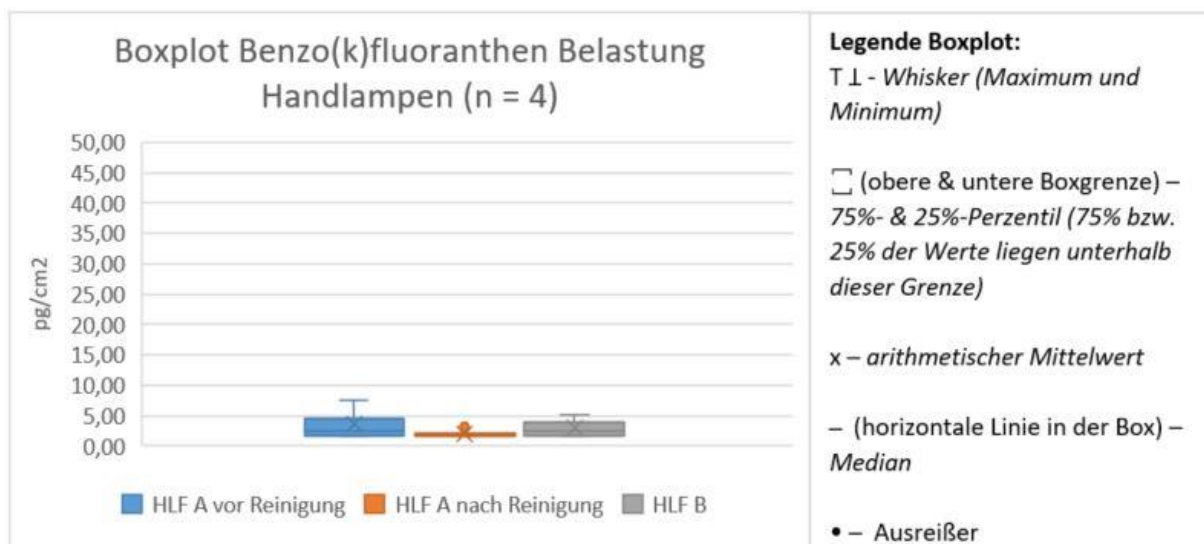


Abbildung 32 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(k)fluoranthen im Probennahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

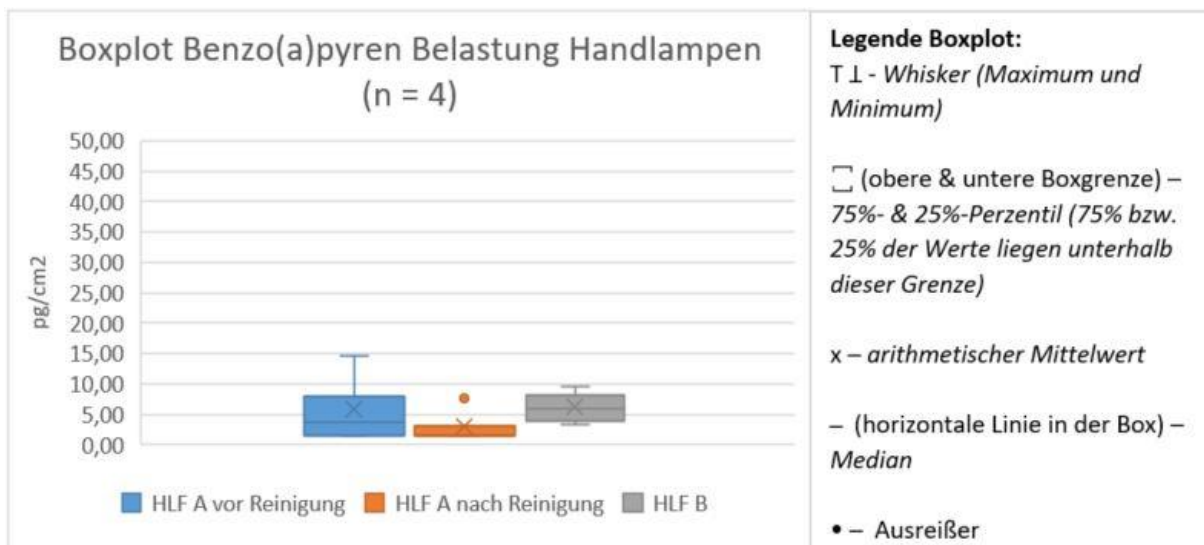


Abbildung 33 – Boxplot der Belastung der Handlampen mit Benzo(a)pyren im Probennahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

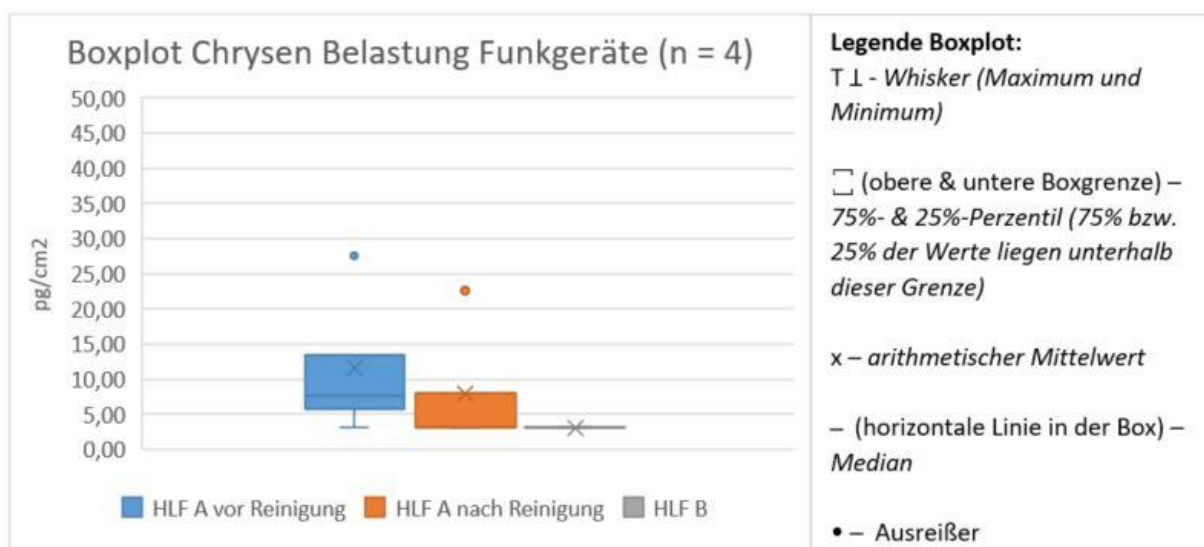


Abbildung 34 – Boxplot der Belastung der Faustmikrofone der Handfunkgeräte mit Chrysen im Probennahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)



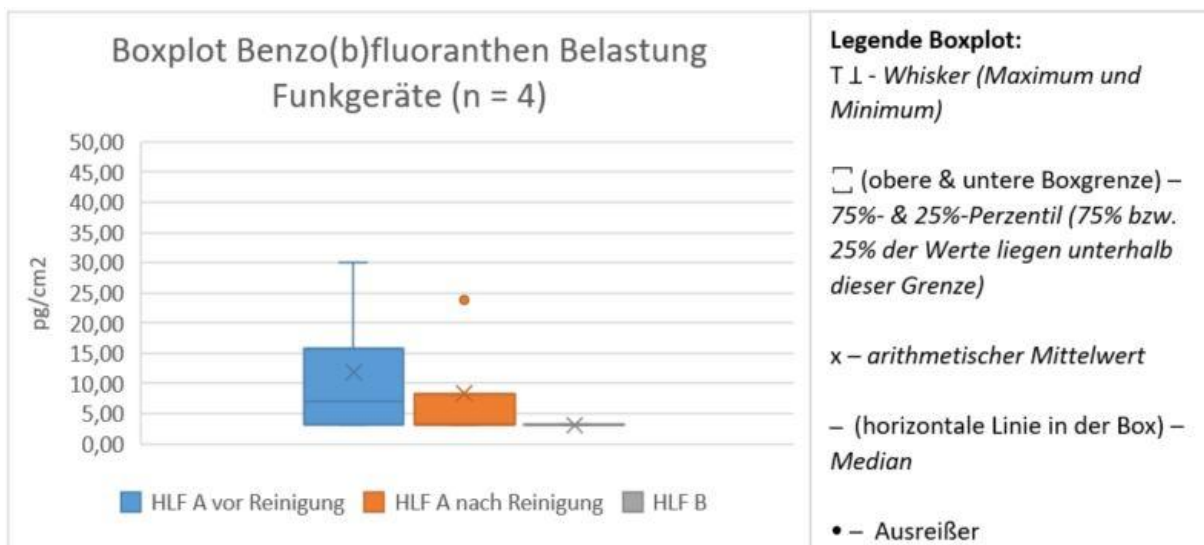


Abbildung 35 – Boxplot der Belastung der Fastrmikrofone der Handfunkgeräte mit Benzo(b)fluoranthen im Probenahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

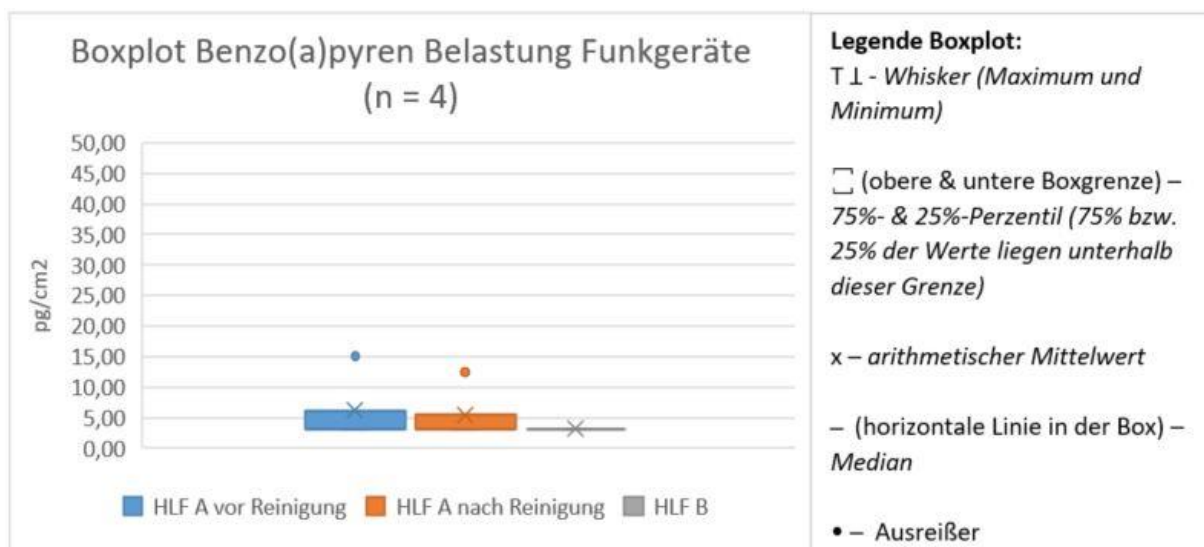


Abbildung 36 – Boxplot der Belastung der Fastrmikrofone der Handfunkgeräte mit Benzo(a)pyren im Probenahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

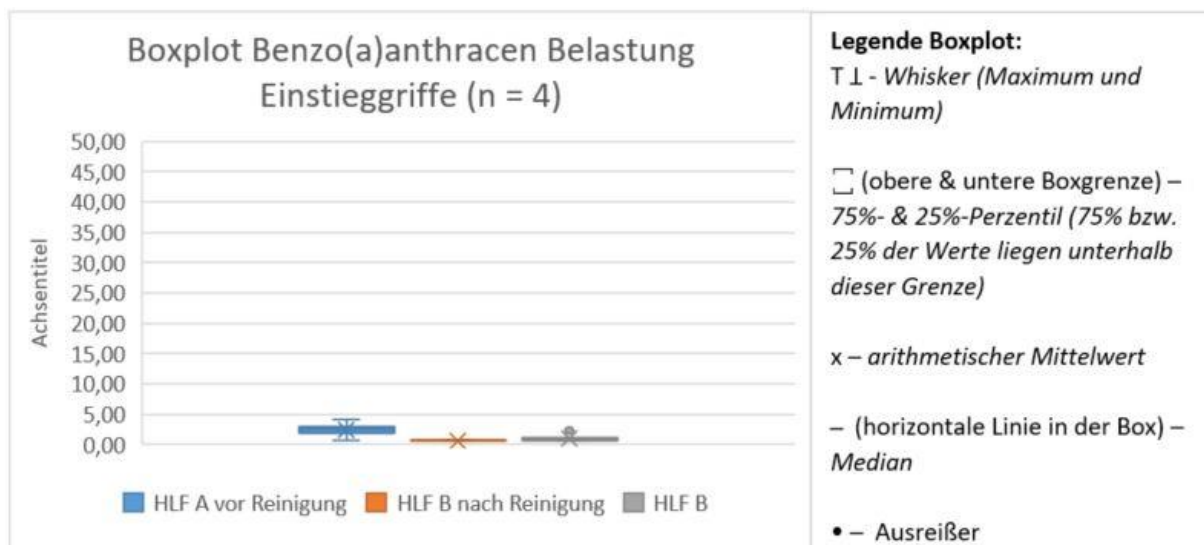


Abbildung 37 – Boxplot der Belastung der Einstieggriffe der Löschfahrzeuge mit Benzo(a)anthracen im Probennahmezeitraum von vier Wochen (n = 4)

Anhand der Abbildungen 29 bis 37 ist festzuhalten, dass in den Proben PAK vorhanden sind, die eine mutagene oder kanzerogene Aktivität, teilweise sogar sehr starke Aktivität (siehe Benzo(a)pyren), aufweisen. Benzo(a)pyren ist hier als ausschlaggebender Indikator für das Krebsrisiko zu nennen. Das ist sowohl im HLF A als auch in HLF B der Fall. Das bedeutet wiederum, dass ein potentiell höheres Krebsrisiko für Feuerwehrleute vorhanden sein kann, da ein Kontakt mit kanzerogenen aktiven PAK, wie Benzo(a)pyren, möglich ist. Es liegt also eine Gesundheitsgefährdung für Feuerwehrleute durch PAK an Ausrüstungsgegenständen vor. Um das davon ausgehende Risiko zu quantifizieren, müsste die Menge bzw. Konzentration der gefundenen PAK, deren Wirkung und Exposition der Feuerwehrleute untersucht werden. Zu beachten bei der Einschätzung des Risikos ist auch, dass die Feuerwehrleute mehreren belasteten Gegenständen (Handlampe, Funkgerät, Brechwerkzeug und weitere) sowie der eigenen belasteten Schutzkleidung und möglicherweise auch der durch PAK belasteten Umgebungsluft, an der Einsatzstelle bzw. in der Mannschaftskabine der Feuerwehrfahrzeuge, ausgesetzt sind. Eine Abschätzung des Risikos durch dermale und inhalative Exposition gegenüber den PAK wird in Kapitel 6.11 diskutiert.

Gut zu erkennen ist in der Abbildung 29 (Handlampen), dass die Menge von Benzo(a)anthracen bei HLF A stark variiert (3,49 bis 18,59  $\text{pg}/\text{cm}^2$  und Ausreißer bei 32,41  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ) und sie sich bei HLF B nur in einem Schwankungsbereich von etwa 10  $\text{pg}/\text{cm}^2$  bewegt. Es ist gut zu erkennen, dass die Menge nach der Reinigung des HLF A geringer ist als vor der Reinigung (im Mittel ca. 52,5 % weniger). In Abbildung 37 (Einstieggriffe) ist zu sehen, dass Benzo(a)anthracen kaum noch vorhanden ist (Mittelwert: 2,43  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ), aber auch hier durch die Reinigung eine Reduktion der Menge unterhalb der Bestimmungsgrenze erreicht werden konnte. An den Funkgeräten hat sich nur in Woche zwei der Probennahme bei HLF A eine Menge von über 40  $\text{pg}/\text{cm}^2$  befunden, die durch die Reinigung unterhalb der Bestimmungsgrenze gesenkt werden konnte, wie in Tabelle 8 zu sehen ist. Für Benzo(a)anthracen kann man somit sagen, dass es hauptsächlich an der Handlampe zu finden

ist. Funkgeräte und Einstieggriffe sind kaum damit kontaminiert. Die Reinigung brachte hierbei eine gute Reduzierung der Kontamination mit sich.

Bei Chrysen in Abbildung 30 (Handlampen) ist zu sehen, dass es bei HLF A und B vorhanden ist, ebenfalls mit einer deutlich geringeren Schwankungsbreite bei HLF B (7,63 bis 11,91  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , Ausreißer bei 17,16  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ) als bei HLF A (1,59 bis 34,31  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ). In Abbildung 34 (Funkgeräte) hingegen ist Chrysen nur bei HLF A (Mittelwert: 11,57  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ) anzutreffen, bei HLF B in keiner der Proben oberhalb der Bestimmungsgrenze. Bei den Einstieggriffen ist Chrysen weder bei HLF A noch B vorhanden. Auch hier kann man sehen, dass die Reinigung bei den Handlampen eine Reduzierung der vorhandenen Menge um 8,81  $\text{pg}/\text{cm}^2$ , bei Betrachtung des Mittelwertes, bringt. Für Chrysen kann daher festgehalten werden, dass es hauptsächlich an den Handlampen zu finden ist und die Reinigung hier auch einen Effekt verzeichnet.

In Abbildung 31 (Handlampen) ist ein ähnliches Muster wie zuvor beschrieben erkennbar. Benzo(b)fluoranthen ist bei beiden HLF nachweisbar und der Schwankungsbereich bei HLF B mit 3,82  $\text{pg}/\text{cm}^2$  (Schwankungsbreite mit Ausreißer: 7,63  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ) als sehr gering anzusehen (Vergleich HLF A Schwankungsbreite mit Ausreißer: 43,53  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ). Bei HLF B sind an den Funkgeräten und den Einstieggriffen keine Mengen von Benzo(b)fluoranthen oberhalb der Bestimmungsgrenze nachzuweisen. Die Reinigung zeigt auch hier bei HLF A, sowohl bei den Handlampen, als auch bei den Funkgeräten, eine Reduzierung der vorhandenen Menge im Mittel um 51,5 % (Handlampen) und 29,7 % (Funkgeräte). So ist für Benzo(b)fluoranthen festzuhalten, dass es auch hauptsächlich an den Handlampen zu finden ist und nur bei HLF A auch größere Mengen an den Funkgeräten (s. Abbildung 35) zu finden sind. Eine Reinigung zeigt auch hier eine reduzierende Wirkung der Menge der PAK.

Abbildung 32 zeigt Benzo(k)fluoranthen, welches bei den Handlampen nur in geringen Mengen vorhanden ist ( $< 8 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ). Bei den Funkgeräten und den Einstieggriffen konnten keine Mengen oberhalb der Bestimmungsgrenze von Benzo(k)fluoranthen nachgewiesen werden. Die Reinigung zeigt hier, dass die Menge, bei zwei vorhandenen Werten über der Bestimmungsgrenze, einmal unterhalb der Bestimmungsgrenze und einmal um die Hälfte (von 7,63 auf 3,24  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ) reduziert werden konnte. So ist auch hier festzustellen, dass sich Benzo(k)fluoranthen hauptsächlich an den Handlampen anlagert, oder diese besonders exponiert sind, aber die Reinigung ebenfalls eine Reduktion der vorhandenen Menge mit sich bringt.

Benzo(a)pyren ist im Vergleich zu den anderen bisher analysierten PAK in geringen Mengen vorhanden (1,59 bis 14,62  $\text{pg}/\text{cm}^2$ ). Nur Benzo(k)fluoranthen ist in noch geringeren Mengen vorhanden ( $< 8 \text{ pg}/\text{cm}^2$ ). Interessant zu beobachten ist in Abbildung 33 (Handlampen), dass im HLF A vor der Reinigung nur in Woche zwei und Woche vier Benzo(a)pyren nachgewiesen werden konnte, wovon der höchste Wert bei 14,62  $\text{pg}/\text{cm}^2$  lag. Der höchste Wert bei HLF B lag bei 9,53  $\text{pg}/\text{cm}^2$  in der vierten Woche. Der höchste Wert liegt zwar höher bei HLF A, dafür wurde bei HLF B in jeder der vier Woche Benzo(a)pyren oberhalb der Bestimmungsgrenze

gefunden. Die Reinigung bei HLF A reduziert dabei die Menge des Benzo(a)pyrens in Woche zwei um nahezu die Hälfte (von 14,62 auf 7,63 pg/cm<sup>2</sup>) und in Woche vier von 5,72 pg/cm<sup>2</sup> auf unter die Bestimmungsgrenze. Dieses Ergebnis unterstützt die Annahme, dass eine Reinigung nach einem intensiven Brandereignis bzw. auch die regelmäßige Reinigung das durchschnittliche Niveau der PAK, in diesem Fall Benzo(a)pyren, niedrig hält, bzw. sogar unter die Bestimmungsgrenze reduzieren kann. Die Belastung an den Funkgeräten (s. Abbildung 36) war in Woche eins, drei und vier unterhalb der Bestimmungsgrenze. Nur in Woche zwei, wo es zu dem Brandereignis kam, konnten Mengen von Benzo(a)pyren festgestellt werden. Für Benzo(a)pyren lässt sich so zusammenfassend sagen, dass eine Anlagerung hauptsächlich an den Handlampen stattfindet und Funkgeräte kaum und die Einstieggriffe nicht nachweisbar belastet sind. Ebenfalls lässt sich feststellen, dass die Reinigung die Menge von Benzo(a)pyren reduziert.

Dibenzo(a,h)anthracen kommt in keiner Probe oberhalb der Bestimmungsgrenze vor, bis auf in Woche zwei bei HLF A vor der Reinigung, also in der Woche, wo das Brandereignis stattgefunden hat. Somit ist aber auch hier die Reinigung in Woche zwei als erfolgreich anzusehen, da Dibenzo(a,h)anthracen nach der Reinigung nicht mehr nachgewiesen werden konnte.

Zusammenfassend für die sechs analysierten PAK kann gesagt werden, dass diese sich in den größten Mengen an den Handlampen anlagern. Das kann, wie oben beschrieben, an den Oberflächen oder der Trageweise der Handlampen und der Funkgeräte liegen bzw. einer stärkeren Exposition der Handlampen. Des Weiteren lässt sich bei allen Probenträgern feststellen, dass die Reinigung eine Reduktion der PAK mit sich bringt, teilweise im Mittel um mehr als 50 %, was bei diesen sechs PAK von besonderer Wichtigkeit ist, da diese eine schwache bis sehr starke Aktivität in Mutagenität und Kanzerogenität aufweisen. Das stärkt das Ergebnis, dass eine regelmäßige Reinigung bzw. mindestens eine ereignisbezogene Reinigung effektiv ist, um vorhandene PAK-Mengen, insbesondere von kanzerogenen PAK, zu reduzieren.

## 6.11 Diskussion der vier Thesen

I.: Die Ergebnisse zeigen, dass die erste These, dass Ausrüstungsgegenstände von Feuerwehrleuten bei einem Brandereignis mit Schadstoffen, insbesondere PAK, kontaminiert werden, durch die vorliegende Datenlage bestätigt werden kann. Im Vergleich zu den Blindproben befinden sich viele der 16-EPA PAK an den im Einsatz befindlichen Ausrüstungsgegenständen und den Einstieggriffen. In diesem Zuge kann auch festgehalten werden, dass die Handlampen mit den größten Mengen an PAK kontaminiert waren, obwohl sich Handlampen und Funkgeräte nicht weit voneinander entfernt befinden.

II.: Die zweite These besagt, dass die Schadstoffe, die während der Brandbekämpfung an die Ausrüstungsgegenstände gelangt sind, bis in die Fahrzeuge verschleppt werden. Diese These kann insofern bestätigt werden, dass die Handlampen und die Fahrzeuge nach einem Brandeinsatz in der Regel wieder in der Mannschaftskabine gebracht werden. Somit wird die

Kontamination mit den Ausrüstungsgegenständen in die Fahrzeuge gebracht. Die Verschleppung an die Kontaktflächen am Fahrzeug (z. B. Einstieggriffe) kann hier nur in Ansätzen bestätigt werden. An den Einstieggriffen sind eher geringe Mengen von PAK festgestellt worden (Mittelwert: 1,04 pg/cm<sup>2</sup>). Das zeigt, dass eine Verschleppung der PAK-Mengen nicht eins zu eins bis zu den Einstieggriffen stattfindet. Es kann aber auch daran liegen, dass die Einstieggriffe nicht regelmäßig durch die Feuerwehrleute genutzt werden. Um diese These zu prüfen, sind, in weiteren Studien und Proben innerhalb der Mannschaftskabine zu nehmen, beispielsweise von den Sitzplätzen, den Türgriffen oder anderen Kontaktflächen.

III.: Die Annahme der dritten These, dass das Reinigen der Ausrüstungsgegenstände eine Absenkung der Schadstoffbelastung zur Folge hat, kann durch die Ergebnisse der Analyse bestätigt werden. Die Reinigung führt insbesondere bei den kanzerogen aktiven PAK zu einer Verringerung der Menge bei den Handlampen zwischen 44,29 % und 53,59 %, bei den Faustmikrofonen zwischen 10,78 % und 74,66 % und bei den Einstieggriffen bei Benzo(a)anthracen um 73,66 %. Größtenteils ist die Menge der einzelnen PAK nach der Reinigung geringer als vor der Reinigung. Bei den Funkgeräten tritt nicht immer eine Verringerung der PAK auf, was möglicherweise durch die unterschiedlichen Oberflächen (Tasten, Sprechmembran, Knickschutz und Befestigungsclip) zu begründen ist. Diese sind durch die unterschiedliche Struktur schwierig abzuwischen und möglicherweise verfangen sich auch PAK an der Oberfläche und können nicht entfernt werden. Bei den Handlampen, mit durchweg glatten Oberflächen, zeigt das Reinigen eine effektive Wirkung (im Mittel Reduzierung um 48,98 %).

IV.: Für die Bestätigung der vierten These, dass die Schadstoffbelastung abhängig von der Intensität der Brandereignisse ist und sich im zeitlichen Verlauf ändert, spricht das Brandereignis vor Woche zwei der Probennahme, wobei es sich hier um eine einmalige Beobachtung im Rahmen der zeitlich limitierten Bachelorarbeit handelt. In Woche zwei ist bei nahezu allen PAK des HLF A ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen, der auf dieses Brandereignis zurückzuführen ist (Mittelwert HLF A Woche zwei, ohne Naphtalin: 25,81 pg/cm<sup>2</sup>, im Vergleich Mittelwert HLF A Wochen eins, drei und vier, ohne Naphtalin: 5,91 pg/cm<sup>2</sup>). Somit kann die PAK-Menge nach einem Brandereignis, zumindest zeitweilig, sehr deutlich ansteigen. Auch die Änderung im zeitlichen Verlauf wird bei so einem Brandeinsatz sehr deutlich. Es müssen weitere Proben genommen werden, um den zeitlichen Verlauf über einen längeren Zeitraum mit mehreren Brandereignissen zu untersuchen. Bei HLF B zum Beispiel sind die PAK-Mengen über die gesamten vier Wochen sehr konstant geblieben (Mittelwert HLF B Woche eins, ohne Naphtalin: 5,97 pg/cm<sup>2</sup>, Woche zwei: 5,18 pg/cm<sup>2</sup>, Woche drei: 6,33 pg/cm<sup>2</sup>, Woche vier: 6,95 pg/cm<sup>2</sup>). Eine Aufsummierung der PAK-Mengen konnte über den Probennahmezeitraum von vier Wochen nicht festgestellt werden, weder bei HLF A noch B. Trotz der stark erhöhten Werte in der zweiten Woche bei HLF A, pendelten die Werte sich wieder auf einem durchschnittlichen Niveau ein und hielten sich nicht auf dem vorherigen hohen Niveau. Hier wäre interessant zu klären, ob auch ohne das Reinigen des Fahrzeuges nach einer Woche wieder das durchschnittliche Niveau erreicht wird, oder es hier einen längeren Zeitraum in Anspruch nimmt. Die Reinigung hat die PAK-Mengen zwar nicht gleich wieder auf das

durchschnittliche Niveau gebracht, aber schon zu einer schnellen Reduzierung der PAK-Mengen geführt, in deren Verlauf die PAK-Mengen nach einer Woche wieder bis auf das durchschnittliche Niveau abgesunken waren. Auch eine Studie, die über einen langen Zeitraum angelegt ist, in der mehrere Brandereignisse stattfinden, könnte noch mehr Aufschlüsse darüber geben, ob auf lange Sicht eine fortwährende Akkumulation der PAK-Mengen stattfindet, wenn nicht regelmäßig gereinigt wird. Auch das gerade beschriebene Einpendeln auf das erläuterte durchschnittliche Niveau fand bei dem HLF A nach der Reinigung wieder statt. Das wiederum bedeutet, dass die Reinigung eines Fahrzeuges nur für einen recht kurzen Zeitraum ( $< 1$  Woche) anhält. Somit muss das Fahrzeug mindestens in einem 1-Wochen-Rhythmus gereinigt werden, um die Grundbelastung in jedem Fall zu halten, bzw. zu unterschreiten. Da die Reinigung nach einem Brandereignis auch als effektiv bewertet werden kann, sollte in der Praxis nach einem intensiven Brandereignis in jedem Fall eine Reinigung des Fahrzeuges und insbesondere der Ausrüstungsgegenstände erfolgen. Fraglich ist auch jetzt noch, ob das Reinigen der Schutzkleidung der Feuerwehrleute ähnlich effektiv ist. In der Studie von Fent et al. wurde untersucht, welche Arten von Dekontamination einen Erfolg bringen.

Fent et al. haben dafür die Kontamination von Feuerwehrleuten und deren persönlicher Schutzkleidung durch Schadstoffe von einem Brandereignis und die Dekontamination am Einsatzort untersucht. 31 Feuerwehrleute haben an der Studie teilgenommen. Es wurden Wischproben vor dem Brand, nach dem Brand, nach der Dekontamination der PSA und nach der Reinigung der Haut gesammelt, um das Kontaminationslevel und den Erfolg der Dekontaminations- und Reinigungsmaßnahmen beurteilen zu können. Auch in dieser Studie konnte ein Ansteigen des Kontaminationslevels mit PAK der PSA mit ansteigender Anzahl an Brandbekämpfungen beobachtet werden. Hier wurde auch die Kontamination der Helme beschrieben, die einem ähnlichen Trend wie die restliche PSA folgte. Besonders die Helme der im Inneren des Brandobjektes Eingesetzten, in Deutschland vergleichbar mit dem Angriffstrupp, wiesen eine stärkere Kontamination als Helme von nicht im Innenangriff tätigen Feuerwehrleuten auf. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Hände nach dem Brand stärker belastet waren als der Halsbereich der Feuerwehrleute. Nur bei denen, die im Außenbereich Lüftungsöffnungen geschaffen haben, waren die Belastungen im Halsbereich höher als an den Händen. Laut den Autoren ist das Ergebnis einerseits auf die Art sich auf dem Boden krabbelnd fortzubewegen (Innenangriff) und andererseits auf die nicht konsequent genutzten Flammenschutzhauben der im Außenbereich arbeitenden Personen zurückzuführen. Von den durchgeführten Dekontaminationsmethoden an der PSA war die Dekontamination mit Wasser und Seife am effektivsten. Dennoch konnte auch nur mit trockenem Abbürsten eine Reduktion der PAK bewirkt werden, Vorteil hierbei ist, dass die Schutzkleidung weiterhin nutzbar bleibt, da sie nicht trocknen muss. Die auf Druckluft basierte Dekontamination brachte kaum eine Reduktion der PAK mit sich (9). Es stellt sich dar, wie wichtig es ist, die komplette Schutzausrüstung ordnungsgemäß, auch im Außenangriff, zu tragen, da die Kontamination mit Schadstoffen dadurch eingeschränkt werden kann. Außerdem erweist sich die Dekontamination der Schutzkleidung an der Brandstelle als effektives Mittel, um die Schadstoffbelastung zu senken. In Kombination mit der Dekontamination der Ausrüstungsgegenstände am Ort der Brandstelle können diese



Reinigungsmaßnahmen gesamtheitlich dazu beitragen, die Exposition von Feuerwehrleuten durch Schadstoffe deutlich zu verringern und so das Krebsrisiko zu senken.

Da die Effektivität von Dekontaminationsmethoden an der Einsatzstelle, sowohl der Schutzkleidung, als auch der Ausrüstungsgegenstände und Teilen der Fahrzeuginnenräume nachgewiesen wurde, stellt sich die Frage, warum eine solche Prozedur oftmals nicht durchgeführt wird. Die folgende Studie befasst sich unter anderem mit diesem Thema und versucht, Ansätze für diese Problematik zu finden.

In der Studie „Firefighter attitudes, norms, beliefs, barriers and behavior toward post-fire decontamination process in era of increased cancer risk“ konnte ausgemacht werden, dass Feuerwehrleute grundsätzlich positiv gegenüber dem Dekontaminationsprozess und Normen eingestellt sind. Dennoch wurde meistens als einzige Dekontaminationsmaßnahme das Duschen nach einem Einsatz durchgeführt. Die Reinigung an der Einsatzstelle wurde eher selten vorgenommen, als Grund dafür wurde oftmals die Dauer der Maßnahmen und die im Anschluss oft nasse und somit nicht mehr zu nutzende PSA angeführt (47). Die in der Studie angeführten Gründe müssen bei der Erarbeitung von Prozeduren zur Dekontamination beachtet werden, damit die geplanten Maßnahmen auch umgesetzt werden und somit das Risiko für Erkrankungen gesenkt werden kann.

Das Krebsrisiko durch die dermale Exposition von Feuerwehrleuten durch PAK ist schwer zu bestimmen. Um die PAK-Menge, die in der Analyse dieser Arbeit gefunden wurde einschätzen zu können, werde ich die Studie „Surface contamination with PASH, PAH an PCDD/F after fire accidents in private residences“ von Wobst et al. heranziehen. In dieser Studie wurden unter anderem die auf einem Quadratmeter vorhandenen PAK-Mengen analysiert. Die Analyse wurde für die 16 EPA-PAK durchgeführt. Dafür wurden Proben bei zwei realen Wohnungsbränden genommen, bei denen Temperaturen von bis zu 1000 °C erreicht wurden. Es wurden dabei summierte PAK-Konzentrationen zwischen 34,3 und 58.800 µg/m<sup>2</sup> festgestellt. Das entspricht 343 und 5,88 x 10<sup>6</sup> pg/cm<sup>2</sup> (48). Der höchste Wert bei dieser Arbeit lag bei einer summierten PAK-Konzentration von 4351,37 pg/cm<sup>2</sup>. Bei dieser Probe handelt es sich um ein Faustmikrofon und die Probennahme fand in Woche zwei statt, also nachdem das intensive Brandereignis war. Es kann festgehalten werden, dass die größte in dieser Arbeit gefundene PAK-Menge um 4008,37 pg/cm<sup>2</sup> höher ist, als die niedrigste PAK-Konzentration in der Studie von Wobst et al. Also sind die in dieser Arbeit gefundenen PAK Mengen im Vergleich zu einem Wohnungsbrand hoch. In der Studie wurde auch festgestellt, dass es lokal teilweise signifikante Unterschiede in den PAK-Konzentrationen gab. Die Autoren benennen diese Gegebenheit als „Gefahr der Hot Spots“ (48). Auch das ist in die Betrachtung miteinzubeziehen. Wenn Feuerwehrleute mit ihrer Ausrüstung oder mit den Handschuhen in Kontakt mit einem „Hot Spot“ kommen würde vermutlich auch die PAK-Konzentration an der Ausrüstung und den Handschuhen ansteigen. Da diese nach dem Einsatz oftmals mit bloßen Händen angefasst werden, ist dann auch das Risiko für eine Kontaminationsverschleppung bzw. eine Absorption oder eine sonstige Inkorporation höher. Um die Auswirkungen der Schadstoffe nachvollziehen zu können, werden nachfolgend zwei Studien gezeigt.

In der Studie „Mortality of Urban Firefighters in Alberta, 1927-1987“ von Guidotti et al. wurden die Todesursachen der in dem Zeitraum von 1927 bis 1987 bei den Feuerwehren in Edmonton oder Calgary (Kanada) beschäftigten Feuerwehrleute untersucht. Außerdem wurde versucht herauszufinden, inwieweit die berufliche Belastung mit Schadstoffen von der Brandstelle damit in Verbindung gebracht werden kann. Bei der Studie wurden 370 Tode von der besagten Kohorte untersucht. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass es keinen kausalen Zusammenhang zwischen der Tätigkeit als Feuerwehrmann und der Sterblichkeit durch Herzversagen bzw. chronischen Lungenerkrankungen gibt. Dennoch scheint es ein erhöhtes Risiko für Lungenkrebs zu geben, wenn man 35 Jahre oder mehr als Feuerwehrangehöriger tätig war. Krebserkrankungen der Niere und des Harnleiters können ebenfalls mit der beruflichen Exposition durch Schadstoffe in Verbindung gebracht werden. Die Funde von anderen Studien, die eine Erhöhung von Blasen-, Darm- oder Rektumkarzinomen beschreiben, können nur begrenzt unterstützt werden (13). In der Meta-Analyse von LeMasters et al. wurden 32 Studien untersucht. Diese Analyse ergab, dass das Multiple Myelom, das Non-Hodgkin-Lymphom und Prostata Krebs als wahrscheinliches Risiko für Feuerwehrleute, basierend auf den von den Autoren angesetzten Kriterien, einzustufen ist. Sie sprechen auch die Empfehlung aus, Hodenkrebs auch als wahrscheinliche Krebsart für Feuerwehrleute zu werten, da mehrere Studien dies übereinstimmend dargelegt haben. Somit wird vermutet, dass diese Bereiche besonders von den Schadstoffen beeinträchtigt werden müssen (8). Besonders die zweite Studie von LeMasters et al. legt nahe, dass Krebs bei Feuerwehrleuten in erhöhtem Maße, insbesondere bei längerer Tätigkeit (> 35 Jahre in Bezug auf Lungenkrebs) auftritt, teilweise handelt es sich um bestimmte Krebsarten, die bei Feuerwehrleuten besonders häufig auftreten.

Die Feuerwehrleute fassen die belasteten Gegenstände möglicherweise mehrfach während eines Einsatzes bzw. während einer Schicht an. Selbst wenn sich die Belastung, wie in den Ergebnissen dargestellt, im zweistelligen  $\text{pg}/\text{cm}^2$  Bereich bewegt, ist die Summe der Kontakte und auch die größere Kontaktfläche, die zur Kontamination führt, zu beachten. Außerdem kommt hinzu, dass die Feuerwehrleute zusätzlich zu dem dermalen Kontakt mit den PAK, auch noch anderen toxischen Substanzen (s. Tabelle 1) ausgesetzt sind, oder PAK über die Atemwege an einer Brandstelle oder von der kontaminierten Schutzkleidung aufnehmen. Die Kombination dieser Expositionswege spricht auch insgesamt für ein hohes Risiko, dem Feuerwehrleute aufgrund ihrer Tätigkeit ausgesetzt sind. Abhängig ist dieses Risiko ebenfalls, wie im vorherigen Kapitel herausgearbeitet, von der Zahl der Brandeinsätze, die ein Feuerwehrmitglied absolviert. Mit einer höheren Zahl an Brandeinsätzen steigt vermutlich auch das Risiko einer Erkrankung, da diese Feuerwehrleute mehr Karzinogenen ausgesetzt sind, als welche mit weniger Brandeinsätzen.

Wichtig ist auch zu erwähnen, dass es Studien gibt, die die Ergebnisse einer erhöhten PAK-Menge bei Brandeinsätzen nicht teilen. Beispielsweise in der Studie von Caux et al. Hier wurden 20 Stunden nach einer Brandbekämpfung Urinproben von den Versuchsteilnehmern genommen. Allerdings konnte hier keine übermäßige Belastung von Feuerwehrleuten durch PAK, im Verhältnis zu den Grenzwerten und den Werten anderer Berufsgruppen, die

nachgewiesener Maßen mit PAK in Kontakt kommen, erhoben werden. Die Autoren führen ein geringes Vorhandensein von den untersuchten Schadstoffen an der Brandstelle oder die Effizienz der getragenen persönlichen Schutzausrüstung als mögliche Begründung für die geringen Belastungswerte an (10).

## 7. Maßnahmen/Konzepte zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppung

Wie bereits dargestellt, ist eine Inkorporation während und nach dem Einsatz zu vermeiden. Diese kann durch Inhalation, Ingestion und Absorption erfolgen. Die Nutzung von umluftunabhängigen Atemschutzgeräten zur Vermeidung der Inhalation von Brandrauchbestandteilen ist unabdingbar. Neben dem Atemschutz sollte durch die Einsatzkräfte, die nicht an direkten Brandbekämpfungsmaßnahmen beteiligt sind, ein ausreichender Abstand zur Brandstelle eingehalten werden. Dabei ist auch die Windrichtung in der Aufstellung zu beachten. Wenn die Inhalation ausgeschlossen werden kann, sind noch die Ablagerungen von Schadstoffen auf der Haut und an den Ausrüstungsgegenständen problematisch, sowie die damit verbundene mögliche Absorption. Um eine Ingestion ausschließen zu können, müssen Kontaminationsverschleppungen unbedingt vermieden werden, damit keine Schadstoffe beispielsweise über die Nahrung aufgenommen werden können. Nachfolgend werden einige Maßnahmen und Modelle erläutert, die von unterschiedlichsten Feuerwehren durchgeführt werden, um eine Weiterverbreitung der Schadstoffe und die Inkorporation, unabhängig des Weges, nach dem Einsatz zu vermeiden. Wichtig ist auch hier zu erwähnen, dass kein Konzept für jeden Anwender geeignet ist. Die Konzepte müssen immer auf die Anwendbarkeit vor Ort überprüft werden und möglicherweise an die örtlichen Verhältnisse angepasst werden.

Zu Beginn wird die Vor-Ort-Dekontamination (Dekon) beschrieben. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Maßnahmen, die noch an der Einsatzstelle erfolgen sollen, um eine Verschleppung der Kontamination zu vermeiden. Zentraler Angelpunkt dieser Methode ist eine kleine Dekontaminationsstelle, an der die Dekontaminationsmaßnahmen hauptsächlich stattfinden. Der Maschinist des eingesetzten Fahrzeuges markiert diese Dekonstelle mit einem Verkehrsleitkegel, damit für alle Einsatzkräfte ersichtlich ist, wo die Dekontaminationsmaßnahmen stattfinden sollen. Bei der Aufstellung der Dekonstelle sind Windrichtung und ausreichender Abstand zur Einsatzstelle zu beachten, um sowohl die zu dekontaminierenden, als auch andere an der Einsatzstelle tätigen Personen zu schützen. Zu der Dekonstelle legt der Maschinist dann eine kleine Schlauchleitung bzw. je nach Temperatur eine Bürste bereit, um die ersten groben Dekonmaßnahmen durchführen zu können. Bei höheren Temperaturen kann die Schlauchleitung genutzt werden und bei niedrigeren Temperaturen kann die Bürste genutzt werden, weil das Wasser gefrieren kann. Sobald die Dekonstelle fertig eingerichtet ist, kann der Maschinist dem Einheitsführer die Einsatzbereitschaft der Dekonstelle melden, damit dieser und der eingesetzte Angriffstrupp Bescheid wissen. Wenn der eingesetzte Angriffstrupp die Brandstelle verlässt, begibt er sich direkt zur Dekonstelle, um eine Kontaminationsverschleppung zu Fahrzeug oder in andere Bereiche zu vermeiden. Im Bereich der Dekonstelle sollen sich möglichst keine weiteren Personen als der kontaminierte Trupp aufhalten, damit auch hier eine Kontamination von anderen Einsatzkräften vermieden wird. Der Atemschutztrupp reinigt sich dann gegenseitig mit der bereitgestellten Schlauchleitung oder der Bürste von Helm bis Stiefel. Bei der

Reinigung soll möglichst kein Wasser durch offene Stellen an die Haut gelangen. Die zu reinigende Person stellt sich deshalb mit ausgestreckten Armen auf, um die Maßnahmen zu erleichtern und den Kontakt mit Wasser über offene Stellen (z. B. Handgelenke, Hals oder Helm) zu vermeiden. Diese Maßnahmen führt der Trupp gegenseitig an sich durch. Nach dieser Grobreinigung legt der Atemschutztrupp seine Ausrüstung und die Schutzkleidung vorsichtig und mit möglichst geringem Hautkontakt ab. Anschließend wischt der Trupp sich mit Hilfe von Reinigungstüchern die Hände und Arme, das Gesicht, den Hals, hinter den Ohren und die Augenlider ab. Dabei ist das Reinigungstuch zu wechseln, sobald eine deutlich sichtbare Verschmutzung in dem Tuch bemerkt wird. Damit sollen erste kanzerogene Stoffe von wichtigen Hautpartien entfernt werden, von denen primär eine Kontaminationsverschleppung und Weiter- bzw. Neukontamination ausgehen kann. Daraufhin kann Wechselkleidung angezogen werden und es wird die gebrauchte Schutzkleidung, inklusive Stiefeln, luftdicht verpackt. Bei dem Verpacken der Schutzkleidung ist ebenfalls auf Haut- und Atemschutz zu achten. Das kann in Form von Einmalhandschuhen und Partikelfiltern erfolgen. Durch das luftdichte Verpacken kann die Schutzkleidung auf der Rückfahrt mit in die Mannschaftskabine genommen werden und bei akutem Bedarf, zum Beispiel im Falle eines Folgeeinsatzes, ausgepackt und wieder angezogen werden. Die Ausrüstung, wie Helm, Atemschutzgerät, Lampen, Funkgeräte, Brechwerkzeug und weiteres Material, wird anschließend an der Dekonstelle nochmal gründlich, zum Beispiel mit Wasser, Seife und Bürste, gereinigt. Hierbei ist ebenfalls wieder auf einen ausreichenden Haut- und Atemschutz zu achten. Zusätzlich zu diesen Dekonmaßnahmen an der Einsatzstelle soll innerhalb von einer Stunde nach dem Einsatz geduscht werden, um die Haut zu reinigen und so eine mögliche Absorption zu vermeiden (49,50). Für dieses Konzept werden eine Bürste bzw. eine kleine Schlauchleitung, Reinigungstücher, Wechselkleidung und Duschen an den Wachen benötigt.

Im Folgenden werden nacheinander zwei Modelle beschrieben, die sich nicht nur auf die Reinigung am Einsatzort beziehen, sondern auch auf das Verhalten von allen Einsatzkräften und die Ausstattung von Feuerwehrfahrzeugen und –wachen. Das sogenannte Skellefteå Modell stammt aus Schweden und wurde dort zum Schutz der Feuerwehrleute vor beruflichen Gesundheitsgefahren über das Gemeinschaftsprojekt Healthy Firefighters entwickelt. Das zweite Konzept stammt aus den USA und heißt Concord Modell und wurde von der North Carolina Firefighter Cancer Alliance entwickelt und dient ebenfalls dazu, die Feuerwehrleute vor Karzinogenen zu schützen (51,52).

Das Skellefteå Modell basiert auf dem Grundsatz, dass die Fahrzeugkabine von Feuerwehrfahrzeugen sauber und frei von kontaminiertem Material sein muss. Es wird nahegelegt, dass schon bei Ankunft am Einsatzort die Fahrzeugaufstellung beachtet werden muss. Dabei sind insbesondere die Rauchentwicklung sowie die Windrichtung zu beurteilen. Ein weiteres Mittel, um den Eintrag von Schadstoffen in die Fahrzeuge zu verhindern, ist das Geschlossenhalten von Türen, Fenstern und Gerätefächern der Fahrzeuge, solange sie nicht gebraucht werden. Einheitsführer sollen eine korrekte Schutzausrüstung tragen, also einen ausreichenden Haut- und Atemschutz. Dazu ist die Schutzkleidung dicht zu schließen und zum

Beispiel ein Partikelfilter zu tragen. Das ist besonders wichtig, da, wie in Kapitel 4.1.2 dargestellt, der Einheitsführer bei seinen Erkundungsmaßnahmen und bei der Nachkontrolle der Einsatzstelle Schadstoffen ausgesetzt sein kann. Für die vorgehenden Trupps, unabhängig ob im Außenbereich oder im Inneren eines Gebäudes und unabhängig von der Stärke der Rauchentwicklung, ist die Schutzkleidung dicht geschlossen, inklusive Handschuhe und Atemschutz, zu tragen. Auch unterstützende Funktionen sollen Atemschutz, zum Beispiel Partikelfilter, und dichte Kleidung, inklusive Handschuhe, tragen. Unmittelbar nach dem Einsatz ist durch den vorgehenden Trupp neue, saubere Kleidung anzuziehen. Die gebrauchte Schutzkleidung soll unter Atemschutz (mindestens Partikelfilter) und mit Handschuhen ausgezogen werden. Anschließend wird die ausgezogene Kleidung luftdicht verpackt. So kann diese mit in die Mannschaftskabine genommen werden und bei akutem Bedarf wiederverwendet werden. Bei Rückkehr zur Wache ist die verschmutzte Kleidung dann separat von nicht kontaminierten Sachen unter Atem- und Hautschutz, bestenfalls in einem Raum mit Unterdrucklüftung, um ein Austreten von Ausgasungen zu vermeiden, mit Hilfe einer Waschmaschine zu reinigen. Die Reinigung an der Wache ist alternativ durch eine externe Wäscherei zu ersetzen. Der eingesetzte Trupp soll dann auf der Wache duschen, um die Schadstoffe von der Haut zu entfernen (53,54). Für dieses Modell werden luftdichte Säcke, Wechselkleidung, eine Wäscherei (intern oder extern) und Duschen in den Wachen benötigt.

Das Concord Modell ist sehr umfangreich. Auch hier ist die Basis des Konzeptes, dass die komplette Ausrüstung und die Mannschaftskabine der Fahrzeuge sauber und frei von Schadstoffen von vorherigen Brandereignissen sein sollen. Dabei soll ebenfalls die Fahrzeug- und Geräteaufstellung, über die Beurteilung von Rauchentwicklung und Windrichtung, beachtet werden. Einsatzleitung, Befehlsstelle, Rehabilitations- und Versorgungsbereiche, sowie medizinisches Monitoring sollen außerhalb der Reichweite von Rauchgasen und anderen Kontaminationsmöglichkeiten aufgestellt werden. Türen, Fenster und Gerätefächer der Fahrzeuge sind zur Vermeidung von Raucheintrag geschlossen zu halten. Die Einheitsführer bei der Erkundung und alle anderen Personen im Bereich der Einsatzstelle sollen Atemschutz und dichte Kleidung tragen. In der Nähe von Feuer und Rauch soll eine dichte Schutzkleidung, inklusive Handschuhe und umluftunabhängiger Atemschutz getragen werden. Arbeiten im Außenbereich sollen mit der gleichen Sorgsamkeit wie im Innenangriff durchgeführt werden. Auch unterstützende Funktionen und Maschinisten, sowie Einheitsführer sollen Atemschutz, beispielsweise Filtermaske oder Partikelfilter, und dichte Schutzkleidung, inklusive Handschuhe, tragen. Partikelfilter sollen auch bei ungefährlicher Atmosphäre bereitgehalten werden, um sie bei plötzlich auftretender Rauchentwicklung bzw. drehendem Wind aufsetzen zu können. Auch bei Nachlöscharbeiten sind Atemschutz und dichte Schutzkleidung zu tragen. Ausrüstungsgegenstände wie Brechwerkzeuge sollen nach einem Brandeinsatz luftdicht separiert werden, bis eine ausführliche Reinigung möglich ist. Bevor Schutzkleidung und Atemschutz abgelegt werden, soll an der Einsatzstelle eine Grobreinigung mit einem kleinen Wasserschlauch durchgeführt werden und anschließend eine Feinreinigung mit Wasser und Seifenmittel, um die sichtbare Kontamination von der Schutzkleidung zu entfernen. Der unterstützende Feuerwehrangehörige trägt dabei Haut- und Atemschutz. Dabei sollen auch Ausrüstungsgegenstände, wie Atemschutzgeräte, mit Wasser



und Seife gereinigt werden. Anschließend wird die kontaminierte Kleidung in einem luftdichten Sack verpackt. Daneben soll die Haut mit Reinigungstüchern gesäubert werden. Die eingesetzten Trupps sollen danach Wechselkleidung, inklusive neuer Schuhe, anziehen, um eine Kontaminationsverschleppung zu vermeiden. Kontaminierte Ausrüstung, wie Schläuche, sollen gereinigt werden und die Fahrzeuginnenräume mit Reinigungstüchern gewischt werden. Die kontaminierte Kleidung, inklusive Handschuhe, Stiefel und Helme, sollen in die Wäsche gegeben werden, optimalerweise in einem Raum mit Unterdrucklüftung, um ein Austreten von Ausgasungen zu vermeiden. In regelmäßigen Abständen ist eine Feinreinigung der Helme durchzuführen, in der diese auseinander zu nehmen sind, um an alle Stellen zu gelangen. Innerhalb einer Stunde nach dem Brandereignis sollen die betroffenen Feuerwehrleute duschen, um die Schadstoffe von der Haut zu entfernen. Danach soll saubere Kleidung angezogen werden. (55). Zur Durchführung dieses Modells sind luftdicht verschließbare Säcke, Reinigungstücher für Personen und Fahrzeuginnenräume, Wechselkleidung, eine Wäscherei (intern oder extern) und Duschen in der Wache erforderlich.

Eine Möglichkeit, um die Kontaminationsverschleppung im Feuerwehrhaus selbst zu verhindern, ist die Schwarz-Weiß-Trennung. Die basiert darauf, dass es einen Bereich gibt, in dem sich verschmutzte Kleidung und Ausrüstung befindet, und einen Bereich, in dem sich nur saubere Sachen befinden. Die beiden Bereiche müssen baulich, zum Beispiel über Schleusensysteme, und auch farblich bzw. durch deutliche Hinweise voneinander abgetrennt werden. Somit ist schon beim Bau eines neuen Feuerwehrhauses und dem Umbau eines Bestandgebäudes darauf zu achten, diese Trennung zu gewährleisten. Auch private und dienstliche Kleidung muss voneinander getrennt sein. Schutzkleidung und Ausrüstung dürfen nicht mit nach Hause genommen und dort gewaschen werden, die Reinigung ist fachgerecht durchzuführen (56). Um dieses Konzept umzusetzen, sind oftmals umfangreiche bauliche Veränderungen notwendig. Somit benötigt dieses Konzept einen sehr großen und kostspieligen Aufwand, um es umzusetzen. Bei Neubauten sollte dieses Konzept von vornherein eingeplant werden.

Die einzelnen Konzepte zeigen, dass es unterschiedliche Wege gibt, mit der Kontamination bei Bränden umzugehen. Bei dem Umfang der einzelnen Konzepte ist zu beachten, dass diese, gerade für Freiwillige Feuerwehren, die in Deutschland den größten Teil der Feuerwehrleute stellen, zu groß ist, um sie sinnvoll und effektiv umzusetzen. Oftmals fehlt es dabei einfach an Ausstattung oder an Zeit, da die freiwilligen Feuerwehrleute beispielsweise wieder an ihre regulären Arbeitsplätze müssen, um die Konzepte in vollem Umfang umsetzen zu können. Die oben beschriebene Vor-Ort-Dekontamination scheint eine Möglichkeit zu sein, eine erfolgreiche Einsatzstellenhygiene, auch bei geringer Ausstattung und Zeit, durchzuführen. Umfangreiche Konzepte bedürfen einer gut geplanten Einführungsphase, um sie erfolgreich bei Feuerwehren etablieren zu können. Gerade für kleinere Feuerwehren in Deutschland sollten noch weitere, kurzfristige und mit wenig Aufwand verbundene Konzepte zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppung entwickelt und etabliert werden, da die umfangreichen Modelle bei diesen Feuerwehren teilweise nicht oder nur schwierig anwendbar sind.

## 8. Fazit und Ausblick

Bei fast allen Verbrennungsreaktionen entstehen als Nebenprodukt in allen Phasen eines Brandes PAK. Insbesondere bei unvollständigen Verbrennungen ist das der Fall. Die PAK sammeln sich an Rußteilchen, die ebenfalls bei der Verbrennung entstehen, an. Einige der PAK sind als Karzinogene eingestuft. Meistens wirken die karzinogenaktiven PAK über metabolisierte Produkte des Ausgangsstoffes. Diese können mit der DNS Addukte bilden und so Defekte oder Mutationen in der DNS verursachen, die in der Folge zu Krebs führen können.

Diverse in dieser Arbeit beschriebene Studien haben gezeigt, dass Feuerwehrleute in ihrer Tätigkeit mit PAK konfrontiert sind und teilweise auch vermehrt Krebserkrankungen bei Feuerwehrleuten auftreten. Bei diesen Studien handelt es sich meistens um Untersuchungen außerhalb Deutschlands und Europas. Teilweise wurden aufgrund der Ergebnisse dieser Studien bestimmte Krebsarten als Berufskrankheiten für Feuerwehrangehörige anerkannt, wie zum Beispiel in Kanada. Um in Deutschland eine Anerkennung von Krebsarten als Berufskrankheit für Feuerwehrleute durchsetzen zu können, sind weitere Studien in Deutschland durchzuführen. Die Biomonitoringstudie der DGUV kann hierbei nur der Anfang sein, um das Thema „Krebs bei Feuerwehrleuten“ von allen Seiten zu beleuchten. Insbesondere ist die Taktik im deutschen Feuerwehrwesen, mit der Grundlage der FwDv 3 im Brandeinsatz, eine andere als das Vorgehen in Amerika oder Australien. Dementsprechend müssen Untersuchungen erfolgen, inwieweit ausländische Konzepte zur Einsatzstellenhygiene und Schwarz-Weiß-Trennung bei deutschen Feuerwehren erfolgen können.

In dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass auf den Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehrleute, in diesem Fall Handlampen und Funkgeräte, und den Einstiegriffen zur Mannschaftskabine, PAK-Ansammlungen zu finden sind und sich diese PAK-Mengen im Laufe der Zeit von vier Wochen recht konstant auf einem bestimmten Niveau halten. Der kurze Zeitraum der Probennahme lässt keine Beurteilung der Langzeitentwicklung von PAK-Mengen auf Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehrleute zu. Auch in diesem Fall müssen weitere Untersuchungen stattfinden, um festzustellen, ob über längere Zeit eine Akkumulation der PAK stattfindet. Es lässt sich weiterhin festhalten, dass die PAK nach einem intensiven Brandereignis deutlich erhöhte Werte aufweisen. Folglich kann man sagen, dass die Feuerwehrleute, bei einem intensiven Brandereignis mit großen Mengen PAK konfrontiert werden. Sie versuchen sich über Atemschutz und ihre Schutzkleidung vor Inhalation, Ingestion und Absorption von PAK zu schützen, dennoch gibt es bei einer Brandbekämpfung immer wieder Momente, in denen sich auch unterstützende Funktionen ungeschützt kurzzeitig im Gefahrenbereich aufhalten. Zusätzlich werden die Ausrüstung und die Schutzkleidung nach einem Einsatz teilweise einfach in der Mannschaftskabine mit zur Wache genommen. Hier besteht dann für jeden mitfahrenden Feuerwehrangehörigen die Gefahr der Kontamination. Im weiteren Verlauf kommt dann auch die Gefahr der Kontaminationsverschleppung zum Tragen, wenn keine Reinigung von Ausrüstung, Schutzkleidung, Fahrzeug und Personal durchgeführt wird. Das wiederum führt dann zu einem erhöhten Krebsrisiko, da die Feuerwehrleute permanent den Schadstoffen ausgesetzt sind. Weiterhin haben die

Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Reinigung von Fahrzeuginnenräumen und Ausrüstung zu einem Absinken der PAK-Mengen führt. Die PAK sind zwar nicht restlos beseitigt, aber gerade bei den PAK mit kanzerogener und mutagener Aktivität findet eine deutliche Reduktion der vorhandenen Menge statt. Somit konnte die Reinigung als effektives Mittel, zumindest zur akuten Minderung der PAK-Mengen nach einem Brandeinsatz, identifiziert werden. Auch hier müssen noch weitere Untersuchungen von unterschiedlichen Reinigungsverfahren durchgeführt werden, um möglichst effektive Verfahren zur Reduzierung der Schadstoffmenge zu finden.

Zur Verhinderung der Kontaminationsverschleppung und der Folge- bzw. Neukontamination von Feuerwehrkräften, wurden unterschiedliche Methoden und Konzepte wie Vor-Ort Dekontamination, Skellefteå Modell, Concord Modell oder Schwarz-Weiß-Trennung beschrieben, die teilweise gut und schnell umsetzbar und teilweise sehr umfangreich sind. Auch in diesem Fall muss untersucht werden, welche Konzepte für das deutsche Feuerwehrwesen mit seinen vielen, teilweise auch kleinen Freiwilligen Feuerwehren, umsetzbar sind. Möglicherweise müssen auch neue Konzepte speziell für kleine bzw. Freiwillige Feuerwehren entwickelt werden, damit auch diese ihre Einsatzhygiene verbessern und eine Kontaminationsverschleppung verhindern können.

## Literaturverzeichnis

1. DGUV. Feuerwehrleute optimal vor Gefahrstoffen schützen [Internet]. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. [Zugriff am 21. Mai 2018]. Verfügbar unter: [http://www.dguv.de/de/mediencenter/pm/pressearchiv/2016/quartal\\_3/details\\_3\\_135363.jsp](http://www.dguv.de/de/mediencenter/pm/pressearchiv/2016/quartal_3/details_3_135363.jsp)
2. Fengler D. Wissenschaft: Das unerforschte Krebsrisiko der Feuerwehrleute. 18. April 2016 [Zugriff am 6. Dezember 2018]; Verfügbar unter: <https://www.welt.de/regionales/hamburg/article154468375/Das-unerforschte-Krebsrisiko-der-Feuerwehrleute.html>
3. Krebs bei Feuerwehrleuten: Gift auf der Haut. Spiegel Online [Internet]. 23. Oktober 2017; Verfügbar unter: <http://www.spiegel.de/gesundheit/diagnose/krebs-bei-feuerwehrleuten-gift-auf-der-haut-a-1173833.html>
4. NDR. Keine Hilfe für krebskranke Feuerwehrleute [Internet]. [Zugriff am 6. Dezember 2018]. Verfügbar unter: </nachrichten/hamburg/Keine-Hilfe-fuer-krebskranke-Feuerwehrleute,feuerwehr1750.html>
5. Alarie Y. Toxicity of Fire Smoke. *Crit Rev Toxicol*. 1. Januar 2002;32(4):259–89.
6. Umweltbundesamt. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? [Internet]. 2016 [Zugriff am 6. August 2018]. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische\\_ aromatische\\_kohlenwasserstoffe.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische_ aromatische_kohlenwasserstoffe.pdf)
7. Rodewald G. *Brandlehre*. 6., überarb. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer; 2007.
8. LeMasters GK, Genaidy AM, Succop P, Deddens J, Sobeih T, Barriera-Viruet H, u. a. Cancer Risk Among Firefighters: A Review and Meta-analysis of 32 Studies. *J Occup Environ Med* [Internet]. 2006;48(11). Verfügbar unter: [https://journals.lww.com/joem/Fulltext/2006/11000/Cancer\\_Risk\\_Among\\_Firefighters\\_\\_A\\_Review\\_and.14.aspx](https://journals.lww.com/joem/Fulltext/2006/11000/Cancer_Risk_Among_Firefighters__A_Review_and.14.aspx)
9. Fent KW, Alexander B, Roberts J, Robertson S, Toennis C, Sammons D, u. a. Contamination of firefighter personal protective equipment and skin and the effectiveness of decontamination procedures. *J Occup Environ Hyg*. 3. Oktober 2017;14(10):801–14.
10. Caux C, O'Brien C, Viau C. Determination of Firefighter Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Benzene During Fire Fighting Using Measurement of Biological Indicators. *Appl Occup Environ Hyg*. 1. Mai 2002;17(5):379–86.
11. Keir JLA, Akhtar US, Matschke DMJ, Kirkham TL, Chan HM, Ayotte P, u. a. Elevated Exposures to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Other Organic Mutagens in Ottawa Firefighters Participating in Emergency, On-Shift Fire Suppression. *Environ Sci Technol*. 7. November 2017;51(21):12745–55.

12. Oliveira M, Slezakova K, Alves MJ, Fernandes A, Teixeira JP, Delerue-Matos C, u. a. Firefighters' exposure biomonitoring: Impact of firefighting activities on levels of urinary monohydroxyl metabolites. *Int J Hyg Environ Health*. 1. November 2016;219(8):857–66.
13. Guidotti TL. Mortality of urban firefighters in alberta, 1927–1987. *Am J Ind Med*. 1. Juni 1993;23(6):921–40.
14. Oliveira M, Slezakova K, Alves MJ, Fernandes A, Teixeira JP, Delerue-Matos C, u. a. Polycyclic aromatic hydrocarbons at fire stations: firefighters' exposure monitoring and biomonitoring, and assessment of the contribution to total internal dose. *Spec Issue Emerg Contam Eng Nat Environ*. 5. Februar 2017;323:184–94.
15. Government of Alberta. Workers' Compensation Act Revised Statutes of Alberta 2000 Chapter W-15 [Internet]. Jan 4, 2018. Verfügbar unter: <http://www.qp.alberta.ca/documents/Acts/W15.pdf>
16. Government of Alberta. Alberta Regulation 102/2003 workers' compensation act firefighters' primary site cancer regulation [Internet]. Feb, 2018. Verfügbar unter: [http://www.qp.alberta.ca/documents/Regs/2003\\_102.pdf](http://www.qp.alberta.ca/documents/Regs/2003_102.pdf)
17. Feuerkrebs gUG. Feuerkrebs gUG - Prävention, Förderung, Aufklärung [Internet]. [www.feuerkrebs.de](http://www.feuerkrebs.de). [Zugriff am 25. Juli 2018]. Verfügbar unter: <http://www.feuerkrebs.de/index.php/ueber-uns.html>
18. Bundesregierung. Anlage 1 Berufskrankheitenverordnung [Internet]. Gesetze im Internet. [Zugriff am 25. Juli 2018]. Verfügbar unter: [http://www.gesetze-im-internet.de/bkv/anlage\\_1.html](http://www.gesetze-im-internet.de/bkv/anlage_1.html)
19. Merkblatt-4104.pdf [Internet]. [Zugriff am 25. Juli 2018]. Verfügbar unter: [https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-4104.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-4104.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
20. Merkblatt-5102.pdf [Internet]. [Zugriff am 25. Juli 2018]. Verfügbar unter: [https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-5102.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-5102.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
21. Boffetta P, Jourenkova N, Gustavsson P. Cancer risk from occupational and environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Cancer Causes Control*. 1. Mai 1997;8(3):444–72.
22. Jürgen Kunkelmann. Brandschutzforschung der Bundesländer-Forschungsbericht 130 Flashover / Backdraft - Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen [Internet]. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV), Herausgeber. [Zugriff am 1. August 2018]. Verfügbar unter: [https://www.ffb.kit.edu/download/IMK\\_Ber.\\_Nr.\\_130.pdf](https://www.ffb.kit.edu/download/IMK_Ber._Nr._130.pdf)
23. Spektrum Akademischer Verlag. Verdampfung [Internet]. [Spektrum.de](http://www.spektrum.de). [Zugriff am 2. August 2018]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/verdampfung/9725>

24. Bundesinstitut für Risikobewertung. Krebserzeugende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) in Verbraucherprodukten sollen EU-weit reguliert werden - Risikobewertung des BfR im Rahmen eines Beschränkungs-vorschlages unter REACH [Internet]. [Zugriff am 27. Dezember 2018]. Verfügbar unter: [https://www.bfr.bund.de/cm/343/krebserzeugende\\_polyzyklische\\_aromatische\\_kohlenwasserstoffe\\_pak\\_in\\_verbraucherprodukten\\_sollen\\_eu\\_weit\\_reguliert\\_werden.pdf](https://www.bfr.bund.de/cm/343/krebserzeugende_polyzyklische_aromatische_kohlenwasserstoffe_pak_in_verbraucherprodukten_sollen_eu_weit_reguliert_werden.pdf)
25. Andersson JT, Achten C. Time to Say Goodbye to the 16 EPA PAHs? Toward an Up-to-Date Use of PACs for Environmental Purposes. Polycycl Aromat Compd. 15. März 2015;35(2-4):330-54.
26. Fent K, Herausgeber. Ökotoxikologie: Umweltchemie – Toxikologie – Ökologie [Internet]. 4. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2013 [Zugriff am 2. Januar 2019]. Verfügbar unter: <https://eref.thieme.de/10.1055/b-002-99137>
27. Technische Informationsbibliothek. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) [Internet]. Hannover; [Zugriff am 8. August 2018]. Verfügbar unter: [https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH\\_de.pdf](https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/PAH_de.pdf)
28. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. ERB (Exposition-Risiko-Beziehung)-Begründung zu Benzo[a]pyren [Internet]. [Zugriff am 28. Dezember 2018]. Verfügbar unter: [https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/910/910-benzo-a-pyren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/910/910-benzo-a-pyren.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
29. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Annex XV restriction report proposal for a restriction [Internet]. [Zugriff am 28. Dezember 2018]. Verfügbar unter: [https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/de/Downloads/PAK-Dossier-PAK.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/de/Downloads/PAK-Dossier-PAK.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
30. Aigner KR, Stephens FO, Herausgeber. Onkologie Basiswissen: mit 75 Abbildungen und 6 Tabellen. Berlin Heidelberg: Springer; 2016. 313 S.
31. Tumorsuppressorgene [Internet]. Verfügbar unter: <http://tv.doccheck.com/de/movie/74869/tumorsuppressorgene>
32. Wagener C. Einführung in die molekulare Onkologie: Veränderung und Wirkung von Tumorgenen und Tumorproteinen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1996.
33. Europäisches Parlament und Rat. Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 [Internet]. Verfügbar unter: [https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/de/Downloads/CLP-VO/CLP\\_GHS\\_VO.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/de/Downloads/CLP-VO/CLP_GHS_VO.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
34. Brüning T, Käßlerlein H, Plöttner S, Welge P. Kombinationswirkungen von PAK - Zellbiologische Untersuchungen als Instrument zur Beurteilung von Kombinationswirkungen. IPA Journal. (03/2013):16-9.



35. Keir JLA, Akhtar US, Matschke DMJ, Kirkham TL, Chan HM, Ayotte P, u. a. Elevated Exposures to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Other Organic Mutagens in Ottawa Firefighters Participating in Emergency, On-Shift Fire Suppression. *Environ Sci Technol*. 7. November 2017;51(21):12745–55.
36. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe - Volltext FwDv - Feuerwehr-Dienstvorschriften [Internet]. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. [Zugriff am 3. Mai 2018]. Verfügbar unter: [https://www.bbk.bund.de/DE/Service/Fachinformationsstelle/RechtundVorschriften/VorschriftenundRichtlinien/VolltextFwDv/FwDV-volltext\\_einstieg.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Service/Fachinformationsstelle/RechtundVorschriften/VorschriftenundRichtlinien/VolltextFwDv/FwDV-volltext_einstieg.html)
37. Bundesrat. Innenministerkonferenz - Aufgaben und Arbeitsweise [Internet]. Innenministerkonferenz. [Zugriff am 23. Oktober 2018]. Verfügbar unter: <https://www.innenministerkonferenz.de/IMK/DE/aufgaben/aufgaben-node.html>
38. AGBF Bund. AGBF Bund - Offizielle Website - Downloads - AK Grundsatzfragen - Öffentlich - Grundsatzpapier [Internet]. [Zugriff am 24. Oktober 2018]. Verfügbar unter: <http://www.agbf.de/downloads-ak-grundsatzfragen/category/43-ak-grundsatzfragen-oeffentlich-grundsatzpapier.html?download=148:2015-11-empfehlung-der-qualitaetskriterien-fuer-die-bedarfsplanung-in-staedten>
39. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV). Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz. Stuttgart: Dt. Gemeindeverl.; 2008.
40. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV). FwDV: Feuerwehr-Dienstvorschrift. 1: Grundtätigkeiten - Lösch- und Hilfeleistungseinsatz. Stand: September 2006. Stuttgart: Kohlhammer, Dt. Gemeindeverl.; 2007. 167 S.
41. Niklas Kükelhahn. Schadstoffbelastung der Ausbilder von feststoffbefeuereten Brandübungsanlagen [Bachelorthesis]. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg; 2018.
42. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Feuerwehrfahrzeuge - Teil 1: Nomenklatur und Bezeichnung; Deutsche Fassung EN 1846-1:2011.
43. Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. Merkblatt Empfehlung für den Feuerwehreinsatz zur Einsatzhygiene bei Bränden. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes; 2014.
44. Pressestelle Feuerwehr Hamburg. FW-HH: Feuerwehr Hamburg löscht brennenden Unrat und Glutnester in S-Bahn Tunnel [Internet]. [presseportal.de](http://presseportal.de). [Zugriff am 1. Januar 2019]. Verfügbar unter: <https://www.presseportal.de/blaulicht/pm/82522/4062791>
45. Pressestelle Feuerwehr Hamburg. FW-HH: Feuerwehr Hamburg löscht brennende Wohnung [Internet]. [presseportal.de](http://presseportal.de). [Zugriff am 1. Januar 2019]. Verfügbar unter: <https://www.presseportal.de/blaulicht/pm/82522/4064013>

46. Zhang Y, Dou H, Chang B, Wei Z, Qiu W, Liu S, u. a. Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Indoor Straw Burning and Emission Inventory Updating in China. *Ann N Y Acad Sci.* 1. Oktober 2008;1140(1):218–27.
47. Harrison TR, Muhamad JW, Yang F, Morgan SE, Talavera E, Caban-Martinez A, u. a. Firefighter attitudes, norms, beliefs, barriers, and behaviors toward post-fire decontamination processes in an era of increased cancer risk. *J Occup Environ Hyg.* 3. April 2018;15(4):279–84.
48. Wobst M, Wichmann H, Bahadir M. Surface contamination with PASH, PAH and PCDD/F after fire accidents in private residences. *Chemosphere.* 1. März 1999;38(7):1685–91.
49. PBCFR FACE - Post Fire On Scene Decon [Internet]. Palm Beach; 2017. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=rWT4Ia0sU1s>
50. Healthy In, Healthy Out — Firefighter Cancer Prevention [Internet]. 2016. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=kBmnMOFdxwA>
51. Healthy firefighters [Internet]. Healthy Firefighters - Official homepage. [Zugriff am 1. Januar 2019]. Verfügbar unter: <http://www.healthyfirefighters.com/>
52. North Carolina Firefighter Cancer Alliance [Internet]. NCFCA. [Zugriff am 1. Januar 2019]. Verfügbar unter: <https://www.ncfirefightercancer.org>
53. Swedish Civil Contingencies Agency. Healthy Firefighters – the Skellefteå Model improves the work environment [Internet]. 2015 [Zugriff am 12. Januar 2019]. Verfügbar unter: <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/27621.pdf>
54. Skellefteå model (Deutsch) [Internet]. 2015. Verfügbar unter: [https://www.youtube.com/watch?v=rrk\\_V9rwicc](https://www.youtube.com/watch?v=rrk_V9rwicc)
55. Concord Decontamination Model 2018 [Internet]. 2018. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=Ft1MItz4ZQs>
56. Hanseatische Feuerwehr Unfallkasse Nord. Einsatzstellenhygiene: Der Dreck bleibt draußen! | HFUK Nord | Hanseatische Feuerwehr-Unfallkasse Nord | Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein [Internet]. [Zugriff am 3. Januar 2019]. Verfügbar unter: <https://www.hfuknord.de/hfuk/aktuelles/meldungen/2016/Einsatzstellenhygiene.php>

## Anhang



**LABOR FÜR RÜCKSTANDSANALYTIK BREMEN GMBH**

Labor für Rückstandsanalytik Bremen GmbH · Anne-Conway-Straße 9 · 28359 Bremen

Herrn  
Pascal Thomas

**Chemische  
Untersuchung von**  
Kosmetika,  
Textilien und Leder,  
Lebensmitteln,  
Wasser, Boden, Luft.  
**Gutachten · Beratung**

Internet: [www.lr-bremen.de](http://www.lr-bremen.de)

Bremen, den 06.11.2018

### PRÜFBERICHT

**Prüfbericht Nr.:** 1810776  
**Auftraggeber:** Pascal Thomas  
**Prüfmaterial:** 42 Materialproben  
**Probeneingang:** 16.10.2018  
**Probeneingang:** 16.10.2018 – 06.11.2018  
**Probenbezeichnung:** BA-001 bis BA-042  
**Prüfparameter:** PAK EPA 16  
**Prüfmethode:**  
- Extraktion mit n-Hexan  
- Einengen des Extraktes  
- Messung mittels GC-MSD

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben und Prüfparameter. Eine nur auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichts bedarf der schriftlichen Zustimmung des Labors für Rückstandsanalytik Bremen

Sitz und Gerichtsstand der Gesellschaft ist Bremen. Amtsgericht Bremen HRB 12393 Geschäftsführer: Dr. Mehmet Cetinkaya



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 2 von 12

**Prüfergebnisse:**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-000	BA-001	BA-002	BA-003
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	4390	3110	2250	2830
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	+	+	+	+
Phenanthren	5	+	+	+	+
Anthracen	5	+	+	+	+
Fluoranthren	5	+	+	+	+
Pyren	5	+	+	+	+
Benzo(a)anthracen	5	+	+	+	+
Chrysen	5	+	+	+	+
Benzo(b)fluoranthren	5	+	+	+	+
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	+	+
Benzo(a)pyren	5	+	+	+	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylene	10	+	+	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 3 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	BA-004	BA-005	BA-006	BA-007
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	2600	2750	2850	6290
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	+	+	+	6,1
Phenanthren	5	6,5	8,5	7,2	38
Anthracen	5	+	+	+	5,7
Fluoranthren	5	+	8,9	9,6	46
Pyren	5	+	12	13	41
Benzo(a)anthracen	5	+	+	+	19
Chrysen	5	+	+	+	25
Benzo(b)fluoranthren	5	+	+	+	23
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	+	5,6
Benzo(a)pyren	5	+	+	+	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	+	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 4 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-008	BA-009	BA-010	BA-011
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	3070	2900	3400	4440
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	+	+	5,9	+
Phenanthren	5	+	9,5	28	10
Anthracen	5	+	+	6,7	+
Fluoranthren	5	5,7	11	37	9,9
Pyren	5	5,8	13	46	14
Benzo(a)anthracen	5	+	16	26	+
Chrysen	5	+	+	16	+
Benzo(b)fluoranthren	5	+	+	23	+
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	5,3	+
Benzo(a)pyren	5	+	+	5,1	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	+	14	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar





Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 5 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-012	BA-013	BA-014	BA-015
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	1860	3100	3000	2350
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	6,4	5,1	+	+
Phenanthren	5	21	17	7,2	7,1
Anthracen	5	+	+	+	6,6
Fluoranthren	5	26	17	6,1	8,4
Pyren	5	33	17	6,5	+
Benzo(a)anthracen	5	+	11	+	+
Chrysen	5	+	14	+	+
Benzo(b)fluoranthren	5	+	13	+	+
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	+	+
Benzo(a)pyren	5	+	+	+	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	+	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 6 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-016	BA-017	BA-018	BA-019
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	3950	4880	1750	2100
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	17	+	+	+
Fluoren	5	39	9,8	+	6,4
Phenanthren	5	434	36	10	35
Anthracen	5	119	11	+	8,0
Fluoranthren	5	174	70	9,9	31
Pyren	5	148	66	11	40
Benzo(a)anthracen	5	51	32	9,5	15
Chrysen	5	54	22	+	14
Benzo(b)fluoranthren	5	71	24	+	27
Benzo(k)fluoranthren	5	12	+	+	+
Benzo(a)pyren	5	23	12	+	12
Dibenz(a,h)anthracen	10	11	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	15	+	+	12
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	21	+	+	10

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 7 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-020	BA-021	BA-022	BA-023
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	3960	2310	2020	2050
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	+	+	26	7,5
Phenanthren	5	8,4	9,7	211	31
Anthracen	5	+	+	62	10
Fluoranthren	5	+	12	92	62
Pyren	5	6,7	16	82	57
Benzo(a)anthracen	5	+	+	27	+
Chrysen	5	+	+	29	18
Benzo(b)fluoranthren	5	+	+	38	19
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	5,1	+
Benzo(a)pyren	5	+	+	12	9,9
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	+	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	10	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 8 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-024	BA-025	BA-026	BA-027
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	2210	2800	2550	1490
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	+	12	+	+
Phenanthren	5	7,1	58	11	12
Anthracen	5	+	14	+	+
Fluoranthren	5	6,3	21	14	12
Pyren	5	8,1	21	17	13
Benzo(a)anthracen	5	+	5,5	+	+
Chrysen	5	+	+	5,4	+
Benzo(b)fluoranthren	5	+	+	8,7	+
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	+	+
Benzo(a)pyren	5	+	+	+	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	+	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 9 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-028	BA-029	BA-030	BA-031
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	2070	2520	1350	3160
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	5,7	5,2	10	11
Phenanthren	5	36	13	60	36
Anthracen	5	6,9	+	+	5,5
Fluoranthren	5	35	12	22	13
Pyren	5	46	15	24	15
Benzo(a)anthracen	5	22	+	+	+
Chrysen	5	12	+	+	+
Benzo(b)fluoranthren	5	23	+	+	+
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	+	+
Benzo(a)pyren	5	6,7	+	+	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	13	+	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar



Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 10 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	BA-032	BA-033	BA-034	BA-035
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	3070	2180	3170	2770
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	9,6	+	9,3	+
Phenanthren	5	22	9,5	56	17
Anthracen	5	+	+	15	+
Fluoranthen	5	16	+	59	13
Pyren	5	21	8,4	60	16
Benzo(a)anthracen	5	+	+	22	+
Chrysen	5	+	+	22	7,0
Benzo(b)fluoranthen	5	+	+	19	+
Benzo(k)fluoranthen	5	+	+	+	+
Benzo(a)pyren	5	+	+	9,0	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	+	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	10	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar





Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 11 von 12

**Probenbezeichnung**

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung			
		BA-036	BA-037	BA-038	BA-039
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Naphthalin	10	3370	2960	3940	2770
Acenaphthylen	10	+	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+	+
Fluoren	5	5,3	6,3	+	+
Phenanthren	5	12	52	8,1	11
Anthracen	5	+	14	+	+
Fluoranthen	5	11	62	+	9,0
Pyren	5	14	75	7,0	12
Benzo(a)anthracen	5	9,7	33	+	9,2
Chrysen	5	+	27	+	+
Benzo(b)fluoranthen	5	+	15	+	+
Benzo(k)fluoranthen	5	+	8,2	+	+
Benzo(a)pyren	5	+	15	+	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	15	+	+
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	15	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar

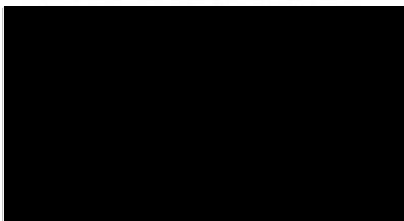


Prüfbericht Nr.: 1810776  
Seite 12 von 12

Parameter	Bestimmungs- grenze	Probenbezeichnung		
		BA-040	BA-041	BA-042
<b>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</b>				
Naphthalin	10	3260	4070	2970
Acenaphthylen	10	+	+	+
Acenaphthen	10	+	+	+
Fluoren	5	5,1	+	+
Phenanthren	5	15	8,3	7,1
Anthracen	5	+	+	+
Fluoranthren	5	12	+	+
Pyren	5	15	6,9	7,4
Benzo(a)anthracen	5	7,2	+	+
Chrysen	5	+	+	+
Benzo(b)fluoranthren	5	+	+	+
Benzo(k)fluoranthren	5	+	+	+
Benzo(a)pyren	5	+	+	+
Dibenz(a,h)anthracen	10	+	+	+
Benzo(g,h,i)perylen	10	+	+	
Indeno(1,2,3-cd)pyren	10	+	+	+

Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf ng/Wischprobe  
+ = nicht nachweisbar

Labor für Rückstandsanalytik Bremen GmbH



Dr. Dennis Leupold  
Laborleitung