

Abschlussbericht zum Vorhaben
**„Krebsrisiko im Feuerwehrdienst –
Biomonitoring von
Feuerwehreinsatzkräften bei
Realbränden“ (FP0414)**

Laufzeit

01.10.2017 – 31.10.2020

Bericht vom 31.05.2021

*Dr. Dirk Taeger, Stephan Koslitz, Birgit
Heinrich, Tim Pelzl, Dr. Heiko U.
Käfferlein, Prof. Dr. Dietmar Breuer, Prof.
Dr. Thomas Brüning*

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung deutsch

Kurzfassung englisch

1. Problemstellung

2. Forschungszweck/-ziel

3. Methodik

Studienablauf

Ethik und Datenschutz

Fallzahlberechnung

Auswertung Biomonitoring

Auswertung Baumwollunterbekleidung

4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Übersicht über die Studienpopulation

Übersicht über die Brandeinsätze

Übersicht über den Einsatz von Baumwollunterwäsche

Ergebnisse der Biomonitoringanalysen

Eingangsuntersuchung

Biomonitoring Einsätze

1-Hydroxypyren Verläufe einzelner Einsätze

Ergebnisse der PAK-Analysen in der Baumwollunterwäsche

Auswertung bezogen auf die untersuchten PAK

Auswertung bezogen auf die einzelnen Einsatzszenarien

Auswertung bezogen auf die Kleidungsstücke und deren Stanzpositionen

5. Diskussion

Biomonitoring

Baumwollwäsche

Vergleich mit anderen Biomonitoring-Studien bei der Feuerwehr

Expositionsquelle Brandrauch

Vergleich mit gewerblichen Arbeitsplätzen

6. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

7. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

Literaturverzeichnis

8. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

9. Anhang/Anhänge

Unterschriftenseite verpflichtend für Kooperationsprojekte

Kurzfassung deutsch

Im Jahr 2007 hatte die internationale Krebsforschungsagentur (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Arbeit als Feuerwehreinsatzkraft als möglicherweise krebserzeugend für den Menschen (Gruppe 2B) eingestuft. Neuere Meta-Analysen zeigen keine Erhöhung des allgemeinen Krebsrisikos mit Ausnahme von einzelnen Krebserkrankungen. Unklar bleibt die konkrete Exposition der Einsatzkräfte gegenüber krebserzeugenden Gefahrstoffen bei realen Brandeinsätzen.

Gefahrstoffe können über den Atemtrakt, den Verdauungstrakt und die Haut aufgenommen werden. Beim Brandrauch handelt es sich um eine Mischexposition chemischer Verbindungen, deren Zusammensetzung je nach Brand stark variieren kann. Als Leitkomponenten im Brandrauch können die Substanzen aus der Gruppe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) angesehen werden, die aus mehreren Hundert Einzelsubstanzen mit unterschiedlicher krebserzeugender Wirkung bestehen. In Deutschland gibt es bisher keine Erkenntnisse darüber, ob – und wenn ja, wie viel – von diesen PAK bei der Brandbekämpfung im Einsatz von Feuerwehreinsatzkräften aufgenommen werden. Aus diesem Grunde förderte die DGUV dieses Forschungsprojekt.

Die Studie wurde bei der Feuerwehr der Freien und Hansestadt Hamburg und der Berliner Feuerwehr durchgeführt. Dabei wurden 217 Einsatzkräfte der Berufsfeuerwehr und der Freiwilligen Feuerwehr sowie Mitarbeitende der Atemschutz- und Schlauchwerkstätten in die Studie aufgenommen. Zunächst wurde im Rahmen einer Eingangsuntersuchung die persönliche Grundbelastung an 1-Hydroxypyren (1-OHP) im Urin gemessen. Bei 1-OHP handelt es sich um ein Stoffwechselprodukt des PAK Pyren, zu dem zahlreiche Studien zur Exposition sowohl der nicht beruflich belasteten Allgemeinbevölkerung als auch von beruflich gegenüber PAK exponierten Beschäftigten vorliegen.

Nach dem Brandeinsatz wurden die teilnehmenden Einsatzkräfte gebeten, zu drei verschiedenen Zeitpunkten Urin abzugeben. Zusätzlich wurde von jeder teilnehmenden Einsatzkraft nach dem Einsatz ein Einsatzfragebogen ausgefüllt. In diesem Fragebogen wurde detailliert nach wichtigen Angaben zum Brand und zum Einsatz, wie z. B. Grad der Verrauchung und gewählte persönliche Schutzausrüstungen gefragt. Die durchschnittliche Exposition, die Variabilität der 1-OHP Exposition sowie die Maximalexposition bei im Voraus definierten Einsatzszenarien (z. B. Brand in einem Wohngebäude) wurden ermittelt. Parameter wie die Tätigkeit, Rauchexposition, die Dauer und Funktion während des Brandeinsatzes sowie die verwendete persönliche Schutzausrüstung (PSA) wurden dabei für die Bewertung mitberücksichtigt. Für die Beurteilung der gemessenen 1-OHP Biomonitoring-Werte hinsichtlich einer Exposition gegenüber PAK (und damit ohne jeglichen Bezug zu gesundheitlichen Effekten) wurde der „Biologische Arbeitsstoff-Referenzwert“ (BAR) für Nichtraucher der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (MAK-Kommission) der Deutschen Forschungsgemeinschaft herangezogen, der bei 0,3 µg/g Kreatinin liegt. Für Raucher existiert kein entsprechender BAR. Daher wurde für die rauchenden Studienteilnehmer aus dem Umweltsurvey 1998 entsprechend das 95. Perzentil der Raucher in der Allgemeinbevölkerung als Beurteilungsgröße gewählt (0,73 µg/L, ebenfalls ohne Bezug zu gesundheitlichen Effekten). Für die Beurteilung der gemessenen 1-OHP-Werte mit Bezug zu gesundheitlichen Effekten (Schädigung der Erbsubstanz DNA) wurde der „Biological Exposure Index“ (BEI[®]) der US-amerikanischen Gesellschaft „American Conference of Governmental Industrial Hygienists“ (ACGIH) herangezogen (2,5 µg/L).

Insgesamt wurden 70 Brandeinsätze im Rahmen der Studie von den Einsatzkräften dokumentiert, davon 49 bei der Berufsfeuerwehr und 21 bei der Freiwilligen Feuerwehr. In den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten wurden 7 Arbeitstage dokumentiert. Die 1-OHP Konzentrationen der Beschäftigten in den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten waren unterhalb der Beurteilungsmaßstäbe. Allerdings sind valide Aussagen aufgrund der wenigen Teilnehmenden in diesem Bereich nur eingeschränkt möglich. Bei den 70 Brandeinsätzen zeigte sich ein

Anstieg der mittleren 1-OHP Konzentration unabhängig von der Kreatinin-Adjustierung im Vergleich zur Eingangsuntersuchung. So lag die Anzahl der 1-OHP-Werte in den Urinproben nach dem Brandeinsatz deutlich öfter oberhalb der Bestimmungsgrenze als vor dem Einsatz. Allerdings blieb der überwiegende Anteil der Proben in Abhängigkeit vom Rauchstatus der Teilnehmer unterhalb der jeweiligen Referenzwerte. Nur eine Person wies nach dem Brandeinsatz Werte über dem BEI[®] auf. Bei den Nichtraucher und Ex-Rauchern wiesen 20 % und bei den Rauchern 13 % Werte über den jeweiligen Beurteilungsmaßstab nach dem Brandeinsatz auf. Insgesamt lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass durch den Brandeinsatz Pyren (und damit PAK) aufgenommen und zu 1-OHP verstoffwechselt wird. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit drei weiteren Biomonitoring-Studien bei Realbrandeinsätzen, die in Kanada und den USA durchgeführt wurden. Im Vergleich zu industriellen PAK-exponierten Arbeitsplätzen (u. a. in der Stahlindustrie) sind die hier ermittelten Konzentration an 1-OHP bei Einsatzkräften der Feuerwehr durch einen Brandeinsatz wesentlich geringer. Im Gegensatz zu (Berufs-) Feuerwehrangehörigen sind industriell Beschäftigte darüber hinaus an jedem Arbeitstag während ihrer Arbeitsschicht gegenüber diesen Substanzen exponiert.

Die hierbei ermittelten Konzentrationen im Biomonitoring zeigen, dass eine korrekt angelegte, funktionsfähige Schutzkleidung sowie das bedarfsgerechte Tragen von umluftunabhängigem Atemschutz die Aufnahme von PAK verhindert bzw. so minimiert, dass die Beurteilungsmaßstäbe in der Mehrzahl der Fälle eingehalten werden. Es gibt jedoch einzelne Situationen, in denen die Konzentrationen auf Werte oberhalb der Beurteilungsmaßstäbe, insbesondere des mit gesundheitlichen Effekten assoziierten BEI[®], ansteigen. Dabei zeigt sich im Rahmen dieser Studie die Haut als relevanter Aufnahmeweg. Hier müssen geeignete Präventionsmaßnahmen eingesetzt werden, um die Belastungen zu verringern. Einen möglichen Ansatz dafür liefern die Ergebnisse des Teilprojektes „Entwicklung von Expositionsvermeidungsstrategien im Feuerwehreinsatz“. Diese wurde bereits im Jahr 2020 in Form der DGUV Information 205-035 *Hygiene und Kontaminationsvermeidung bei der Feuerwehr* und eines begleitenden Erklärfilms veröffentlicht. Darin enthalten sind unter anderem konkrete Beispiele, die den Feuerwehren aufzeigen, wie ein Expositionsvermeidungskonzept etabliert werden kann.

Um die dermale Belastung gegenüber PAK während des Einsatzes einzuschätzen, trugen ein Teilkollektiv von 14 Feuerwehreinsatzkräften bei Einsätzen in zwei verschiedenen Szenarien (Wohngebäudebrand und Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien) sowie drei Beschäftigte in einer Schlauch- und Atemschutzwerkstatt unter der Einsatzkleidung ein Set Baumwollwäsche, bestehend aus Shirt, Hose, Haube, Handschuhen und Socken. Aus der getragenen Unterwäsche wurden Stoffstücke ausgestanzt und auf PAK untersucht. Die Baumwollunterwäsche diente als Trägermaterial, eine Kontamination kann Hinweise auf eine dermale Exposition gegenüber PAK durch fehlende Schutzwirkung der Einsatzkleidung liefern.

Die Analysenergebnisse der Baumwollunterwäsche waren überwiegend unauffällig. Insbesondere die als krebserzeugend anzusehenden schwerer flüchtigen höhermolekularen PAK (z. B. Benzo[a]pyren) wurden in lediglich zwölf von 270 auswertbaren ausgestanzten Stoffstücken und in weitgehend geringen Konzentrationen bestimmt. Teilweise wurden auch höhere Konzentrationen an PAK quantifiziert, überwiegend in optisch auffällig verschmutzten Stellen der Baumwollunterwäsche. Jedoch lagen auch hier alle Konzentrationen unterhalb der zur Orientierung herangezogenen Beurteilungsmaßstäbe.

Im Rahmen dieser Studie wurde ein Biomonitoring-Parameter untersucht (1-OHP), der die mittelflüchtigen PAK repräsentiert und ein Stoffwechselprodukt eines selbst nicht als krebserregend bekannten PAK, dem Pyren, darstellt. Da die bei einem Brandereignis entstehende Stoffmatrix sehr komplex und individuell ist, sollen mit dem in der IPA-Probenbank gesicherten Material jedoch noch weitere Untersuchungen erfolgen, u. a. auf Stoffwechselprodukte kanzerogener Vertreter der PAK sowie weiterer krebserzeugender Substanzen. Dies gewährleistet einen möglichst umfassenden Einblick in die Expositionssituation von freiwilligen und

hauptamtlichen Feuerwehrangehörigen. Insbesondere zählen hierzu Stoffwechselprodukte von Benzo[a]pyren, Benzol, Naphthalin, Chlorphenole und Schwermetalle. Zudem stehen auch noch Blutproben für eine Bestimmung der Dioxinbelastung der Einsatzkräfte zur Verfügung, die ebenfalls noch ausgewertet werden sollen. Hinsichtlich hier nicht berücksichtigter Expositionsszenarien wird auch zusätzlicher Forschungsbedarf bei der Einschätzung der Exposition gegenüber krebserzeugenden Gefahrstoffen bei der Vegetationsbrandbekämpfung, dem Betrieb von holzbefeuerten Brandübungsanlagen sowie bei der Fragestellung zur effektiven und sicheren Wiederaufbereitung von kontaminierten PSA und Gerätschaften der Feuerwehr gesehen.

Kurzfassung englisch

In 2007, the International Agency for Research on Cancer (IARC) of the World Health Organization (WHO) classified working as a firefighter as possibly carcinogenic (Group 2B). However, recent meta-analyses show no increase in overall cancer risk except for a few cancer sites. The specific exposure of firefighters to hazardous materials during actual fire operations remains unclear. Hazardous substances can be absorbed through the respiratory tract, the digestive tract, and the skin.

Fire smoke is a mixture of many hundreds of chemical compounds, the composition of which varies greatly depending on the fire. Nevertheless, a major fraction of fire smoke is composed of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), many of which are known carcinogens. In Germany, there is currently no knowledge as to whether and, if so, how much carcinogenic PAHs are absorbed by firefighters during firefighting operations on duty. For this reason, the DGUV sponsored this research project.

The study was carried out at the fire departments in the City of Hamburg and the Berlin, and included 217 firefighters from the professional and volunteer fire departments, as well as employees from the respiratory protection and hose repair units/facilities. First, personal baseline exposure to 1-hydroxypyrene (1-OHP), a metabolic product of the PAH pyrene, was measured in urine during the initial examination. There are already numerous studies available that have previously investigated exposure to 1-OHP in the non-occupationally exposed general population, as well as from occupationally exposed workers to PAHs.

After the fire event, participating responders were asked to provide a urine sample at three different time points. In addition, each participating responder was asked to complete a questionnaire at the end of the assignment, which required relevant details about the fire and the operation itself, such as the amount of smoke and the selected personal protective equipment. The average exposure, the variability of 1-OHP exposure, and the maximum exposure in predefined scenarios were evaluated. Further parameters, such as the activity, smoke exposure, duration and function during the fire mission, and the personal protective equipment used were also considered for the assessment. Two references were used to evaluate the measured 1-OHP biomonitoring values: the "Biological Exposure Index" (BEI®) of the US-American society ACGIH and the "Biological Work Substance Reference Value" (BAR) of the Senate Commission for the Examination of Harmful Work Substances (MAK Commission) of the German Research Foundation. No BAR currently exists for smokers; therefore, the 95th percentile of the general population was appropriately set as the assessment level for non-occupational exposure to PAHs for the smoking study participants from the 1998 Environmental Survey.

A total of 70 fire incidents were documented by responders during the study. Of these, 49 were with full time firefighters and 21 with volunteer firefighters. Seven workdays were monitored in the respiratory protection and hose repair facilities, with the results showing that 1-OHP concentrations were below the level of detection in employees of these areas. However, valid conclusions are not possible for this group due to the small number of participants. The 70 fire operations showed an increase in the mean 1-OHP concentration independent of creatinine adjustment compared with the initial examination. The number of values below the limit of quantitation decreased significantly in the post-fire samples. Concentrations that were significantly above the BEI®, the BAR, or the reference value for smokers also occurred sporadically. However, the majority of samples remained below these assessment values. Overall, the results suggest an intake of pyrene by fire use which is then metabolized to 1-OHP. These results are comparable to the three other biomonitoring studies in real fire operations conducted in Canada and US. Compared to industrial PAH-exposed workplaces, the concentration of 1-OHP in responders is generally much lower as a result of fire operations. In contrast to (professional) firefighters, the industrial workers are exposed to PAHs for more than eight hours each workday, and consequently are exposed to much higher concentrations during the course of their years employed than firefighters.

The concentrations determined in biomonitoring show that properly-fitted, functional protective clothing and the wearing of self-contained breathing apparatus as required prevents the absorption of PAHs or, in most cases, at least reduces absorption to such an extent that the assessment standards are met. However, there are individual situations in which the concentrations rise above the assessment standards. In these cases, the skin is shown to be the primary route of uptake, in particular for this study. Here, suitable preventive measures must be used to reduce exposure. A possible approach for such reduction is provided by the results of a co-project “Development of exposure prevention strategies in firefighting operations”, which was published in 2020 in the form of DGUV Information 205-035 *Hygiene and contamination prevention in the fire department* and an accompanying explanatory film. Among the many topics addressed, both the publication and film contain concrete examples by which fire departments can introduce steps to avoid exposure.

In order to assess dermal exposure, a subgroup of 14 firefighters operating in two different fire scenarios (residential building fire and vehicle or other outdoor fire) and three employees in a hose and respiratory protection workshop wore a set of cotton undergarments consisting of a shirt, trousers, bonnet, gloves and socks under their operational clothing. Pieces of fabric were punched out of the worn undergarments, which served as carrier material, and analysed for PAHs. The idea was that detectable levels of PAHs would provide evidence of dermal exposure to PAHs due to a lack of adequate protection by the worn protective clothing.

The analytical measurements of the cotton undergarment however led to inconclusive results. For example, the low volatile, higher molecular weight PAHs (e.g., benzo[a]pyrene), which are considered to be carcinogenic were measured in only 12 of 270 analysable punched-out pieces of fabric and were present in low concentrations. In some cases, higher concentrations of PAHs were quantified, but mainly in conspicuously soiled areas of the cotton undergarment. However, here too, all concentrations were below the assessment benchmarks used as reference.

In this study, only one biomonitoring parameter, 1-OHP representing the medium volatile PAHs was investigated. Further investigations for other carcinogenic substances can be carried out using the urine samples stored in the IPA Biobank in order to obtain a comprehensive and more complete picture of the exposure situation of volunteer and full-time fire department members, since the substance matrix produced during a fire incident is very complex and individual. In particular, this includes metabolites of benzo[a]pyrene, benzene, naphthalene, chlorophenols and heavy metals. In addition, blood samples are still available to determine the dioxin contamination of the firefighters. In addition to the scenarios considered here, there is need for further research to determine the exposure situation in vegetation firefighting activities, the operation of wood-fired fire training facilities, as well as to fully evaluate the effectiveness and safe treatment of contaminated PPE and firefighting equipment.

1. Problemstellung

In Deutschland gibt es ungefähr 40.000 hauptamtliche und 1,3 Millionen ehrenamtliche Feuerwehreinsatzkräfte. Diese sind bei ihren Einsätzen einer Vielzahl von Gefährdungen ausgesetzt. In den letzten Jahren wird immer wieder diskutiert, ob die Tätigkeit als Feuerwehreinsatzkraft mit einem erhöhten Krebsrisiko assoziiert ist. Im Jahr 2007 hatte die internationale Krebsforschungsagentur (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Arbeit als Feuerwehreinsatzkraft als möglicherweise krebserzeugend für den Menschen (Gruppe 2B) eingestuft (International Agency for Research on Cancer et al. 2010). Diese Einstufung beruhte unter anderem auf einer Metaanalyse aus dem Jahre 2006 (LeMasters et al. 2006). Seitdem sind mehrere neue epidemiologische Studien zu Krebsrisiken bei Feuerwehreinsatzkräften durchgeführt und publiziert worden. Diese wurden in verschiedenen Metaanalysen zusammengefasst und bewertet (Casjens et al. 2019; Jalilian et al. 2019; Sritharan et al. 2017). Eine Erhöhung des allgemeinen Krebsinzidenz- und Mortalitäts-Risikos wurde nicht beobachtet. Für einzelne Krebserkrankungen zeigen sich jedoch erhöhte Risiken. Allerdings weisen die zugrundeliegenden Studien teilweise eine große Heterogenität auf, zudem wurden zeit- und länderspezifische Effekte beobachtet (Casjens et al. 2020). Überwiegend wurden männliche Einsatzkräfte der Berufsfeuerwehr in den Studien eingeschlossen. Nur wenige Studien untersuchten die Krebsrisiken von weiblichen oder freiwilligen Einsatzkräften. Generell ist die Möglichkeit eines individuell erhöhten Krebsrisikos durch die Brandbekämpfung nicht auszuschließen.

Da es sich bei Bränden um unfallartige Ereignisse handelt, liegen bei den epidemiologischen Studien überwiegend keine Informationen über die tatsächliche Exposition vor. Zudem hat jede Einsatzkraft eine definierte Funktion vorgegeben oder Tätigkeit bei der Brandbekämpfung auszuüben, sodass die Expositionssituationen von Mitgliedern eines Einsatztrupps sehr unterschiedlich sein können. Während sich Feuerwehreinsatzkräfte mit Atemschutz vor der Inhalation von Gefahrstoffen schützen können, können sich Brandrauch und andere beim Brand freigesetzte Gefahrstoffe auf der Haut ablagern und so möglicherweise zur Krebsentstehung beitragen. Hierzu gibt es bisher keine gesicherten Erkenntnisse aus realen Brandeinsätzen. Um die vom Menschen aufgenommenen Gefahrstoffe messen zu können, bietet sich das Biomonitoring an. Mit dieser Methode kann die Menge an aufgenommenen Schadstoffen, egal ob sie über den Atemtrakt, den Verdauungstrakt oder die Haut in den Körper gelangen, bestimmt werden. Der Großteil der Biomonitoring-Studien, die die innere Belastung durch Gefahrstoffe beim Brandeinsatz gemessen haben, sind in Übungssituationen oder nachgestellten Einsätzen durchgeführt worden (Banks et al. 2021; Rossbach et al. 2020; Fent et al. 2019; Feunekes et al. 1997; Moen und Ovrebø 1997). Im Gegensatz dazu sind, nach unserer Kenntnis, lediglich drei Studien zum Biomonitoring von Einsatzkräften bei realen Brandeinsätzen publiziert worden, zwei in Kanada (Caux et al. 2002; Keir et al. 2017) und eine in den Vereinigten Staaten (Hoppe-Jones et al. 2021). In Deutschland existiert bisher keine vergleichbare Studie, die die innere Exposition der Einsatzkraft bei der realen Brandbekämpfung bestimmt. Studien in Brandübungscontainern geben nicht die tatsächliche Situation wieder. Nur durch die Kenntnis der tatsächlichen Exposition ist eine effektive Prävention möglich, um eine mögliche Gesundheitsgefahr der Einsatzkräfte zu verhindern. In diesem Projekt sollte daher geklärt werden, ob krebserzeugende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im Feuerwehreinsatz bei der Brandbekämpfung von Feuerwehreinsatzkräften aufgenommen werden, und wenn ja, wie viele.

2. Forschungszweck/-ziel

Das Projekt ist Teil des DGUV Forschungsprojekts „Krebsrisiko für Feuerwehreinsatzkräfte - Strategien zur Expositionsvermeidung und -erfassung“. Dieses wird vom Sachgebiet „Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen“ (SG FwH) und dem Fachbereich „Feuerwehren, Hilfeleistungen, Brandschutz“ (FB FHB) durchgeführt. Weitere Teilprojekte sind die „Entwicklung von Expositionsvermeidungsstrategien im Feuerwehreinsatz“ und die „Entwicklung einer praxisgerechten Expositionsdokumentation und Anpassung der Zentralen Expositionsdatenbank (ZED)“.

Das Ziel des Teilprojekts „Biomonitoring von Feuerwehreinsatzkräften bei Realbränden“ war es, zu klären, ob und wenn ja, wie viel von krebserzeugenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) bei der Brandbekämpfung von Feuerwehreinsatzkräften aufgenommen werden. Die Menge an inkorporierten PAK wurde dabei durch 1-Hydroxypyren (1-OHP) im Urin bestimmt. Dieses ist ein Stoffwechselprodukt des PAK Pyren. Hierzu liegen zahlreiche Studien zur Exposition aus der nicht beruflich belasteten Allgemeinbevölkerung wie auch von beruflich mit PAK exponierten Beschäftigten vor. Die durchschnittliche Exposition, die Variabilität der 1-OHP Exposition sowie die Maximalexposition bei im Voraus definierten Einsatzszenarien wurden ermittelt. Parameter wie die Tätigkeit oder Funktion während des Brandeinsatzes sowie verwendete persönliche Schutzausrüstung wurden dabei für die Bewertung mitberücksichtigt.

Einige der teilnehmenden Einsatzkräfte trugen die bereitgestellte Baumwollwäsche unter der Einsatzkleidung, bestehend aus Shirt, Hose, Haube, Handschuhen und Socken. Bei circa der Hälfte handelte es sich um Realeinsätze mit direkter Brandbekämpfung im Innenangriff mit Pressluftatmern, bei denen die Einsatzkräfte erfahrungsgemäß der höchsten Brandrauchexposition ausgesetzt sind. Die getragene Baumwollunterwäsche wurde nach dem Einsatz auf PAK untersucht. Dabei diente sie als Trägermaterial für durch die Schutzkleidung dringende PAK. Auf diese Weise können Rückschlüsse auf eine mögliche mangelnde Schutzwirkung der Einsatzkleidung gezogen werden.

Für zukünftige Forschungsfragen wurden die überschüssigen Urinbestände sowie Blutproben in der Biobank des IPA eingelagert, sofern die Teilnehmenden dazu im Vorfeld ihr Einverständnis gegeben haben. Mittels der Blutproben soll zu einem späteren Zeitpunkt die Belastung gegenüber Dioxinen ermittelt werden. Hierbei handelt es sich um einen chronischen Parameter, der eine Langzeitbelastung anzeigt. Zusätzlich soll in den eingelagerten Urinen zukünftig nach weiteren Stoffwechselprodukten von Verbrennungsprodukten gesucht werden, sofern entsprechende Biomonitoringmethoden zur Verfügung stehen.

Letztendlich können die Ergebnisse des Projekts zur Entwicklung von Strategien und Verhaltensweisen dienen bzw. auf den Bereich der Feuerwehr übertragen werden, um eine möglicherweise wirksamere Expositionsvermeidung im Einsatzalltag zu erreichen. Langfristig könnten dadurch berufsbedingte bzw. durch die ehrenamtliche Tätigkeit erworbene Krebserkrankungen vermieden werden.

3. Methodik

Studienablauf

Die Studie wurde als Querschnittstudie angelegt. Die Studienteilnehmer wurden dazu an einem definierten Zeitpunkt untersucht. Eine prospektive Erfassung war nicht vorgesehen, da lediglich eine Erfassung der akuten Exposition gegenüber PAK geplant war. Dies geschah anhand des im Urin ausgeschiedenen 1-OHP, einem Stoffwechselprodukt des PAK Pyren.

Eine Pilotphase zwischen Januar und April 2018 wurde bei der Feuerwehr Bochum durchgeführt. Die Pilotstudie diente dem Testen der Studienmaterialien und des Studienablaufs. Die Ergebnisse wurde bereits ausführlich beschrieben (Taeger et al. 2018) und sind nicht Gegenstand dieses Abschlussberichts. Aufgrund der Erfahrungen in der Pilotstudie wurden die Studieninstrumente an einigen Stellen nachgebessert und für die Hauptstudie optimiert.

Die Hauptphase der Studie wurde schließlich bei der Feuerwehr der Freien und Hansestadt Hamburg und der Feuerwehr Berlin durchgeführt. Dabei wurden sowohl Einsatzkräfte der Berufsfeuerwehr und der Freiwilligen Feuerwehr sowie Mitarbeitende der Atemschutz- und Schlauchwerkstätten in die Studie aufgenommen.

Ursprünglich war vorgesehen, vier Personen einer taktischen Grundeinheit der Feuerwehr zu untersuchen: Dies sind der Gruppenführer, der Maschinist und der Angriffstrupp bestehend aus zwei Personen. Es hatte sich allerdings schon nach Durchführung der Pilotstudie gezeigt, dass dieses Konzept nicht zu realisieren war, da nicht alle Gruppenmitglieder an der Pilotstudie im Rahmen eines Brandeinsatzes gleichzeitig teilnahmen. Daher wurde beschlossen, alle Einsatzkräfte, die vor Ort bei der Brandbekämpfung tätig waren, in die Studie einzuschließen, auch wenn Sie nicht eine gemeinsame Gruppe bildeten. Sofern realisierbar, trug eine Einsatzkraft des Angriffstrupps Baumwollwäsche unter der Einsatzkleidung. Diese Entscheidung wurde vor dem Hintergrund der zusätzlichen Wärmelast der Einsatzkraft überlassen.

In Abbildung 1 ist der Studienablauf schematisch dargestellt.

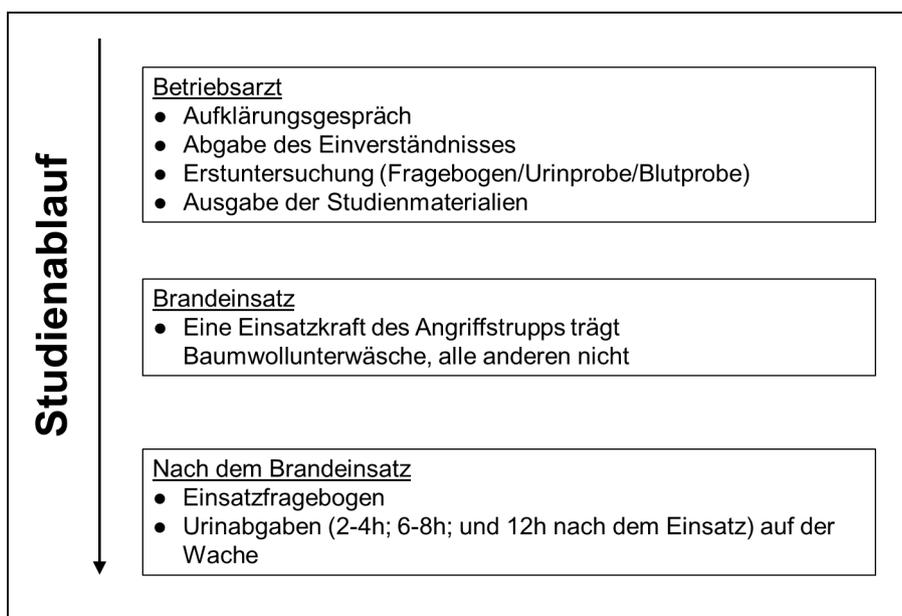


Abbildung 1: Studienablauf

Auf ausgewählten Wachen der Berufsfeuerwehren und der Freiwilligen Feuerwehren sowie den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten in Berlin und Hamburg wurden Informationsveranstaltungen durchgeführt. Bei diesen

wurden die Einsatzkräfte über Ziel und Zweck der Studie informiert und um ihre Teilnahme gebeten. Für weitere Informationen konnten die Einsatzkräfte sich an ihre zuständigen Betriebsärzte/innen wenden. Dieser/diese klärte die Teilnahmewilligen über die Studie auf. Mittels einer schriftlichen Einverständniserklärung wurde einer Teilnahme an der Studie zugestimmt. Zusätzlich konnten die Teilnehmenden noch in die Einlagerung ihrer überschüssigen Urinproben zwecks weiterer Analysen in der Biobank des IPA zustimmen sowie der Abnahme einer Blutprobe für eine spätere Dioxinanalyse. Nach der Einwilligung wurde ein Eingangsfragebogen von den Teilnehmenden ausgefüllt und eine Urinprobe sowie ggf. eine Blutprobe abgegeben. In dem Fragebogen wurden neben Beschäftigungszeiten im Feuerwehrdienst auch Lebensstilgewohnheiten abgefragt, da PAK ubiquitär in unserer Umwelt vorhanden sind und z. B. im Zigarettenrauch aber auch in der Nahrung vorkommen. Ebenfalls wurde vermerkt, ob innerhalb der letzten 48 Stunden ein Brandeinsatz erfolgte. Den Teilnehmenden wurde zudem ein Beutel mit allen weiteren benötigten Studienunterlagen ausgehändigt. Dieser enthielt den Einsatzfragebogen, drei Urinbecher für die Urinabgabe nach dem Brandeinsatz und den Probenlaufzettel. Alle Unterlagen waren mit einer Pseudonymisierungs-Nummer entsprechend des genehmigten Datenschutzkonzeptes versehen. Auf den beteiligten Wachen wurde in unterschiedlichen Konfektionsgrößen Baumwollunterbekleidung, bestehend aus Sturmhaube, langärmeligem Shirt, langer Hose, Socken und Handschuhen, in Kisten bereitgestellt, des Weiteren ein Gefrierschrank zur Zwischenlagerung der Urinproben und der Baumwollwäsche nach dem Einsatz.

Nach dem Brandeinsatz wurden die teilnehmenden Einsatzkräfte gebeten, zu drei verschiedenen Zeitpunkten (2-4h Stunden, 6-8h Stunden und 12 Stunden nach Rückkehr in die Wache) Urin in den bereitgestellten Urinbechern abzugeben und in den Gefrierschränken auf den Wachen einzulagern. Die Probenabnahme wurde auf einem Probenlaufzettel von den Einsatzkräften dokumentiert. Ebenfalls wurde ein Einsatzfragebogen ausgefüllt. In diesem Fragebogen wurde detailliert nach wichtigen Angaben zum Brand und zum Einsatz, wie z. B. Grad der Verrauchung und gewählte persönliche Schutzausrüstungen, gefragt. Beide Dokumente konnten auf den Wachen in versiegelte Urnen eingeworfen werden.

Wurde bei einem Einsatz Baumwollwäsche unter der Schutzkleidung getragen, so wurde diese zunächst getrocknet, danach ebenfalls nach Anleitung in Beutel verpackt und in die Gefrierschränke gelegt. Alle Kleidungsstücke waren nummeriert und die Nummern wurden auf dem Probenlaufzettel vermerkt, so dass eine Zuordnung zu den Urinen und den Einsatzfragebögen gegeben war.

Urinproben, Probenlaufzettel, Fragebögen sowie die getragene Baumwollwäsche wurden vom IPA mehrmals im Lauf der Studie von den Wachen und den Betriebsärzten abgeholt.

Neben den Einsatzkräften wurden auch Beschäftigte der Atemschutz- und Schlauchwerkstätten in die Studie mit einbezogen. Zudem ergab sich an einem Standort die Möglichkeit, Mitarbeiter einer Brandübungsanlage zu beproben. Der Ablauf war für diese Teilnehmenden ähnlich. Teilweise wurden die Unterlagen und Proben mit einem Kurierdienst ins IPA gebracht.

Das IPA bereitete die Studie vor und koordinierte den Ablauf. Ebenfalls führte das IPA die Feldarbeit durch. Das Biomonitoring wurde vom IPA und dem Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (ZfAM) durchgeführt. Das Institut für Arbeitsschutz (IFA) untersuchte die Baumwollwäsche gegenüber anhaftenden PAK.

Ethik und Datenschutz

Da es sich bei diesem Forschungsvorhaben um eine Studie am Menschen einschließlich der Forschung an Körpermaterialien handelt, war ein positiver Bescheid einer Ethik-Kommission notwendig. Die Studiendurchführung wurde durch das IPA koordiniert und entsprechend wurde ein Antrag an die Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Ruhr-Universität Bochum gestellt. Dieser wurde am 5.9.2017

genehmigt (Registrier-Nr. 17-6071). Ebenfalls wurde ein Datenschutzkonzept erstellt, das beschreibt, welche Daten im Rahmen der Studie von welchen Stellen verarbeitet werden und welche Maßnahmen zum Schutz dieser Daten durchgeführt werden. Das Ziel dieses Konzeptes ist es, die personenbezogenen Daten vor einem unberechtigten Zugriff zu schützen. Die Prüfung des Datenschutzkonzeptes erfolgte durch den für das IPA zuständigen Datenschützer der BG RCI. Am 19.7.2017 erfolgte die Freigabe.

Fallzahlberechnung

Im Studienprotokoll wurde eine Fallzahlberechnung durchgeführt, um die benötigte Anzahl der Studienteilnehmer für verlässliche statistische Aussagen zu ermitteln. Dabei wurde von der Hypothese ausgegangen, dass sich die 1-OHP Konzentration im Urin nach einem Brandeinsatz verdoppelt. Als Grundlage für die Berechnung diente eine norwegische Studie (Moen und Ovrebø 1997). Die Autoren untersuchten 13 Teilnehmer einer Brandschutzübung. Vor und nach der Übung bzw. den Übungstagen wurde 1-OHP im Urin gemessen. Vor der Übung lag die durchschnittliche Konzentration an 1-Hydroxypyren bei $0,06 \mu\text{mol/mol}$ ($\approx 0,03 \mu\text{g/g}$ Kreatinin) und nach der Übung bei $0,14 \mu\text{mol/mol}$ Kreatinin ($\approx 0,07 \mu\text{g/g}$ Kreatinin). Um diese ungefähre Verdopplung der Konzentration mit einer statistischen Power von 80 % abzusichern, werden zwischen 8 und 25 Studienteilnehmer benötigt, abhängig von der Korrelation zwischen den beiden Messungen: Eine Korrelation besteht, da die Konzentration an 1-Hydroxypyren vor und nach der Übung an denselben Personen gemessen wird.

Im Vorfeld wurden folgende Brandszenarien definiert, die untersucht werden sollten. Diese Szenarien decken die häufigsten Brände ab.

1. Brand im Wohngebäude
2. Großbrand mit massiver Rauchentwicklung
3. Brand in unterirdischen Anlagen
4. Vegetationsbrand
5. Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien
6. Einsatz mit besonderen Randbedingungen
7. Tätigkeiten im Bereich einer Atemschutz- und einer Schlauchwerkstatt

Beim siebten Szenario handelt es sich nicht um einen Brandeinsatz. Die Mitarbeitenden in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt reinigen die verunreinigten Gerätschaften. Daher ist dort ebenfalls mit einer PAK-Belastung zu rechnen. Aus diesem Grunde wurde dieses Szenario mit in die Untersuchungen aufgenommen. Um statistisch aussagekräftige Ergebnisse für einzelne Brandszenarios zu erhalten, müssten in diesen jeweils bis zu 25 Personen untersucht werden. Erhält man bei einem geringeren Stichprobenumfang ein statistisch signifikantes Ergebnis, ist dieses ebenfalls aussagekräftig. Daher wurde bei der Planung der Studie davon ausgegangen, dass mindestens 8 Einsätze pro Brandszenario benötigt werden, um eine mögliche Verdoppelung der 1-OHP Konzentration statistisch abzusichern. Es wurde allerdings im Vorfeld erwartet, dass nicht für jedes Szenario genügend Einsätze zustande kommen würden, da die Art der Einsätze nicht gesteuert werden kann.

Auswertung Biomonitoring

In den Urinproben wurde 1-OHP nach Flüssig/Flüssig-Extraktion und Derivatisierung mit einem Silylierungsmittel (MTBSTFA) mittels Gaschromatographie und Tandem-Massenspektrometrie und negativer chemischer Ionisation (GC-NCI-MS/MS) bestimmt. Die Bestimmungsgrenze (Limit of Quantification; LOQ) liegt bei dieser Methode bei $0,05 \mu\text{g}$ 1-OHP je Liter Urin. Messungen, die unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen, wurden mit der Hälfte der Bestimmungsgrenze ($0,025 \mu\text{g/L}$) in die Berechnungen eingeschlossen.

Für die Kreatinin-adjustierte Auswertung von 1-OHP im Urin wurde zusätzlich Kreatinin mittels der Jaffé-Methode bestimmt. In der Regel werden Urinproben in die Berechnung einbezogen, deren Kreatinin-Wert zwischen $0,3 \text{ g/L}$

und 3,0 g/L liegt und für eine normal hydrierte erwachsene Person steht (Bader et al. 2016). Da es sich in dieser Studie um Teilnehmende handelte, die in der Regel eine überdurchschnittliche Fitness und damit verbundene Muskelmasse aufweisen, wurden jedoch auch Kreatininwerte bis 4,0 g/L für die Auswertung berücksichtigt, so dass eine Kreatinin-Adjustierung für die Proben vorgenommen wurde, die im Bereich zwischen 0,3 – 4,0 g/L lagen. Werte, die außerhalb davon waren, sowie Werte unterhalb des LOQ für 1-OHP, wurden aus der Kreatinin-adjustierten Analyse ausgeschlossen, um eine Verfälschung der Ergebnisse aufgrund einer artifiziell eingeführten geringeren Variabilität zu vermeiden.

Für die Beurteilung der Biomonitoring-Werte wurde einerseits der „Biological Exposure Index“ (BEI®) der US-amerikanischen Gesellschaft ACGIH herangezogen. Dieser beträgt 2,5 µg/L und unterscheidet nicht zwischen Rauchern und Nichtrauchern. Der BEI® gibt diejenige Konzentration an 1-OHP im Urin an, unterhalb derer kein wesentlicher Beitrag einer beruflichen Exposition zur erbgutschädigenden (DNA-schädigenden) Wirkung von PAK nachgewiesen werden kann. Als zweiter Beurteilungswert wurde der „Biologische Arbeitsstoff-Referenzwert“ (BAR) der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (MAK-Kommission) der Deutschen Forschungsgemeinschaft herangezogen. Dieser beschreibt die (rein umweltbedingte) Hintergrundbelastung bei nicht beruflich gegenüber PAK exponierten Nichtrauchern und beträgt 0,3 µg/g Kreatinin. Er nimmt keinen Bezug auf gesundheitliche Effekte. Für Raucher existiert kein entsprechender BAR. Für die rauchenden Studienteilnehmer wurde daher im Rahmen dieser Studie aus dem Umweltsurvey 1998 (Becker et al. 1998) entsprechend das 95. Perzentil der rauchenden Personen aus der Allgemeinbevölkerung als Beurteilungsgröße für eine nicht beruflich bedingte Exposition gegenüber PAK festgesetzt. Dieser Wert liegt bei 0,73 µg/g Kreatinin.

Auswertung Baumwollunterbekleidung

Die im Einsatz getragene Baumwollunterwäsche wurde am IPA fotodokumentiert. An vorher definierten Stellen der Kleidung wurden runde Stoffstücke mit einem Durchmesser von 35 mm (Fläche: 9,6 cm²) herausgestanzt. Optional konnten diese Standardstanzpositionen durch zusätzliche Stoffstücke, sogenannte „Hotspots“, also in der Regel optisch auffällige, verschmutzte Stellen der Kleidung, ergänzt werden.

Im IFA wurden die ausgestanzten Stoffstücke zunächst gewogen, mit 2,5 mL Extraktionslösung (Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%)) versetzt, jeweils 60 Minuten im Ultraschallbad behandelt und auf einem Laborschüttler geschüttelt und abschließend durch einen PTFE-Spritzenvorsatzfilter filtriert. Die Analyse erfolgte mittels Hochleistungsflüssigchromatographie gekoppelt mit Diodenarray- und Fluoreszenzdetektion (HPLC-DAD-FLD Kopplung). Bestimmt wurden die 16 PAK aus der Liste der US Environmental Protection Agency (EPA), zuzüglich Benzo[e]pyren (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)). Die Detektion von Naphthalin, Acenaphthylen und Acenaphthen erfolgte mittels DAD; die der übrigen Verbindungen mittels FLD.

Der Fokus der Analytik lag auf der Quantifizierung der partikulär vorliegenden, schwerer flüchtigen (höhermolekularen) Vertreter der Stoffklasse, von denen viele entsprechend EU-GHS-Einstufung nach Verordnung (EG) 1272/2008 (CLP-Verordnung) als krebserzeugend und/oder mutagen eingestuft sind (Europäisches Parlament und Rat 31.12.2008). Da das Ausstanzen und eine Stabilisierung der Proben vor Ort direkt nach dem Brandeinsatz nicht praktikabel waren, musste die getragene Unterwäsche zunächst ins Labor des IPA transportiert werden, somit konnten bei leicht- und mittelflüchtigen PAK wie z. B. Naphthalin Minderbefunde aufgrund Flüchtigkeit nicht ausgeschlossen werden. Im Falle von Quantifizierungen leicht- und mittelflüchtiger PAK muss daher der Messwert als Mindestwert betrachtet werden und auch eine fehlende Quantifizierung in der Probe kann nicht zwingend mit dem Fehlen dieser PAK im Brandrauch oder auf der Kleidung gleichgesetzt werden. Ergebnisse leicht- und mittelflüchtiger PAK sind daher nur eingeschränkt bewertbar. Andererseits ist, im Vergleich zur inhalativen Aufnahme, der dermale Aufnahmeweg von leicht- und mittelflüchtigen PAK – aufgrund ihrer höheren Flüchtigkeit – ohnehin von untergeordneter Bedeutung.

Als Maß zur Bewertung der Wirkungsstärke von PAK-Gemischen, deren Zusammensetzung stark schwanken kann, wird oft Benzo(a)pyren (BaP) (CLP-Verordnung: Karzinogenität 1B, Keimzellmutagenität 1B, Reproduktionstoxizität 1B) als Leitsubstanz herangezogen (Europäisches Parlament und Rat 31.12.2008).

Zur Beurteilung der dermalen Exposition durch PAK bzw. deren Leitkomponente BaP gibt es keine Grenzwerte. Um die Höhe der PAK-Konzentrationen in den ausgestanzten Baumwollwäschestücken dennoch einordnen zu können, wurden als Bewertungsmaßstäbe die Verordnung (EU) 2018/1513 der Europäischen Kommission vom 10. Oktober 2018 und der Standard 100 by Oeko-Tex® zur Orientierung herangezogen. Diese Bewertungsmaßstäbe beziehen sich auf den Massengehalt an PAK in Textilien, daher erfolgte die Ergebnisangabe bezogen auf das Gewicht der ausgestanzten Stoffstücke (in ng/g).

Die Verordnung (EU) 2018/1513 beschreibt Beschränkungen für Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung bestimmter krebserzeugender, erbgutverändernder und fruchtbarkeitsgefährdender Stoffe der Kategorien 1A oder 1B in Kleidung und damit in Bezug stehendem Zubehör, unter anderem in Textilien und Schuhwaren. Nach dem 1. November 2020 gelten für die acht PAK Benz(a)anthracen, Chrysen, Benzo(e)pyren, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(j)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, BaP und Dibenz(a,h)anthracen Grenzwerte von jeweils 1 mg/kg (= 1 ppm). Ausgenommen von der Regelung sind jedoch u. a. gebrauchte Kleidung und persönliche Schutzausrüstungen (Europäisches Parlament und Rat 2018).

Der Standard 100 by Oeko-Tex® ist eine Kennzeichnung sowohl für Textilien als auch für Zubehör für die Fertigung von Bekleidung im Neuzustand. Das zugrundeliegende normative Dokument wird von der Internationalen Gesellschaft für Forschung und Prüfung auf dem Gebiet der Textil- und Lederökologie herausgegeben. Gemäß ihrem späteren Verwendungszweck werden die Artikel in Produktklassen eingeteilt. Für die Produktklasse II („Textilien mit Hautkontakt“) wird neben den Einzelgrenzwerten der oben erwähnten acht PAK ebenfalls in Höhe von 1 mg/kg (= 1 ppm) zusätzlich ein Summengrenzwert für 24 PAK in Höhe 10 mg/kg (=10 ppm) gelistet (Oeko-Tex®).

Einen Überblick über die analysierten PAK sowohl mit als auch ohne Messwerteinschränkung, ihre Einstufungen und Grenzwerte in den orientierenden Bewertungsmaßstäben gibt Tabelle 1 wieder.

Tabelle 1: Analytierte PAK, Einstufungen und orientierende Bewertungsmaßstäbe

| Gefahrstoff | CAS- Nummer | EU-GHS-Einstufung nach Verordnung (EG) 1272/2008 | | | Grenzwerte orientierende Bewertungsmaßstäbe | | Uneinge- schränkte Quantifi- zierung |
|-----------------------|----------------|--|----|----|--|--------------|---|
| | | K | M | R | Verordnung | Standard 100 | |
| | | | | | (EU) 2018/1513 | by Oeko-Tex® | |
| | | | | | [mg/kg] | [mg/kg] | |
| Naphthalin | 91-20-3 | 2 | | | | | nein |
| Acenaphthylen | 208-96-8 | | | | | | nein |
| Acenaphthen | 83-32-9 | | | | | | nein |
| Fluoren | 86-73-7 | | | | | | nein |
| Phenanthren | 85-01-8 | | | | | | nein |
| Anthracen | 120-12-7 | | | | | | nein |
| Fluoranthen | 206-44-0 | | | | | | nein |
| Pyren | 129-00-0 | | | | | | nein |
| Benz(a)anthracen | 56-55-3 | 1B | | | 1 | 1 | nein |
| Chrysen | 218-01-9 | 1B | 2 | | 1 | 1 | nein |
| Benzo(e)pyren | 192-97-2 | 1B | | | 1 | 1 | ja |
| Benzo(b)fluoranthen | 205-99-2 | 1B | | | 1 | 1 | ja |
| Benzo(k)fluoranthen | 207-08-9 | 1B | | | 1 | 1 | ja |
| Benzo(a)pyren | 50-32-8 | 1B | 1B | 1B | 1 | 1 | ja |
| Dibenzo(ah)anthracen | 53-70-3 | 1B | | | 1 | 1 | ja |
| Benzo(ghi)perylene | 191-24-2 | | | | | | ja |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren | 193-39-5 | 2 ¹ | | | | | ja |

¹ GESTIS –Stoffdatenbank (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) 2021)

Statistische Analyse

Die statistische Auswertung erfolgte über Häufigkeitsanalysen sowie Mittelwert-, Quantil- und Extremwert-Betrachtungen. Dabei wurden Einsatzszenarien sowie Funktion der Einsatzkraft miteinander verglichen. Ebenso wurden weitere Einsatzumstände in die Auswertung mit einbezogen. Bei weniger als drei Personen in einer Analysegruppe wurden aus Datenschutzgründen keine Ergebnisse dargestellt, da eine Re-Identifizierung möglich wäre (z. B. bei Teilnehmern aus der Atemschutzwerkstatt). Als Bezugswert wurde der Eingangsurin verwendet, da vor dieser Abgabe kein Brandeinsatz stattfinden sollte. Die Veränderung der 1-OHP-Werte in den nach dem Einsatz abgegebenen Urinen wurden dazu ins Verhältnis gesetzt. Zudem war ein weiteres wichtiges Beurteilungskriterium, ob die 1-OHP Konzentrationen nach dem Einsatz die Beurteilungsmaßstäbe BAR oder BEI® überschreiten.

In diesem Bericht werden ausschließlich deskriptive Ergebnisse dargestellt. Eine nicht unerhebliche Anzahl der Messwerte lag unterhalb der Bestimmungsgrenze und zudem konnten manche Werte nicht nach Kreatinin adjustiert werden, da der Kreatiningehalt außerhalb des Normbereichs lag. Hier bedarf es einer weiterführenden statistischen Modellierung, um entsprechende Schlussfolgerungen bezüglich der statistischen Signifikanz treffen zu können. Dies wird im Rahmen der wissenschaftlichen Publikationen erfolgen, die nach Abgabe dieses Berichtes verfasst werden.

Zudem ergab sich in Berlin die Möglichkeit, Beschäftigte der Berliner Feuerwehr- und Rettungsdienst-Akademie (BFRA), die in der Brandübungsanlage als Ausbilder tätig sind, zu beproben. Es nahmen acht Beschäftigte der BFRA an dem Projekt teil. Die Ergebnisse dieser Teilnehmer liegen noch nicht vor und sind dementsprechend nicht Teil dieses Abschlussberichts. Auch ließen sie sich keinem der vordefinierten Brandszenarien zuordnen. Die Ergebnisse dieser Analysen werden ebenfalls zeitnah in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht.

4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Übersicht über die Studienpopulation

Es erklärten sich 227 Beschäftigte der Feuerwehren in Berlin und Hamburg bereit, an der Studie teilzunehmen und unterschrieben während des Aufklärungsgesprächs beim Betriebsarzt eine entsprechende Einverständniserklärung. Jedoch gaben zehn der in die Studie Eingeschlossenen keinen Urin bei der Eingangsuntersuchung oder nach einem Einsatz ab. Daher wurden insgesamt 217 Beschäftigte der Feuerwehren in die Auswertung eingeschlossen.

In Hamburg wurden die beteiligten Wachen zwischen Mai 2018 und Juli 2020 beprobt. Es beteiligten sich drei Wachen der Berufsfeuerwehr sowie zwei Wachen der Freiwilligen Feuerwehr, zudem die Atemschutz- und Schlauchwerkstatt. In Berlin beteiligten sich vier Wachen der Berufsfeuerwehr und eine Wache der Freiwilligen Feuerwehr sowie die Atemschutz- und Schlauchwerkstatt. Die Beprobung dort fand zwischen Juli 2019 und September 2020 statt.

Abbildung 2 zeigt die kumulative Teilnehmerzahl einmal mit und ohne Beprobung im Rahmen eines Einsatzes oder der Tätigkeit in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt im Studienverlauf. Sie verdeutlicht, dass die Teilnehmerzahl kontinuierlich bis Oktober 2019 zunahm. Im Juli 2019 – nach dem Beginn der Studie in Berlin – kam es zu einer weiteren starken Zunahme der Teilnehmenden. Die Anzahl der Einsatzkräfte mit einem Brandeinsatz oder Beprobung in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt stieg stetig von Beginn der Studie an. Zum Abschluss der Studie waren von den ursprünglich 217 Beschäftigten der Feuerwehren immer noch 144 Teilnehmer (66%) ohne Brandeinsatz bzw. Beprobung.

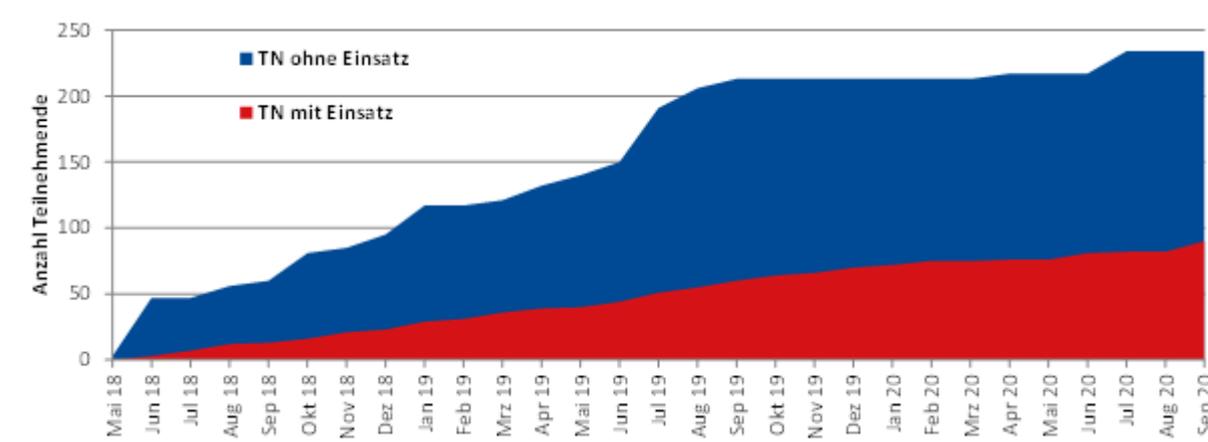


Abbildung 2: Kumulative Teilnehmerzahl im Studienverlauf mit und ohne Beprobung im Rahmen eines Einsatzes oder der Tätigkeit in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt

In Tabelle 2 ist die Aufteilung der Studienteilnehmer nach Angehörigkeit zur Berufsfeuerwehr, Freiwilliger Feuerwehr sowie Tätigkeit in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt aufgelistet. Der überwiegende Anteil besteht aus Angehörigen der Berufsfeuerwehr. Von den 209 Einsatzkräften gaben 69 an zudem an, dass sie sowohl in der Berufsfeuerwehr wie auch in der Freiwilligen Feuerwehr beschäftigt sind. In diesem Fall sind diese Personen der Berufsfeuerwehr zugeordnet worden, außer sie übten ihren im Projekt erfassten Einsatz im Rahmen ihrer Tätigkeit als freiwillige Einsatzkraft aus.

Tabelle 2: Aufteilung der Teilnehmenden nach Zugehörigkeit zu einer Funktionseinheit (n=217)

| Merkmal | Gesamt | Berlin | Hamburg |
|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Berufsfeuerwehr | 176 (81,1 %) | 74 (77,1 %) | 102 (84,3 %) |
| Freiwillige Feuerwehr | 33 (15,2 %) | 15 (15,6 %) | 18 (14,9 %) |
| Atemschutz- und Schlauchwerkstatt | 8 (3,7 %) | 7 (7,3 %) | 1 (0,8 %) |

In den folgenden Darstellungen / Auswertungen wird nicht mehr zwischen den Feuerwehren Berlin und Hamburg unterschieden, da generell untersucht werden sollte inwiefern Funktion, Ausrüstung, Verhalten und Hygiene einen Einfluss auf die Aufnahme von PAK haben. Weiterhin wurden in den folgenden Auswertungen drei Gruppen betrachtet: Einsatzkräfte der Berufsfeuerwehr, Einsatzkräfte der Freiwilligen Feuerwehr und Beschäftigte der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt.

In Tabelle 3 sind die Informationen aufgelistet, die über den Fragebogen bei der Eingangsuntersuchung erhoben wurden. An der Studie beteiligten sich einige wenige weibliche Einsatzkräfte. Die Teilnehmenden der Berufsfeuerwehr waren durchschnittlich fünf Jahre älter als diejenigen der Freiwilligen Feuerwehr. Die Mitarbeiter der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt wiesen einen noch um fünf Jahre höheren Altersdurchschnitt auf. Die Tätigkeitszeit war in beiden Gruppen von Einsatzkräften vergleichbar. In der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt war diese im Durchschnitt fünf Jahre länger. Der Anteil der Nie-Raucher war bei der Berufsfeuerwehr geringer als bei der Freiwilligen Feuerwehr. Dreiviertel der Teilnehmenden der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt waren Nie-Raucher.

Tabelle 3: Deskription der Eingangsuntersuchung (n=217)

| Merkmal | Gesamt | Einsatzkräfte | | Atemschutz- und Schlauchwerkstatt |
|-----------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|
| | | Berufsfeuerwehr | Freiwillige Feuerwehr | |
| Geschlecht (N, %) | | | | |
| männlich | 210 (96,8 %) | 171 (97,2 %) | 32 (97,0 %) | 7 (87,5 %) |
| weiblich | 7 (3,2 %) | 5 (2,8 %) | 1 (3,0 %) | 1 (12,5 %) |
| Alter | 36,3 | 36,9 | 31,5 | 41,4 |
| (MW, Min-Max)* | (20,3 – 56,7) | (22,7 – 56,7) | (20,3 – 45,5) | (26,5 – 53,0) |
| Tätigkeit als Einsatzkraft | 12,7 | 12,8 | 11,5 | 17,8 |
| (Jahre)† | (0,0 – 41,0) | (1,0 – 41,0) | (0,0-27,0) | (2,0 – 28,0) |
| Rauchstatus (N, %) | | | | |
| Nie-Raucher | 115 (53,0 %) | 89 (50,6 %) | 20 (60,6 %) | 6 (75,0 %) |
| Ex-Raucher | 43 (19,8 %) | 37 (21,0 %) | 5 (15,2 %) | 1 (12,5 %) |
| Raucher | 59 (27,2 %) | 50 (28,4 %) | 8 (24,2 %) | 1 (12,5 %) |

* Zum Studieneintritt; Geburtsdatum eines Teilnehmers fehlt

† Bei drei Teilnehmern fehlt diese Angabe

Weiterhin wurden über den Eingangsfragebogen Informationen zu persönlicher Hygiene, Ernährung, Lebensumständen, Schutzkleidung und Tätigkeiten mit einer PAK-Belastung innerhalb der letzten 24 Stunden erhoben. Diese Angaben dienen dazu, die 1-Hydroxypyren Messungen in den abgegebenen Urinen beurteilen zu können. Pflegeprodukte können z. B. PAK enthalten, wenn sie auf einer Mineralstoffbasis beruhen. Ebenso können Lebensmittel PAK enthalten bzw. bei deren Zubereitung entstehen (z. B. Grillen). Über diese Angaben wird in den weiteren Analysen berichtet, falls diese berücksichtigt wurden.

Übersicht über die Brandeinsätze

Insgesamt wurden 70 Brandeinsätze im Rahmen der Studie von den Einsatzkräften dokumentiert, 49 bei der Berufsfeuerwehr und 21 bei der Freiwilligen Feuerwehr. In den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten wurden sieben Arbeitstage dokumentiert.

Drei Einsatzkräfte gaben an, dass der Einsatz zwei verschiedene Szenarien beinhaltete. Davon hatten zwei Einsatzkräfte gleichzeitig einen Brandeinsatz im Wohngebäude und einen Großbrand mit massiver Rauchentwicklung. Eine Einsatzkraft hatte ebenfalls einen Brandeinsatz im Wohngebäude und gleichzeitig einen Fahrzeug- bzw. sonstigen Brand im Freien. Da alle drei Einsatzkräfte unter Atemschutz im Innenangriff tätig waren, werden diese Teilnehmer dem Szenario Wohnungsbrand zugeordnet. In Tabelle 4 sind die Einsatzszenarien aufgelistet.

Tabelle 4: Übersicht über die durchgeführten Einsätze nach Szenario (N=77)

| Einsatzszenario | Gesamt | Einsatzkräfte | |
|--|--------|-----------------|-----------------------|
| | | Berufsfeuerwehr | Freiwillige Feuerwehr |
| Brand im Wohngebäude | 50 | 34 (68 %) | 16 (32 %) |
| Großbrand mit massiver Rauchentwicklung | 4 | 3 (75 %) | 1 (25 %) |
| Brand in unterirdischen Anlagen | 1 | 1 (100 %) | — |
| Vegetationsbrand | 1 | — | 1 (100 %) |
| Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien | 14 | 11 (79 %) | 3 (21 %) |
| Einsatz mit besonderen Randbedingungen | 0 | — | — |
| Tätigkeiten im Bereich einer Atemschutz- und einer Schlauchwerkstatt | 7 | 7 (100 %) | — |

Insgesamt 60 der 70 Einsatzkräfte, deren Brandeinsätze dokumentiert wurden, hatten genau eine Funktion bzw. Tätigkeit bei der Brandbekämpfung angegeben. Bei den übrigen zehn wurden bis zu drei Funktionen insgesamt angegeben. So war ein Gruppenführer zudem noch im Innenangriff mit Pressluftatmer tätig oder nach einem Innenangriff noch mit Nachlöscharbeiten beschäftigt. Diese Personen werden in der folgenden Tabelle so zugeordnet, dass die Tätigkeit oder die Funktion berücksichtigt wird, unter der die höchste PAK Exposition zu vermuten ist. Bei den beiden obigen Beispielen ist dies z. B. der Innenangriff mit Pressluftatmer.

Tabelle 5: Funktion bzw. Tätigkeit während des Brandeinsatzes (n=70)

| Funktion/Tätigkeit* | Anzahl (Prozent) |
|----------------------------------|-------------------------|
| Gruppenführer/Einheitführer | 12 (17,1 %) |
| Maschinist | 2 (2,9 %) |
| Einsatzkraft mit Pressluftatmer | |
| Innenangriff | 31 (44,3 %) |
| Außenangriff | 2 (2,9 %) |
| Nachlösch/Aufräumarbeiten | 5 (7,1 %) |
| zur Brandbekämpfung (im Freien) | 14 (20,0 %) |
| Einsatzkraft ohne Pressluftatmer | |
| zur Brandbekämpfung | 1 (1,4 %) |
| außerhalb des Gefahrenbereichs | 3 (4,3 %) |

*Bei 10 Einsatzkräften Mehrfachnennungen. Hier wurde die Funktion/Tätigkeit mit der größten vermuteten Exposition angegeben

Bei 44 % der beprobten Einsätze fand ein Innenangriff mit Pressluftatmer statt (Tabelle 5). Weitere 20 % trugen zur Brandbekämpfung im Freien (Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien) einen Pressluftatmer. Weniger häufig wurden Pressluftatmer im Außenangriff oder bei Nachlösch- und Aufräumarbeiten eingesetzt. Somit verwendeten 52 Einsatzkräfte (74 %) einen Pressluftatmer, vier keinen Pressluftatmer (6 %). Zwölf Gruppenführer und zwei Maschinisten wurden ebenfalls beprobt.

Im Folgenden ist die Tätigkeit bzw. die Funktion bei den Wohnungsbränden aufgelistet (Tabelle 6). Auch hier zeigte sich eine ähnliche Verteilung. Die Wohnungsbrände waren mit 71 % das am häufigsten vorkommende Brandereignis.

Tabelle 6: Wohnungsbrand (N=50)

| Funktion/Tätigkeit* | Anzahl (Prozent) |
|----------------------------------|-------------------------|
| Gruppenführer/Einheitführer | 10 (20,0 %) |
| Maschinist | 2 (4,0 %) |
| Einsatzkraft mit Pressluftatmer | |
| Innenangriff | 30 (60,0 %) |
| Außenangriff | — |
| Nachlösch/Aufräumarbeiten | 5 (10,0 %) |
| Einsatzkraft ohne Pressluftatmer | |
| zur Brandbekämpfung | |
| außerhalb des Gefahrenbereichs | 3 (6,0 %) |

Die Funktionen bzw. Tätigkeiten der übrigen 20 Einsätze verteilen sich unterschiedlich auf die restlichen Brandszenarien. Bei den 14 Fahrzeug- bzw. sonstigen Bränden im Freien wurde immer ein Pressluftatmer getragen. Bei den vier Großbränden waren es je zwei Gruppenführer und zwei Einsatzkräfte mit Pressluftatmer im Außenangriff. Bei einem Brand in einer unterirdischen Anlage war ein Gruppenführer und beim Vegetationsbrand eine Einsatzkraft ohne Pressluftatmer zur Brandbekämpfung beprobt worden.

Übersicht über den Einsatz von Baumwollunterwäsche

Im Rahmen der Hauptphase des Projektes trugen insgesamt 17 der der Berufsfeuerwehr angehörenden Studienteilnehmer Baumwollunterwäsche.

Je sechs Einsatzkräfte trugen Baumwollunterwäsche bei Wohngebäudebränden und bei Fahrzeug- bzw. sonstigen Bränden im Freien. Des Weiteren wurden bei Tätigkeiten in einer Atemschutz- und Schlauchwerkstatt von drei Beschäftigten Baumwollshirts und -handschuhe getragen. Zwei Feuerwehreinsatzkräfte gaben keinen Einsatzfragebogen ab und können daher keinem Arbeitsbereich zugeordnet werden.

Nicht alle Einsatzkräfte trugen das vollständige Set an Kleidungsstücken. Insgesamt wurden 312 ausgestanzte Stoffstücke auf die 16 EPA-PAK und Benzo[e]pyren untersucht. Abbildung 3 liefert einen Überblick über die Stanzpositionen (Handschuhe und Socken fehlen) und Tabelle 7 deren Anzahl für die einzelnen Kleidungsstücke der Baumwollunterwäsche.

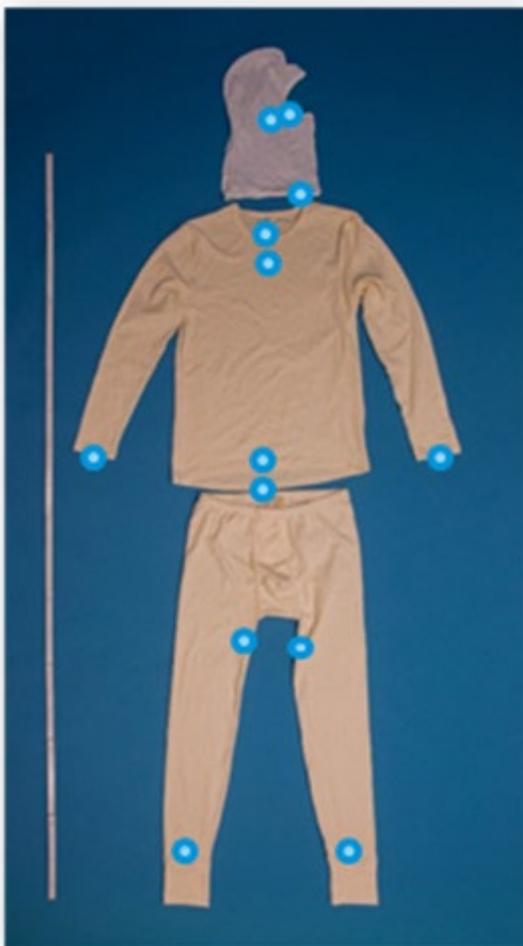


Abbildung 3: Überblick über Stanzpositionen in der Baumwollunterwäsche

Tabelle 7: Auflistung der untersuchten Stoffstücke und deren Stanzpositionen

| Kleidungsstück | Stanzposition | Gesamtzahl ausgestanzte Stoffstücke |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Baumwollshirt | Hals vorne | jeweils 17 |
| | Hals hinten | |
| | Ärmel links vorne | |
| | Ärmel rechts vorne | |
| | Bund vorne | |
| | Bund hinten | |
| Baumwollhose | Schritt vorne | jeweils 14 |
| | Schritt hinten | |
| | Schienbein links vorne | |
| | Schienbein rechts vorne | |
| Baumwollhaube | Augenhöhe links | jeweils 11 |
| | Augenhöhe rechts | |
| | Hals mittig | |
| Baumwollhandschuhe | Handrücken links | jeweils 14 |
| | Handrücken rechts | |
| | Daumen links | |
| | Daumen rechts | |
| Baumwollsocken | Bündchen links | jeweils 12 |
| | Bündchen rechts | |
| | Ferse links | |
| | Ferse rechts | |
| „Hotspots“ | Baumwollhose, Tascheneingriff links | 1 |
| | Baumwollhose, Tascheneingriff rechts | 1 |
| | Baumwollshirt, Ellbogen rechts | 1 |
| | Baumwollhaube, Hals hinten | 1 |
| | Baumwollhandschuh, Zeigefinger links | 3 |
| | Baumwollhandschuh, Zeigefinger rechts | 4 |
| | Baumwollhandschuh, Innenfläche links | 3 |
| Baumwollhandschuh, Innenfläche rechts | 3 | |
| Summe ausgestanzte Stoffstücke: | | 312 |
| Gesamtzahl Analysen: | | 5304 |

Ergebnisse der Biomonitoringanalysen

Eingangsuntersuchung

Die 1-OHP Konzentration der Eingangsuntersuchungen wurde als diejenige Konzentration angesehen, die Teilnehmende in ihrem Alltag ohne Brandeinsatz durch ihren Lebensstil aufnehmen. Diese sollten sich weitgehend im Bereich der Allgemeinbevölkerung bewegen und damit den jeweiligen BAR für Raucher oder Nichtraucher nicht überschreiten. Ein 5 %-Anteil an Überschreitungen im Gesamtkollektiv entspricht dabei immer noch einer mit der Allgemeinbevölkerung vergleichbaren Verteilung (s. Definition BAR, 95%-Perzentil).

Der Mittelwert, der Bereich (Minimum bis Maximum) sowie das 95 %-Perzentil an 1-OHP im Urin der Eingangsuntersuchung über alle Einsatzkräfte hinweg (n=217) lag bei 0,12 µg/L (<LOQ-3,41 µg/L) sowie 0,32 µg/L. Die entsprechenden Kreatinin-bezogenen Werte (n=127) bei 0,11 µg/g Kreatinin (<LOQ-1,10 µg/g Kreatinin) sowie 0,28 µg/g Kreatinin. Die Verteilung an 1-OHP im Urin bei der Eingangsuntersuchung entspricht damit derjenigen der Allgemeinbevölkerung und weist keinerlei Auffälligkeiten auf.

Bei den Einsatzkräften der Berufsfeuerwehr lagen 71 1-OHP Messungen (40,3 %) unterhalb des LOQ, bei den Einsatzkräften der Freiwilligen Feuerwehr waren dies 12 Proben (36,4 %). Somit lagen 40 % der Eingangsurine aller Einsatzkräfte unterhalb der Bestimmungsgrenze von 1-OHP. In der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt waren dies drei Viertel der Eingangsurine der acht Teilnehmenden. In die Auswertung der volumenbezogenen Werte gingen alle 217 Eingangsurine ein, wobei – wie oben dargestellt – diejenigen unterhalb LOQ mit der halben Bestimmungsgrenze berücksichtigt wurden.

Bei neun Einsatzkräften der Berufsfeuerwehr und drei der Freiwilligen Feuerwehr lag der Kreatiningehalt außerhalb des Normbereichs. Das sind 6 % der Eingangsurine der Einsatzkräfte. In der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt hatte nur eine Person eine Probe außerhalb des als regulär einzuschätzenden hydratisierten Bereichs. Der Kreatininwert der Mehrheit dieser Proben lag unter 0,3 g/L mit einer Ausnahme (4,9 g/L). Für die Kreatinin-adjustierte Auswertung fallen diese Messungen – ebenso diejenigen, die volumenbezogen unterhalb des LOQ lagen – weg. Kreatinin-adjustierte Werte konnten daher für 126 Eingangsurine bestimmt werden.

In Tabelle 8 werden die 1-OHP Messungen der Teilnehmenden deskriptiv dargestellt. Im Mittel liegen alle Messergebnisse der Eingangsuntersuchung unterhalb der zur Bewertung der 1-OHP Exposition herangezogenen Beurteilungswerte für 1-OHP von 0,30 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und 0,73 µg/g Kreatinin für Raucher sowie von 2,5 µg/L. Raucher weisen wie erwartet gegenüber Nichtrauchern im Durchschnitt höhere Werte auf. Die Teilnehmenden der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt sind unauffällig.

Insgesamt lagen die 1-OHP Werte bei der Eingangsuntersuchung im Bereich dessen, was man auch in der Allgemeinbevölkerung - abhängig vom Rauchstatus - erwarten würde. Nur die Werte von drei Teilnehmenden lagen oberhalb der jeweiligen Referenzwerte für Nichtraucher bzw. Raucher. Ein Wert lag mit 3,41 µg/L über dem BEI® und mit 1,10 µg/g Kreatinin über dem Wert aus dem Umweltsurvey. Diese Einsatzkraft ist Raucher und hatte zusätzlich angegeben, in den letzten 24 Stunden gebratenen Fisch oder Fleisch gegessen zu haben.

Tabelle 8: Ergebnisse des Biomonitorings für 1-Hydroxypyren (1-OHP) der Eingangsuntersuchung aller Teilnehmenden (n=217)

| Parameter Anzahl; Mittelwert (Minimum und Maximum) | Gesamt | | Berufsfeuerwehr | | Freiwillige Feuerwehr | | Atemschutz- und Schlauchwerkstatt | |
|--|--------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Alle Teilnehmer (N) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 217 | 0,12 (<LOQ – 3,41) | 176 | 0,10 (<LOQ – 1,21) | 33 | 0,21 (<LOQ – 3,41) | 8 | 0,04 (<LOQ – 0,12) |
| 1-OHP (µg/g Krea)* | 126 | 0,11 (0,02 – 1,10) | 104 | 0,10 (0,02 – 0,53) | 20 | 0,15 (0,03 – 1,10) | 2† | — |
| Nie-Raucher | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 115 | 0,08 (<LOQ – 1,21) | 89 | 0,08 (<LOQ – 1,21) | 20 | 0,06 (<LOQ – 0,17) | 6 | 0,04 (<LOQ – 0,12) |
| 1-OHP (µg/g Krea)* | 58 | 0,09 (0,02 – 0,53) | 49 | 0,09 (0,02 – 0,53) | 8 | 0,08 (0,03 – 0,12) | 1† | — |
| Ex-Raucher | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 43 | 0,08 (<LOQ – 0,21) | 37 | 0,08 (<LOQ – 0,21) | 5 | 0,10 (0,05 – 0,20) | 1† | — |
| 1-OHP (µg/g Krea)* | 26 | 0,08 (0,03 – 0,39) | 21 | 0,09 (0,03 – 0,39) | 5 | 0,05 (0,03 – 0,09) | 0 | — |
| Raucher | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 59 | 0,22 (<LOQ – 3,41) | 50 | 0,15 (<LOQ – 0,59) | 8 | 0,66 (0,07 – 3,41) | 1† | — |
| 1-OHP (µg/g Krea)* | 42 | 0,15 (0,02 – 1,10) | 34 | 0,12 (0,03 – 0,30) | 7 | 0,31 (0,04 – 1,10) | 1† | — |

* Die Angaben zu den Kreatinin-adjustierten Messungen beziehen sich nur auf Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,05 µg/L für 1-Hydroxypyren und Kreatininwerte im Bereich von 0,3 – 4,0 g/L. Daher wurden hier nur 126 Personen berücksichtigt.

† Bei weniger als 3 Personen wurden keine Ergebnisse dargestellt

LOQ: Bestimmungsgrenze von 1-Hydroxypyren (0,05 µg/L)

Biomonitoring Einsätze

Es wurden im Rahmen des Projekts 70 Brandeinsätze dokumentiert, und sieben Beschäftigte aus den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten gaben ebenfalls Urinproben nach ihrer Schicht ab. Dies geschah zu drei verschiedenen Zeitpunkten: Urinprobe 2 (2-4 Stunden nach dem Einsatz/Schichtende); Urinprobe 3 (6-8 Stunden nach dem Einsatz /Schichtende); Urinprobe 4 (12 Stunden nach dem Einsatz /Schichtende). Die Konzentration an 1-OHP in diesen Urinproben wird untereinander verglichen und auch der Eingangsuntersuchung (Urinprobe 1) vergleichend gegenübergestellt.

Von den 70 Einsatzkräften, die an einem Brandeinsatz teilnahmen, hatte jeweils eine Person keine Urinprobe zu einem der Zeitpunkt (2-4) abgegeben. Zusätzlich konnte eine Probe zum Zeitpunkt 4 aufgrund Störungen im Chromatogramm nicht ausgewertet werden. Somit lagen für 67 Einsatzkräfte zu allen vier Zeitpunkten Urinproben (n=268) vor, die auswertbar waren. Für die Kreatinin-adjustierte Auswertung konnten hingegen nicht alle Urinproben verwendet werden. So lagen zum ersten Zeitpunkt 30 Proben, zum Zeitpunkt 2 und Zeitpunkt 3 jeweils 13 Proben und 12 Proben zum Zeitpunkt 4 unterhalb der Bestimmungsgrenze (n=68). Außerhalb des Normalbereiches für Kreatinin lagen zusätzlich zum Zeitpunkt 1 vier Proben, zum Zeitpunkt 2 zwei Proben, zum Zeitpunkt 3 vier Proben und zum Zeitpunkt 4 eine Probe (Summe n=11). Alle Kreatininwerte, bis auf einen zum Zeitpunkt 2, lagen unterhalb der unteren Grenze von 0,3 g/L. Insgesamt konnten damit von den 268 volumenbezogenen Werten 168 in Kreatinin-bezogene Werte überführt werden.

Die Abbildung 4 zeigt die 1-OHP Konzentrationen zur Eingangsuntersuchung (Probe 1) und nach dem Einsatz bzw. nach Ankunft auf der Wache (Proben 2-4) aller 70 Teilnehmenden mit einem Einsatz. Ein Anstieg der mittleren Konzentration nach dem Einsatz ist zu sehen. Nur vereinzelt lagen 1-OHP Konzentrationen über dem BEI[®]. Die beiden erhöhten Werte über dem BEI[®] nach dem Brandeinsatz können einer Person zugeordnet werden. Allerdings zeigte sich insgesamt ein großer Streubereich. Bei der Eingangsuntersuchung (Probe 1) lagen 47% der Messungen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,05 µg/L, bei den drei folgenden Urinabgaben verringerte sich der Anteil auf 24 %, 22 % bzw. 21 % der Proben. Für die Kreatinin-adjustierten Konzentrationen können – wie bereits zuvor erläutert – nicht alle Werte verwendet werden. Nur wenige Werte lagen insgesamt über den Referenzwerten für Nichtraucher bzw. Raucher.

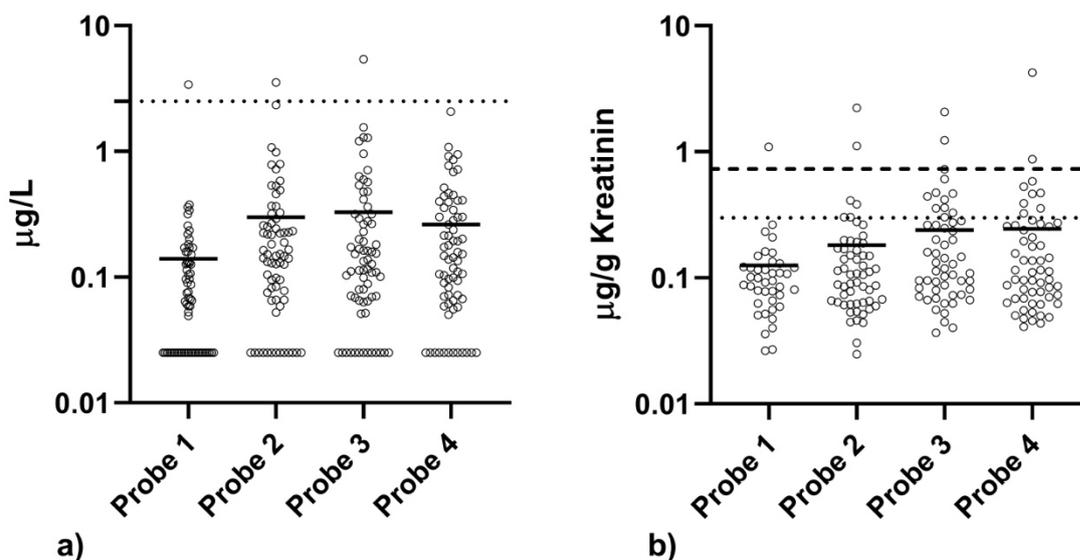


Abbildung 4: 1-OHP Konzentrationen (mit Mittelwerten) vor und nach den Einsätzen (alle Einsatzkräfte) a) in µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI[®]-Wert) und b) µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

Deutlicher wird dies in Abbildung 5, in der die Kreatinin-adjustierten Werte getrennt nach Nicht-/Ex-Rauchern und Rauchern dargestellt sind. Während nur ein Raucher nach dem Einsatz über dem entsprechenden Referenzwert liegt und wenige in dessen Nähe (Abbildung 5b), sieht man vor allem bei den Nie-/Ex-Rauchern zum Probenzeitpunkt 3 und 4 einige Messwerte oberhalb des BAR (Abbildung 5a). Der mittlere Anstieg der Kreatinin-adjustierten 1-OHP-Konzentration nach dem Einsatz fällt für die Nichtraucher und Ex-Raucher wesentlich deutlicher aus als für die Raucher. Insgesamt fällt auch der Anstieg der Kreatinin-adjustierten 1-OHP Konzentrationen deutlich höher aus als der Anstieg der volumenbezogenen Werte. Bei den Nichtrauchern und Ex-Rauchern weisen 12 von 53 Einsatzkräften nach dem Einsatz einen 1-OHP Wert über dem BAR auf und bei den 17 Rauchern lag eine Einsatzkraft über dem Beurteilungswert von 0,73 µg/L Allerdings liegen die meisten Werte auch nach dem Einsatz unter den Beurteilungsmaßstäben entsprechend des jeweiligen Rauchstatus.

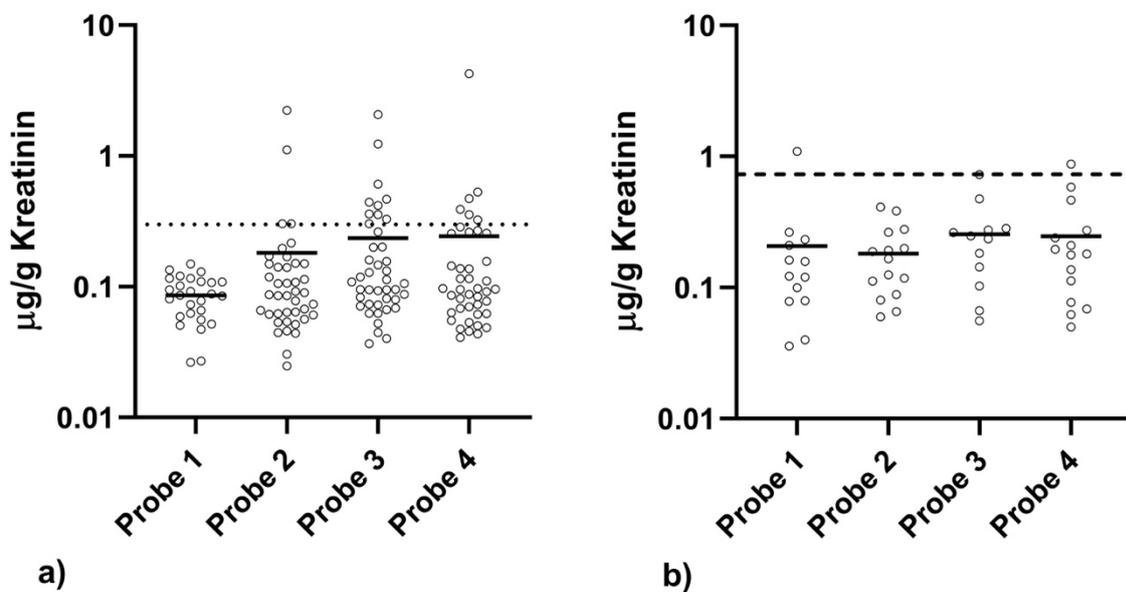


Abbildung 5: 1-OHP Konzentrationen (mit Mittelwerten) für a) Nichtraucher und Ex-Raucher und b) Raucher vor und nach den Einsätzen µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse des Biomonitorings der Einsatzkräfte mit einem Brandeinsatz aufgeführt. Im Vergleich zur Eingangsuntersuchung sieht man eine Verdoppelung der mittleren 1-OPH Konzentration von 0,14 µg/L auf 0,30 µg/L. Diese Konzentration bleibt im Mittel zum Zeitpunkt 3 gleich hoch und sinkt zwölf Stunden nach dem Einsatz bzw. Rückankunft auf die Wache ab.

Tabelle 9: Ergebnisse des Biomonitorings für 1-Hydroxypyren (1-OHP) aller Einsatzkräfte mit einem Brandeinsatz (N=70)

| Parameter | Urinprobe 1 Eingangsuntersuchung | | Urinprobe 2 2-4 h nach dem Einsatz | | Urinprobe 3 6-8h nach dem Einsatz | | Urinprobe 4 12h nach dem Einsatz | |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) |
| Alle (n = 70) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 70 | 0,14 (LOQ – 3,41) | 69 | 0,30 (LOQ – 3,55) | 69 | 0,33 (LOQ – 5,41) | 69 | 0,26 (LOQ – 2,07) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 40 | 0,13 (0,03 – 1,10) | 55 | 0,18 (0,03 – 2,23) | 55 | 0,23 (0,04 – 2,07) | 57 | 0,25 (0,04 – 4,26) |
| Nie-Raucher (n = 17) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 41 | 0,07 (LOQ – 0,26) | 40 | 0,26 (LOQ – 3,55) | 41 | 0,34 (LOQ – 5,41) | 40 | 0,24 (LOQ – 2,07) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 21 | 0,08 (0,03 – 0,15) | 30 | 0,17 (0,03 – 2,23) | 33 | 0,23 (0,04 – 2,07) | 31 | 0,26 (0,04 – 4,26) |
| Ex-Raucher (n = 12) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 12 | 0,07 (LOQ – 0,20) | 12 | 0,35 (LOQ – 2,34) | 12 | 0,31 (LOQ – 1,28) | 12 | 0,31 (LOQ – 0,91) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 6 | 0,09 (0,05 – 0,12) | 10 | 0,22 (0,05 – 1,11) | 10 | 0,24 (0,06 – 0,61) | 11 | 0,20 (0,04 – 0,53) |
| Raucher (n = 17) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 17 | 0,35 (LOQ – 3,41) | 17 | 0,36 (LOQ – 1,07) | 16 | 0,31 (LOQ – 1,20) | 17 | 0,29 (LOQ – 0,95) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 13 | 0,21 (0,04 – 1,10) | 15 | 0,18 (0,06 – 0,41) | 12 | 0,26 (0,06 – 0,73) | 15 | 0,25 (0,05 – 0,87) |

* Die Angaben zu den Kreatinin-adjustierten Messungen beziehen sich nur auf Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze 0,05 µg/L für 1-Hydroxypyren und Kreatininwerte im Bereich von 0,3 – 4,0 g/L.
LOQ: Bestimmungsgrenze von 1-Hydroxypyren (0,05 µg/L)

Im Folgenden werden ausgewählte Einsatzkräfte mit auffälligen Biomonitoring-Ergebnissen dargestellt und anamnestisch unter Zuhilfenahme ihrer Fragebogendaten detaillierter betrachtet.

Die Person, die zur Eingangsuntersuchung einen hohen Wert an 1-OHP von 3,41 µg/L aufwies, lag nach ihrem Einsatz wieder deutlich unterhalb des BEI®. Die in diesem Kollektiv beobachteten höchsten beiden Einzelwerte (Zeitpunkte 2 und 3 nach dem Einsatz) traten bei einer weiteren Einsatzkraft auf. Diese Person ist Nicht-Raucher. In Abbildung 6 ist der Verlauf der 1-OHP Messungen dargestellt. Beide Werte lagen über dem BEI®. Zum Zeitpunkt 3 betrug diese Konzentration mit 5,41 µg/L mehr als Doppelte des BEI®. Die Einsatzkraft hatte zum Zeitpunkt 4 keine Urinprobe abgeben. Diese Person gab an, sowohl bei einem Brand im Wohngebäude als auch bei einem Großbrand mit massiver Rauchentwicklung eingesetzt gewesen zu sein und über 60 Minuten unter Atemschutz mit Brandbekämpfung im Innenangriff und Nachlöscharbeiten beschäftigt war.

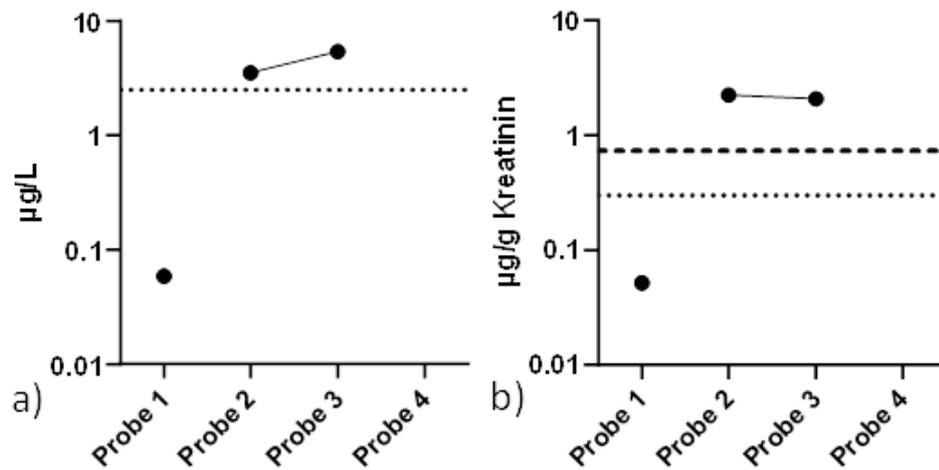


Abbildung 6: Verlauf der 1-OHP Konzentrationen einer Einsatzkraft nach Brand in einem Wohngebäude in µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) und b) µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g)

Keine weitere Einsatzkraft hatte 1-OHP Konzentrationen oberhalb des BEI® von 2,5 µg/L.

Zum Zeitpunkt 2 wurde bei einer weiteren Einsatzkraft eine relativ hohe Konzentration von 2,34 µg/L gemessen. Die Konzentrationen der folgenden Urinabgaben waren dagegen unauffällig. Diese Person hatte einen Einsatz bei einem Brand in unterirdischen Anlagen mit Rauchexposition als Gruppenführer und trug keinen Atemschutz (Abbildung 7a).

Eine dritte Einsatzkraft wies zu den Zeitpunkten 3 (1,55 µg/L) und 4 (2,07 µg/L) relativ hohe 1-OHP Konzentrationen auf. Diese Einsatzkraft hatte einen Einsatz bei einem Brand im Wohngebäude, befand sich jedoch (entsprechend ohne Pressluftatmer) außerhalb des Gefahrenbereiches (Abbildung 7c). Im Fragebogen gab diese Einsatzkraft jedoch an, die kalte Brandstelle für 20 Minuten (ebenfalls ohne Atemschutz) betreten zu haben.

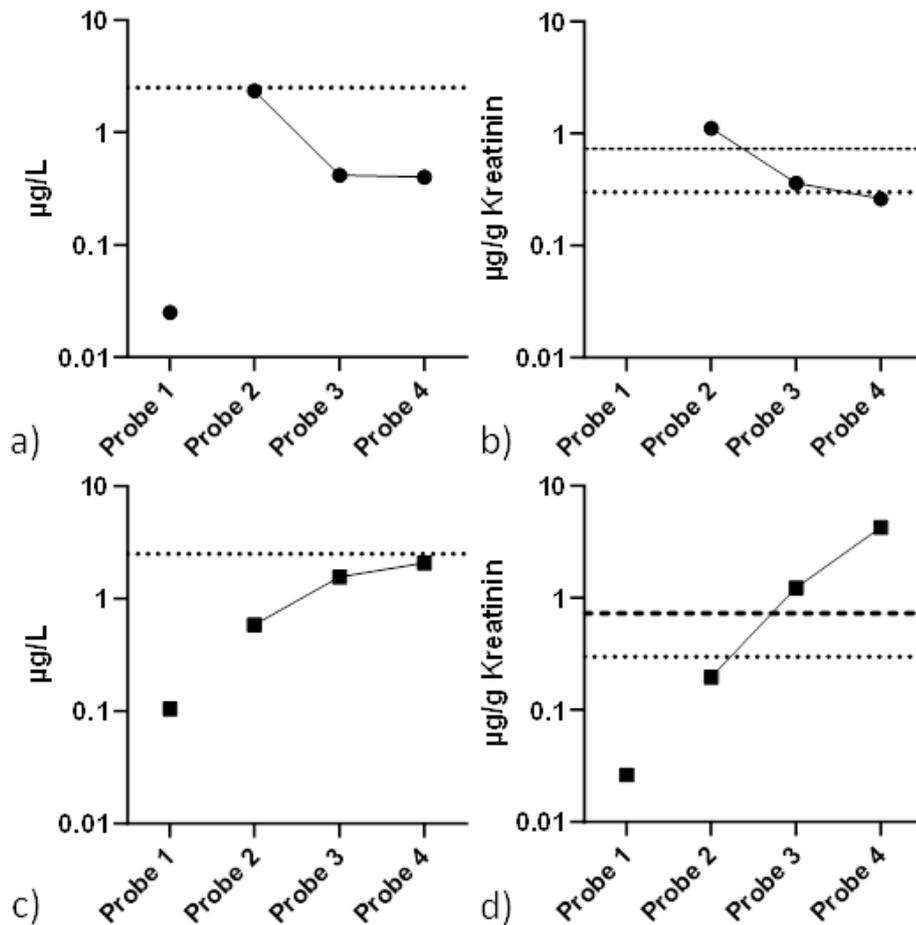


Abbildung 7: Verlauf der 1-OHP-Konzentrationen nach einem Brandeinsatz a) Gruppenführer ohne Pressluftatmer mit Rauchexposition bei einem Brand in einer unterirdischen Anlage in $\mu\text{g/L}$; b) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin; c) Einsatzkraft ohne Pressluftatmer außerhalb des Gefahrenbereiches bei Brand im Wohngebäude in $\mu\text{g/L}$ (Linie bei 2,5 $\mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert); d) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin)

Die Kreatinin-adjustierten Werte aller Feuerwehrlaute mit einem Einsatz zeigen – ähnlich den volumen-bezogenen Werten – ebenfalls einen Anstieg nach Beendigung des Einsatzes (Tabelle 9). Auch hier kommt es ungefähr zu einer Verdoppelung des Mittelwertes, in diesem Fall auf 0,25 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin im Vergleich zur Eingangsuntersuchung. Die höchsten Kreatinin-adjustierten Werte weisen wiederum diejenigen Einsatzkräfte aus, die auch schon zuvor hohe volumenbezogene Werte hatten, so dass insgesamt – wenn auch nicht in ihren absoluten Werten – volumen- und Kreatinin-bezogene Werte gut übereinstimmen und interpretiert werden können. So hat die nichtrauchende Person mit dem Einsatz beim Wohnungsbrand/Großbrand auch hier zu den Zeitpunkten 2 und 3 die jeweils höchsten Kreatinin-adjustierten Werte (Abbildung 6b). Die Einsatzkraft mit einem Einsatz in unterirdischen Anlagen (Ex-Raucher) weist wiederum zum Zeitpunkt 2 einen höheren Kreatinin-adjustierten Wert von 1,11 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin auf (Abbildung 7b) als andere Einsatzkräfte. Die Werte zu den Zeitpunkten 3 und 4 sind dagegen im Vergleich zu den volumenbezogenen Werten wieder deutlich geringer (0,36 resp. 0,26 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin), was mit den entsprechend höheren Kreatinin-Werten und damit dem geringer hydratisierten Zustand der Einsatzkraft erklärt werden kann. Die Einsatzkraft mit einem Einsatz bei einem Brand im Wohngebäude ohne Pressluftatmer außerhalb des Gefahrenbereichs ist Nichtraucher und wies sowohl zum Zeitpunkt 3 (1,23 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin) wie auch zum Zeitpunkt 4 (4,26 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin) hohe Werte auf, die deutlich über dem BAR liegen (Abbildung 7d). Feuerwehreinsatzkräfte können, wie diese Studie zeigt, unter Umständen einsatzbedingt einen gering hydratisierten Status, aber immer noch im Normalbereich liegende Kreatinin-Werte

aufweisen. Aus diesem Grund ist es wichtig, die 1-OHP-Konzentrationen wie bei anderen Hitze­arbeits­plätzen auf Kreatinin zu beziehen und entsprechend zu interpretieren.

Insgesamt zeigte sich der mittlere Anstieg der Kreatinin-adjustierten Werte insbesondere bei Nicht­rauchern und Ex-Rauchern wesentlich deutlicher als bei Rauchern. Dennoch verblieben im Mittel die Werte unter dem BAR von 0,30 µg/g Kreatinin von Nicht­rauchern. Raucher weisen ähnliche mittlere Werte auf. Allerdings lagen hier die Ausgangswerte aus der Eignungs­untersuchung rauchbedingt bereits wesentlich höher, so dass insgesamt kein einsatzbedingter Anstieg der PAK-Exposition in Form von 1-OHP mehr beobachtet werden konnte.

Von den Nicht­rauchern und Ex-Rauchern lagen insgesamt zum Zeitpunkt 2 vier Einsatzkräfte, zum Zeitpunkt 3 zehn Einsatzkräfte und zum Zeitpunkt 4 sechs Einsatzkräfte über dem BAR von 0,30 µg/g Kreatinin. Von den Rauchern lag lediglich eine einzige Einsatzkraft zum Zeitpunkt 4 über dem Wert von 0,73 µg/g Kreatinin.

In Tabelle 10 sind die entsprechenden Biomonitoringwerte für die Teilnehmenden aus den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten aufgeführt. Insgesamt gaben sieben Personen ihre Probe nach einem Arbeitstag ab. Da fünf davon Nicht­raucher und jeweils einer Ex-Raucher und Raucher sind, wird im Weiteren nicht nach Rauchstatus unterschieden, im Einzelfall – sofern nötig zur Interpretation der erhaltenen Werte – aber auf den Rauchstaus eingegangen. Sechs der sieben Urinproben der Eingangs­untersuchung wiesen einen Wert unter der Bestimmungsgrenze auf. Zum Zeitpunkt 2 waren es fünf Proben und jeweils vier Proben zu den Zeitpunkten 3 und 4. Eine Person hatte keine Urinprobe zum Zeitpunkt 4 abgegeben. Lediglich in einer Probe der Erst­untersuchung lag ein niedriger Kreatiningehalt vor. Hier lag die 1-OHP Konzentration auch unter der Bestimmungsgrenze. Da ein Großteil der Werte unter der Bestimmungsgrenze lag, konnten nur für sehr wenige Messungen die Kreatinin-adjustierten 1-OHP Konzentrationen berechnet werden, so dass insgesamt eine über die Darstellung dieser Einzelwerte hinausgehende Interpretation von Kreatinin-bezogenen Werten nicht sinnvoll erscheint. Eine Darstellung der volumen- und Kreatinin-bezogenen Messwerte erfolgt in Abbildung 8.

Tabelle 10: Ergebnisse Biomonitoring aller Beschäftigten in den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten (N=7)

| Parameter | Urinprobe 1 Eingangsuntersuchung | | Urinprobe 2 2-4 h nach dem Einsatz | | Urinprobe 3 6-8h nach dem Einsatz | | Urinprobe 4 12h nach dem Einsatz | |
|---------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) |
| Alle (n = 7) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 7 | 0,03 (LOQ – 0,06) | 7 | 0,03 (LOQ – 0,06) | 7 | 0,05 (LOQ – 0,09) | 6 | 0,05 (LOQ – 0,10) |

* Die Angaben zu den Kreatinin-adjustierten Messungen beziehen sich nur auf Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,05 µg/L für 1-Hydroxypyren (1-OHP) und Kreatininwerte im Bereich von 0,3 – 4,0 g/L.
LOQ: Bestimmungsgrenze von 1-OHP (0,05 µg/L)

Die 1-OHP Konzentrationen steigen zwar nach der Beendigung der Schicht in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt leicht an, bleiben aber auch hier deutlich unterhalb des BEI® und des BAR.

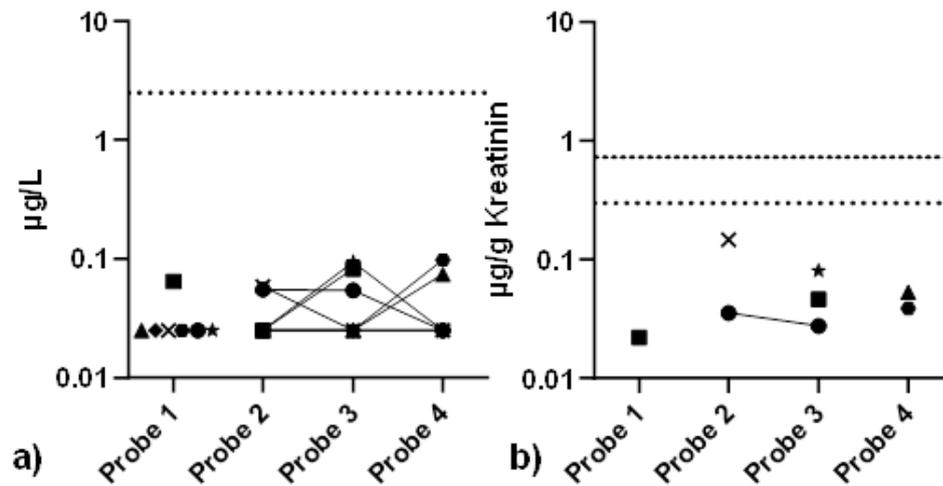


Abbildung 8: Verlauf der 1-OHP-Konzentration im Urin nach Tätigkeit in einer Atemschutz- und Schlauchwerkstatt in a) $\mu\text{g/L}$ (Linie bei $2,5 \mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in $\mu\text{g/g Kreatinin}$ (Linien bei BAR von $0,3 \mu\text{g/g Kreatinin}$ für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei $0,73 \mu\text{g/g Kreatinin}$)

Die volumen- und Kreatinin-bezogenen 1-OHP Messwerte abhängig vom Brandszenario sind in Tabelle 11 dargestellt. Sowohl bei Bränden im Wohngebäude als auch bei Großbränden mit massiver Rauchentwicklung zeigt sich ein Anstieg der mittleren 1-OHP nach dem Einsatz. Aber auch hier liegen die mittleren Werte – mit Ausnahme der zuvor beschriebenen Einzelfälle – deutlich unter dem BEI® bzw. BAR. Bei Fahrzeug- bzw. sonstigen Bränden im Freien ist dagegen nur bei Kreatinin-bezogenen Konzentrationen ein Anstieg zu sehen. Dieser fällt sehr gering aus und ist letztendlich nur zum Zeitpunkt 2 (also 2-4 Stunden nach dem Einsatz) erkennbar. Bei Betrachtung der volumenbezogenen Werte lag bereits zur Eingangsuntersuchung die mittlere Konzentration höher als nach dem Einsatz. Da insgesamt nur ein Vegetationsbrand und ein Brand in unterirdischen Anlagen auftrat, wurden diese nicht in der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 11: Ergebnisse des Biomonitorings an 1-Hydroxypyren (1-OHP) aller Einsatzkräfte nach Brandszenario (N=70)

| Parameter | Urinprobe 1 Eingangsunteruchung | | Urinprobe 2 2-4 h nach dem Einsatz | | Urinprobe 3 6-8h nach dem Einsatz | | Urinprobe 4 12h nach dem Einsatz | |
|--|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) |
| Brand im Wohngebäude (n = 50) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 50 | 0,10 (LOQ – 0,38) | 49 | 0,29 (LOQ – 3,55) | 49 | 0,38 (LOQ – 5,41) | 49 | 0,28 (LOQ – 2,07) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 29 | 0,11 (0,03 – 0,26) | 39 | 0,19 (0,03 – 2,23) | 40 | 0,27 (0,04 – 2,07) | 42 | 0,28 (0,04 – 4,26) |
| Großbrand mit massiver Rauchentwicklung (n = 4) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 4 | LOQ (LOQ – LOQ) | 4 | 0,19 (LOQ – 0,49) | 4 | 0,12 (LOQ – 0,36) | 4 | 0,07 (LOQ – 0,19) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 4 | LOQ (LOQ – LOQ) | 3 | 0,16 (0,07 – 0,30) | 2† | – | 1† | – |
| Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien (n = 14) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 14 | 0,33 (LOQ – 3,41) | 14 | 0,23 (LOQ – 1,07) | 14 | 0,22 (LOQ – 0,96) | 14 | 0,24 (LOQ – 1,08) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 10 | 0,19 (0,04 – 1,10) | 12 | 0,11 (0,05 – 0,38) | 11 | 0,15 (0,06 – 0,48) | 12 | 0,17 (0,04 – 0,58) |

* Die Angaben zu den Kreatinin-adjustierten Messungen beziehen sich nur auf Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,05 µg/L für 1-Hydroxypyren (1-OHP) und Kreatininwerte im Bereich von 0,3 – 4,0 g/L.

† Keine Darstellung da insgesamt weniger als drei Personen in dem Szenario

LOQ: Bestimmungsgrenze von 1-OHP (0,05 µg/L)

Die Tabelle 12 zeigt die 1-OHP Konzentrationen nach Tätigkeiten. Sowohl die Gruppenführer/Einheitsführer als auch die Einsatzkräfte mit Pressluftatmer im Innenangriff zeigten eine mittlere Zunahme der 1-OHP Konzentration nach dem Brandeinsatz, wobei sich dieser Anstieg im Falle der Einsatzkräfte mit Pressluftatmer zur Brandbekämpfung nur im Kreatinin-adjustierten Messwertverlauf zeigte. Die Einsatzkräfte mit Pressluftatmer bei Nachlösch-/ Aufräumarbeiten zeigten nur bei den volumenbezogenen Messwerten eine Erhöhung der mittleren Konzentration. Die deutlichste Zunahme der mittleren 1-OHP Konzentrationen wiesen die Einsatzkräfte ohne Pressluftatmer außerhalb des Gefahrenbereichs auf. Hinsichtlich der Tätigkeiten bei Maschinisten (N=2), Einsatzkräften ohne Pressluftatmer zur Brandbekämpfung (N=1) und Einsatzkräften mit Pressluftatmern im Außenangriff (N=2) waren jeweils zu wenig Einsatzkräfte vertreten, so dass auf die Darstellung der Ergebnisse verzichtet wird.

Tabelle 12: Ergebnisse des Biomonitoring n 1-Hydroxypyren (1-OHP) aller Einsatzkräfte nach Tätigkeit im Brandeinsatz (N=70)

| Parameter | Urinprobe 1 Eingangsuntersuchung | | Urinprobe 2 2-4 h nach dem Einsatz | | Urinprobe 3 6-8h nach dem Einsatz | | Urinprobe 4 12h nach dem Einsatz | |
|--|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) | Anzahl | Mittelwert (Min - Max) |
| Gruppenführer/Einheitsführer (n = 12) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 12 | 0,09 (LOQ – 0,34) | 12 | 0,41 (LOQ – 2,34) | 12 | 0,16 (LOQ – 0,42) | 12 | 0,21 (0,07 – 0,52) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 6 | 0,10 (0,05 – 0,21) | 10 | 0,23 (0,06 – 1,11) | 11 | 0,15 (0,05 – 0,36) | 12 | 0,16 (0,04 – 0,87) |
| Einsatzkraft mit Pressluftatmer im Innenangriff (n = 31) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 31 | 0,11 (LOQ – 0,38) | 30 | 0,37 (LOQ – 3,55) | 30 | 0,51 (LOQ – 5,41) | 30 | 0,31 (LOQ – 0,95) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 18 | 0,12 (0,05 – 0,26) | 25 | 0,23 (0,04 – 2,23) | 26 | 0,31 (0,037 – 2,07) | 26 | 0,20 (0,05 – 0,53) |
| Einsatzkraft mit Pressluftatmer Nachlöscher/Aufräumarbeiten (n = 5) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 5 | 0,05 (LOQ – 0,11) | 5 | 0,11 (0,05 – 0,26) | 5 | 0,10 (LOQ – 0,16) | 5 | 0,14 (LOQ – 0,39) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 2 | 0,08 (0,04 – 0,12) | 5 | 0,08 (0,03 – 0,14) | 4 | 0,10 (0,06 – 0,11) | 4 | 0,09 (0,05 – 0,14) |
| Einsatzkraft mit Pressluftatmer zur Brandbekämpfung (n = 14) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 14 | 0,33 (LOQ – 3,41) | 14 | 0,23 (LOQ – 1,07) | 14 | 0,22 (LOQ – 0,96) | 14 | 0,24 (LOQ – 1,08) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 10 | 0,19 (0,04 – 1,10) | 12 | 0,11 (0,05 – 0,38) | 11 | 0,15 (0,06 – 0,48) | 12 | 0,17 (0,04 – 0,58) |
| Einsatzkraft ohne Pressluftatmer außerhalb des Gefahrenbereichs (n = 3) | | | | | | | | |
| 1-OHP (µg/L) | 3 | 0,09 (LOQ – 1,13) | 3 | 0,21 (LOQ – 0,58) | 3 | 0,53 (LOQ – 1,55) | 3 | 0,71 (LOQ – 2,07) |
| 1-OHP (µg/g Kreatinin*) | 2 | 0,06 (0,03 – 0,09) | 1† | – | 1† | – | 1† | – |
| Einsatzkraft ohne Pressluftatmer zur Brandbekämpfung (n = 1)† | | | | | | | | |
| Maschinist (n = 2)† | | | | | | | | |
| Einsatzkraft mit Pressluftatmer Aussenangriff (n = 2)† | | | | | | | | |

* Die Angaben zu den Kreatinin-adjustierten Messungen beziehen sich nur auf Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,05 µg/L für 1-Hydroxypyren (1-OHP) und Kreatininwerte im Bereich von 0,3 – 4,0 g/L.

† Keine Darstellung, da insgesamt weniger als drei Personen in dem Szenario

LOQ: Bestimmungsgrenze von 1-OHP (0,05 µg/L)

1-Hydroxypyren Verläufe einzelner Einsätze

In den Abbildung 9 bis Abbildung 22 sind beispielhaft Ergebnisse der Einsätze dargestellt, bei denen mehr als eine Einsatzkraft im Brandeinsatz war bzw. einzelne Gegebenheiten wurden herausgearbeitet.

Abbildung 9 zeigt die 1-OHP-Konzentration nach einem Wohnungsbrand, bei dem beide Einsatzkräfte mit Pressluftatmer im Innenangriff eingesetzt waren. Die mit einem Punkt (●) dargestellte Einsatzkraft war Raucher, die andere ist Nichtraucher. Bei beiden Einsatzkräften wird der BAR mit 0,36 µg/g Kreatinin bzw. der Referenzwert für Raucher mit 0,73 µg/g Kreatinin jeweils minimal überschritten. Im Fragebogen wurde der Rauch im Brandobjekt von beiden Einsatzkräften schwarz mit einer Sichtweite von <1m beschrieben. Die Einsatzdauer mit

Atemschutz wurde im Fragebogen mit 25 Minuten beschrieben. Aufgrund des parallelen Verlaufs der 1-OHP Konzentrationen zwischen den beiden Einsatzkräften kann von einem Zusammenhang mit dem Brandereignis ausgegangen werden.

Die in Abbildung 9 dargestellte nichtrauchende Einsatzkraft (■) hat ein vollständiges Set der im Rahmen der Studie bereitgestellten Baumwollwäsche getragen. In ausgestanzten Stoffstücken aus Standardstanzpositionen der Handschuhe, des Shirts und der Hose konnten PAK quantifiziert werden. Während die Stoffstücke aus den Handschuhen nur schwach belastet waren, konnte im linken Ärmel des Shirts eine breitere Palette von PAK in überwiegend mittleren Konzentrationen bestimmt werden. Die Ergebnisse dieses Stoffstücks sind in Tabelle 18 aufgeführt. Neben den beiden Schienbeinen, die gering bis mittelstark mit PAK belastet waren, wurden in der Hose in einem zusätzlich aus dem rechten Tascheneingriff ausgestanzten Hotspot eine Vielzahl von PAK mit höheren Konzentrationen quantifiziert. Einen optischen Eindruck über den Verschmutzungsgrad der Hose mit Darstellung der Stanzpositionen gibt Abbildung 25 wieder. In Tabelle 22 sind die Ergebnisse des Stoffstücks aus dem rechten Tascheneingriff aufgelistet.

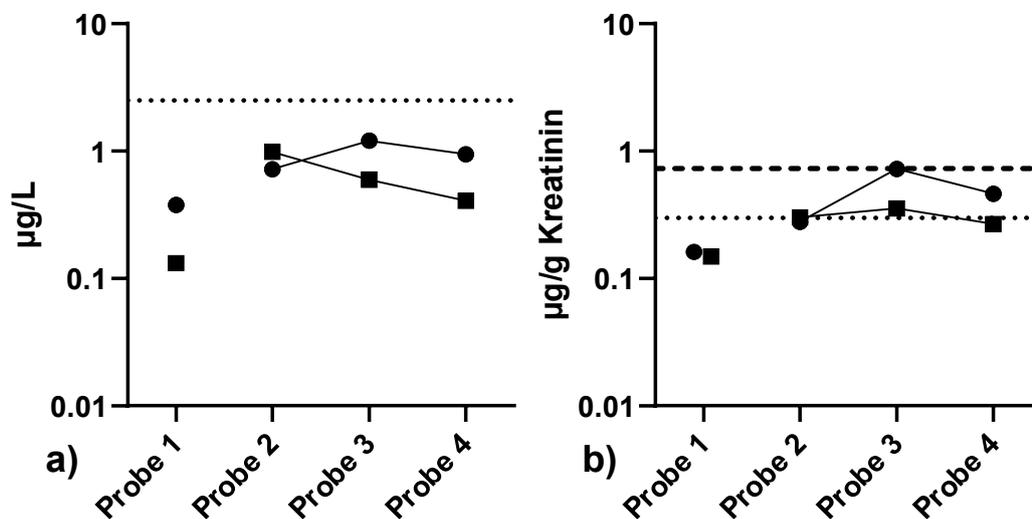


Abbildung 9: 1-OHP-Verlauf in Proben nach einem Wohnungsbrand von zwei gleichzeitig eingesetzten Teilnehmenden in a) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

Ein weiterer Wohnungsbrand mit vier gleichzeitig eingesetzten Kräften ist in Abbildung 10 dargestellt. Hier haben alle im Studienprotokoll geplanten Funktionen Proben abgegeben. Eine Einsatzkraft im Angriffstrupp war Raucher (●), alle andere Einsatzkräfte Nichtraucher. Der Angriffstrupp war, wie im vorherigen Szenario, ebenfalls an der Einsatzstelle gegenüber schwarzem Rauch mit geringer Sichtweise exponiert und für 10 Minuten im Einsatz. Der Gruppenführer hat, nach erfolgreicher Brandbekämpfung, die Brandstelle für ca. 15 Minuten ohne Atemschutz betreten, der Maschinist war nach Angabe im Fragebogen drei Stunden Motorabgasen ausgesetzt.

Die unadjustierten 1-OHP-Werte lassen keine direkten Rückschlüsse auf eine Exposition zu, die in Zusammenhang mit dem Einsatz stehen könnten (Abbildung 10a). Nach Berücksichtigung des Kreatininwertes zeigt sich jedoch ein Anstieg der 1-OHP-Konzentration bis zum Zeitpunkt 3 für den Angriffstrupp und Gruppenführer mit anschließendem Abfall zum Probenahmezeitpunkt 4 (Abbildung 10b). Dabei werden der BAR für Nichtraucher bzw. der entsprechende Referenzwert für Raucher jedoch nicht überschritten. Die Ausscheidung von 1-OHP beim Maschinisten ist durch diesen Einsatz weitestgehend unbeeinflusst.

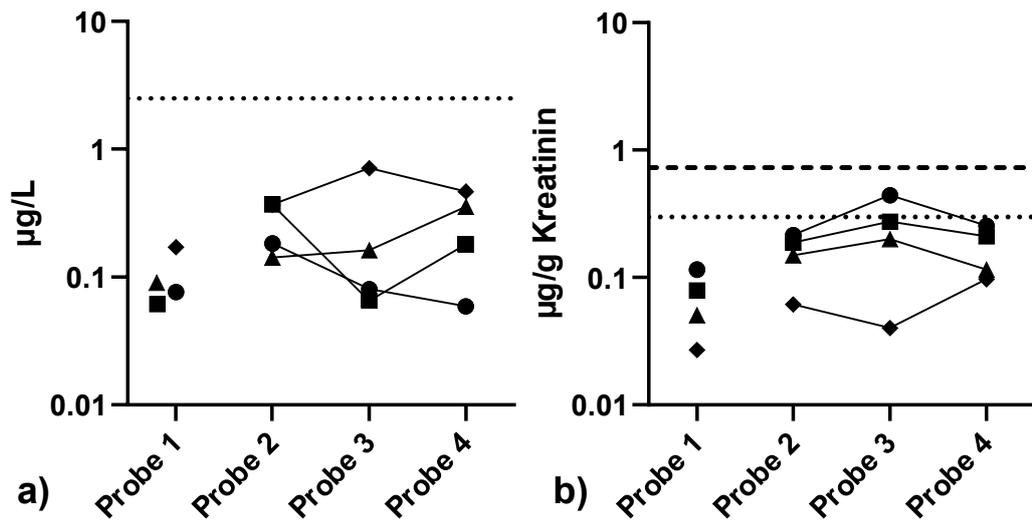


Abbildung 10: 1-OHP-Verlauf in Proben nach einem Wohnungsbrand von Angriffstrupp (●,■) Maschinist (◆) und Gruppenführer (▲) in a) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

Abbildung 11 zeigt einen weiteren Wohnungsbrand, ein Angehöriger des Angriffstrupps (●) war Raucher, die beiden anderen dargestellten Einsatzkräfte Nichtraucher. Alle haben nach Abschluss der Löscharbeiten die Brandstelle für 15 Minuten betreten. Weiterhin war der Gruppenführer (■) noch für 1,5 Stunden gegenüber Motorabgasen exponiert. Nach diesem Einsatz wurde der BAR für Nichtraucher bei dem nichtrauchenden Mitglied des Angriffstrupps zu den Probenahmezeitpunkten 3 und 4 überschritten (◆, Abbildung 11b). Die zweite Person blieb als Raucher unterhalb des Referenzwertes für Raucher. Hierbei muss beachtet werden, dass für diese Person für den Zeitpunkt 3 keine Probe vorliegt. Die Ausscheidung des 1-OHP nach dem Einsatz stieg bei den beiden Angehörigen des Angriffstrupps, die des Gruppenführers bleibt auf einem nahezu gleichen Level.

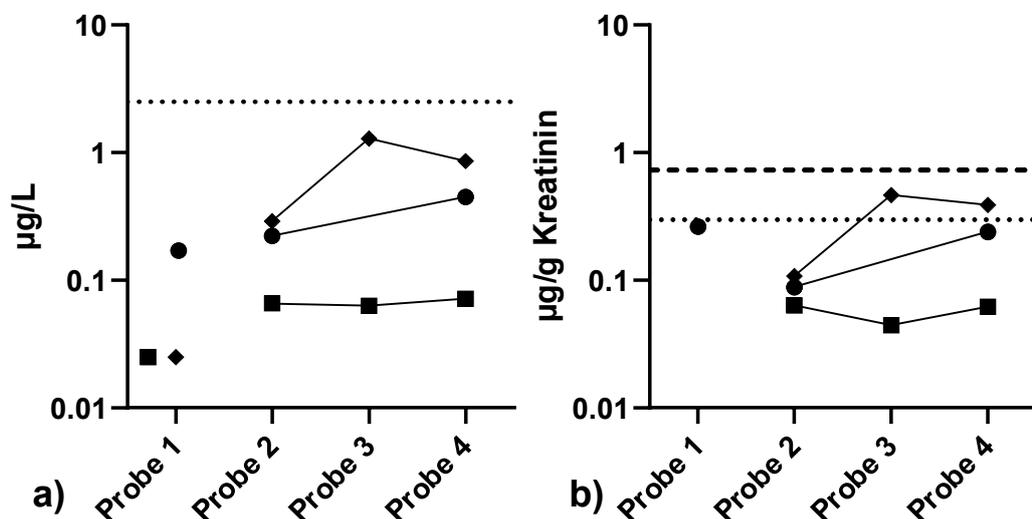


Abbildung 11: 1-OHP-Verlauf des Gruppenführers (■) und des Angriffstrupps (●, ◆) bei einem Wohnungsbrand in a) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

Bei einem weiteren Einsatz, an dem zwei in die Studie eingeschlossene Einsatzkräfte involviert waren, wurde ein Fahrzeugbrand mit angeschlossenen Pressluftatmer bekämpft, die Ergebnisse des Humanbiomonitorings sind in Abbildung 12 dargestellt. Bei einer Einsatzkraft lag die 1-OHP Konzentration in allen Proben nach dem Einsatz unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,05 µg/L (Abbildung 12a), aus diesem Grund sind diese Punkt auch in

Abbildung 12b nicht dargestellt. Unadjustiert wie auch adjustiert konnte keine Belastung durch diesen Einsatz beobachtet werden.

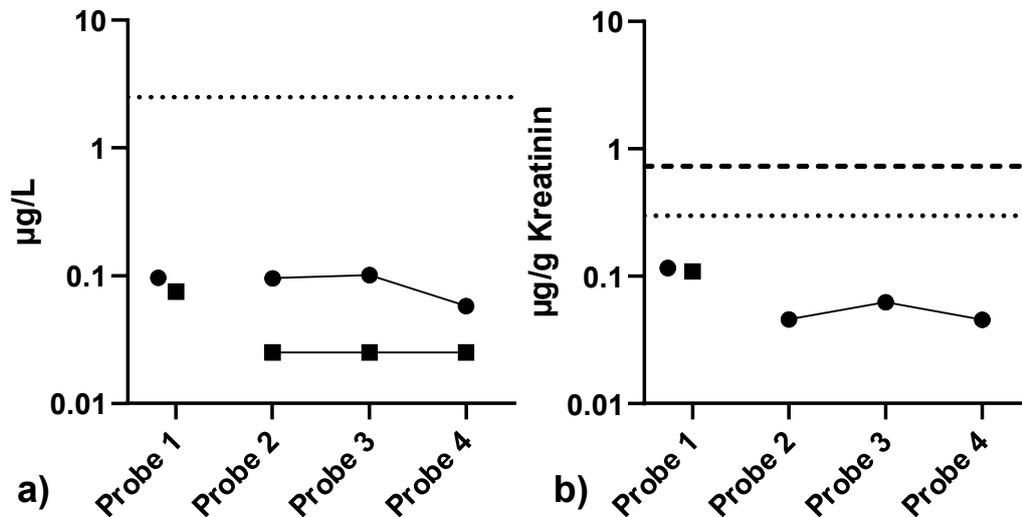


Abbildung 12: 1-OHP-Verlauf nach einem Einsatz bei einem Fahrzeugbrand mit Pressluftatmer in a) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

Eine Auswertung in Gruppen nach Funktionen der Einsatzkräfte war für die Szenarien Brand im Wohngebäude sowie Brand im Freien möglich (Abbildung 13 und Abbildung 14). Hierbei konnten drei Gruppen gebildet werden. In Abbildung 13 sind die vier Probenahmezeitpunkte der Gruppenführer (GF, n=10), des Angriffstrupps mit Atemschutz im Innenangriff (AT IA, n=28) und des Angriffstrupps mit Atemschutz im Außenbereich ohne Atemschutz (AT AA, n=8) dargestellt. Die Urinkonzentrationen der Einsatzkräfte im Innenangriff zeigten im Median nach dem Einsatz höhere Werte. Auffällig hierbei ist zudem, dass der Median der Gruppenführer zum Zeitpunkt 2 ähnlich wie bei den Angehörigen des Angriffstrupps im Innenangriff liegt. Dieser Effekt ist nach der Kreatininkorrektur nicht mehr zu erkennen. Für die nach einem Wohnungsbrand beprobten Gruppenführer ist eine höhere Kreatinin-bezogene 1-OHP-Konzentration in der Probe zum Zeitpunkt 3 nach dem Einsatz nachweisbar. Bei den im Innenangriff mit Atemschutz eingesetzten Kräften sind in den Proben zu den Zeitpunkten 3 und 4 höhere 1-OHP-Konzentrationen zu beobachten, wobei auch die Referenzwerte in den Proben zu den Zeitpunkten 2 und 3 jeweils überschritten werden. Bei den Einsatzkräften im Außenangriff zeigt sich eine große Streuung der Ergebnisse, wobei hier auch die Referenzwerte in den Proben zu den Zeitpunkten 3 und 4 überschritten werden.

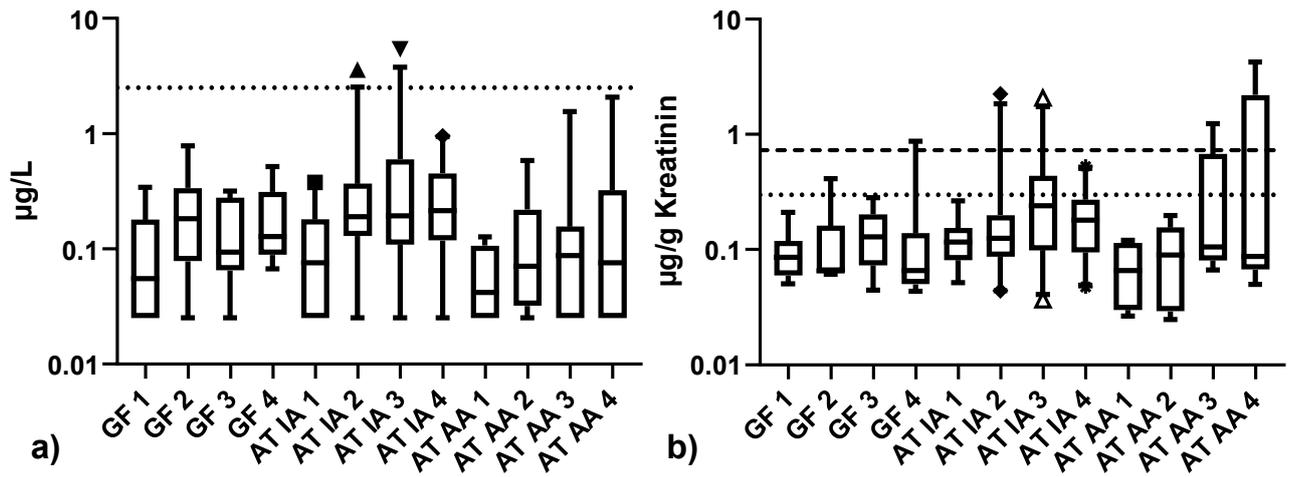


Abbildung 13: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften im Szenario „Wohnungsbrand“ (GF=Gruppenführer; AT IA=Angriffstrupp im Innengriff mit Atemschutz; AT AA=Angriffstrupp im Außeneinsatz ohne Atemschutz) in a) $\mu\text{g/L}$ (Linie bei $2,5 \mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (Linien bei BAR von $0,3 \mu\text{g/g}$ Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei $0,73 \mu\text{g/g}$ Kreatinin)

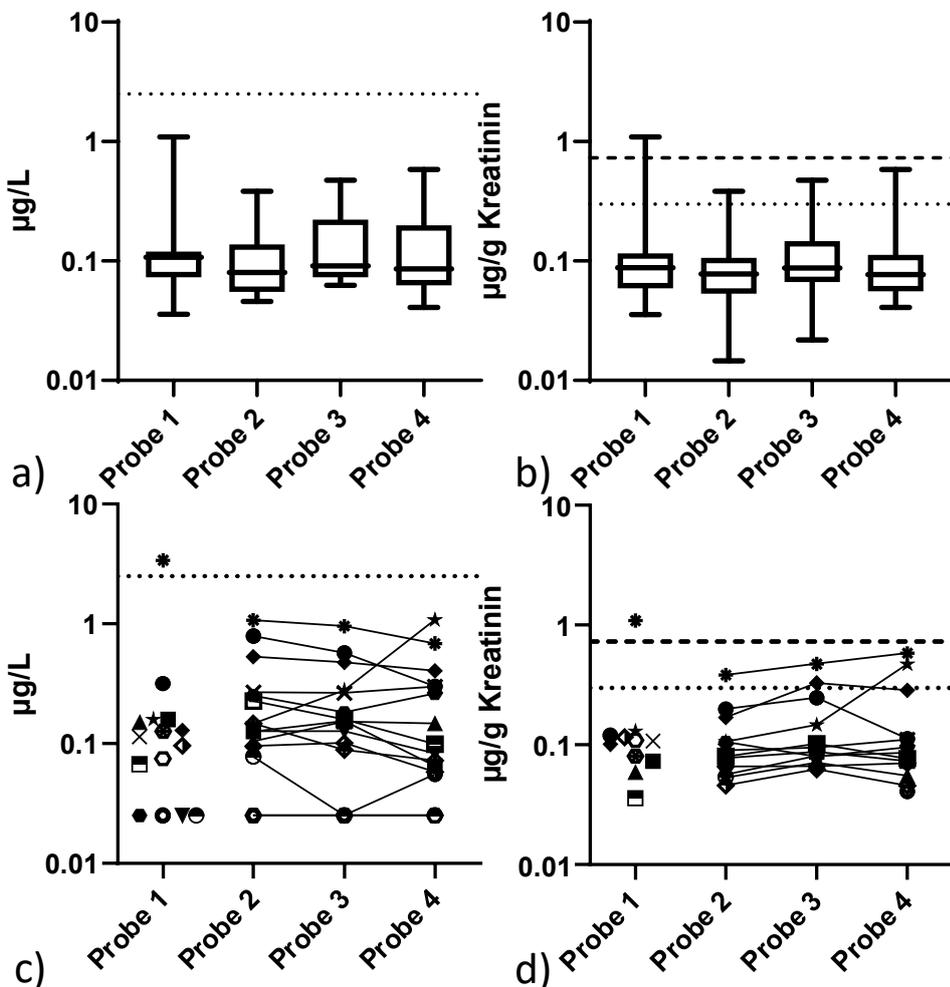


Abbildung 14: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften im Szenario „Brand im Freien“ alle Einsatzkräfte ohne Atemschutz in a)/c) $\mu\text{g/L}$ (Linie bei $2,5 \mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert) bzw. b)/d) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (Linien bei BAR von $0,3 \mu\text{g/g}$ Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei $0,73 \mu\text{g/g}$ Kreatinin)

Im Folgenden sind 1-OHP-Verläufe von gleichen Einsatzszenarien dargestellt, allerdings bei unterschiedlichen Einsatzstellen und zudem in zum Teil unterschiedlichen Funktionen. Ferner wurden durch die Einsatzkräfte zum Teil unterschiedliche Tätigkeiten während des Einsatzes ausgeführt. Die 1-OHP-Konzentrationen von vier Einsatzkräften, die bei unterschiedlichen Großbränden eingesetzt waren, sind in Abbildung 15 dargestellt. Es zeigten sich insgesamt keine auffälligen 1-OHP Konzentrationen.

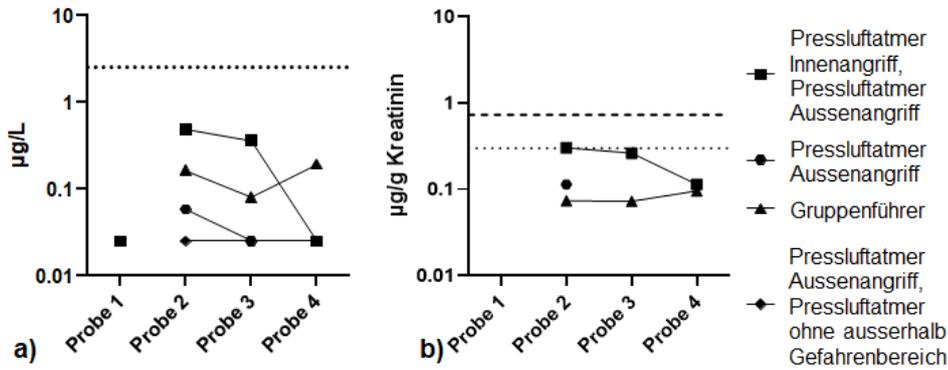


Abbildung 15: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften im Szenario „Großbrand“ in a) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

In Abbildung 7c/d wurde die Einsatzkraft mit den höchsten kreatininbezogenen 1-OHP-Konzentrationen nach einem Wohnungsbrand im Außenangriff dargestellt. Abbildung 16 zeigt weitere Einsatzkräfte, die in dem gleichen Szenario „Wohnungsbrand im Außenangriff ohne Pressluftatmer“ eingesetzt waren, allerdings bei unterschiedlichen Einsätzen. Insgesamt zeigten sich in deren Urinproben keine Auffälligkeiten. Der alleinige Unterschied zwischen den Teilnehmern bestand darin, dass die Einsatzkraft mit den höchsten kreatininbezogenen 1-OHP-Konzentrationen nach Auswertung der Fragebögen als Einzige die kalte Brandstelle nach dem Löschen betreten hat. Die mit einem Dreieck in Abbildung 16a dargestellte Einsatzkraft war im Rahmen der Studie bei zwei Einsätzen als Maschinist einer Drehleiter für mehr als eine Stunde neben den Motorabgasen auch Rauchgasen ausgesetzt, hier konnte in keiner Probe nach den Einsätzen eine 1-OHP-Konzentration oberhalb der Nachweisgrenze bestimmt werden, lediglich in der Probe zur Eingangsuntersuchung war 1-OHP nachweisbar. In Abbildung 14b werden diese Werte nicht gezeigt, da keine Kreatinin-Korrektur durchgeführt werden konnte. Die zwei weiteren Einsatzkräfte, die eine 1-OHP Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze zeigen, waren zusätzlich auch noch unter Atemschutz zu Nachlöscharbeiten mit Rauchentwicklung im Gebäude eingesetzt (● = Raucher, ◆ = Nichtraucher).

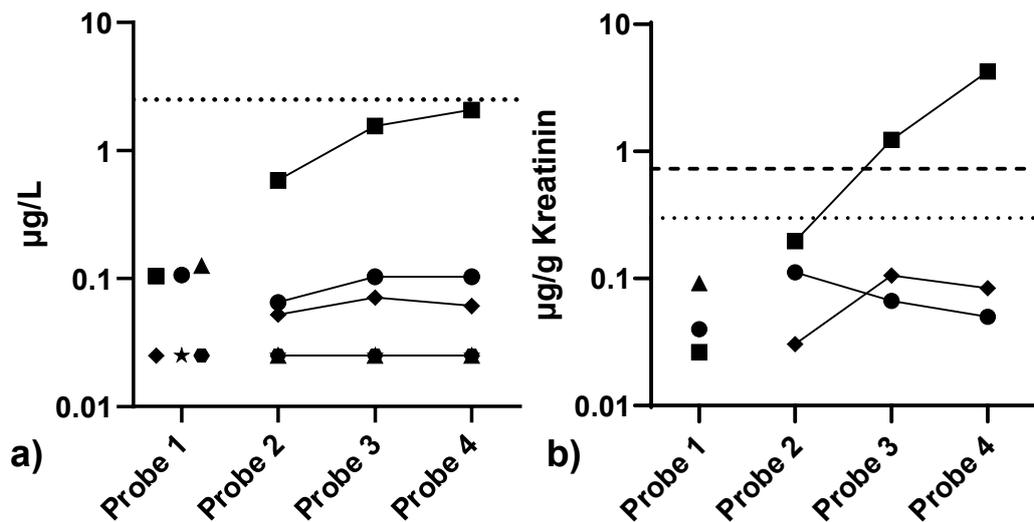


Abbildung 16: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften im Szenario „Außenangriff Wohngebäude“ in a) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

Nachdem im Vorhergehenden einzelne Einsatzszenarien betrachtet wurden, soll im Folgenden der Einfluss von Verhaltensmaßnahmen dargestellt werden, die im Fragebogen abgefragt wurden. In Abbildung 17 wird der Verlauf der 1-OHP-Konzentration danach unterschieden, ob die Brandstelle nach den Löschmaßnahmen betreten wurde. Hierbei fällt auf, dass die Personen, die dies mit „Ja“ beantworteten, insbesondere in der Probe 4 höhere Konzentrationen im Urin zeigten als Personen, die „Nein“ angaben. Bei diesen beiden Gruppen zeigte sich ein Anstieg im Median zwischen der Eingangsuntersuchung und den Proben nach dem Brandereignis. Beide Gruppen zeigen im Maximum ähnlich hohe Expositionen. Zu den Einsatzkräften ohne Angabe zählten neben Beschäftigten in der Werkstatt auch Einsatzkräfte, die mit und ohne Atemschutz zur Brandbekämpfung eingesetzt waren.

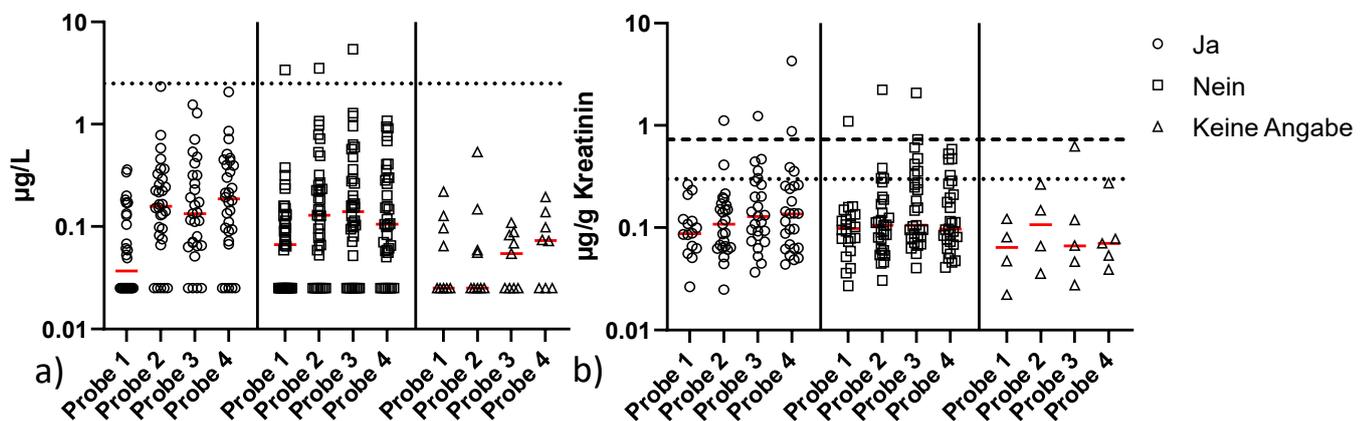


Abbildung 17: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften in Abhängigkeit, ob die „kalte Brandstelle“ betreten wurde in a) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

In Abbildung 18 werden die Ergebnisse nach der Antwort auf die Frage „Wurde Ihre Einsatzkleidung durch Braundrauchbestandteile kontaminiert? Falls ja, trugen Sie beim Umziehen Schutzhandschuhe?“ getrennt betrachtet. In diesem Fall war auch hier kein eindeutiger Effekt durch das Tragen von Schutzhandschuhen für alle Einsatzkräfte erkennbar. Um den Effekt genauer erkennen zu können, werden in Abbildung 18c/d jeweils nur die Einsatzkräfte betrachtet, die bei einem Brand mit dunkelgrauem/schwarzem Rauch eingesetzt waren. Hierbei wird ersichtlich, dass Einsatzkräfte, die zum Ablegen der Gerätschaften und anschließendem Ablegen der im Einsatz

getragenen PSA Schutzhandschuhe trugen, Kreatinin-bezogen keinen Anstieg von 1-OHP im Urin zeigten, während in Abbildung 18d bei den durch Kreise dargestellten Einsatzkräften ein Anstieg zu beobachten war.

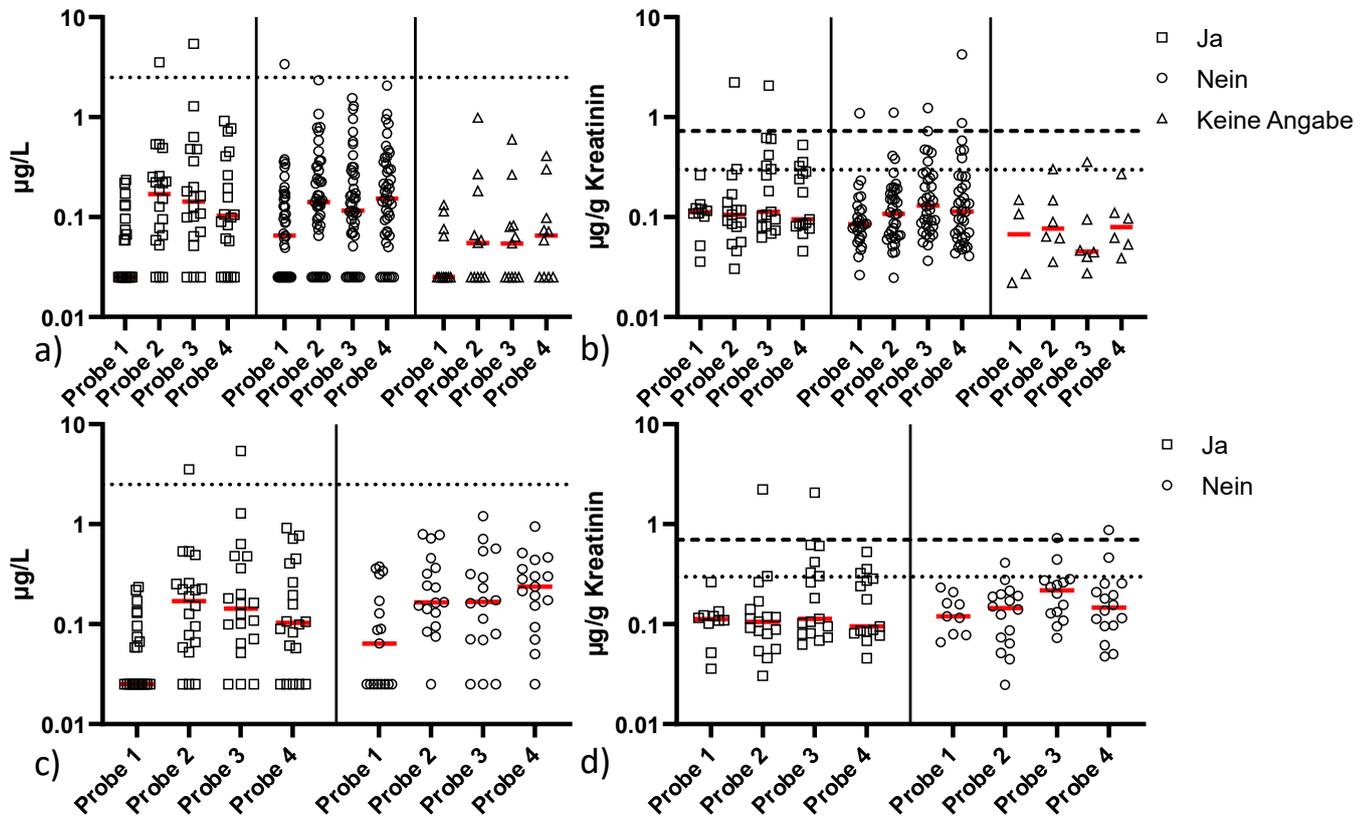


Abbildung 18: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften in Abhängigkeit, ob nach dem Einsatz Untersuchungshandschuhe getragen wurden (a)/b); in c) /d) sind nur die Einsatzkräfte dargestellt, die im Einsatz eine dunkelgrau/schwarze Rauchsicht beobachtet haben; in a) /c) µg/L (Linie bei 2,5 µg/L zeigt BEI®-Wert) bzw. b) /d) in µg/g Kreatinin (Linien bei BAR von 0,3 µg/g Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei 0,73 µg/g Kreatinin)

Für die Abbildung 19 wurden die Daten zur Rauchfarbe aus den Fragebögen ausgewertet. Da häufig Mehrfachnennungen auftraten, wurden jeweils zwei Kategorien zusammengefasst (weiß + hellgrau, dunkelgrau + schwarz). Insbesondere in Abbildung 19 wird deutlich, dass die Einsatzkräfte, die angegeben hatten, in dunkelgrauem/schwarzem Rauch im Einsatz gewesen zu sein, höhere 1-OHP-Konzentrationen im Urin ausscheiden. Einsatzkräfte ohne Angabe liegen im Median ähnlich wie die, die den Rauch mit weiß/hellgrau charakterisierten. Allerdings konnten keine Unterschiede bei alleiniger Betrachtung der Maximalwerte festgestellt werden. So gab es bei allen drei Szenarien jeweils singulär auftretende Maximalwerte, die bei Einsatzkräften ohne Angabe beobachtet wurden.

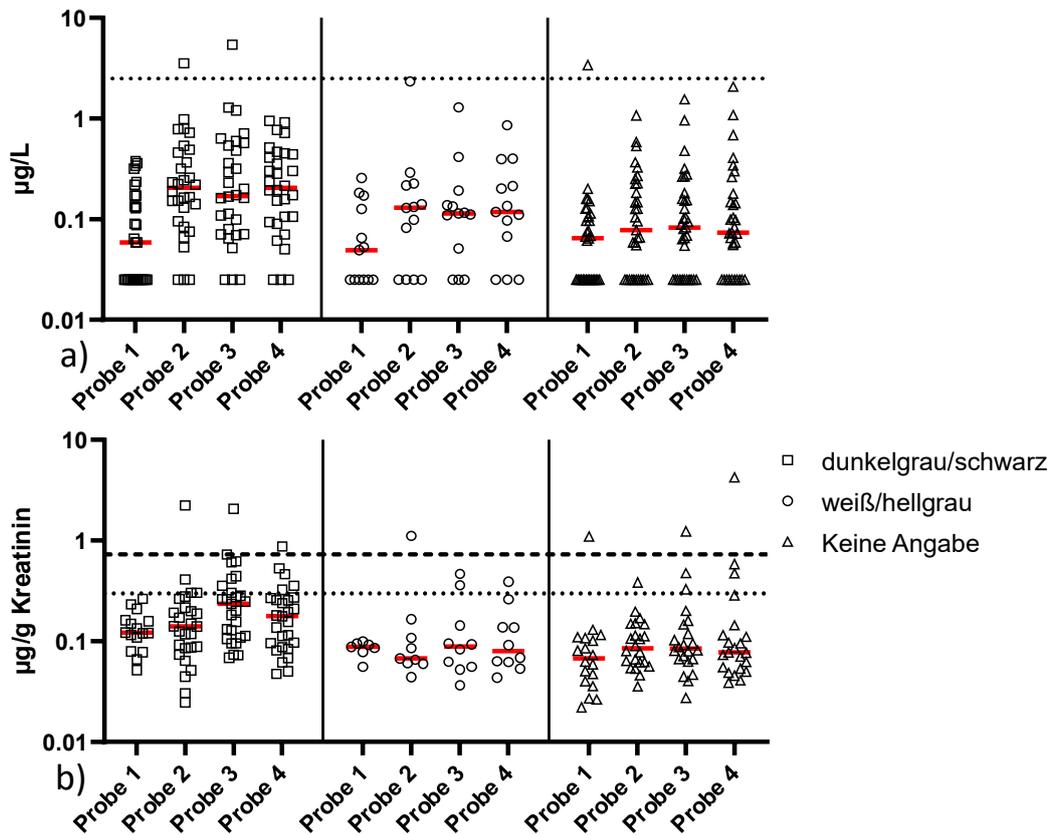


Abbildung 19: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften in Abhängigkeit zur im Fragebogen berichteten Rauchfarbe in a) $\mu\text{g/L}$ (Linie bei $2,5 \mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (Linien bei BAR von $0,3 \mu\text{g/g}$ Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei $0,73 \mu\text{g/g}$ Kreatinin)

Die im Fragebogen abgefragten Daten zur Sichtweite im Objekt wurden in Abbildung 20 mit den 1-OHP-Daten in Verbindung gebracht. Dabei wird, insbesondere Kreatinin-bezogen, deutlich, dass bei Sichtweiten <2 m (Quadrat und Punkt in Abbildung 20b) nach dem Einsatz die 1-OHP-Ausscheidung größer ist als in den anderen drei Gruppen. Bei letzteren Gruppen ist im Unterschied zu der Gruppe mit <2 m Sichtweite im Median auch kein Anstieg der 1-OHP-Ausscheidung zu beobachten.

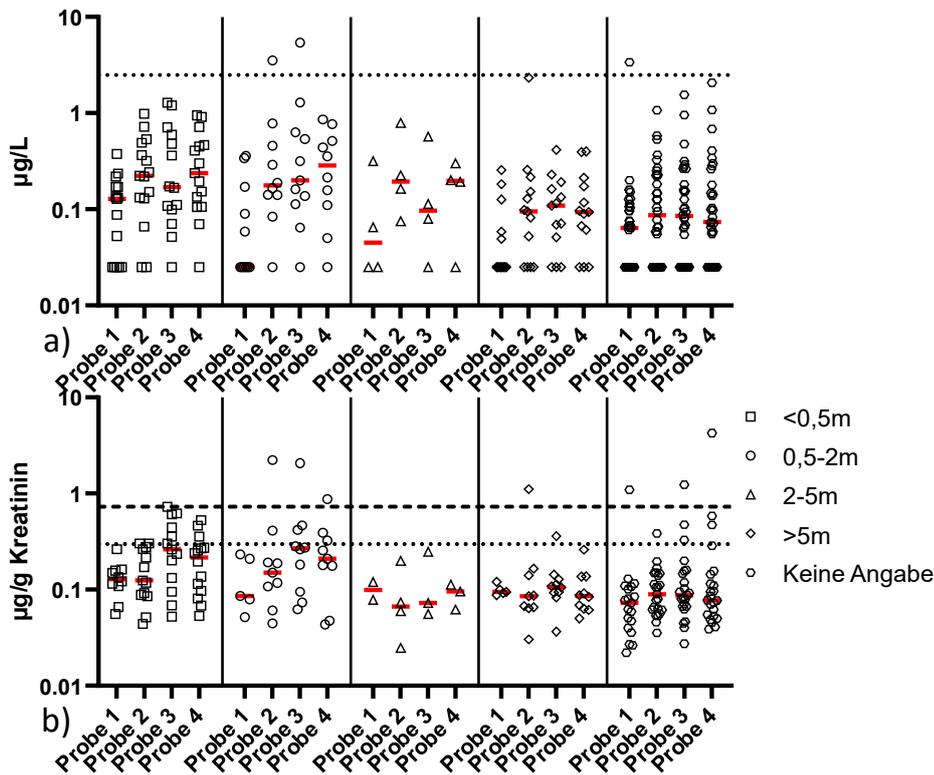


Abbildung 20: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften in Abhängigkeit zur im Fragebogen berichteten Sichtweite in a) $\mu\text{g/L}$ (Linie bei $2,5 \mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (Linien bei BAR von $0,3 \mu\text{g/g}$ Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei $0,73 \mu\text{g/g}$ Kreatinin)

Einen ähnlichen Einfluss wie die Sichtweite auf die 1-OHP-Konzentration im Urin scheint auch die Höhe der Rauchschrift im Raum zu haben (Abbildung 21). Hier wiesen insbesondere die Einsatzkräfte, die einen Einsatz in einer Rauchschrift hatten, die sehr tief war ($<1\text{m}$ über Boden), im Median höhere Werte als die anderen drei Gruppen auf. Auch in der Gruppe „keine Angabe“ ist die Streuung der Werte wieder sehr hoch, wobei die mittleren Werte jedoch im Bereich der Gruppen mit höherer Rauchschrift und damit niedrigen 1-OHP-Werten lagen.

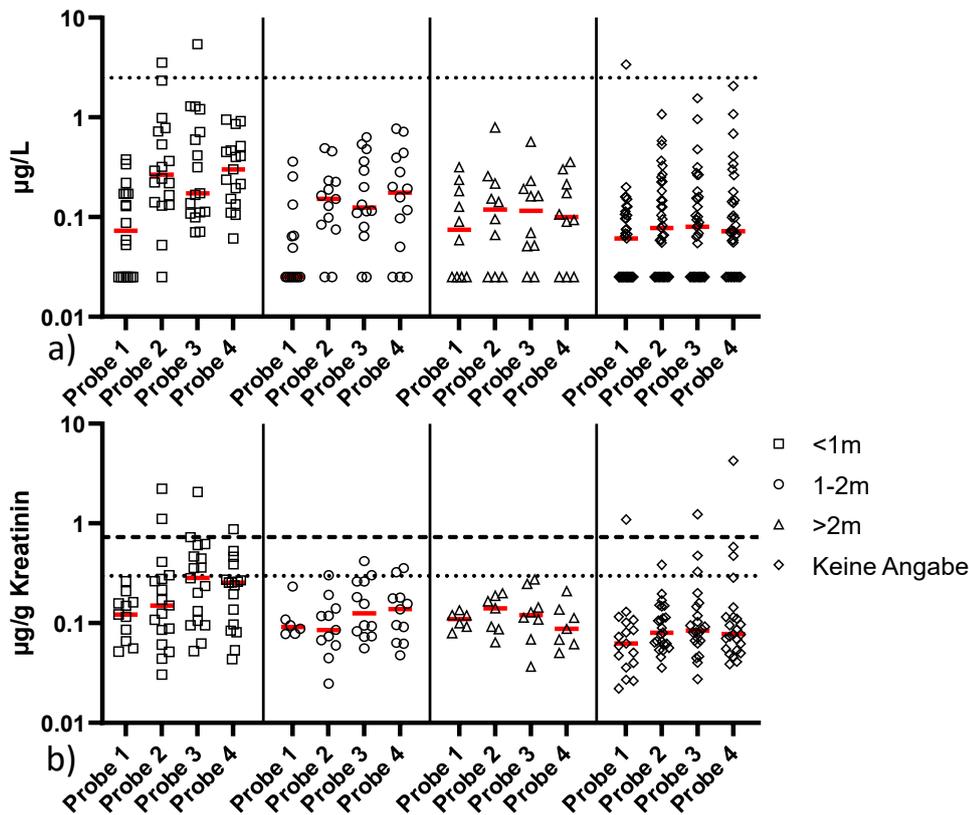


Abbildung 21: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften in Abhängigkeit zur im Fragebogen berichteten Höhe der Rauchschicht in a) $\mu\text{g/L}$ (Linie bei $2,5 \mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (Linien bei BAR von $0,3 \mu\text{g/g}$ Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei $0,73 \mu\text{g/g}$ Kreatinin)

Insgesamt gab es sieben Einsätze, bei denen ausschließlich ($n=3$) oder teilweise ($n=4$) Druckluftschaum (compressed air foam system, CAFS) zum Einsatz kam (Abbildung 22). Je zwei Studienteilnehmer in den Gruppen, welche Schaummittel einsetzten, waren Gruppenführer und nicht direkt an der Brandbekämpfung beteiligt. Ein Gruppenführer im Einsatz mit Schaummittel ist bereits in Abbildung 7 als auffällig identifiziert worden. Die dritte Einsatzkraft der Gruppe „ausschließlich“ hat das Schaummittel bei einem Brand in einem Wohngebäude im Innenangriff mit angeschlossenem Pressluftatmer eingesetzt, und die 1-OHP-Konzentrationen der Proben zwei und drei lagen oberhalb des Rauchstatus-spezifischen Referenzwertes. In der Gruppe „teilweise“ waren zwei Einsatzkräfte bei einem Brand im Wohngebäude ebenfalls im Innenangriff mit Atemschutz eingesetzt, hier liegen die 1-OHP-Konzentrationen unterhalb des Referenzwertes bezogen auf den Rauchstatus.

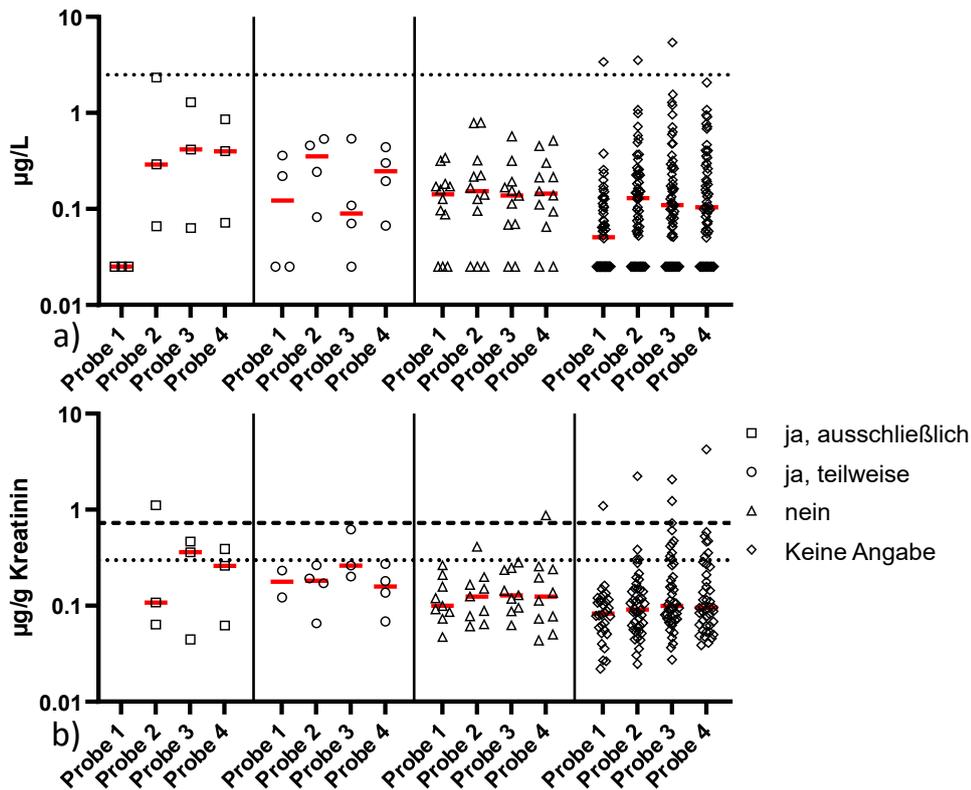


Abbildung 22: 1-OHP-Verlauf von Einsatzkräften in Abhängigkeit ob Schaummittel im Rahmen der Brandbekämpfung eingesetzt wurde in a) $\mu\text{g/L}$ (Linie bei $2,5 \mu\text{g/L}$ zeigt BEI®-Wert) bzw. b) in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (Linien bei BAR von $0,3 \mu\text{g/g}$ Kreatinin für Nichtraucher und Referenzwert für Raucher bei $0,73 \mu\text{g/g}$ Kreatinin)

Ergebnisse der PAK-Analysen in der Baumwollunterwäsche

Die Ergebnisse der PAK-Analysen der ausgestanzten Stoffstücke der Baumwollunterwäsche wurden auf die Einsatzszenarien bezogen und im Hinblick auf die einzelnen Kleidungsstücke und deren Stanzpositionen betrachtet.

Auswertung bezogen auf die untersuchten PAK

Die in Tabelle 7 gelisteten 312 ausgestanzten Stoffstücke wurden auf die 16 EPA-PAK und Benzo[e]pyren analysiert. Die Ergebnisse der Einsatzkräfte, die keinen Einsatzfragebogen abgaben, fließen nicht in die Auswertung ein. In den verbleibenden 270 ausgestanzten Stoffstücken wurden in 27 Proben PAK quantifiziert (10 %), davon in zwölf Proben schwerer flüchtige PAK (4,5 %). Von den insgesamt erhaltenen 4.590 für die Auswertung verwertbaren Ergebnissen an einzelnen PAK in diesen Stoffstücken lagen lediglich 140 Ergebnisse oberhalb der Bestimmungsgrenzen (3,1 %).

Tabelle 13 zeigt einen Überblick über die Anzahl der Quantifizierungen pro Analyt und dessen Konzentrationsbereiche. Die Bestimmungsgrenzen (LOQ) können aufgrund der variierenden Gewichte der Stoffproben lediglich als absolute Größe angegeben werden. In Einzelfällen können die Bestimmungsgrenzen insbesondere von Naphthalin und Acenaphthylen matrixbedingt höher liegen.

Tabelle 13: Übersicht Analyseergebnisse der PAK

| Gefahrstoff | LOQ abs. [ng] | Anzahl Stoffstücke > LOQ | Konzentrationen (Min – Max) [ng/g] | Mittelwert arithm. [ng/g] |
|-----------------------|---------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Naphthalin | 50 | 0 | – | – |
| Acenaphthylen | 50 | 0 | – | – |
| Acenaphthen | 25 | 0 | – | – |
| Fluoren | 25 | 0 | – | – |
| Phenanthren | 13 | 23 | 27 – 657 | 140 |
| Anthracen | 2,5 | 8 | 11 - 44 | 24 |
| Fluoranthren | 11 | 11 | 24 - 300 | 124 |
| Pyren | 5,0 | 23 | 13 - 250 | 71 |
| Benzo(a)anthracen | 3,8 | 14 | 12 – 187 | 74 |
| Chrysen | 3,8 | 14 | 12 – 216 | 75 |
| Benzo(e)pyren | 25 | 4 | 131 - 182 | 153 |
| Benzo(b)fluoranthren | 5,0 | 11 | 23 - 172 | 76 |
| Benzo(k)fluoranthren | 4,5 | 7 | 17 - 100 | 62 |
| Benzo(a)pyren | 4,3 | 12 | 11 - 205 | 86 |
| Dibenzo(ah)anthracen | 7,3 | 0 | – | – |
| Benzo(ghi)perylen | 4,3 | 7 | 19 - 159 | 90 |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren | 7,5 | 6 | 57 - 159 | 110 |

Die flüchtigsten PAK Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen und Fluoren wurden nicht bestimmt. Mittelflüchtige PAK von Phenanthren bis Chrysen wurden hingegen quantifiziert. Die höchste Konzentration konnte mit 657 ng/g für Phenanthren ermittelt werden. Für Benz(a)anthracen und Chrysen, welche in den zur Orientierung herangezogenen Beurteilungsmaßstäben gelistet sind, liegen alle analysierten Konzentrationen deutlich unterhalb der Grenzwerte (s. Tabelle 1). Bei der Analyse leicht- und mittelflüchtiger PAK kann die Exposition u.U. flüchtigkeitsbedingt unterschätzt werden, so dass es sich in diesen Fällen um Mindestwerte handeln kann (s. die in Kapitel 3 „Auswertung Baumwollunterbekleidung“ beschriebenen Aspekte zu Messwerteinschränkungen). Abbildung 23 gibt eine graphische Darstellung der Analyseergebnisse der quantifizierten mittelflüchtigen PAK wieder.

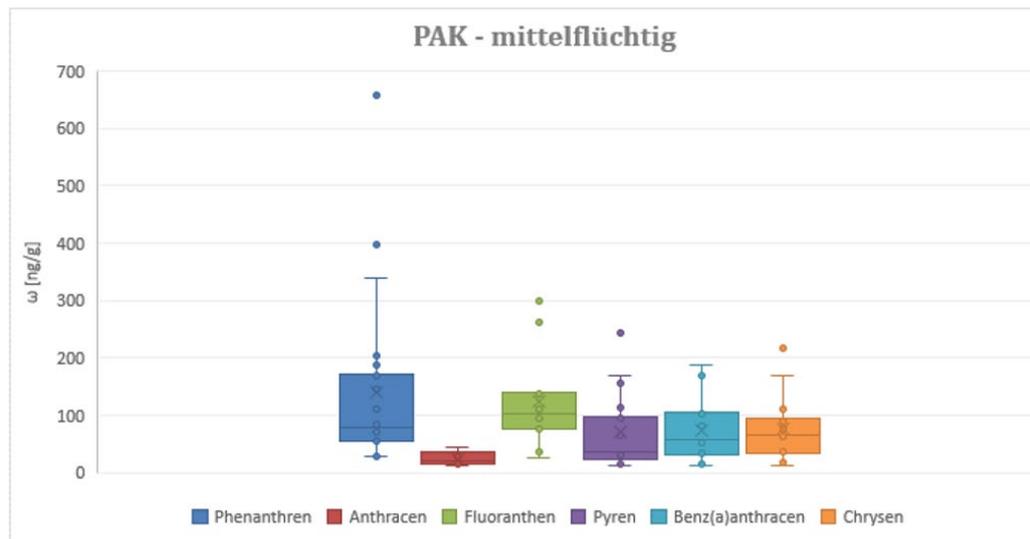


Abbildung 23: Analyseergebnisse mittelflüchtiger PAK > LOQ (Messwerte sind Minimalwerte), ω = Massenanteil

Mit Ausnahme von Dibenzo(ah)anthracen wurden alle schwerer flüchtigen PAK quantifiziert. Die höchste Konzentration partikulär vorliegender PAK wurde für die Leitkomponente Benzo(a)pyren mit 206 ng/g bestimmt. Bezogen auf die einzelnen schwerer flüchtigen PAK lagen alle Konzentrationen jedoch auch hier wieder deutlich unterhalb der zur Orientierung herangezogenen Beurteilungsmaßstäbe (s. Tabelle 1). In Abbildung 24 sind die Analyseergebnisse der quantifizierten schwerer flüchtigen PAK dargestellt.

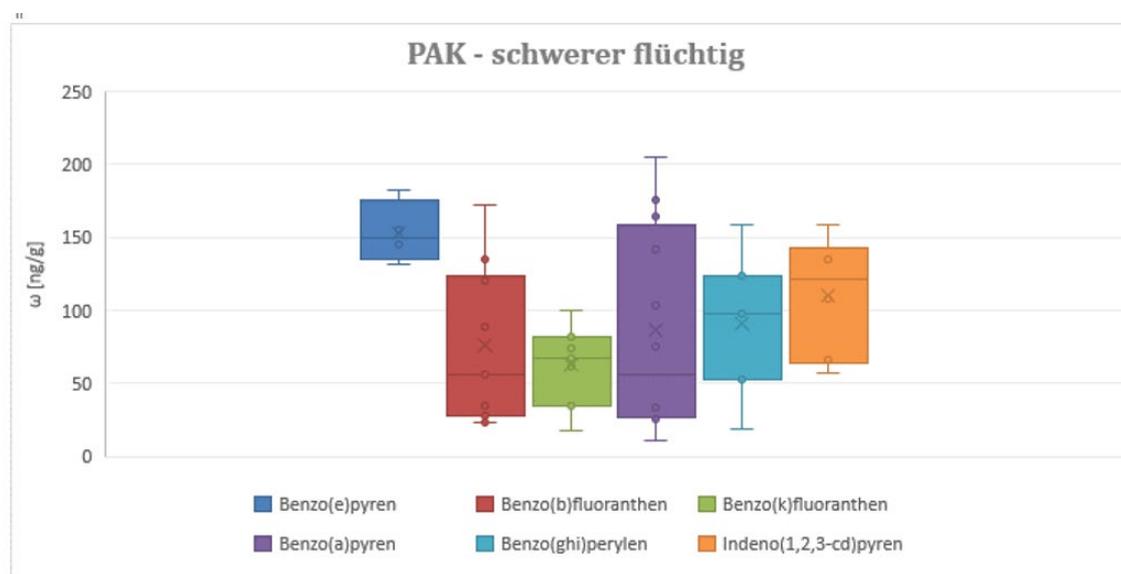


Abbildung 24: Analyseergebnisse schwerer flüchtiger PAK > LOQ, ω = Massenanteil

Bei der weiteren Darstellung der Ergebnisse wird auf die PAK Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren und Dibenzo(ah)anthracen, welche in keiner ausgestanzten Stoffprobe quantifiziert wurden, nicht weiter eingegangen.

Auswertung bezogen auf die einzelnen Einsatzszenarien

Einsatzszenario Wohngebäudebrand

Insgesamt wurden 125 ausgestanzte Stoffstücke von sechs Einsatzkräften im Rahmen von Einsätzen des Szenarios Wohngebäudebrand untersucht. Dabei wurden bei drei Einsatzkräften in insgesamt zehn Stoffstücken PAK bestimmt, dies entspricht einem Anteil von 8,0 %. Bis auf Benzo(e)pyren wurden alle in Tabelle 13 quantifizierten PAK gefunden. Die Maximalwerte für die mittelflüchtigen PAK Phenanthren, Fluoranthren, Benz(a)anthracen und Chrysen wurden bei einer Feuerwehreinsatzkraft im Innenangriff mit Pressluftatmer ermittelt. Sie wurden ausschließlich in einer Stoffprobe, einem Hotspot aus dem rechten Tascheneingriff einer Baumwollhose, bestimmt. Tabelle 14 gibt die Analyseergebnisse für das Einsatzszenario Wohngebäudebrand wieder. Die detaillierten Analyseergebnisse des Hotspots können Tabelle 22 entnommen werden.

Tabelle 14: Analyseergebnisse quantifizierter PAK in der Baumwollunterwäsche – Wohngebäudebrand

| Gefahrstoff, quantifiziert | Anzahl Stoffstücke > LOQ | Konzentrationen (Min – Max) [ng/g] | Mittelwert arithm. [ng/g] |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Phenanthren | 9 | 54 – 657 | 182 |
| Anthracen | 3 | 16 – 37 | 27 |
| Fluoranthren | 4 | 35 – 300 | 130 |
| Pyren | 9 | 23 – 244 | 66 |
| Benz(a)anthracen | 7 | 15 – 187 | 59 |
| Chrysen | 7 | 17 – 216 | 67 |
| Benzo(b)fluoranthren | 5 | 23 – 89 | 38 |
| Benzo(k)fluoranthren | 2 | 17, 61 | 39 |
| Benzo(a)pyren | 5 | 25 – 103 | 44 |
| Benzo(ghi)perylen | 2 | 19, 56 | 38 |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren | 1 | 66 | – |

Einsatzszenario Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien

Bei Fahrzeug- bzw. sonstigen Bränden im Freien wurden bei fünf von sechs Einsatzkräften, die die Baumwollunterwäsche trugen, PAK bestimmt. In neun von insgesamt 103 Stoffproben und damit in 8,7 % der Proben wurden PAK in generell niedrigen Konzentrationen quantifiziert. Überwiegend wurden die mittelflüchtigen Verbindungen Phenanthren und Pyren quantifiziert, von den schwerer flüchtigen PAK lag lediglich in einer Probe Benzo(a)pyren in einer Konzentration geringfügig oberhalb der Bestimmungsgrenze vor (Tabelle 15).

Tabelle 15: Analyseergebnisse quantifizierter PAK in der Baumwollunterwäsche – Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien

| Gefahrstoff, quantifiziert | Anzahl Stoffstücke > LOQ | Konzentrationen (min – max) [ng/g] | Mittelwert arithm. [ng/g] |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Phenanthren | 7 | 27 – 79 | 43 |
| Fluoranthren | 1 | 24 | – |
| Pyren | 7 | 13 – 24 | 18 |
| Benz(a)anthracen | 1 | 12 | – |
| Chrysen | 1 | 12 | – |
| Benzo(a)pyren | 1 | 11 | – |

Einsatzszenario Atemschutz- und Schlauchwerkstatt

Von den drei Beschäftigten, die bei Tätigkeiten in einer Atemschutz- und Schlauchwerkstatt Baumwollshirts und -handschuhe trugen, wurden insgesamt 42 Stoffstücke untersucht. In den Handschuhen wurden zusätzlich zu den Standardstanzpositionen jeweils vier Stoffstücke aus optisch auffälligen Stellen ausgestanzt. Bei zwei Beschäftigten konnten weder in den Baumwollshirts noch in den -handschuhen PAK-Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenzen ermittelt werden. Beim dritten Beschäftigten wurden in den ausgestanzten Stoffstücken aus dem Shirt ebenfalls keine PAK bestimmt, jedoch wurde in acht Proben aus dem Paar Baumwollhandschuhe eine breite Palette an PAK mit zum Teil höheren Konzentrationen quantifiziert. Abbildung 26 zeigt das Paar Baumwollhandschuhe mit den Stanzpositionen. Ein Hotspot aus dem linken Zeigefinger wies die Maximalkonzentrationen für die mittelflüchtigen Verbindungen Anthracen und Pyren und die höchsten Gehalte für alle quantifizierten schwerer flüchtigen PAK auf, darunter mit 205 ng/g die maximale Konzentration für die Leitkomponente Benzo(a)pyren. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die Konzentrationsbereiche in den ausgestanzten Stoffstücken des belasteten Handschuhpaars. Die Konzentrationen des Hotspots aus dem linken Zeigefinger können Tabelle 22 entnommen werden.

Tabelle 16: Analyseergebnisse quantifizierter PAK Baumwollhandschuhe –Atemschutz- und Schlauchwerkstatt

| Gefahrstoff, quantifiziert | Anzahl Stoffstücke > LOQ | Konzentrationen (min – max) [ng/g] | Mittelwert arithm. [ng/g] |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Phenanthren | 7 | 76 – 398 | 184 |
| Anthracen | 5 | 11 – 44 | 22 |
| Fluoranthren | 6 | 85 – 261 | 136 |
| Pyren | 7 | 34 – 250 | 131 |
| Benz(a)anthracen | 6 | 52 – 170 | 101 |
| Chrysen | 6 | 42 – 170 | 95 |
| Benzo(e)pyren | 4 | 131 – 182 | 153 |
| Benzo(b)fluoranthren | 6 | 34 – 172 | 107 |
| Benzo(k)fluoranthren | 5 | 34 – 100 | 71 |
| Benzo(a)pyren | 6 | 37 – 205 | 133 |
| Benzo(ghi)perylen | 5 | 53 – 159 | 112 |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren | 5 | 57 – 159 | 119 |

Auswertung bezogen auf die Kleidungsstücke und deren Stanzpositionen

Bei Wohngebäudebränden und Fahrzeug- bzw. sonstigen Bränden im Freien trugen elf Einsatzkräfte Baumwollhauben unter den Feuerwehrhelmen. In keiner der 34 ausgestanzten Stoffstücke aus den Baumwollhauben konnten PAK quantifiziert werden. Tabelle 17 zeigt auf, an welchen Positionen in den übrigen Kleidungsstücken PAK bestimmt und bei welchen Einsätzen diese getragen wurden.

Tabelle 17: Übersicht Analyseergebnisse PAK bezogen auf die Stanzpositionen und das jeweilige Einsatzszenario

| Kleidungsstück | Stanzposition | Anzahl Stoffstücke mit Analysen > LOQ | Einsatzszenario |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--|
| Baumwollshirt | Ärmel links vorne | 1 | Wohngebäudebrand, Innenangriff |
| | Ärmel links vorne | 1 | Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien |
| Baumwollhose | Schienbein links vorne | 1 | Wohngebäudebrand, Innenangriff |
| | Schienbein rechts vorne | 1 | |
| | Hotspot Hose, Tascheneingriff | 1 | |
| Baumwollhandschuh | Handrücken links | 1 | Wohngebäudebrand, Innenangriff und Nachlöscharbeiten |
| | Handrücken rechts | 2 | |
| | Daumen links | 2 | |
| | Daumen rechts | 1 | |
| Baumwollhandschuh | Handrücken links | 1 | Atemschutz- und Schlauchwerkstatt |
| | Handrücken rechts | 1 | |
| | Daumen links | 1 | |
| | Daumen rechts | 1 | |
| | Hotspot Zeigefinger links | 1 | |
| | Hotspot Zeigefinger rechts | 1 | |
| | Hotspot Innenfläche links | 1 | |
| Hotspot Innenfläche rechts | 1 | | |
| Baumwollsocke | Bündchen links | 5 | Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien |
| | Bündchen rechts | 3 | |

Baumwollshirts

In zwei von insgesamt 103 ausgestanzten Stoffstücken aus den Baumwollshirts (102 reguläre Stanzpositionen und ein Hotspot) wurden PAK quantifiziert, dies entspricht einem Anteil von 1,9 %. In der Hotspotprobe konnten keine PAK bestimmt werden. Eine der beiden belasteten Proben stammte aus einem Einsatz bei einem Fahrzeug- bzw. sonstigen Brand im Freien, das andere Baumwollshirt wurde von einer Feuerwehreinsatzkraft bei einem Wohngebäudebrand im Innenangriff mit Pressluftatmer getragen. Beide Proben wurden aus dem vorderen linken Ärmel ausgestanzt. Im Stoffstück aus dem Brandszenario „Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien“ wurde nur Phenanthren mit einer Konzentration von 38 ng/g quantifiziert. Die Analyse des Stoffstücks aus dem Wohngebäudebrand enthielt eine Vielzahl von PAK in überwiegend mittleren Konzentrationen. Die Ergebnisse können Tabelle 18 entnommen werden.

Tabelle 18: Analyseergebnisse PAK, Baumwollshirt linker Ärmel vorne – Wohngebäudebrand

| Gefahrstoff, quantifiziert | Konzentrationen [ng/g] |
|----------------------------|------------------------|
| Phenanthren | 338 |
| Anthracen | 28 |
| Fluoranthren | 110 |
| Pyren | 96 |
| Benz(a)anthracen | 62 |
| Chrysen | 70 |
| Benzo(b)fluoranthren | 28 |
| Benzo(k)fluoranthren | 17 |
| Benzo(a)pyren | 34 |
| Benzo(ghi)perylen | 19 |

Baumwollhosen

Es wurden insgesamt 58 Stoffstücke aus den Baumwollhosen ausgestanzt (darunter zwei Hotspots). Lediglich bei dem Brandeinsatz einer Feuerwehreinsatzkraft in einem Wohngebäude im Innenangriff mit Pressluftatmer konnten in einer Hose in drei ausgestanzten Stoffstücken mittel- und schwerer flüchtige PAK bestimmt werden; dies entspricht 5,2 % aller Proben. Zwei Stoffstücke wurden aus dem Bereich der vorderen Schienbeine ausgestanzt, bei der dritten Probe handelt es sich um die optisch auffällige Hotspot-Probe mit hoher PAK Belastung aus dem rechten Tascheneingriff. Tabelle 19 gibt die Konzentrationsbereiche der drei ausgestanzten Stoffstücke wieder, die Ergebnisse der Hotspotprobe sind in Tabelle 22 aufgeführt.

Tabelle 19: Analyseergebnisse PAK, Baumwollhose – Wohngebäudebrand

| Gefahrstoff, quantifiziert | Anzahl Stoffstücke > LOQ | Konzentrationen (Min – Max) [ng/g] | Mittelwert arithm. [ng/g] |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Phenanthren | 3 | 110 – 657 | 313 |
| Anthracen | 2 | 16, 37 | 27 |
| Fluoranthren | 2 | 75, 300 | 188 |
| Pyren | 3 | 38 – 244 | 116 |
| Benz(a)anthracen | 3 | 42 – 187 | 94 |
| Chrysen | 3 | 44 – 216 | 107 |
| Benzo(b)fluoranthren | 3 | 23 – 89 | 47 |
| Benzo(k)fluoranthren | 1 | 61 | – |
| Benzo(a)pyren | 3 | 25 – 103 | 54 |
| Benzo(ghi)perylen | 1 | 56 | – |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren | 1 | 66 | – |



Abbildung 25: Belastete Baumwollhose – Wohngebäudebrand (● = Standard-Stanzpositionen; ● = Hotspot)

Baumwollhandschuhe

Von 69 ausgestanzten Stoffproben aus den Baumwollhandschuhen, darunter 13 Hotspots, konnten in 14 Proben aus Einsätzen bei Wohngebäudebränden und Tätigkeiten in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt PAK bestimmt werden. Mit einem Prozentsatz von 20 % waren die Handschuhe damit am häufigsten mit PAK belastet.

Bei Wohngebäudebränden wurden in den ausgestanzten Stoffstücken von Einsatzkräften im Innenangriff mit Pressluftatmer und bei Nachlöscharbeiten überwiegend mittelflüchtige PAK bestimmt, die Belastungen lagen in unteren bis mittleren Konzentrationsbereichen (Tabelle 20).

Tabelle 20: Analyseergebnisse PAK, Baumwollhandschuhe – Wohngebäudebrand

| Gefahrstoff, quantifiziert | Anzahl Stoffstücke > LOQ | Konzentrationen (Min – Max) [ng/g] | Mittelwert arithm. [ng/g] |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Phenanthren | 5 | 54 – 84 | 72 |
| Fluoranthren | 1 | 35 | – |
| Pyren | 5 | 23 – 37 | 30 |
| Benz(a)anthracen | 3 | 15 – 34 | 24 |
| Chrysen | 3 | 17 – 36 | 26 |
| Benzo(b)fluoranthren | 1 | 23 | – |
| Benzo(a)pyren | 1 | 25 | – |

Alle mit PAK belasteten Stoffstücke aus Baumwollhandschuhen bei Tätigkeiten in der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt stammten aus dem Handschuhpaar eines Beschäftigten und umfassten neben den Standard-Stanzpositionen vier weitere Hotspots mit zum Teil höheren Belastungen. Gering belastet waren die

ausgestanzten Stoffstücke aus den Bereichen der Handrücken, hier wurde nur Phenanthren ($\omega = 109 \mu\text{g/g}$, rechter Handrücken) und Pyren ($\omega = 34 \mu\text{g/g}$, linker Handrücken) quantifiziert. Stärker belastet mit einer breiten Palette mittel- und schwerer flüchtiger PAK waren hingegen die ausgestanzten Proben aus den beiden Daumen, die Hotspots aus den Handinnenflächen und insbesondere aus den Zeigefingern. Einen optischen Eindruck über den Verschmutzungsgrad des Handschuhpaars liefert die Abbildung 26.

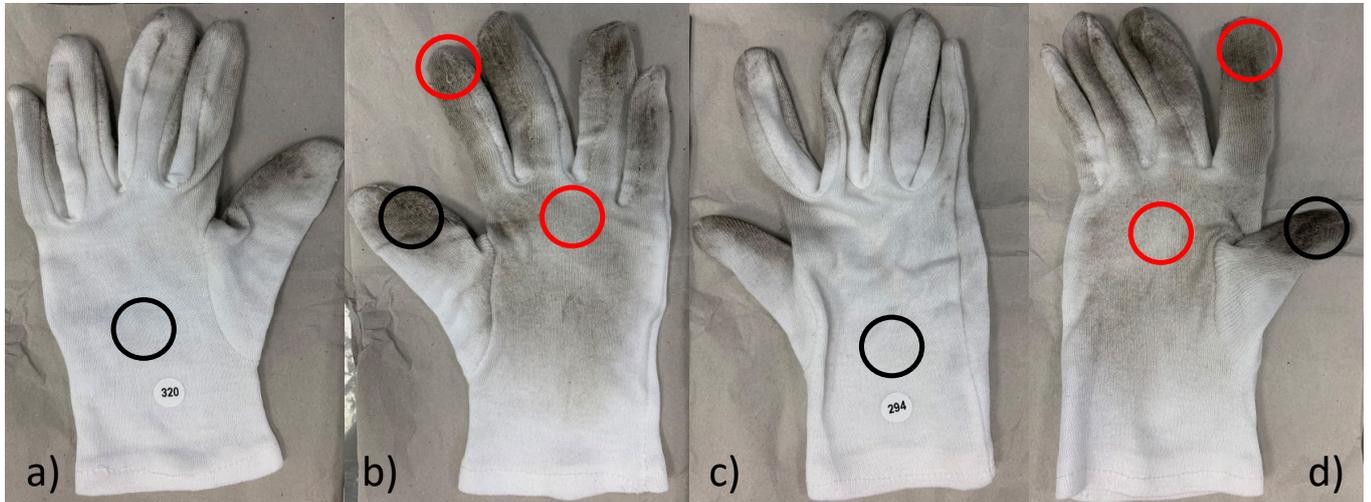


Abbildung 26: Belastetes Paar Baumwollhandschuhe – Atemschutz- und Schlauchwerkstatt (● = Standard-Stanzpositionen; ● = Hotspot)

Einen Überblick über die Konzentrationsbereiche aller quantifizierter PAK in dem belastetem Paar Handschuhe listet Tabelle 16 auf. Die Einzelkonzentrationen in den belasteten Hotspots können Tabelle 22 entnommen werden.

Baumwollsocken

Belastungen in den Baumwollsocken wurden ausschließlich beim Szenario Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien gemessen. In acht von insgesamt 48 ausgestanzten Stoffstücken und damit in 17 % der Proben wurden PAK quantifiziert. Es waren lediglich die Bereiche an den Bündchen der Socken betroffen. Mit einer Ausnahme wurden nur mittelflüchtige PAK bestimmt, die Konzentrationen lagen im unteren ng/g-Bereich (Tabelle 21).

Tabelle 21: Analysenergebnisse PAK, Baumwollsocken – Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien

| Gefahrstoff, quantifiziert | Anzahl Stoffstücke > LOQ | Konzentrationen (Min – Max) [ng/g] | Mittelwert arithm. [ng/g] |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Phenanthren | 6 | 27 – 79 | 43 |
| Fluoranthren | 1 | 24 | – |
| Pyren | 7 | 13 – 24 | 18 |
| Benz(a)anthracen | 1 | 12 | – |
| Chrysen | 1 | 12 | – |
| Benzo(a)pyren | 1 | 11 | – |

Hotspots

Neben Stoffstücken aus den standardisierten Stanzpositionen wurden zusätzlich insgesamt 17 Stoffstücke aus optisch auffälligen Stoffbereichen untersucht. Zwei Ausstanzungen stammen aus Baumwollhosen, jeweils eine

Ausstattung aus einem Baumwollshirt und einer Baumwollhaube und 13 Ausstattungen aus Baumwollhandschuhen. Die genauen Stanzpositionen der Hotspots können Tabelle 17 entnommen werden.

Von allen Hotspots wurden lediglich in fünf Proben aus zwei Kleidungsstücken PAK quantifiziert, im rechten Tascheneingriff einer Baumwollhose einer Einsatzkraft bei einem Wohngebäudebrand im Innenangriff mit Pressluftatmer und in vier Hotspots aus dem linken und rechten Baumwollhandschuh eines Beschäftigten bei Tätigkeiten im Bereich Atemschutz- und Schlauchwerkstatt. In diesen beiden Kleidungsstücken wurden viele PAK in überwiegend höheren Konzentrationen bestimmt, darunter die Maximalkonzentrationen aller untersuchten Kleidungsstücke, also reguläre und Hotspot-Stanzpositionen zusammengenommen. Tabelle 22 listet die Analysenergebnisse aller PAK in den Hotspots der Baumwollhose und dem Paar Baumwollhandschuhe auf. Die Maximalkonzentrationen der PAK sind in Fettdruck hervorgehoben, die der Verbindungen mit Grenzwerten in den zur orientierenden Beurteilung herangezogenen Bewertungsmaßstäbe zusätzlich in Rot wiedergegeben.

Tabelle 22: Analysenergebnisse PAK, Hotspots

| Gefahrstoff, quantifiziert | Baumwollhose – Wohngebäudebrand | Baumwollhandschuhe – Atemschutz- und Schlauchwerkstatt | | | |
|-------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------|------------------------|----------------------|
| | Konzentrationen [ng/g] | | | | |
| | Stanzposition | | | | |
| | Tascheneingriff rechts | Zeigefinger rechts | Innenfläche rechts | Zeigefinger links | Innenfläche links |
| Phenanthren | 657¹ | 204 | 170 | 398 | 187 |
| Anthracen | 37 | 22 | 15 | 44¹ | < 18 |
| Fluoranthren | 300¹ | 139 | 94 | 261 | 136 |
| Pyren | 244 | 156 | 94 | 250¹ | 170 |
| Benzo(a)anthracen | 187² | 111 | 52 | 170 | 82 |
| Chrysen | 216² | 110 | 42 | 170 | 75 |
| Benzo(e)pyren | < 119 | 155 | < 150 | 182² | < 165 |
| Benzo(b)fluoranthren | 89 | 135 | 34 | 172² | 56 |
| Benzo(k)fluoranthren | 61 | 74 | < 28 | 100² | 34 |
| Benzo(a)pyren | 103 | 164 | 37 | 205² | 75 |
| Benzo(ghi)perylen | 56 | 124 | < 27 | 159¹ | 53 |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren | 66 | 137 | < 47 | 159¹ | 57 |

¹Maximalkonzentration für PAK, ²Maximalkonzentration für PAK mit Grenzwert in Bewertungsmaßstäben

5. Diskussion

Generell ist die Möglichkeit eines individuell erhöhten Krebsrisikos durch die Brandbekämpfung nicht auszuschließen. In diesem Projekt wurde untersucht, ob – und wenn ja, wie viel – PAK bei der Brandbekämpfung und den damit verbundenen Tätigkeiten von Feuerwehreinsatzkräften aufgenommen werden. Dazu wurden 227 Beschäftigte der Berufsfeuerwehren und Freiwilligen Feuerwehren Hamburg und Berlin in die Studie eingeschlossen. 1-Hydroxypyren als Stoffwechselprodukt des PAK Pyren diente als Expositionsmarker im Urin. Acht der Beschäftigten waren in Atemschutz- und Schlauchwerkstätten tätig. Unter den Teilnehmenden gaben 70 Einsatzkräfte nach einem Brandeinsatz und sieben Beschäftigte aus der Atemschutz- und Schlauchwerkstatt nach ihrer Schicht Urinproben ab. Bei Realeinsätzen in Wohngebäudebränden und bei Fahrzeug- und sonstigen Bränden im Freien trug ein Teilkollektiv von 14 Einsatzkräften der Berufsfeuerwehr ein Set an Baumwollwäsche, bestehend aus Shirt, Hose, Haube, Handschuhen und Socken, unter der Einsatzkleidung. Drei weitere Beschäftigte trugen Baumwollshirts und -handschuhe bei Tätigkeiten in einer Atemschutz- und Schlauchwerkstatt. Die Baumwollunterwäsche diente als Trägermaterial für durch die Schutzkleidung dringenden PAK und ermöglicht damit Rückschlüsse auf eine dermale Belastung.

Die Teilnahmequote der Beprobten zu allen Teilnehmenden betrug 40% und nur auf Einsatzkräfte bezogen 32 %. Es wurde viel Aufwand betrieben, die Beschäftigten der Feuerwehren für das Projekt zu gewinnen und an die Probeabgabe nach einem Einsatz aus dem Bereich Brandschutz zu erinnern. Eine höhere Beteiligungsquote bei den Brandeinsätzen ließ sich nicht realisieren. Zum einen hängt diese natürlich auch von der Anzahl der Brände im Studienverlauf während der Dienstzeit in einer der zu beprobenden Funktionen ab. Bei einigen Teilnehmenden wird dies der Grund gewesen sein, dass sie keinen Einsatz im Rahmen des Projektes vorweisen konnten. Andere wurden während der Laufzeit der Studie auf Wachen versetzt, die nicht an der Studie teilnahmen, und eine Abgabe der Proben war somit nicht möglich. Das lässt sich allerdings nicht quantifizieren. Die Responserate in epidemiologischen Studien ist sehr unterschiedlich. In der bevölkerungsbezogenen epidemiologischen SHIP-Studie in Vorpommern betrug diese zwischen 49 % und 76 % in den unterschiedlichen Gemeinden des Studiengebietes (Latzka et al. 2004). Letztendlich zeigt sich, dass die Teilnahmequote in diesem Projekt sich nicht besonders von anderen bevölkerungsbezogenen epidemiologischen Studien unterscheidet, wenn man davon ausgeht, dass jeder zweite der Teilnehmenden keinen Brandeinsatz im Zeitrahmen des Projektes hatte.

Für die Auswertung der Konzentration an 1-OHP im Urin wurden zwei Beurteilungsmaßstäbe verwendet: Zum einen Referenzwerte für 1-OHP im Urin. Diese orientieren sich am 95 %-Perzentil beruflich nicht exponierter Beschäftigter aus der Allgemeinbevölkerung in Deutschland. Da PAK, und damit Pyren, auch im Zigarettenrauch vorkommt, ist der Referenzwert für 1-OHP im Urin von Nichtrauchern per se niedriger als der von Rauchern. Für Nichtraucher beträgt er 0,30 µg/g Kreatinin. Dies wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) festgelegt und wird als „Biologischer Arbeitsstoff-Referenzwert“ (BAR) bezeichnet. Für Raucher gibt es keinen entsprechenden Wert der DFG. Daher wurde hier – um auch die Ergebnisse rauchender Studienteilnehmer interpretieren zu können – ein Referenzwert gewählt, der sich an den Rauchern der deutschen Allgemeinbevölkerung aus dem Umweltsurvey 1998 orientiert und 0,73 µg/g Kreatinin beträgt (Becker et al. 1998). Das 95 %-Perzentil für Nichtraucher (0,30 µg/g) und Raucher (0,73 µg/g) ist nichts anderes, als dass die 1-OHP Werte im Urin bei 95 % aller beruflich nicht exponierten Personen im Falle von Nichtrauchern unterhalb von 0,30 µg/g und im Falle von Rauchern unterhalb von 0,73 µg/g im Urin liegen. Es bedeutet aber auch, dass jeweils 5 % der nichtrauchenden bzw. rauchenden Allgemeinbevölkerung Konzentrationen an 1-OHP im Urin aufweisen, die oberhalb dieser Werte liegen. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass Referenzwerte keinerlei Bezug zu gesundheitlichen Effekten haben, eine Überschreitung lediglich als stattgefundene Exposition gewertet werden kann und in keinem Fall mit einem höheren Gesundheitsrisiko im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung gleichgesetzt werden darf.

Um auch Aussagen hinsichtlich eines erhöhten Gesundheitsrisikos zu ermöglichen, das mit einer PAK-Exposition einhergeht, muss an Stelle des Referenzwertes ein Beurteilungswert mit Bezug zu gesundheitlichen Effekten gewählt werden. Im Falle von PAK und 1-OHP im Urin gibt es in Deutschland oder Europa keinen derartigen Beurteilungswert. Es gibt jedoch mit dem „Biological Exposure Index“ (BEI[®]) der US-amerikanischen Gesellschaft für Industriehygiene (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) einen entsprechenden Wert für 1-OHP im Urin nach beruflicher Exposition gegenüber PAK für die USA. Der BEI[®] für 1-OHP im Urin beträgt 2,5 µg/L und basiert auf Studien aus der PAK-Industrie, die zeigen, dass bei länger andauernden Expositionen gegenüber PAK, die zu Werten oberhalb dieser Konzentration an 1-OHP im Urin führen, genotoxische Effekte beim Menschen, also Schädigungen der Erbsubstanz DNA, nicht mehr auszuschließen sind. Dieser Wert gilt damit streng genommen nur für PAK-belastete gewerbliche Arbeitsplätze, kann aber hilfsweise auch für die Interpretation der hier vorliegenden Daten bei Feuerwehreinsatzkräften herangezogen werden. Der BEI[®] macht dabei keinen Unterschied zwischen Rauchern und Nichtrauchern. Wichtig in diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass eine Schädigung der Erbsubstanz DNA dabei nicht gleichbedeutend mit der Entstehung von Krebs ist. Insbesondere einmalige/kurzfristige Überschreitungen dürfen daher ebenfalls nicht automatisch mit einem erhöhten Krebsrisiko gleichgesetzt werden. Hier sind die Dauer und die Häufigkeit einer Überschreitung über das gesamte Arbeitsleben zu berücksichtigen. Zudem variiert der BEI[®] abhängig vom Verhältnis der luftgetragenen karzinogenen PAK (z. B. Benzo[a]pyren) zu Pyren. Dieses Verhältnis wird bei unkontrollierten Bränden von vielen Faktoren, wie Brandgut und Sauerstoffzufuhr, bestimmt (Viau 1999). Daher kann ein einzelner BEI[®] von 2,5 µg/L auch nicht für alle Brandeinsätze Gültigkeit haben (Caux et al. 2002). Dennoch wurde für diesen Bericht dieser BEI[®] für 1-OHP der ACGIH hilfsweise zur Bewertung von PAK-Expositionsdaten im Hinblick auf mögliche DNA-schädigende Wirkungen verwendet (ACGIH 2017). Ein ähnlicher Richtwert von knapp 2,0 µg/g Kreatinin wurde mit Bezug auf gesundheitliche Effekte auch von Jongeneelen (2014) vorgeschlagen.

Biomonitoring

Alle 1-OHP Konzentrationen bei der Eingangsuntersuchung waren unauffällig. Außer bei drei Teilnehmenden lagen alle Werte unterhalb der Referenzwerte für Nichtraucher (BAR) bzw. Raucher. Eine spezifische Ursache für die drei Überschreitungen konnte im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden. Die entsprechenden Ergebnisse der Urinproben nach dem Einsatz waren unauffällig. Rein statistisch hätten wir bei dieser Studiengröße bei bis zu elf Teilnehmenden (5 %) eine Überschreitung des BAR erwarten können. Die tägliche Aufnahme von PAK durch die Nahrung, Zigarettenrauch und anderen Quellen unterliegt Schwankungen. Das zeigt, dass die Einsatzkräfte eine mit der beruflich nicht exponierten Allgemeinbevölkerung vergleichbare Exposition aufweisen. Insofern eignen sich diese Werte als Vergleichswerte zu den 1-OHP Konzentrationen nach einem Brandeinsatz bzw. Schichtende in den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten. Organisatorisch ließ sich die Voraussetzung „48 h vor Probenabgabe kein Brandeinsatz“, die im Studienprotokoll für die Eingangsuntersuchung angenommen wurde, nicht bei allen Einsatzkräften so einhalten. Acht Einsatzkräfte gaben an, am Tag der Probenabgabe bzw. am Tag davor bei einem Brandeinsatz eingesetzt gewesen zu sein, zwölf Einsatzkräfte hatten zwei Tage vor der Eingangsuntersuchung einen Einsatz. Die Werte dieser Einsatzkräfte lagen jeweils unter dem entsprechenden (Rauchstatus-spezifischen) Referenzwert.

Die Verläufe der 1-OHP Konzentrationen bieten einen orientierenden Einblick in die Realexposition von Einsatzkräften der Feuerwehr. Eine Generalisierung dieser Ergebnisse ist nicht ohne weiteres möglich, da jeder Einsatz verschieden ist, abhängig von Brandgut, Ventilation, Gebäudestruktur und vielen anderen Faktoren. Es handelt sich hier also nicht um eine Auswahl repräsentativer Brandeinsätze in Deutschland. Gleichwohl sind es reale Brandeinsätze, die die Einsatzwirklichkeit widerspiegeln. Sie zeigen somit auch die Bandbreite der Exposition gegenüber PAK durch Brandeinsätze auf. Dies wurde auch in einer anderen Studie gezeigt (Fent et al. 2019): Dort war die 1-OHP-Ausscheidung nach der Ausbildung im Übungscontainer nach dem Verbrennen von OSB-Platten höher im Vergleich zu unbehandeltem Holz. Zugleich lassen sich aus den Ergebnissen aber auch orientierende

Aussagen zu den relativen Expositionsverhältnissen untereinander (zwischen den Szenarien und Tätigkeiten) und damit auch zu Haupteinflussgrößen auf die Exposition treffen.

Überwiegend wurden durch die Einsatzkräfte in diesem Projekt Brände in Wohngebäuden und im Freien dokumentiert. Dies sind sicherlich auch die häufigsten Brände in Deutschland. Allerdings nahmen mit Hamburg und Berlin Feuerwehren zweier Großstädte mit dichter Wohnbebauung an dem Projekt teil. Es gibt keine bundeseinheitliche Statistik zu Feuerwehreinsätzen. Die Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) führt eine Brandschadenstatistik (Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb) 2020), die sehr detailliert ist. Aus dieser kann jedoch nicht ohne weiteres auf die Brandszenarien in diesem Projekt geschlossen werden. Die Statistik des Deutschen Feuerwehrverbandes verzeichnete für das Jahr 2020 insgesamt 248.077 Brände und Explosionen (Deutscher Feuerwehrverband 2018). Hier zeigt sich durchaus, dass die Ergebnisse orientierenden Charakter haben. Nichtsdestotrotz geben sie wichtige Hinweise auf mögliche Gefahrstoff-Expositionen durch Brandeinsätze.

In mehr als 60 % der Einsätze war die Einsatzkraft mit einem Pressluftatmer ausgestattet und in wiederum dreiviertel dieser Fälle während des Innenangriffs. Es wurden ebenfalls 12 Gruppenführer beprobt, während Maschinisten und Einsatzkräfte ohne Pressluftatmer kaum teilnahmen. Insofern können im Rahmen der Studie Aussagen insbesondere für den Brandeinsatz mit Pressluftatmer getroffen werden sowie teilweise für die Gruppenführer. Bei der direkten Brandbekämpfung sind die Einsatzkräfte der höchsten Exposition ausgesetzt. Insofern können vor allem Aussagen getroffen werden, ob PAK bei der unmittelbaren Brandbekämpfung trotz korrekter Anwendung der PSA von der Einsatzkraft aufgenommen wird. Aussagen zu den anderen Tätigkeiten sind dagegen limitiert, da die Aufgaben während eines Einsatzes sehr individuell sind. Das gilt auch für die Beschäftigten in den Atemschutz- und Schlauchwerkstätten. Mit sieben Teilnehmenden ist die Stichprobe zu klein für valide Aussagen. Allerdings können in ausgewählten Einzelfällen aus der Kombination aus analytischen Ergebnissen (Urin, Baumwollmaterial) und zusätzlicher Angaben aus dem Fragebogen zu besonderen Vorkommnissen und Handlungsabläufen durchaus Rückschlüsse auf mögliche Expositions- oder Kontaminationsquellen gezogen werden.

Bei den 70 Brandeinsätzen zeigte sich ein Anstieg der mittleren 1-OHP Konzentration unabhängig von der Kreatinin-Adjustierung im Vergleich zur Eingangsuntersuchung. Die Anzahl der Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze nahm in den Proben nach dem Brandeinsatz deutlich ab. Konzentrationen, die über dem BEI[®], dem BAR für Nichtraucher oder dem Referenzwert für Raucher waren, kamen lediglich vereinzelt vor. Der überwiegende Anteil der Proben verblieb unterhalb dieser Beurteilungswerte. Insgesamt ist aus den Daten ersichtlich, dass eine Aufnahme von Pyren (und damit PAK) durch den Brandeinsatz stattfindet und dieses zu 1-OHP verstoffwechselt wird. Im Vergleich zur Eingangsuntersuchung ist nach dem Einsatz im Mittel eine Verdoppelung der Konzentration aus den Daten ersichtlich. Dass die mittlere Konzentration von Zeitpunkt 2 zu Zeitpunkt 3 und insbesondere Kreatinin-adjustiert von Zeitpunkt 2 zum Zeitpunkt 3 in etwa gleichbleibt bzw. noch leicht ansteigt, zeigt deutlich, dass dieser Anstieg tatsächlich durch eine beim Brandeinsatz stattgehabte Exposition gegenüber Pyren bzw. PAK zustande kam. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass in der überwiegenden Anzahl der Einsätze weder der BEI[®] noch die entsprechenden Raucherstatus-abhängigen Referenzwerte überschritten wurden. Nur bei einzelnen Einsätzen konnte eine höhere Aufnahme von Pyren und damit PAK festgestellt werden, die über diesen Beurteilungsmaßstäben lag. Die höchste Konzentration wurde dabei bei einem Wohnungsbrand gemessen (mit Pressluftatmer im Innenangriff und Nachlöscharbeiten). Ebenfalls wurden bei zwei Einsatzkräften, die ohne Pressluftatmer tätig waren, erhöhte Konzentrationen an 1-OHP im Urin nachgewiesen.

Bei genauerer Betrachtung derjenigen Fälle, in denen erhöhte Konzentrationen gemessen werden konnten, handelte es sich in der Regel um Einsätze mit starker Raumentwicklung. Dabei konnte auch das regelhafte Tragen des umluftunabhängigen Atemschutzes die Aufnahme von Pyren nicht vollständig verhindern, jedoch zumindest soweit vermindern, dass nur noch in wenigen Fällen Konzentrationen über dem mit gesundheitlichen Effekten assoziierten BEI[®] beobachtet werden konnten. Die übrige, korrekt angelegte Schutzkleidung inklusive Flammenschutzhaube kann die Aufnahme der Brandrauchbestandteile zusätzlich minimieren. In den beobachteten Fällen mit höheren Konzentrationen an 1-OHP im Urin erfolgte die Inkorporation daher vermutlich über die Haut, da eine inhalative Aufnahme durch die PSA erst nach Verlassen der Einsatzstelle und dem Ablegen des umluftunabhängigen Atemschutzes möglich gewesen wäre. Ein weiterer möglicher Aufnahmeweg – dann ebenfalls größtenteils über die Haut – kann der Kontakt zu kontaminierter Kleidung oder anderen Gegenständen nach Verlassen der Brandstelle sein. Dies ist u. a. aus den Ergebnissen derjenigen Einsätze ersichtlich, bei denen mehrere Einsatzkräfte gleichzeitig beprobt wurden. Hier wiesen die Einsatzkräfte mit Pressluftatmer, die direkten Kontakt zum Brandrauch hatten, die höheren Konzentrationen auf. Insbesondere zeigte sich ganz allgemein, dass dunkelgrauer/schwarzer Rauch, Sichtweiten unter zwei Metern und eine tiefe Rauchsicht unter einem Meter im Median zu einer höheren 1-OHP Konzentration führte. In einem Brandszenario mit diesen Gegebenheiten wird mehr PAK freigesetzt, da sich die PAK hauptsächlich im Brandrauch befinden und entsprechend dunkler, schwarzer Rauch auch mehr PAK beinhaltet als hellerer Rauch.

Andere Faktoren wie das Betreten der kalten Brandstelle, die Benutzung von Schaummitteln und das Benutzen von Untersuchungshandschuhen nach dem Einsatz ergaben hingegen keine Hinweise, dass sie die 1-OHP Konzentration im Urin beeinflussen. Da die Brandstelle nach dem Einsatz betreten wurde, ist von keiner wesentlichen Aufnahme von PAK relativ zum Gesamtgeschehen auszugehen. Andererseits kann auf Basis der geringen Fallzahl an Betreten der kalten Brandstelle in unserer Studie keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen gezogen oder belastbare Aussagen getroffen werden, so dass hier letztendlich das spezifische Verhalten der Einsatzkraft bei der Begehung (reine Begehung, Anfassen von Brandgut, etc.) von Bedeutung ist. Das gleiche gilt vermutlich auch für das Tragen von Untersuchungshandschuhen beim Ablegen der kontaminierten Geräte und Kleidung, wobei hier bei der Auswertung zusätzlich nach der Rauchfarbe deutlich wird, dass die Einsatzkräfte, die Einmalhandschuhe trugen, tendenziell geringere Mengen an 1-OHP ausschieden. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Expositionsszenarien und individuellen Verhaltensweisen an der Brandstelle ist dies allerdings kein sicherer Nachweis dafür, dass diese Maßnahme tatsächlich einen Effekt auf die Höhe der Exposition hat. Dennoch ist es natürlich wichtig, entsprechende Hygienemaßnahmen beim Betreten der kalten Brandstelle oder nach dem Einsatz anzuwenden. Jede sinnvolle und einfach anwendbare Maßnahme zur Expositionsminderung sollte auch angewendet werden. Insgesamt gab es zu wenige Einsätze mit Schaummittel, um belastbare Aussagen dazu treffen zu können.

Baumwollwäsche

Die Baumwollunterwäsche wurde an 21 standardisierten und zusätzlich an optisch auffälligen Stellen (Hotspots) ausgestanzt und auf die 16 PAK aus der Liste der EPA, zuzüglich Benzo[e]pyren, analysiert (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)).

Als Maß zur Bewertung der Wirkungsstärke von PAK-Gemischen dient BaP (EU-GHS-Einstufung nach Verordnung (EG) 1272/2008: Karzinogenität 1B, Keimzellmutagenität 1B, Reproduktionstoxizität 1B) als Leitsubstanz. Da keine Grenzwerte für die dermale Exposition durch PAK bzw. deren Leitkomponente BaP existieren, wurden hilfsweise als Bewertungsmaßstäbe zur Einschätzung der PAK-Konzentrationen in der Baumwollunterwäsche die Verordnung (EU) 2018/1513 der Europäischen Kommission vom 10. Oktober 2018 und der Standard 100 by Oeko-Tex[®] herangezogen (Europäisches Parlament und Rat 31.12.2008; Oeko-Tex[®]). Die EU-Verordnung 2018/1513 sieht vor, dass nach dem 1. November 2020 eine Reihe unterschiedlicher, als nachweislich krebserzeugend,

keimzellverändernd oder reproduktionstoxisch angesehene PAK (spezifisch Benz(a)anthracen, Chrysen, Benzo(e)pyren, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(j)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren und Dibenzo(ah)anthracen) nicht mehr in Konzentrationen von jeweils 1 mg/kg (=1.000 ng/g = 1 ppm) oder höher in Kleidung oder damit in Bezug stehendem Zubehör sowie Schuhwaren vorhanden sein dürfen. Auch wenn persönliche Schutzausrüstungen explizit von dieser Verordnung ausgenommen wurden (da an sie primär besondere Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Funktionalität erfüllt sein müssen), wird dieses Beurteilungsmaß hilfsweise für die Interpretation der in dieser Studie quantifizierten PAK-Konzentrationen in der Baumwollunterwäsche herangezogen. Einen identischen maximalen Grenzwert von 1 mg/kg für oben genannte PAK sieht – ähnlich wie die EU-Verordnung – auch der Standard 100 von Oeko-Tex® vor. Zusätzlich dürfen hier 24 PAK in der Summe die Konzentration von 10 mg/kg nicht überschreiten. Bei beiden Beurteilungsmaßstäben (EU-Verordnung und Standard 100 Oeko-Tex®) handelt es sich um Maßstäbe ohne Bezug auf gesundheitliche Effekte und rein auf Basis des Minimierungsgebots von krebserzeugenden, keimzellverändernden oder reproduktionstoxisch eingestuften Substanzen in Textilien. Insgesamt können daher sowohl bei Unterschreitung des Wertes gesundheitliche Effekte nicht ausgeschlossen werden als auch umgekehrt bei Überschreitung der Maßstäbe gesundheitliche Effekte als wahrscheinlich oder gar gesichert angenommen werden. Die Analysenergebnisse der Baumwollunterwäsche lagen in allen Fällen unterhalb o. g. Bewertungsmaßstäbe. Lediglich in 10 % von 270 auswertbaren ausgestanzten Stoffstücken konnten (mittel- und schwerer flüchtige) PAK in überwiegend geringen Konzentrationen bestimmt werden. Bei einer Gesamtzahl von 4.590 Einzelanalysen lagen in 3,1 % aller Fälle die Konzentrationen über den Bestimmungsgrenzen. Der höchste gemessene Einzelwert an einem PAK betrug 657 ng/g an Phenanthren. Nicht quantifiziert wurden Dibenzo(ah)anthracen und die flüchtigsten Vertreter aus der Stoffklasse der PAK Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen und Fluoren.

Die Baumwollunterwäsche wurde bei zwei Einsatzszenarien (Wohngebäudebrände und Fahrzeug- bzw. sonstige Brände im Freien) jeweils von sechs Einsatzkräften der Berufsfeuerwehr getragen. Bei Wohngebäudebränden im Innenangriff mit Pressluftatmern wurden in 8,0 % der Proben eine breite Palette von mittel- bis schwerer flüchtigen PAK im überwiegend unteren bis mittleren ng/g-Bereich bestimmt. Eine Hotspotprobe aus dem rechten Tascheneingriff einer Baumwollhose lieferte die Maximalwerte für Phenanthren, Fluoranthren, Benz(a)anthracen und Chrysen. Bei Fahrzeug- bzw. sonstigen Bränden im Freien wurden an Stoffstücken PAK mit 8,3 % in einem nahezu identischen Anteil quantifiziert wie bei Wohngebäudebränden. Jedoch wurden in diesen Proben weniger verschiedene PAK gefunden, die darüber hinaus auch noch in geringeren Konzentrationen bestimmt wurden. Die Ergebnisse unterstützen die Annahme, dass die stärkste Belastung bei der direkten Brandbekämpfung mit Rauchentwicklung in geschlossenen Räumen auftritt.

Drei Beschäftigte der Berufsfeuerwehr trugen bei Tätigkeiten in einer Atemschutz- und Schlauchwerkstatt Baumwollshirts und -handschuhe. Während bei zwei Beschäftigten keine Belastungen mit PAK festgestellt werden konnten, wurde beim dritten Beschäftigten in dem getragenen Paar Baumwollhandschuhe eine breite Palette an PAK mit zum Teil höheren Konzentrationen quantifiziert. Dies betraf sowohl die Standardstanzpositionen als auch zusätzliche Stoffproben aus optisch auffälligen Bereichen. Ein Hotspot aus dem linken Zeigefinger wies die Maximalkonzentrationen für die mittelflüchtigen Verbindungen Anthracen und Pyren und die höchsten Gehalte für alle schwerer flüchtigen PAK auf, darunter auch mit 205 ng/g die maximale Konzentration für die Leitkomponente BaP. Im Gegensatz zu seinen Kollegen trug dieser Beschäftigte keine Einmalhandschuhe über den Baumwollhandschuhen. Auch wenn aufgrund des zu geringen Datenkollektivs keine validen Rückschlüsse gemacht werden können, liefert dieses Ergebnis einen Hinweis auf die Wirksamkeit der Einmalhandschuhe als PSA im Rahmen von Tätigkeiten in Atemschutz- und Schlauchwerkstätten.

Mit 14 belasteten von insgesamt 69 ausgestanzten Stoffproben waren die Baumwollhandschuhe am häufigsten mit PAK kontaminiert. Neben dem oben erwähnten Handschuhpaar des Beschäftigten in der Atemschutz- und

Schlauchwerkstatt wurden die übrigen belasteten Handschuhe im Rahmen von Realeinsätzen von Feuerwehreinsatzkräften bei Wohngebäudebränden getragen. In ausgestanzten Stoffstücken dieser Handschuhe wurden überwiegend mittelflüchtige PAK im unteren Konzentrationsbereich quantifiziert.

In keinem der 34 ausgestanzten Stoffstücke aus den Baumwollhauben, die bei Wohngebäudebränden und Fahrzeug- bzw. sonstigen Bränden im Freien getragen wurden, konnten PAK bestimmt werden. Dies deutet darauf hin, dass das Tragen von Feuerwehrhelmen und insbesondere Flammenschutzhauben vor einer Exposition der Haut gegenüber PAK schützt.

In lediglich zwei von insgesamt 103 ausgestanzten Stoffstücken aus den Baumwollshirts konnten PAK quantifiziert werden. Nur in einer Probe wurde eine breitere Palette an PAK in überwiegend mittleren Konzentrationen bestimmt. Damit wiesen die Baumwollshirts eine vergleichsweise geringe Belastung auf.

Aus den Baumwollunterhosen wurden insgesamt 58 Stoffstücken ausgestanzt. In drei Stoffstücken einer Baumwollhose, die bei einem Wohngebäudebrand im Innenangriff mit Pressluftatmer getragen wurde, konnten mittel- und schwerer flüchtige PAK bestimmt werden. Eine verhältnismäßig hohe PAK-Belastung wies eine aus dem rechten Tascheneingriff zusätzlich ausgestanzte, optisch auffällige Probe auf.

Nur mit geringen Konzentrationen waren hingegen die Baumwollsocken belastet, bei denen in acht von 48 ausgestanzten Stoffstücken PAK quantifiziert wurden. Hier konnten PAK ausschließlich in den Bündchen bestimmt werden. Trotz der geringen Konzentrationen weist dies darauf hin, dass eine dermale Exposition der Feuerwehreinsatzkräfte gegenüber Gefahrstoffen an Hautstellen zwischen den einzelnen Kleidungsstücken der Einsatzkleidung prinzipiell möglich ist.

Nicht jede optisch auffällige Probe war mit PAK belastet. So konnten nur in fünf von 17 Stoffstücken aus optisch auffälligen Stoffbereichen PAK quantifiziert werden. Zwar wurden in zwei dieser Hotspots, dem Stoffstück aus dem rechten Tascheneingriff der Baumwollunterhose und dem Hotspot aus dem linken Zeigefinger des belasteten Baumwollhandschuhpaars, die maximalen Werte für alle PAK bestimmt, jedoch lagen diese Konzentrationen generell deutlich unterhalb der zur Orientierung herangezogenen Beurteilungsmaßstäbe. Der optische Verschmutzungsgrad kann daher nicht zwingend als Maßstab für das mögliche Ausmaß einer Exposition herangezogen werden.

Vergleich mit anderen Biomonitoring-Studien bei der Feuerwehr

Im Folgenden werden die Projektergebnisse des Biomonitorings entsprechend der publizierten Literatur eingeordnet. Zum einen werden diese mit anderen Biomonitoring-Studien verglichen, die ebenfalls die Exposition von Feuerwehreinsatzkräften untersuchten, zum anderen erfolgt eine Betrachtung im Vergleich zu Studien von PAK-exponierten Beschäftigten an gewerblichen Arbeitsplätzen wie z. B. bei Tätigkeiten in der Stahlindustrie.

Die überwiegende Anzahl von Biomonitoring-Studien bei Feuerwehren besteht aus Untersuchungen in Brandübungscontainern oder in nachgestellten Brandszenarien (Banks et al. 2021; Rossbach et al. 2020; Fent et al. 2019; Feunekes et al. 1997; Moen und Ovrebø 1997). Eventuell in den Studien angegebene molare 1-OHP-Konzentration in $\mu\text{mol/mol}$ Kreatinin wurden mit dem Faktor 1,93 in die entsprechenden $\mu\text{g/g}$ Kreatinin-Angaben umgerechnet, um sie mit den hier vorliegenden Studienergebnissen und den Referenzwerten für Nichtraucher und Raucher vergleichen zu können (Riechert et al. 2011). Da der gesundheitsbasierte BEI[®] in $\mu\text{g/L}$ angegeben ist, müssen zu einem Vergleich Angaben in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin auch in entsprechende volumenbezogene Werte ($\mu\text{g/L}$) und umgekehrt umgerechnet werden. Im Gegensatz zur molaren Masse von 1-OHP und Kreatinin, die mit dem Faktor 1,93 eine exakte Umrechnung von $\mu\text{mol/mol}$ Kreatinin in $\mu\text{g/g}$ Kreatinin erlaubt, ist die Ausscheidung an Kreatinin in einer Person, die für die Umrechnung von $\mu\text{g/g}$ Kreatinin in $\mu\text{g/L}$ (und umgekehrt) benötigt wird, nicht konstant.

Der Grund ist, dass sich die Kreatinin-Ausscheidung von Person zu Person unterscheidet und abhängig ist vom hydratisierten Zustand und der Muskelmasse (Fitnesszustand). Die mittlere Ausscheidung der Allgemeinbevölkerung an Kreatinin beträgt 1,1 g/L (Barr et al. 2005). Sie bezieht sich generell auf Erwachsene jedoch nicht notwendigerweise auf Erwachsene an gewerblichen Arbeitsplätzen. Letztere weisen in der Regel aufgrund ihrer körperlichen Tätigkeiten eine höhere Kreatininausscheidung im Urin auf, so dass u. a. die US-amerikanische ACGIH einen Umrechnungsfaktor von 1,4 g/L als Konvention für die Umrechnung von volumenbezogenen Werte in Kreatinin-bezogene Werte für beruflich Beschäftigte nutzt. Dieser Wert wird entsprechend auch im vorliegenden Bericht herangezogen um Kreatinin-bezogene Werte in volumenbezogene Werte und umgekehrt umzurechnen. Eine Konzentration von 1,0 µg 1-OHP/L Urin entspricht damit 1,4 µg/g Kreatinin und umgekehrt.

Nach Einsätzen in Übungscontainern wurden grundsätzlich höhere Konzentrationen von 1-OHP bei Einsatzkräften im Vergleich zu Kontrollpersonen gefunden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Raucher im Vergleich zu Nichtrauchern bereits mit einer höheren Ausgangs-Konzentration starten (Feunekes et al. 1997). In der auch für die Fallzahlplanung herangezogenen norwegischen Studie wurde eine ungefähre Verdoppelung der mittleren 1-OHP Konzentration nach dem Übungseinsatz gefunden (Moen und Ovrebø 1997). Dazu wurden die Konzentrationen ein und derselben Personen jeweils vor und nach der Übung miteinander verglichen, um einen besseren Einblick in die individuelle Aufnahme von 1-OHP durch den Einsatz zu erhalten. Die höchste Konzentration (0,44 µg/g Kreatinin, d.h. 1,84 µg/L) wurde bei einem Trainer gefunden, der Nichtraucher war, sich lange im Rauch (Außenbereich) aufhielt und mehrmals während der Übung die Atemschutzmaske abnahm. Letztendlich führte diese Exposition zu einer Überschreitung des entsprechenden Referenzwertes für Nichtraucher von 0,3 µg/g Kreatinin, jedoch nicht zu einer Überschreitung des gesundheitsbasierten BEI®-Wertes von 2,5 µg/L. Es konnte damit allerdings gezeigt werden, dass die Zunahme an 1-OHP im Urin eindeutig der Brandrauchexposition geschuldet ist. Die einzige uns bekannte Studie zum Biomonitoring während Feuerwehrrübungen in Deutschland ist eine Studie bei der Feuerwehr in Frankfurt am Main (Rossbach et al. 2020). In dieser wurden sechs Trainingsleiter einer Brandübungsanlage beprobt. Bis zu 18 Stunden nach der Übungseinheit wurden Urinproben gewonnen. Spätestens drei Stunden nach Trainingsende konnte eine Erhöhung an 1-OHP im Urin festgestellt werden. Alle Teilnehmer waren Nichtraucher und trugen zusätzlich zu ihrer PSA umluftunabhängige Atemschutzgeräte. Die mediane Exposition stieg von 0,06 auf 0,40 µg/g Kreatinin (ca. Faktor 7, also von 0,08 auf 0,56 µg/L). Vor dem Training lag die größte 1-OHP Konzentration bei 0,15 und nach dem Training bei 1,88 µg/g Kreatinin (d.h. 2,63 µg/L). Die Ergebnisse zeigen, dass in Einzelfällen nicht nur Überschreitungen des Referenzwertes sondern durchaus auch Überschreitungen des gesundheitsbasierten BEI®-Wertes möglich sind. Dies betraf aber nur eine Person. Der Rest verblieb mit den Werten zum Teil deutlich darunter und innerhalb des Referenzbereichs. Dennoch zeigte sich auch hier, dass bei Brandübungen – trotz getragenen Atemschutz und Einsatzkleidung – Pyren (und damit PAK) aufgenommen wird. Insbesondere starke Rauchexposition und auch das Nichttragen von Atemschutz im Bereich der Übungsanlage bzw. nach Abschluss der Übung erhöht die 1-OHP Konzentrationen nochmals. Viele Faktoren beeinflussen dabei die Menge und Höhe an Schadstoffen, die beim Brand freigesetzt werden. Das zeigten unabhängig voneinander finnische und US-amerikanische Untersuchungen (Laitinen et al. 2010; Fent et al. 2019). Daher ist ein direkter Vergleich schwierig. Die Studien belegen, dass während des Trainings die mittlere 1-OHP Konzentration, trotz korrekt angelegter PSA, steigt und über die Beurteilungsmaßstäbe hinausgehen kann. Zudem zeigten (Fent et al. 2019), dass die ausgeschiedene Menge an 1-OHP stark von den im Übungscontainer eingesetzten Materialien abhängig ist. Bei dem Einsatz von unbehandelten Paletten und Stroh lag der Median bei 0,84 µg/g Kreatinin (d.h. 1,18 µg/L), wurden dagegen OSB-Platten in diesem Szenario eingesetzt, lag der Median bei 3,5 µg/g Kreatinin (d.h. 4,9 µg/L). Beim Einsatz von künstlichem Rauch verblieb der Median der Trainer unterhalb der Beurteilungswerte (0,27 µg/g Kreatinin bzw. 0,38 µg/L). Auch in einer aktuellen australischen Studie wurden verschiedene Brennmaterialien in

Übungscontainern verwendet (Banks et al. 2021): Bei der Übung von zwölf Feuerwehrleuten kam Diesel zum Einsatz und bei 14 Feuerwehrleuten Spanplatten. Vor und viermal nach der Übung wurden Urinproben genommen. Auch hier zeigt sich die Abhängigkeit der 1-OHP Konzentration vom Brennmaterial. Beim Diesel konnte keine signifikante Erhöhung der 1-OHP Konzentration festgestellt werden. Die fehlende Erhöhung steht im Widerspruch zu anderen Studien, zeigt damit allerdings nochmals wie vielfältig schon die Expositionsumstände in Übungscontainern sein können. Eine noch höhere Variabilität konnte insofern bei Realbränden erwartet werden, da eine Übung in Trainingsanlagen hinsichtlich der Exposition nur bedingt mit einer realen Einsatzsituation vergleichbar ist. So sind in modernen Wohnungen u. a. auch viele Kunststoffmaterialien verbaut, die in Brandübungsanlagen in der Regel nicht verfeuert werden dürfen. Insofern stellte sich die Frage, wie sich die Situation bei realen Bränden darstellt.

Unabhängig von dieser Studie liegen drei Biomonitoring-Studien bei Realbrandeinsätzen in der Literatur vor. Zwei der Studien wurden in Kanada durchgeführt und eine in den USA. In Toronto wurden 43 Einsatzkräfte nach ihrem Brandeinsatz beprobt (Caux et al. 2002). Die Urinproben wurden bis zu 20 Stunden nach dem Einsatz gewonnen und eine Kontrollprobe nach mindestens vier Tagen ohne Brandeinsatz. Für die Teilnehmer (2 Raucher, 41 Nichtraucher) wurde als Beurteilungsmaßstab für 1-OHP ein Wert von 0,32 $\mu\text{mol/mol}$ Kreatinin ($\approx 0,62 \mu\text{g/g}$ Kreatinin, ca. 0,87 $\mu\text{g/L}$) verwendet. Dieser wurde vom Analyselabor festgelegt und entsprach dem 95 %-Quantil der kanadischen Allgemeinbevölkerung, wobei dieser Wert nicht zwischen Rauchern und Nichtrauchern unterschied. Bis auf eine lagen alle Proben unter diesem Beurteilungsmaßstab. Überwiegend wurden Wohnungs- und Gebäudebrände bekämpft, und die Einsatzkräfte waren direkt zur Brandbekämpfung oder mit Such- und Rettungsaufgaben betraut. Innerhalb der ersten acht Stunden nach dem Brandeinsatz wurde das meiste 1-OHP im Urin ausgeschieden. Im Median trat die höchste 1-OHP Konzentration mit 0,42 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (0,59 $\mu\text{g/L}$) innerhalb der ersten vier Stunden nach dem Einsatz auf. Die höchste gemessene 1-OHP Konzentration lag bei 7 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (9,8 $\mu\text{g/L}$), so dass es auch in dieser Studie in einem Einzelfall zur Überschreitung des gesundheitsbasierten BEI[®]-Wertes kam. Die mediane Konzentration bei Teilnehmern, die direkt bei der Brandbekämpfung und bei den Nachlöscharbeiten eingesetzt waren, betrug jedoch lediglich 0,73 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (1,02 $\mu\text{g/L}$). Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Brandbekämpfung bei Einsatzkräften zu einer PAK Exposition über die allgemeine Hintergrundbelastung hinaus führt. Sie weisen aber darauf hin, dass beim Tragen von atemluftunabhängigen Atemschutzgeräten die 1-OHP Konzentration, im Vergleich zu Industriearbeitsplätzen mit PAK-Exposition, als niedrig anzusehen ist. Auch die Lebenszeitdosis ist vermutlich geringer, da nicht acht Stunden werktäglich Brandeinsätze stattfinden.

Die zweite kanadische Studie zum Biomonitoring von realen Brandeinsätzen im urbanen Setting wurde in Ottawa durchgeführt (Keir et al. 2017). Dort wurden von 16 männlichen Einsatzkräften, die insgesamt 19 Brandeinsätze hatten, Urinproben gewonnen. Es lagen auch Wischproben der Haut, der Unterziehkleidung und der PSA vor. Bei sämtlichen Bränden handelte es sich um Wohnungs- oder Gebäudebrände in Ottawa. Es wurden über einen Zeitraum von 18 Stunden nach dem Einsatz Urinproben gesammelt (Sammelurin) und in diesen Biomarker der Exposition wie 1-OHP bestimmt. Vor dem Einsatz lagen 27 auswertbare Urinproben vor, während nach dem Einsatz 31 Urine in die Auswertung einbezogen wurden. Vor dem Einsatz wurde 1-OHP im Bereich von 0,02 – 0,33 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (0,03 – 0,46 $\mu\text{g/L}$) und nach dem Einsatz von 0,06 – 1,81 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (0,08 – 2,53 $\mu\text{g/L}$) gemessen. Der geometrische Mittelwert stieg von 0,10 auf 0,27 $\mu\text{g/g}$ Kreatinin (0,14 auf 0,38 $\mu\text{g/L}$). Der Rauchstatus der Teilnehmer war nicht bekannt. Ein ähnlicher Anstieg (Faktor 2-3) ist in unserer Studie erkennbar. Für alle Teilnehmer verdoppelte sich die Kreatinin-adjustierte 1-OHP Konzentration durch den Einsatz. Bei Nie-Rauchern und Ex-Rauchern kam es zu einer mehr als vierfachen Konzentrationserhöhung nach dem Einsatz. Lediglich die Raucher zeigten im Mittel keinen Anstieg. Auch in unserer Studie sahen wir bei Wohnungsbränden nahezu eine Verdreifachung. Insofern bestätigen unsere Untersuchungen die Ergebnisse der kanadischen Studie. Beachtet werden sollte allerdings, dass in der kanadischen Studie 18-Stunden Sammelurine verwendet wurden,

um die gesamte Verstoffwechslung von Pyren über einen längeren Zeitraum hinweg zusammenzufassen bzw. zu integrieren. Wir haben uns entschieden, innerhalb eines Zeitraums von 12 Stunden Urin in drei Zeitabschnitten zu sammeln und diese getrennt voneinander auszuwerten, um Aussagen über die Kinetik der Ausscheidung an 1-OHP tätigen zu können. Wir konnten feststellen, dass bei Nichtrauchern die mittlere 1-OHP Konzentration nach 12 Stunden nicht wieder auf das Niveau der Eingangsuntersuchung absank. Dies deutet darauf hin, dass auch nach 12 Stunden Pyren bzw. 1-OHP im Körper vorliegt und dieses verzögert ausgeschieden wird. Allerdings kann erwartet werden, dass die Konzentration nach diesen 12 Stunden deutlich abnimmt, da die größten Anstiege im Zeitraum 2-4 und 6-8 Stunden nach dem Einsatz zu beobachten sind. Bei Rauchern ist die zusätzliche, d.h. einsatzbedingte Aufnahme und Verstoffwechslung des Pyrens deutlich weniger zu sehen, da der Zigarettenrauch-bedingten Aufnahme des Pyrens eine wesentlich größere Bedeutung für die Ausscheidung an 1-OHP im Urin zukommt als der Brandrauch-bedingten Exposition. Ein weiterer Unterschied unserer Studie ist die höhere Anzahl von Teilnehmern im Vergleich zu der kanadischen Studie sowie eine bessere Kenntnis über die genauen Brandumstände. Zudem wurden keine Proben ein und derselben Einsatzkraft aus unterschiedlichen Bränden analysiert, so dass in unserer Studie die Exposition immer einem bestimmten Brandszenario zugeordnet werden konnte. Insgesamt zeigen sowohl unsere Studie als auch die kanadische, dass bei Gebäudebränden PAK in den Körper der Einsatzkraft gelangen können und es in wenigen Einzelfällen und unter ungünstigen Bedingungen auch zu einer Überschreitung gesundheitsrelevanter Beurteilungswerte wie dem BEI[®] kommen kann. Dies ist jedoch, wie bereits oben beschrieben, von den verschiedensten Faktoren abhängig, u. a. vom Ausmaß der Brandrauchentwicklung (Sichtweite, Höhe im Raum) sowie vom Einsatzort (Innenangriff). Aus den kanadischen Studien gab es dazu keine Hinweise.

Die dritte Studie mit Biomonitoring bei Realbränden wurde in den Jahren 2015 bis 2017 in Tucson, Arizona, durchgeführt (Hoppe-Jones et al. 2021). Vor etwaigen Einsätzen gaben dazu 242 Einsatzkräfte – darunter 54 Rettungssanitäter – Urinproben ab. Von 141 dieser Teilnehmenden (darunter drei Frauen) konnten 2-4 Stunden nach einem Einsatz weitere Urinproben gewonnen werden, in denen unter anderem auch 1-OHP bestimmt wurde. Die volumenbezogenen Werte ($\mu\text{g/L}$) wurden gemäß der spezifischen Dichte der jeweiligen Probe adjustiert und damit nicht, wie in den meisten Studien, nach Kreatinin. Insofern sind die konkreten Messwerte nicht direkt mit unserer Studie oder den beiden kanadischen Studien vergleichbar. Insgesamt wurden 15 Brandeinsätze beprobt, darunter elf Hausbrände, ein Brand in einem Appartement und drei andere Gebäudebrände. Die Ergebnisse wurden stratifiziert nach Funktion im Einsatz. Im Vergleich zu den Ergebnissen in den Urinproben vor dem Einsatz wurden nach dem Einsatz bei den Zugführern eine um ca. 1,8-fach höhere Konzentration von 1-OHP gefunden; bei den Maschinisten war diese ca. 1,6-fach höher, bei den Einsatzkräften im direkten Brandeinsatz um etwa den Faktor 2 und bei den Rettungssanitätern um etwa den Faktor 2,3. Ähnlich wie in unserer Studie zeigte sich auch hier eine hohe Variabilität der Konzentration nach dem Einsatz. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Ergebnisse für eine Expositionsreduktion direkt am Ort des Brandgeschehens sprechen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass unsere Ergebnisse vergleichbar mit denen der drei vorangegangenen Studien aus Kanada und den USA sind. Mögliche Unterschiede bei den Gebäuden, der Innenraumausstattung, der taktischen Ausrichtung bei der Brandbekämpfung sowie der Feuerwehrausstattung haben offenbar einen untergeordneten Einfluss auf die Menge an aufgenommenem Pyren.

Expositionsquelle Brandrauch

In Deutschland gibt es für PAK keine Grenzwerte, die sich am Biomonitoring orientieren. Bei Tätigkeiten mit PAK wird Benzo[a]pyren (BaP) als Bezugsgröße in Luftmessungen herangezogen. In der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS 910) sind dafür eine Akzeptanzkonzentration von 70 ng/m^3 ($= 0,07 \mu\text{g/m}^3$) und eine Toleranzkonzentration von 700 ng/m^3 ($= 0,7 \mu\text{g/m}^3$) angegeben (TRGS 910). Die dermale Aufnahme bleibt dabei unberücksichtigt. Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, dass die Akzeptanz- und Toleranzkonzentrationen als

Schichtmittelwerte über einen Zeitraum von acht Stunden und täglich über das gesamte Arbeitsleben festgelegt sind. Selten werden so lange Einsatzzeiten, besonders arbeitstäglich, erreicht.

In einer US-Studie, die reale Brände simulierte, wurden Luftmessungen während eines Innenangriffes durchgeführt (Fent et al. 2018). Dabei wurde eine Wohnung in einem Container nachgebildet und in Brand gesetzt. Mittlere Konzentrationen von bis zu $4.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an B[a]P wurden im Wohnzimmer gemessen. Derartig hohe Konzentrationen an Gefahrstoffen mit Überschreitungsfaktoren von 1.000 bis 10.000 im Vergleich zu Grenzwerten sind bei einem Brandereignis nichts Ungewöhnliches. Aufgrund dieser bekannten hohen Konzentration von toxischen, giftigen und kanzerogenen Stoffen tragen Einsatzkräfte entsprechend persönliche Schutzausrüstung, die bedarfsgerecht durch den umluftunabhängigen Atemschutz ergänzt wird.

In einer weiteren US-amerikanischen Studie wurden in einer Brandübungsanlage während der Brandübungen Luftmessungen durchgeführt und der Gehalt an PAK inkl. B[a]P gemessen (Feunekes et al. 1997). Als Brandmaterial kam Heizöl zum Einsatz. Die Dauer der Übungen betrug zwischen einer halben und anderthalb Stunden. Hierbei wurde im Durchschnitt eine B[a]P-Exposition von $300\text{-}700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gefunden. Die 8-Stunden Schichtmittelwerte an B[a]P bewegten sich einem Bereich von $0,029 - 0,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ B[a]P.

Uns ist lediglich eine Publikation bekannt, in der bei realen Brandeinsätzen entsprechende Messungen durchgeführt wurden (Keir et al. 2020). Hier wurden in Kanada Feuerwehreinsatzkräfte mit Messgeräten ausgestattet, um die während der Brandbekämpfung in Gebäuden auftretenden PAK-Konzentrationen personenbezogen zu bestimmen. Im Rahmen von insgesamt 29 Messungen lagen die gemessenen B[a]P-Konzentrationen hierbei zwischen $0,03$ und $133,76 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese – wenn auch wenigen – Ergebnisse lassen deutlich niedrigere Konzentrationen unter Real- als unter Trainingsbedingungen erkennen, da bei diesen Trainings meistens Rauchgasdurchzündungen simuliert werden, bei denen eine unvollständige Verbrennung durch die Ventilation bewusst stattfindet und somit eine große Menge an u. a. PAK entstehen. Zudem finden die personenbezogenen Messungen unter Realbedingungen an Orten im Brandgeschehen statt, an denen sich Feuerwehkräfte mit entsprechendem Atemschutz hitzebedingt noch aufhalten können. Im Gegensatz dazu können Messergebnisse auf Basis stationärer Messungen – wie die zuvor genannten $300\text{-}700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder gar bis zu $4.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – an Stellen im Brand auftreten, die von Feuerwehreinsatzkräften unter Realbedingungen aufgrund der dort herrschenden extremen Temperaturen physikalisch überhaupt nicht mehr erreicht werden können. Diese Daten zeigen, dass die Entstehung von PAK sehr unterschiedlich sein kann und von vielen Faktoren abhängt – so z. B. vom Brandgut, den Umgebungsbedingungen sowie dem Standort – und zwischen Trainings- und Realbedingungen deutlich variieren kann.

Zu beachten ist ferner, dass Einsatzkräfte mit PSA ausgestattet sind. Gerade dort, wo die höchsten PAK-Expositionen bei einem Brand vorkommen – im Brandrauch – wäre eine Brandbekämpfung ohne umluftunabhängigen Atemschutz nicht möglich. Daher ist das Tragen der PSA unbedingt erforderlich und verhindert die Aufnahme von Gefahrstoffen durch den Atemtrakt.

Vergleich mit gewerblichen Arbeitsplätzen

Damit die Aufnahme von Pyren durch den Brandeinsatz entsprechend eingeordnet werden kann, ist es sinnvoll, die 1-OHP Konzentrationen von Feuerwehreinsatzkräften nicht nur mit den genannten Beurteilungsmaßstäben wie den Rauchstatus-spezifischen Referenzwerten oder dem gesundheitsbasierten BEI®-Wert, sondern auch mit den Expositionen von Beschäftigten an anderen PAK-belasteten (gewerblichen) Arbeitsplätzen zu vergleichen. Bereits in der kanadischen Realbrand-Studie von 2002 wird erwähnt, dass die dort untersuchten Einsatzkräfte im Vergleich zu den Beschäftigten in PAK-belasteten Industrien nicht gegenüber hohen Dosen von Pyren und damit PAK exponiert waren (Caux et al. 2002). Zu diesen Beschäftigten zählen Arbeiter in der Petrochemie und solche, die mit Aluminiumschmelzen oder Asphaltarbeiten befasst sind. In einer deutschen Untersuchung an industriellen

Arbeitsplätzen (Bahnschwellen-Recycling sowie thermische Bodensanierung) in den Jahren 2013 - 2015 wurden innere Belastungen im Median von 8 µg/g Kreatinin bzw. 11,2 µg/L (Maximalwerte bis zu 92,9 µg/g Kreatinin bzw. 130,01 µg/L) nachgewiesen, die durch aufeinanderfolgende umfangreiche Interventionsmaßnahmen letztendlich auf Mediane von zunächst 1,6 µg/g Kreatinin (2,2 µg/L) und schließlich 0,3 µg/g Kreatinin (0,4 µg/L) reduziert werden konnten (Hagmann et al. 2018). In einer deutschlandweiten Studie wurden Beschäftigte aus verschiedenen Industriezweigen mittels Biomonitoring untersucht (Marczynski et al. 2009). In Nachschichtmessungen wurden bei Beschäftigten in der Koksherstellung mediane 1-OHP Konzentrationen von 3,8 µg/g Kreatinin (5,3 µg/L) und einem Interquartilsbereich von 2,2 – 6,9 µg/g Kreatinin (3,1 – 9,7 µg/L) gefunden. Bei der Herstellung von feuerfesten Materialien wurden eine mediane Konzentration von 8,4 µg/g Kreatinin (11,8 µg/L) mit einem Interquartilsbereich von 3,8 – 17,8 µg/g Kreatinin (5,3 – 24,9 µg/L), bei der Herstellung von Graphitelektroden eine mediane Konzentration von 9,7 µg/g (13,6 µg/L) und einem Interquartilsbereich von 5,6 – 17,2 µg/g Kreatinin (7,8 – 24,1 µg/L) und bei Umformwerken eine mediane Konzentration von 13,5 µg/g (18,9 µg/L) mit einem Interquartilsbereich von 7,5 – 31,3 µg/g Kreatinin (10,5 – 33,7 µg/L) festgestellt. Diese Resultate zeigen deutlich, dass auf vielen Industriearbeitsplätzen mit PAK-Exposition die 1-OHP Konzentration wesentlich höher ist als die von Einsatzkräften nach einem Brandeinsatz. Insgesamt kann die Tätigkeit einer Feuerwehreinsatzkraft nicht mit der eines Industriearbeiters gleichgesetzt werden. Die Exposition – gerade gegenüber humankanzerogenen PAK – ist bei (Berufs-)Feuerwehrangehörigen deutlich niedriger und tritt nicht arbeitstäglich über das gesamte Berufsleben auf. Entsprechend ist auch das daraus resultierende Gesundheitsrisiko erheblich geringer als bei PAK-exponierten (gewerblichen) Beschäftigten.

6. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

Im Laufe des Projektes sind zwei internationale Publikationen erschienen, die ähnliche Untersuchungen bei Einsatzkräften durchgeführt haben (Keir et al. 2017; Hoppe-Jones et al. 2021). Beide Studien sind relevant für die Einordnung der Ergebnisse dieser Studie und werden in diesem Bericht ausführlich diskutiert.

7. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

Diese erste deutsche Studie zur inneren PAK-Belastung von Feuerwehreinsatzkräften nach Realbrandeinsätzen bestätigt die Ergebnisse, die drei andere Studien bei Realbränden auf dem nordamerikanischen Kontinent gefunden haben. Die ermittelte innere Belastung mit 1-OHP ist dabei vergleichbar mit denen, die sich bei Übungen zur Bekämpfung von feststoffbefeuereten Übungsanlagen ergeben. Diese Studie zeigt weiterhin, dass auch die Haut einen wichtigen Aufnahmeweg für PAK bei Feuerwehreinsatzkräften darstellt, da ein deutlicher Anstieg der inneren Expositionen bei denjenigen Einsatzkräften festgestellt wurde, die Pressluftatemgeräte während des Einsatzes (u. a. im Innen- und Außenangriff) trugen. Dennoch zeigte sich insgesamt, dass eine korrekt angelegte, funktionsfähige Schutzkleidung sowie das bedarfsgerechte Tragen von umluftunabhängigem Atemschutz die Aufnahme von PAK deutlich verringert und in nahezu allen Fällen so minimiert, dass Beurteilungsmaßstäbe zur Einhaltung der Exposition sowie zur Vermeidung gesundheitlicher Effekte eingehalten werden. Es gibt jedoch einzelne Situationen, in denen die Konzentrationen über die Beurteilungsmaßstäbe hinaus ansteigen, da die Aufnahme von PAK in den Körper von vielen Faktoren abhängt und entsprechend der hohen Variabilität an Einsatzszenarien äußerst unterschiedlich ausfallen kann. Eine Überschreitung von nicht mit gesundheitlichen Effekten assoziierten Beurteilungsmaßstäben wie z. B. Referenzwerten für 1-OHP im Urin findet dabei durchaus regelmäßig statt und zeigt an, dass die Einsatzkräfte per se gegenüber krebserzeugenden Gefahrstoffen wie PAK während des Einsatzes exponiert sind (u. a. über die Haut wie oben angesprochen). Im Gegensatz dazu werden gesundheitsassoziierte Beurteilungswerte wie z. B. der BEI®-Wert nur in ausgewählten Einzelfällen überschritten; auch treten derartige höhere Expositionen nicht jeden Tag und über das gesamte Berufsleben auf wie es z. B. der Fall bei gewerblich PAK-Exponierten in der Mineralöl- oder Stahlindustrie der Fall sein kann.

Ein Teilkollektiv der Studienteilnehmer trug Baumwollunterwäsche, die als Trägermaterial für die durch die Einsatzkleidung dringenden PAK fungierte und damit detailliertere Informationen über die dermale Belastung der Feuerwehreinsatzkräfte geben konnte. Die Analyseergebnisse waren – ähnlich den Befunden von 1-OHP im Urin – überwiegend unauffällig und lagen generell unterhalb der zur Orientierung herangezogenen Beurteilungsmaßstäbe von 1 mg/kg (= 1.000 ng/g) gemäß EU-Verordnung 2018/1513 bzw. Standard 100 Oeko-Tex®. Allerdings können nur Aussagen über die untersuchten Einsatzszenarien „Wohngebäudebrand“ und „Fahrzeug- bzw. sonstiger Brand im Freien“ getroffen werden. Es gibt derzeit jedoch keine Hinweise, dass die Exposition bei anderen Einsatzszenarien unterschiedlich dazu ausfallen könnten. Erste Untersuchungsergebnisse im Rahmen von Tätigkeiten in einer Atemschutz- und Schlauchwerkstatt zeigten – wenn überhaupt - ebenfalls nur Kontaminationen unterhalb der o.g. Beurteilungsmaßstäbe. Auch konnte eine Exposition in Form einer höheren Ausscheidung von 1-OHP im Urin – trotz Kontaminationen an den mit Baumwollhandschuhen geschützten Händen – nicht nachgewiesen werden. Dies weist darauf hin, dass durch konsequentes Tragen von PSA eine dermale Aufnahme von PAK über die Hände vermieden werden kann.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die derzeit eingesetzten Präventionsmaßnahmen (Atemschutz, Handschuhe, korrekt angelegte Schutzkleidung) geeignet sind, Belastungen gegenüber PAK zu minimieren. Einen weiteren Beitrag zum Minimierungsgebot nach Gefahrstoffverordnung liefern die Ergebnisse des Teilprojektes 1 „Entwicklung von Expositionsvermeidungsstrategien im Feuerwehreinsatz“. Dieses wurde bereits im Jahr 2020 in Form der DGUV Information 205-035 *Hygiene und Kontaminationsvermeidung bei der Feuerwehr* und einem begleitenden Erklärfilm veröffentlicht. Darin enthalten sind unter anderem konkrete Beispiele, die den Feuerwehren aufzeigen, wie ein Expositionsvermeidungskonzept etabliert werden kann (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV); Koslitz et al. 2020). Insofern ist die Tätigkeit als Feuerwehreinsatzkraft unter den gegenwärtigen Schutzbedingungen unter dem Gesichtspunkt der PAK-Exposition als sicher anzusehen. Weitere technische und organisatorische Maßnahmen zur Expositionsminimierung sind zu überlegen.

Die hier dargestellten Studienergebnisse lieferte erste Ergebnisse über die Aufnahme von Gefahrstoffen während realer Brandeinsätze. Im Rahmen dieser Studie wurde ein Biomonitoring-Parameter, der die mittelflüchtigen PAK repräsentiert, untersucht. Vor dem Hintergrund der komplexen Zusammensetzung von Brandrauch und dem individuellen Verhalten von Einsatzkräften an Brandstellen sollen mit den in der Probenbank gesicherten Urinproben noch Untersuchungen auf weitere wichtige krebserzeugende Gefahrstoffe erfolgen, um so abschließend einen möglichst umfassenden Einblick in die Expositionssituation von freiwilligen und hauptamtlichen Feuerwehrangehörigen zu erhalten. Insbesondere zählen hierzu Stoffwechselprodukte von Benzo[a]pyren, Benzol, Naphthalin, Chlorphenolen und Schwermetallen. Die Ergebnisse können entsprechend der Vorgehensweise in diesem Projekt, d.h. hinsichtlich Einsatzszenario, Tätigkeit und Fragebogendaten, ausgewertet werden, um wesentliche Einflussgrößen auf die Expositionshöhe zu identifizieren. Zudem stehen in der Biobank des IPA auch Blutproben für eine Bestimmung der Dioxinbelastung der Einsatzkräfte zur Verfügung. Auch sollten im Rahmen einer Interventionsstudie Übungskräfte untersucht werden, die beispielsweise einen feststoffbefeuerten Übungscontainer mehrmals betreten. Damit kann unter kontrollierten Bedingungen ermittelt werden, inwiefern unterschiedliche Verhaltensmaßnahmen die Aufnahme von kanzerogenen Gefahrstoffen möglichst effektiv minimieren können. Aufgrund des tagtäglichen Umgangs mit verschmutzten Materialien wäre es zusätzlich wünschenswert, noch einmal eine größere Anzahl an Beschäftigten in Atemschutz- und Schlauchwerkstätten zu untersuchen, da im Rahmen dieser Studie nur sehr limitierte Aussagen aufgrund der geringen Teilnehmerzahl getroffen werden konnten. Auch die Frage nach geeigneten Reinigungs- und Wiederaufbereitungstechniken, z. B. um die Konzentration von Gefahrstoffen in der Schutzkleidung effektiv unter ein kritisches Niveau zu senken wird oft gestellt und wäre zu klären. Schließlich zeigen die letzten Jahre, dass Vegetations- und Waldbrände bundesweit zunehmen. Dieses Einsatzszenario ist in vielerlei Hinsicht nicht mit den üblichen Wohnungsbränden und Bränden im Freien zu vergleichen, die im urbanen Umfeld auftreten. So ist in der Regel die Expositionsdauer gegenüber Brandrauch bei Vegetationsbränden deutlich länger als zum Beispiel bei Wohnungsbränden. Atemschutz kommt bei der Vegetationsbrandbekämpfung ebenfalls nur in sehr begrenztem Umfang zum Einsatz, was auch den längeren Einsatzzeiten und der oft körperlich anspruchsvolleren Arbeit, oft in Kombination mit hohen Umgebungstemperaturen, geschuldet ist. Entsprechend zeigt sich auch hier abschließend weiterer Forschungsbedarf, um auch für diese Einsatzart Aussagen zur realen Expositionssituation treffen zu können.

Literaturverzeichnis

- ACGIH (2017): Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS): BEI®. 7th Edition Documentation. 7. Aufl. Cincinnati, OH, USA.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR): Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHS). In: ATSDR's Toxicological Profiles 2005, zuletzt geprüft am 26.04.2021.
- Banks, A. P. W.; Thai P.; Engelsman M.; Wang X.; Osorio A. F.; Mueller J. F. (2021): Characterising the exposure of Australian firefighters to polycyclic aromatic hydrocarbons generated in simulated compartment fires. In: *International journal of hygiene and environmental health* 231, S. 113637. DOI: 10.1016/j.ijheh.2020.113637.
- Barr D. B.; Wilder L. C.; Caudill S. P.; Gonzalez A. J.; Needham L. L.; Pirkle J. L. (2005): Urinary creatinine concentrations in the U.S. population: implications for urinary biologic monitoring measurements. In: *Environmental health perspectives* 113 (2), S. 192–200. DOI: 10.1289/ehp.7337.
- Becker K.; Kaus S.; Krause C.; Lepom P.; Schulz C.; Seiwert M.; Seifert B. (1998): Umwelt-Survey 1998. Human-Biomonitoring. 6 Bände. Berlin: Firma Werbung und Vertrieb (3). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2104.pdf>, zuletzt geprüft am 23.04.2021.
- Casjens S.; Brüning T.; Taeger D. (2019): Meta-analysis of cancer risks of professional firefighters. In: *International journal of cancer* 145 (6), S. 1701. DOI: 10.1002/ijc.32404.
- Casjens S.; Brüning T.; Taeger D. (2020): Cancer risks of firefighters: a systematic review and meta-analysis of secular trends and region-specific differences. In: *International archives of occupational and environmental health* 93 (7), S. 839–852. DOI: 10.1007/s00420-020-01539-0.
- Caux C.; O'Brien C.; Viau C. (2002): Determination of firefighter exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and benzene during fire fighting using measurement of biological indicators. In: *Applied occupational and environmental hygiene* 17 (5), S. 379–386. DOI: 10.1080/10473220252864987.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): DGUV Information 205-035 „Hygiene und Kontaminationsvermeidung bei der Feuerwehr“, zuletzt geprüft am 19.03.2021.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (2021): Gefahrstoffe: GESTIS-Stoffdatenbank. Online verfügbar unter <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>, zuletzt aktualisiert am 23.04.2021, zuletzt geprüft am 23.04.2021.
- Deutscher Feuerwehrverband (2018): Erfassung statistischer Daten. Einsätze nach Tätigkeitsbereichen. Online verfügbar unter <https://www.feuerwehrverband.de/presse/statistik/>.
- Europäisches Parlament und Rat (31.12.2008): VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, vom 2008. Fundstelle: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2008/1272/2020-11-14>, zuletzt geprüft am 23.04.2021.
- Europäisches Parlament und Rat (2018): VERORDNUNG (EU) 2018/ 1513 DER KOMMISSION - vom 10. Oktober 2018 - zur Änderung des Anhangs XVII der Verordnung (EG) Nr. 1907/ 2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) hinsichtlich bestimmter als karzinogen, keimzellmutagen oder reproduktionstoxisch (CMR) eingestufte Stoffe der Kategorie 1A oder 1B. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L256), S. 1–7, zuletzt geprüft am 23.04.2021.

- Fent K. W.; Evans D. E.; Babik K.; Striley C.; Bertke S., Kerber S. et al. (2018): Airborne contaminants during controlled residential fires. In: *Journal of occupational and environmental hygiene* 15 (5), S. 399–412. DOI: 10.1080/15459624.2018.1445260.
- Fent, K. W.; Toennis C.; Sammons D.; Robertson S.; Bertke S.; Calafat A. M. et al. (2019): Firefighters' and instructors' absorption of PAHs and benzene during training exercises. In: *International journal of hygiene and environmental health* 222 (7), S. 991–1000. DOI: 10.1016/j.ijheh.2019.06.006.
- Feunekes F. D.; Jongeneelen F. J.; vd Laan H.; Schoonhof F. H. (1997): Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons among trainers in a fire-fighting training facility. In: *American Industrial Hygiene Association journal* 58 (1), S. 23–28. DOI: 10.1080/15428119791013035.
- Hagmann M.; Hebisch R.; Baumgärtel A.; Beelte S.; Krug M.; Sondermann J. et al. (2018): PAK-Belastung beim Bahnschwellen-Recycling und bei thermischer Bodensanierung. In: *Zbl Arbeitsmed* 68 (5), S. 261–265. DOI: 10.1007/s40664-018-0286-5.
- Hoppe-Jones C.; Griffin S. C.; Gulotta J. J.; Wallentine D. D.; Moore P. K.; Beitel S. C. et al. (2021): Evaluation of fireground exposures using urinary PAH metabolites. In: *Journal of exposure science & environmental epidemiology*. DOI: 10.1038/s41370-021-00311-x.
- International Agency for Research on Cancer; Weltgesundheitsorganisation; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (2010): IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, volume 98, Painting, Firefighting, and Shiftwork. This publication represents the views and expert opinions of an IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, which met in Lyon, 2 - 9 October 2007. Lyon: WHO. Online verfügbar unter <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Painting-Firefighting-And-Shiftwork-2010>.
- Jalilian H.; Ziaei M.; Weiderpass E.; Rueegg C. S.; Khosravi Y.; Kjaerheim K. (2019): Cancer incidence and mortality among firefighters. In: *International journal of cancer* 145 (10), S. 2639–2646. DOI: 10.1002/ijc.32199.
- Jongeneelen, F. J. (2014): A guidance value of 1-hydroxypyrene in urine in view of acceptable occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. In: *Toxicology letters* 231 (2), S. 239–248. DOI: 10.1016/j.toxlet.2014.05.001.
- Keir J. L. A.; Akhtar U. S.; Matschke D. M. J.; Kirkham T. L.; Chan H. M.; Ayotte P. et al. (2017): Elevated Exposures to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Other Organic Mutagens in Ottawa Firefighters Participating in Emergency, On-Shift Fire Suppression. In: *Environmental science & technology* 51 (21), S. 12745–12755. DOI: 10.1021/acs.est.7b02850.
- Keir J. L. A.; Akhtar U. S.; Matschke D. M. J.; White P. A.; Kirkham T. L.; Chan H. M.; Blais J. M. (2020): Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) and metal contamination of air and surfaces exposed to combustion emissions during emergency fire suppression: Implications for firefighters' exposures. In: *The Science of the total environment* 698, S. 134211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134211.
- Koslitz S.; Taeger D.; Casjens S.; Käfferlein H. U.; Weiß T.; Brüning T. et al. (2020): Krebsrisiko im Feuerwehrdienst. Studie und Empfehlungen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. In: *BRANDSCHUTZ* (8), S. 17–23, zuletzt geprüft am 19.03.2021.
- Laitinen J.; Mäkelä M.; Mikkola J.; Huttu I. (2010): Fire fighting trainers' exposure to carcinogenic agents in smoke diving simulators. In: *Toxicology letters* 192 (1), S. 61–65. DOI: 10.1016/j.toxlet.2009.06.864.

- Latza U.; Stang A.; Bergmann M.; Kroke A.; Sauer S.; Holle R. et al. (2004): Zum Problem der Response in epidemiologischen Studien in Deutschland (Teil I). In: *Gesundheitswesen (Bundesverband der Ärzte des Öffentlichen Gesundheitsdienstes (Germany))* 66 (5), S. 326–336. DOI: 10.1055/s-2004-813093.
- LeMasters G. K.; Genaidy A. M.; Succop P.; Deddens J.; Sobehi T.; Barriera-Viruet H. et al. (2006): Cancer risk among firefighters: a review and meta-analysis of 32 studies. In: *Journal of occupational and environmental medicine* 48 (11), S. 1189–1202. DOI: 10.1097/01.jom.0000246229.68697.90.
- Bader M.; Netz-Piepenbrink S.; Göen T.; Hartwig A. (2016): Creatinine in urine [Biomonitoring Methods, 2015]. In: The MAK-Collection for Occupational Health and Safety, Bd. 1: American Cancer Society, S. 437–447. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527600418.bi6027urie2115>.
- Marczynski B.; Pesch B.; Wilhelm M.; Rossbach B.; Preuss R.; Hahn J-U. et al. (2009): Occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and DNA damage by industry: a nationwide study in Germany. In: *Archives of toxicology* 83 (10), S. 947–957. DOI: 10.1007/s00204-009-0444-9.
- Moen B. E.; Ovrebø S. (1997): Assessment of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons during firefighting by measurement of urinary 1-hydroxypyrene. In: *Journal of occupational and environmental medicine* 39 (6), S. 515–519. DOI: 10.1097/00043764-199706000-00005.
- Oeko-Tex®: Standard 100 by Oeko-Tex®. Online verfügbar unter https://www.oeko-tex.com/importedmedia/downloadfiles/STANDARD_100_by_OEKO-TEX_R_-_Standard_de.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2021.
- Riechert F.; Berger M.; Kersten N. (2011): Biomonitoring bei der Holzimprägnierung mit Steinkohlenteerölen — 1-Hydroxypyren im Urin als Marker für die innere Belastung mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). In: *Zbl Arbeitsmed* 61 (1), S. 4–12. DOI: 10.1007/BF03344975.
- Rossbach B.; Wollschläger D.; Letzel S.; Gottschalk W.; Muttray A. (2020): Internal exposure of firefighting instructors to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) during live fire training. In: *Toxicology letters* 331, S. 102–111. DOI: 10.1016/j.toxlet.2020.05.024.
- Sritharan J.; Pahwa M.; Demers P. A.; Harris S. A.; Cole D. C.; Parent M.-E. (2017): Prostate cancer in firefighting and police work: a systematic review and meta-analysis of epidemiologic studies. In: *Environmental health : a global access science source* 16 (1), S. 124. DOI: 10.1186/s12940-017-0336-z.
- Taeger D.; Pelzl T. Koslitz S.; Käfferlein H. U.; Brüning T. (2018): Zwischenbericht zum Vorhaben „Krebsrisiko im Feuerwehrdienst – Biomonitoring von Feuerwehreinsatzkräften bei Realbränden“ (FB 0414). Hg. v. IPA. Bochum, zuletzt geprüft am 23.04.2021.
- TRGS 910: TRGS 910 Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen, zuletzt geprüft am 15.03.2021.
- Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb) (2020): vfdb-Brandschadenstatistik. Untersuchung der Wirksamkeit von (anlagentechnischen) Brandschutzmaßnahmen. 1. Aufl. Hg. v. Sebastian Festag & Ernst-Peter Döbbeling. Münster. Online verfügbar unter <http://www.ref14.vfdb.de/brandstatistik/brandschadenstatistik/>, zuletzt geprüft am 15.03.2021.
- Viau, M. B. (1999): Urinary 1-hydroxypyrene as a biomarker of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: biological monitoring strategies and methodology for determining biological exposure indices for various work environments. In: *Biomarkers : biochemical indicators of exposure, response, and susceptibility to chemicals* 4 (3), S. 159–187. DOI: 10.1080/135475099230859.

8. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

Folgende Veröffentlichungen wurden im Rahmen des Projektes erstellt:

- Publikationen
 - Sicherheit und Gesundheitsschutz in der Feuerwehr, Brandschutz – Deutsche Feuerwehrzeitschrift 03/2017
 - Krebsrisiko im Feuerwehrdienst, Erste Erkenntnisse und Ergebnisse der Studie Krebsgefahren im Feuerwehrdienst ; Crisis Prevention Fachportal; 02/2020 <https://crisis-prevention.de/feuerwehr/erste-erkenntnisse-ergebnisse-der-studie-krebsgefahren-im-feuerwehrdienst.html>
 - Krebsrisiko im Feuerwehrdienst?; BG RCI.magazin 3/4 2020
 - Krebsrisiko im Feuerwehrdienst – erste Erkenntnisse und Ergebnisse einer Studie der DGUV; DGUV Forum 1/2020
 - Krebsrisiko im Feuerwehrdienst – Studie und Empfehlungen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung; Brandschutz – Deutsche Feuerwehrzeitschrift 08/2020
 - Die Aufnahme von Gefahrstoffen über die Haut von Feuerwehreinsatzkräften während der Brandbekämpfung; IPA-Journal 04/2020
- Vorträge
 - DGUV - Fachgespräch „Sicherheit und Gesundheitsschutz in der Feuerwehr - zukunftsfähig gemacht.“ am 13./14. Dezember 2016 in Dresden
 - 2. gemeinsame Tagung der BG RCI und des Werkfeuerwehrverbandes Deutschland e.V. für Gasschutzleitende, Atemschutzbeauftragte und Führungskräfte von Werkfeuerwehren 2017 in Wernigerode
 - Sitzung AK Forschung der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Nordrhein-Westfalen; 6.4.2017 in Dortmund
 - Einsatzhygiene bei Bränden „Biomonitoring“; Fortbildung LG 2.2 Norddeutschland; 22. und 23. September 2017 in Hamburg
 - Für die Zukunft gewappnet? Sicherheit und Gesundheit in der Feuerwehr; 7. FUK-Forum „Sicherheit“; Fachtagung der Feuerwehr-Unfallkassen; 4./5. Dezember 2017 in Hamburg
 - Mitarbeit an Produktion des Films „Hygiene im Feuerwehreinsatz“ der HFUK-Nord; 2018
 - Feuerwehrforschungstag NRW 2018; 22.03.2018 Institut der Feuerwehr, Münster
 - Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.; Projektvorstellung; 18.09.2018
 - Sicherheits-Forum Feuerwehr; UK NRW; 19. September 2018 in Gladbeck
 - 5. DGUV - Fachgespräch „Kommitment: Einsatzdienst – Sicher – Gesund – Miteinander“ am 11./12. Dezember 2018 in Dresden
 - Informationsveranstaltung für Feuerwehren zur ZED am 14.02.2019 im IFA in Sankt Augustin
 - G2-Seminar 2019; IFA; 21.02./14.03.2019; Sankt Augustin
 - 3. gemeinsame Tagung der BG RCI und des Werkfeuerwehrverbandes Deutschland e.V. für Gasschutzleitende, Atemschutzbeauftragte und Führungskräfte von Werkfeuerwehren 2019 in Wernigerode
 - 4. Hamburger Atemschutztag; 23.05.2019
 - Tagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb); 28.-29.5.2019 in Ulm
 - Forum der Unfallversicherungsträger im Rahmen der Jahrestagung des VDBW am 24.10.2019 in Freiburg
 - „Fachtagung Einsatzstellenhygiene 2019“; A+A 2019 in Düsseldorf

- 8. FUK-Forum „Sicherheit“ vom 2.-3.12.2019 in Hamburg

9. Anhang/Anhänge

Keine

Unterschriftenseite verpflichtend für Kooperationsprojekte

Projektnummer: FP0141

Titel: Krebsrisiko im Feuerwehrdienst – Biomonitoring von Feuerwehreinsatzkräften bei Realbränden“ (FP0414)

Erklärung für das Berichtswesen in Kooperationsprojekten

Hiermit erklären die Unterzeichnenden, dass der zum 31. Mai 2021 vorgelegte

Abschlussbericht mit allen Kooperationspartnern abgestimmt ist.


----- Datum: 23.05.21

Dr. Dirk Taeger, IPA


----- Datum: 23.05.21

Stephan Koslitz, IPA


----- Datum: 21.05.21

Birgit Heinrich, IFA


----- Datum: 20.05.21

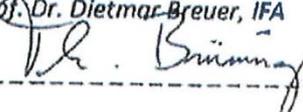
Tim Pelzl, UK Baden-Württemberg


----- Datum: 25.05.21

Dr. Heiko U. Käfferlein, IPA


----- Datum: 25.05.21

Prof. Dr. Dietmar Breuer, IFA


----- Datum: 19.05.21

Prof. Dr. Thomas Brüning, IPA