

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER
BERICHTE

Untersuchung und Bewertung der
Kontamination von PSA der Feuerwehren bei
der Brandbekämpfung in Innenräumen

199

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V,
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile
Verteidigung

Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 199

Untersuchung und Bewertung der Kontamination von PSA der Feuerwehren bei der Brandbekämpfung in Innenräumen

von

Dipl.-Chem. Frank Schuppe

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge

Heyrothsberge

31. Mai 2021

BERICHTS-KENNBLATT

| | | | | | |
|--|--|---|---|-----------------------------------|--|
| Nummer des Berichtes: <div>199</div> | | Titel des Berichtes: Untersuchung und Bewertung der Kontamination von PSA der Feuerwehren bei der Brandbekämpfung in Innenräumen | | ISSN: <div>0170-0060</div> | |
| Autoren: Dipl.-Chem. Frank Schuppe | | | durchführende Institution: IBK Heyrothsberge Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Komm. Direktor: Jörg Buchaly, Branddirektor | | |
| Nummer des Auftrages: IMK-Forschungsvorhaben Nr. 199 98 (03/2018) | | | auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und - Senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung | | |
| Datum des Berichtes: 31. Mai 2021 | | | | | |
| Seitenzahl: 162 | | Abbildungen: 75 | | Tabellen: 43 | |
| Literaturverweise: 91 | | | | | |
| Kurzfassung: Die in epidemiologischen Studien nachgewiesene erhöhte Gefährdung von Feuerwehrleuten an Krebs zu erkranken, hat vielfältige Forschungsaktivitäten ausgelöst. Im Focus stehen die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Sie werden bei jedem Brand gebildet, bei ventilationsgesteuerten Bränden allerdings in erhöhtem Maße. Sie sind daher Leitsubstanzen für die Karzinogenität von Brandrauch. Untersuchungen im Technikum zeigen, dass die Einsatzbekleidung einen hohen Schutz gegen Permeation karzinogener PAK bietet. Die aus der Kontamination von Schichten der Einsatzbekleidung berechneten Behelfs-Schutzfaktoren liegen deutlich über 100. Die erhöhte Kontamination innerer Schichten und der Haut erklärt dies nicht. Offenbar sind andere Eintrittspfade, wie Undichtigkeiten und das Pumpverhalten der Bekleidung sowie insbesondere die Nach-Einsatz-Exposition und Kontaminationsverschleppungen, wichtiger. Zumindest nach intensivem Kontakt mit Brandrauch und zu erwartenden stärkeren Kontaminationen sollte die Einsatzbekleidung daher noch vor Ort gewechselt und einer Reinigung bzw. Dekontamination durch extraktive Verfahren, wie der Chemischen Reinigung oder Wäsche mit druckverflüssigtem Kohlendioxid, zugeführt werden. | | | | | |
| Schlagwörter: PSA, Brandrauch, Schadstoffe, PAK, Aufnahmewege, Permeation, Schutzfaktor, Krebsrisiko, Nasswäsche, Dekontamination, Chemische Reinigung, Kohlendioxidwäsche | | | | | |

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich nochmals beim Team der Abteilung Forschung des IBK bedanken. Mein besonderer Dank gilt M. Sc. Daniel Butscher für die versuchs- und messtechnische Unterstützung sowie Frau Annett Michel-Rosenbohm für die umsichtige Probenbearbeitung.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------|
| Verzeichnis Abkürzungen, Maßeinheiten und Marken | III |
| Abbildungsverzeichnis | IX |
| Tabellenverzeichnis | XIII |
| Zusammenfassung | 1 |
| 1. Einführung | 2 |
| 2. Brandrauch | 4 |
| 2.1 Schadstoffe im Brandrauch | 4 |
| 2.2 PAK | 8 |
| 2.2.1 Vorkommen und Bildung | 8 |
| 2.2.2 Bewertung von PAK-Gemischen | 10 |
| 2.2.3 Aufnahmewege | 13 |
| 3. Untersuchungskonzept | 17 |
| 3.1 Vorgehen | 17 |
| 3.2 Materialien und Proben | 19 |
| 3.2.1 Materialaufbauten | 21 |
| 3.2.2 Beprobung | 22 |
| 3.3 Analytik | 23 |
| 3.4 Bewertung | 25 |
| 4. Untersuchungen zur Barrierewirkung (Technikum) | 28 |
| 4.1 Versuchsdurchführung | 28 |
| 4.1.1 Brandstoffzusammensetzung | 29 |
| 4.1.2 Verbrennungsbedingungen | 32 |
| 4.1.3 Beladungsbedingungen | 39 |
| 4.2 Ergebnisse und Auswertung | 46 |
| 4.2.1 Barrierewirkung | 46 |
| 4.2.2 Schutzfaktoren | 54 |
| 4.3 Fehlerdiskussion | 62 |
| 5. Kontaminations-Untersuchungen (Praxisproben) | 65 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Proben und Probenahme | 65 |
| 5.2 | Ergebnisse und Diskussion | 69 |
| 5.2.1 | Gewerblicher Bereich | 71 |
| 5.2.2 | Holzbefeuerte BÜA | 71 |
| 5.2.3 | Gewaschene PSA | 72 |
| 5.3 | Wasch- und Dekontaminationsverfahren..... | 74 |
| 6. | Résumé..... | 77 |
| | Literatur | 80 |
| | Anlagen Teil 1 - Technikumsproben | 86 |
| | Anlagen Teil 2 - Praxisproben | 123 |

Verzeichnis Abkürzungen, Maßeinheiten und Marken

Abkürzungen

| | |
|-----------------|---|
| A3F | auch AFFF, Aqueous Film Forming Foam (wasserfilmbildendes Schaummittel) |
| ABS | Acrylnitril-Butadien-Styrol, ein Copolymer |
| AFFF | vgl. A3F |
| B | Breite |
| BAM | Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin |
| BBK | Brandbekämpfung |
| BF | Berufsfeuerwehr |
| BG | Bestimmungsgrenze |
| BÜA | Brandübungsanlage |
| CLP | CLP-Verordnung, Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 |
| ca. | circa |
| CO | Kohlenmonoxid, Summenformel des chemischen Moleküls |
| CO ₂ | Kohlendioxid, Summenformel des chemischen Moleküls |
| CMR | Kennzeichnung krebserzeugender, mutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe, (von Carcinogenic, Mutagenic and toxic to Reproduction) |
| DB-5 | Bezeichnung und Markenname für eine leicht polare Trennsäule für die Gaschromatographie des Herstellers Agilent Technologies |
| DDT | Dichlordiphenyltrichlorethan, hochchloriertes Insektizid |
| DGUV | Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Spitzenverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und der Unfallkassen |
| DV | Dienstvorschrift |
| ECHA | European Chemicals Agency, Europäische Chemikalienagentur |
| EG | Europäische Gemeinschaft |
| EPA-PAK | von der amerikanischen Umweltbehörde US EPA zur Bewertung PAK-haltiger Proben empfohlene Stoffliste mit 16 Einzelverbindungen |
| ePTFE | nachbehandeltes Polymer PTFE, gerecktes bzw. expandiertes PTFE, wie es für atmungsaktive Membranen verwendet wird |
| EU | Europäische Union |
| FAST-Test | Fluorescent Aerosol Screening Test |
| FF | Freiwillige Feuerwehr |
| FG | Flächengewicht |
| FTOH | Fluortelomeralkohole |
| FwDV | Feuerwehrdienstvorschrift |
| GefStoffV | Gefahrstoffverordnung |

| | |
|------------------|--|
| GC | Gaschromatographie, auch Gaschromatograph |
| GC-MS | Gaschromatographie- Massenspektrometer |
| GC-MSD | vgl. GC-MS, gekoppeltes Analysensystem aus GC und Massenselektivem Detektor |
| GS | Geprüfte Sicherheit, Prüfsiegel GS-Zeichen nach Produktsicherheitsgesetz |
| GSG | Gefährliche Stoffe und Güter |
| H | Höhe |
| HCl | Chlorwasserstoff, Summenformel |
| HCN | Cyanwasserstoff, alt auch Blausäure, Summenformel |
| HDF | Hochdichte Faserplatte |
| HPLC | Hochleistungs- bzw. älter Hochdruckflüssigkeitschromatographie |
| HRR | Heat Release Rate |
| IARC | International Agency for Research on Cancer, eine Einrichtung der UNO |
| i.a.R. | In aller Regel |
| i.d.R. | In der Regel |
| Int Std | Interner Standard, bezeichnet in der chemischen Analytik und Probenaufbereitung eine Stoffzugabe zur Erkennung von Probenverlusten |
| KW | Kohlenwasserstoff(e), Kurzbezeichnung für chemische Verbindungen aus Kohlenstoff und Wasserstoff |
| L | Länge |
| LC ₅₀ | letale Konzentration (engl.: lethal concentration), Konzentration bei der 50 % der Versuchstiere im Untersuchungszeitraum, meist 24 Stunden, sterben |
| MDF | Mitteldichte Faserplatte |
| NIOSH | National Institute for Occupational Safety and Health, US-Bundesbehörde für arbeitsmedizinische Forschung |
| O ₂ | Sauerstoff, Summenformel des chemischen Moleküls |
| OEKO-TEX | OEKO-TEX Association, Textilsiegel, eingetragenes Warenzeichen |
| PA | Polyamid, ein Polymertyp |
| PA6 | Polycaprolactam, ein Polyamid |
| PAK | Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe |
| PAN | Polyacrylnitril, ein Polymer |
| PBDE | Polybromierte Diphenylether |
| PBT | Kennzeichnung persistenter, bioakkumulativer und toxischer Stoffe (PBT-Stoffe, nach Anhang XIII REACH) |
| vPvB | sehr persistente und sehr bioakkumulative Stoffe, vPvB-Stoffe, nach Anhang XIII REACH |
| PC | Polycarbonat, ein Polymertyp |
| PCB | Polychlorierte Biphenyle |
| PCDD | Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (im Allgemeinen bezeichnet als Dioxine) |

| | |
|----------------------|--|
| PCDF | Polychlorierte Dibenzofurane (im Allgemeinen bezeichnet als Dioxine) |
| PCP | Pentachlorphenol |
| PE | Polyethylen, ein Polymer |
| PE(S) | Copolymer aus Polyester (PES) und Polyether, auch als Polyetherester bezeichnet, oft auch unter Verwendung des Kurznamens PE |
| PES | Polyester, ein Polymer |
| PET | Polyethylenterephthalat, ein Polymer |
| PFAS | Per- und Polyfluorierte Alkylverbindungen |
| PFBS | Perfluorbutansulfonsäure |
| PFOA | Perfluoroctansäure |
| PFOS | Perfluoroctansulfonsäure |
| PMMA | Polymethylmethacrylat, ein Polymer |
| PP | Polypropylen, ein Polymer |
| ProdSichG | Produktsicherheitsgesetz |
| PSA | Persönliche Schutzausrüstung |
| PTFE | Polytetrafluorethylen, ein Polymer |
| PUR | Polyurethan, ein Polymer, in der Textilbranche häufig als PU bezeichnet |
| PVC | Polyvinylchlorid, ein Polymer |
| REACH | Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 |
| RL | Richtlinie |
| SF | Schutzfaktor |
| SF _{Behelf} | behelfsmäßiger Schutzfaktor |
| SFE | Supercritical Fluid Extraction, Extraktion mit überkritischen Gasen |
| SOP | Standardarbeitsanweisung, englisch Standard Operating Procedure, auch Standard Operation Procedure |
| STOP-Regel | Hierarchie-Prinzip im Arbeitsschutz für Schutzmaßnahmen mit: S – Substitution, T – Techn. Maßnahmen, O – Organisatorische Maßnahmen, P – Personen- und Verhaltens-bezogene Maßnahmen |
| SVHC | Substance of Very High Concern, besonders besorgniserregender Stoff |
| 2,3,7,8-TCDD | 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin bzw. 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-1,4-dioxin |
| T _{eq} | Toxizitäts- bzw. Wirkungsäquivalent |
| TE | Thermoelement |
| Txx | Thermoelement-Nummerierung bei Temperaturmessung im Brandrauch |
| TKx | Thermoelement-Nummerierung bei Temperaturmessung an Probe(nbox) |
| TRGS | Technische Regeln für Gefahrstoffe |
| TU | Technische Universität |
| UF | Harnstoff- Formaldehyd |

| | |
|-------|--|
| USEPA | US Environmental Protection Agency |
| UV | Ultraviolettstrahlung |
| UVV | Unfallverhütungsvorschriften |
| VdS | VdS Schadenverhütung GmbH, Institut für Unternehmenssicherheit, eine Tochter des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft |
| vfdb | Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes |
| VO | Verordnung |
| VOC | Flüchtige organische Verbindungen (englisch volatile organic compounds) |
| ZED | Zentrale Expositionsdatenbank, eine Einrichtung des DGUV |

Maßeinheiten und Zeichen

| | |
|---------------------|--|
| °C | Grad Celsius |
| cm | Zentimeter |
| cm ² | Quadratcentimeter |
| F | Schmelzpunkt |
| g/s | Gramm pro Sekunde |
| h | Stunde |
| hPa | Hektopascal |
| K | Kelvin |
| K _p | Siedepunkt |
| kg | Kilogramm |
| l | Liter |
| l/min | Liter pro Minute |
| log K _{ow} | Verteilungskoeffizient n-Octanol / Wasser |
| m ³ | Kubikmeter |
| mg | Milligramm |
| mg C/m ³ | Konzentrationseinheit, Milligramm Kohlenstoff (hier als Ruß) pro Kubikmeter Atemluft |
| M% | Massenanteil |
| min | Minute |
| mph | Meilen pro Stunde |
| m/s | Meter pro Sekunde |
| mg/kg | Milligramm pro Kilogramm |
| µm | Mikrometer |
| µg | Mikrogramm |
| ng | Nanogramm |
| p | Dampfdruck |

| | |
|------|--------------------------------|
| Pa | Pascal, Maßeinheit des Druckes |
| s | Sekunde |
| Vol% | Volumenprozent/ Volumenanteil |

Markenzeichen und Bezeichnungen von Fasern, Geweben und Membranen

Airtex® – Markenname der Firma Novotex-Isomat

Airtex (PU)® – Polyester-Membran mit Polyurethan (PUR) beschichtet, Markenname der Fa. Novotex-Isomat

Airtex (S)® – Polyester-Membran mit Polyester (PES) beschichtet, Markenname der Fa. Novotex-Isomat

m-Aramid(e), auch Meta-Aramid – Markennamen: Nomex, Tejinconex/Tejin Conex, Kermel (korrekt Polyamidimide), Aramet, u.a.

p-Aramid(e), auch Para-Aramid – Markennamen: Kevlar, Twaron, Heracron u. a.

Aramet® - Handelsname für **m-Aramid**-Fasern und -Produkte des US-Herstellers Aramid Hpm, LCC aus den USA

Aramet Spunlance® – durch Interlacing feinst verzwirbeltes Vlies aus Aramet-Fasern hoher Isolationswirkung

Belltron® – Antistatikkfaser; Markenname der Firma Aramid Hpm, LLC, USA

EURAMID® – Hersteller von Aramid-Geweben für Schutzkleidungsmaterialien, Firma Euramid; Gewebe/Vlies-Herstellung i.d.R. in Europa

Euramid Pro® - 99% Euramid, d.h. ein m-Aramid + 1% Belltron antistatik

GE Direct Diffusion Membrane – flüssigkeitsdichte ePTFE-Membran der Firma General Electric, USA

Gore Tex® - Handelsname für ePTFE-Membranen der Fa. W.L. Gore & Associates, USA; sämtlich mit PUR-Beschichtung bzw. -Layer

Hainsworth – Firma A. W. Hainsworth & Sons Ltd, UK; verarbeitet Nomex, Kevlar, PBI sowie Gemische aus beiden

Hainsworth Titan® – Gewebe aus 89 % m-Aramid (Nomex)/ 9 % p-Aramid (Kevlar)/ 2 % Antistatikkfaser

IBENA – Hersteller von Geweben für Schutzkleidungsmaterialien; verarbeitet Nomex, Kevlar, PBI u.a.

IB-TEX® – Gewebe der Firma IBENA aus Nomex-Fasern (m-Aramid) und 25 % aromatische Polyester-Faser

Kermel® – Handelsname der Firma KERMEL, Frankreich, für Fasern/Gewebe aus Polyamidimiden; werden zu den m-Aramid-ge zählt

Kermel Heroskin bzw. HSK® – 99% Kermel, 1% Belltron als Antistatikkfaser

Kermel HTA® – 64,6 % Kermel, 35,2 % p-Aramid/ 0,2% Stahl als Antistatikkfaser

Kevlar® - Handelsname für p-Aramid-Fasern und –Geweben, Hersteller: Fa. E. I. du Pont de Nemours and Co., USA

Lenzing FR® – flammenhemmend ausgestattete Viskose-Fasern und Gewebe, Hersteller: Firma Lenzing, Österreich

Millenia light™ bzw. MI 9180 – Obermaterial aus 59 % p-Aramid, 39 % PBO/ 2 % Antistatikkfaser; Hersteller: Fa. TenCate, Niederlande

Nomex® - Handelsname für m-Aramid-Fasern und –Gewebe, Hersteller: E. I. du Pont de Nemours and Co., USA

Nomex Comfort® bzw. Nomex III® – Obermaterial aus 93 % Nomex/ 5% Kevlar/ 2 % P140 (Carbonfaser als Antistatikkfaser)

Nomex NXT® – Obermaterial aus 75 % Nomex/ 23% Kevlar/ 2 % P140 (Carbonfaser als Antistatikkfaser)

Nomex Titan® – Obermaterial aus Nomex mit untergewebter Kevlar-Lage, das unter Wärmeeinwirkung isolierende Luftpolster bildet

Nomex Tough® – Obermaterial aus 75 % Nomex/ 23% Kevlar/ 2 % P140 (Carbonfaser als Antistatikkfaser)

Nomex III A(antistatik)® – 94 % Nomex/ 5 % Kevlar/ 1 % Metallfaser (Antistatik)

Nomex 3DP® – Nomex-Gewebe mit untergewobenem Kevlar-Gewebe, leicht und bequem

OEKO-TEX® - Produktstandard und Textilsiegel der OEKO-TEX Association, Zürich

P140 – eine Polyamid-Mantelfaser mit Carbonkern, besitzt antistatische Eigenschaften, Hersteller: E. I. du Pont de Nemours and Co., USA

PBI® - Polybenzimidazol, ein Polymertyp und Markenbezeichnung der Firma PBI Performance Products Inc für PBI-Fasern und -Gewebe

PBI Matrix® – Gewebe: 60,09 % m-Aramid/ 37,3 % Polybenzimidazol (PBI)/ 1,8 % Beltron

P(P)BO – Polyoxazol bzw. Polybenzobisoxazol, ein hochtemperaturbeständiger Polymertyp, vgl. Zylon

Pudots® – Membran mit PUR-Noppen zur Bildung von Luftpolster zur therm. Isolation; Markennahme der Fa. LHD Group Deutschland GmbH

Sigmatex® – Carbonfaser der Firma Sigmatex, GB

Sympatex® - Membran- und Laminat-Hersteller Sympatex Technologies GmbH, Deutschland; Hersteller von Polyesterether (PES)-Membranen

SympaTex® – Membranen aus Copolymer von Polyester und Polyether (PES/PE-Membran), Fa. Sympatex Technologies GmbH, Deutschland

Topaz® – Handelsname für PUR-Membranen der Firma Trans-Textil GMBH, Deutschland

Technora® – Para-aramid-Copolymere, Markenname der Firma Teijin, China

Zylon® – PBO-Faser, Markenname des Herstellers Toyobo, Osaka, Japan bzw. Aramid Hpm, LLC, USA

® Kennzeichnung als eingetragenes Warenzeichen. Im Rahmen der Studie werden wiederholt Bezeichnungen von Produkten verwendet, bei denen es sich um eingetragene Warenzeichen handelt. Insbesondere bei Wiederholungen wird im Text vereinfachend nicht die vollständige Bezeichnung genannt.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 1 | Erweiterte Brandchemie, Versuch V0.6, FTIR-Spektrometer DX4000..... | 5 |
| Abbildung 2 | PAK- und Kohlenwasserstoff (KW)-Bildung bei der oxidativen Zersetzung von Polyethylenpulver im Quarzrohr [Piao, 1999]..... | 10 |
| Abbildung 3 | Details der Einsatzbekleidung des Probanden vor dem Versuch, Fotos und Test RTI International [RTI_FAST, 2015]..... | 15 |
| Abbildung 4 | Kontamination der Haut beim Tragen von PSA im Windkanal, FAST-Test mit Fluoreszenz-Partikeln, Fotos und Test RTI International [vgl. RTI_FAST, 2015] | 16 |
| Abbildung 5 | Beprobungsstellen für Mischproben von Einsatzjacken | 23 |
| Abbildung 6 | Raumstruktur und Funktionselemente des Brand- und Essenraumes [Zeichnung: Kohl, 2016]..... | 28 |
| Abbildung 7 | Brandraum bzw. -container (rechts / hinten) sowie Targetraum (links / vorn) | 29 |
| Abbildung 8 | Mischbrandkrippe nach Masterarbeit, Foto: BAM/Otto-von-Guericke Universität Magdeburg [Braun, 2016] | 30 |
| Abbildung 9 | Mischbrandkrippe des IBK Heyrothsberge, Foto: IBK | 30 |
| Abbildung 10 | Temperaturverlauf Brandraum (T01 in 2,2 m Höhe über Brandobjekt), Brand ohne/ mit Löschwassereintrag („trocken / nass“), Hauptversuche V1.1 bis V1.6 (ohne V1.3) | 33 |
| Abbildung 11 | Mischbrandkrippe auf Brandwaage im Brandraum, im Hintergrund Löschwasser-Einspeisevorrichtung | 34 |
| Abbildung 12 | Messanordnung zur Rauchgasanalyse mit FTIR-Spektrometer DX4000 | 35 |
| Abbildung 13 | Brandchemie bei Versuch V1.1 („trocken“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O ₂ -Sonde..... | 36 |
| Abbildung 14 | Brandchemie bei Versuch V1.2 („nass“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O ₂ -Sonde..... | 36 |
| Abbildung 15 | Brandchemie, Versuch V1.4 („trocken“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O ₂ -Sonde..... | 38 |
| Abbildung 16 | Brandchemie, Versuch V1.5 („nass“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O ₂ -Sonde..... | 38 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 17 | Raumanordnung auf Basis von 20-Fuß-Seecontainern, Aufriss..... | 39 |
| Abbildung 18 | Targetraum mit Probenständer sowie Thermoelementbestückung, Seitenansicht, nicht maßstabsgerecht | 40 |
| Abbildung 19 | Probenbox aus Holz, Dimension LxBxH: (20 x 20 x 12) cm aus 2 cm dickem Fichtenholz | 41 |
| Abbildung 20 | rechts Muster der Probenverteilung / links Probenständer mit Probenboxen im Targetraum, Anstellwinkel 45 °, zusätzliche 3 cm-Spanplatte zur Isolierung | 41 |
| Abbildung 21 | Konzentration ausgewählter Schadstoffe bei V1.1, Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 | 43 |
| Abbildung 22 | Temperaturverlauf in Rauchabzugsrichtung, Beispiel V1.1, Öffnen der Brandraumtüren nach 1440 Sekunden | 44 |
| Abbildung 23 | Temperaturverlauf in der PSA-Materialprobe C sowie über Brandobjekt bei trockener Beladung, Beispiel V1.6, Öffnen der Türen nach 1350 Sekunden..... | 45 |
| Abbildung 24 | PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L, <i>gesamt</i> | 48 |
| Abbildung 25 | PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L, <i>außen</i> | 49 |
| Abbildung 26 | PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L (ohne I), <i>mittig</i> | 50 |
| Abbildung 27 | PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L, <i>innen</i> . | 51 |
| Abbildung 28 | PAK-Kontamination – Technikum, nasse Beladung, Material A-L, <i>gesamt</i> .. | 52 |
| Abbildung 29 | PAK-Kontamination – Technikum, nasse Beladung, Material A-L, <i>außen</i> | 53 |
| Abbildung 30 | PAK-Kontamination-Technikum, nasse Beladung, Material A-L (ohne I), <i>mittig</i> | 53 |
| Abbildung 31 | PAK-Kontamination – Technikum, nasse Beladung, Material A-L, <i>innen</i> | 54 |
| Abbildung 32 | Gemittelte PAK-Gesamtkonzentration aller untersuchten Materialaufbauten (A bis L) im direkten Vergleich zwischen Nasser und Trockener Beladung | 54 |
| Abbildung 33 | Temperaturverlauf in Rauchabzugsrichtung, Versuch V1.6 | 58 |
| Abbildung 34 | Temperaturverlauf in Material-Probe C in 1,30 m Höhe, Versuch V1.6 | 58 |
| Abbildung 35 | Angriffstrupp der BF Berlin nach BBK im ausgebauten Dachgeschoss, Bildmitte: Einsatzkraft mit Jacke P8; Foto: BF Berlin, Freigabe erteilt..... | 67 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Abbildung 36 | Jacke P8 - bei Beprobung, bereits leicht getrocknet | 68 |
| Abbildung 37 | PSA der Berliner Feuerwehr, hier: Probe P3, gering belastet, relativ trocken.. | 69 |
| Abbildung 38 | Membran Innengewebe von Probe W3, Fotos: IBK | 73 |
| Abbildung 39 | Phasendiagramm von Kohlendioxid, Prinzip-Darstellung (real reicht das superkritische Gebiet bei tieferen Temperaturen als „Nase“ bis in den Druckbereich um die 60 bar); Graphik aus Wikipedia: Überkritisches Kohlenstoffdioxid, Bild: gemeinfrei | 76 |
| Abbildung 40 | Aufbau im Technikum beladener Materialien sowie ausgewählter Praxisproben, hier Material A bis F | 97 |
| Abbildung 41 | Aufbau im Technikum beladener Materialien sowie ausgewählter Praxisproben, hier Material G bis L | 98 |
| Abbildung 42 | Aufbau im Technikum beladener Materialien sowie ausgewählter Praxisproben, hier Material M und N | 99 |
| Abbildung 43 | Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.1 („trocken“), Öffnen der Brandraumtüren nach 1450 Sekunden | 101 |
| Abbildung 44 | Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.2 („nass“), Öffnen der Brandraumtüren nach 1630 Sekunden | 101 |
| Abbildung 45 | Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.4 („trocken“), Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1500 Sekunden | 102 |
| Abbildung 46 | Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.5 („nass“), Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1420 Sekunden | 102 |
| Abbildung 47 | Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.1, trocken, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1450 Sekunden | 103 |
| Abbildung 48 | Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.2, nass, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1630 Sekunden | 103 |
| Abbildung 49 | Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.4, trocken, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1500 Sekunden | 104 |
| Abbildung 50 | Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.5, nass, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1420 Sekunden | 104 |
| Abbildung 51 | Messstellenplan Versuchsstand, Draufsicht (nicht maßstabsgerecht) | 105 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Abbildung 52 | PAK-Kontamination nach Schichten, Technikum - trockene Beladung, Material A bis D | 112 |
| Abbildung 53 | PAK-Kontamination nach Schichten, Technikum - trockene Beladung, Material E bis H | 113 |
| Abbildung 54 | PAK-Kontamination nach Schichten, Technikum - trockene Beladung, Material I bis L | 114 |
| Abbildung 55 | Praxisproben, ungewaschen – P1, oben gesamt / unten reduziert..... | 142 |
| Abbildung 56 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P2, oben gesamt / unten reduziert | 143 |
| Abbildung 57 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P2 - <i>Hotspots</i> , oben gesamt / unten reduziert | 144 |
| Abbildung 58 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P3, oben gesamt / unten reduziert | 145 |
| Abbildung 59 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P4, oben gesamt / unten reduziert | 146 |
| Abbildung 60 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P4 - <i>Hotspots</i> , oben gesamt / unten reduziert | 147 |
| Abbildung 61 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P5J, oben gesamt / unten reduziert | 148 |
| Abbildung 62 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P5H, oben gesamt / unten reduziert | 149 |
| Abbildung 63 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P6J, oben gesamt / unten reduziert | 150 |
| Abbildung 64 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P6H, oben gesamt / unten reduziert | 151 |
| Abbildung 65 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P5/P6 – sonstige PSA-Teile, oben gesamt / unten reduziert | 152 |
| Abbildung 66 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P7, oben gesamt / unten reduziert | 153 |
| Abbildung 67 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P7 - <i>Hotspots</i> , oben gesamt / unten reduziert | 154 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Abbildung 68 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P8, oben gesamt / unten reduziert | 155 |
| Abbildung 69 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P9J/P9H sowie weitere PSA-Teile, oben gesamt / unten reduziert | 156 |
| Abbildung 70 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von XJ, oben gesamt / unten reduziert | 157 |
| Abbildung 71 | Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von XH, oben gesamt / unten reduziert | 158 |
| Abbildung 72 | Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W1, oben gesamt / unten reduziert | 159 |
| Abbildung 73 | Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W2, oben gesamt / unten reduziert | 160 |
| Abbildung 74 | Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W3, oben gesamt / unten reduziert | 161 |
| Abbildung 75 | Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W4, oben gesamt / unten reduziert [Decontex GmbH, aus: Pfeuffer, 2018], | 162 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tabelle 1 | Wirkung von HCN-Konzentrationen in der Atemluft [Purser, 2016]..... | 6 |
| Tabelle 2 | PAK- und Kohlenwasserstoff (KW)-Bildung bei der oxidativen Zersetzung von Polyethylen-Pulver im Quarzrohr [Piao, 1999] | 9 |
| Tabelle 3 | Kenndaten ausgewählter PAK [GESTIS, 2020] | 12 |
| Tabelle 4 | Grenzwerte für PAK für Erzeugnisse [vgl. EG 1272/2013]..... | 26 |
| Tabelle 5 | Grenzwerte nach ProdSichG bzw. AfPS GS 2014:01 | 27 |
| Tabelle 6 | Brandstoffzusammensetzung der Mischbrandkrippe des IBK..... | 31 |
| Tabelle 7 | Dioxine, Eigenschaften, [Ballschmiter, 2007]..... | 61 |
| Tabelle 8 | Messstellen für Containerversuche | 87 |
| Tabelle 9 | Auszug aus Produktkatalog Düsen der Fa. Lechler | 89 |
| Tabelle 10 | Mischbrandkrippe – vergleichende Angaben zur Zusammensetzung | 92 |
| Tabelle 11 | PAK - Eigenschaften und Grenzwerte | 93 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabelle 12 | Materialien für Schutzkleidung zur Brandbekämpfung, Leistungsstufe 2 | 95 |
| Tabelle 13 | Temperaturniveau im Übungs- und Einsatzgeschehen [Neske, 2014, S. 76] | 100 |
| Tabelle 14 | Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“, Material A und B..... | 106 |
| Tabelle 15 | Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“, Material C und D | 107 |
| Tabelle 16 | Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“, Material E und F | 108 |
| Tabelle 17 | Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“, Material G und H..... | 109 |
| Tabelle 18 | Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“, Material I und J..... | 110 |
| Tabelle 19 | Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“, Material K und L..... | 111 |
| Tabelle 20 | Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material A und B..... | 115 |
| Tabelle 21 | Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material C und D | 116 |
| Tabelle 22 | Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material E und F | 117 |
| Tabelle 23 | Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material G und H | 118 |
| Tabelle 24 | Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material I und J..... | 119 |
| Tabelle 25 | Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material K und L | 120 |
| Tabelle 26 | Schutzfaktoren (SF) bei erhöhter Temperatur, Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“ | 121 |
| Tabelle 27 | Schutzfaktoren bei geringerer Temperatur, Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“ | 122 |
| Tabelle 28 | Übersicht untersuchter Realproben, hier: ungewaschene PSA | 126 |
| Tabelle 29 | Übersicht untersuchter Realproben, hier: gewaschene PSA | 127 |
| Tabelle 30 | Praxisproben, ungewaschen – Analysenergebnisse P1 und P2 | 128 |
| Tabelle 31 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse | 129 |
| Tabelle 32 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P3 | 130 |
| Tabelle 33 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P4 | 131 |
| Tabelle 34 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P5J und P6J | 132 |
| Tabelle 35 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P5H und P6H..... | 133 |
| Tabelle 36 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P5 und P6 | 134 |
| Tabelle 37 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P7 | 135 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabelle 38 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P8..... | 136 |
| Tabelle 39 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse P9J und P9H..... | 137 |
| Tabelle 40 | Praxisproben, ungewaschen - Analysenergebnisse XJ und XH (Brandübungsanlage)..... | 138 |
| Tabelle 41 | Praxisproben, gewaschen - Analysenergebnisse W1 und W2 sowie Hotspot Jackentasche | 139 |
| Tabelle 42 | Praxisproben, gewaschen – W3 Analysenergebnisse und W4 Literaturwerte | 140 |
| Tabelle 43 | Legende zu Tabellen 30 bis 42 | 141 |

Zusammenfassung

Bei Versuchen zur Simulation der Bedingungen eines Innenbrandes im Technikum konnten 12 verschiedene mehrschichtige Materialaufbauten gängiger PSA-Hersteller erfolgreich mit PAK kontaminiert werden. Unter den optimierten Experimentparametern konnten bei den zu untersuchenden Textilproben stärkere Rauchgasexpositionen sowie deutlich höhere Kontaminationsgrade erzielt werden, als es in der Einsatzpraxis der Fall ist. Somit wurde ein Worst-Case-Szenario für eine Bewertung generiert. Nicht berücksichtigt wurden hierbei Kontaminationen, die in der Praxis aus direktem Kontakt mit Brandrückständen bzw. kontaminierten Gegenständen resultieren.

In den Oberstoffen sowie in den Membranen konnten erhöhte PAK-Konzentrationen mit Grenzwertüberschreitungen nachgewiesen werden. Diese waren auf der Membran mit Abstand am größten. Im Innenfutter, der hautnahen Schicht, wurden bei allen untersuchten Proben keine besorgniserregenden Konzentrationen oder Grenzwertüberschreitungen ermittelt. Daraus lässt sich eine sehr gute Schutzwirkung der PSA-Materialien gegenüber der größtenteils krebserregenden PAK, wie sie im Brandrauch vorkommen, ableiten. Dass die PSA bei der Innenbrandbekämpfung nur sehr geringe PAK-Konzentrationen in den hautnahen Schichten aufweist, konnte anhand von zahlreichen Praxisproben bestätigt werden. Als gefährlicher wird die Exposition nach dem Einsatz, durch Kontaminationsverschleppung oder nachträglich ausgasender Schadstoffe aus der PSA, angesehen.

Ein vollständiger Schutz durch die PSA vor Schadstoffen bei der Brandbekämpfung kann nicht garantiert werden. Insbesondere gegenüber flüchtiger und gasförmiger Schadstoffe herrscht noch Klärungs- und Optimierungsbedarf. Auch bei der Bewertung der Saumstellen gibt es noch ungeklärte Aspekte.

Gängige und mögliche alternative Reinigungsverfahren, wie z.B. Nass- und Trockenwäsche oder chemische Reinigungsverfahren, wurden theoretisch beleuchtet.

Schlussfolgernd lassen sich, teils bereits bekannte, Maßnahmen und Empfehlungen ableiten:

- Ablegen der PSA unter Atemschutz und Verpackung noch am Einsatzort,
- einsatznahe Wäsche, ggf. Grobreinigung der PSA vor Ort,
- Begleit- bzw. Anhängekarten, um über den Kontaminationsgrad zu informieren,
- geringere Beladung der Waschmaschinen,
- stärker belastete Bekleidung getrennt waschen,
- Zahl der Reinigungszyklen dem Kontaminationsgrad anpassen.

1. Einführung

Die Bewertung der IARC, dass Brandrauch möglicherweise krebserregend ist (Kategorie 2B), wurde bei einem internationalen Expertentreffen in Lyon im Jahr 2007 und in der dazu erschienenen Monografie [IARC, 98/2010] erörtert. Die daraus resultierenden Diskussionen rückten die Belastung von Feuerwehrleuten mit karzinogenen Stoffen wieder in den Focus. Verschärfend kam 2012 die Einstufung von Dieselruß als krebserregend [IARC, 213/2012] hinzu. Eine wesentliche Stoffgruppe bilden in beiden Bereichen die PAK (Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe).

In Europa wurde in der Folge die REACH-Verordnung novelliert, Grenzwerte für neu in Verkehr zu bringende Erzeugnisse verabschiedet [EG, 1272/2013], in Deutschland das Produktsicherheitsgesetz (ProdSichG) und die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) [GefStoffV, 2010] sowie nachgeordnete rechtliche Grundlagen, wie die AfPS GS 2014:01, angepasst. Mit der EG-Verordnung 130/2019 erfolgte 2019 zudem eine Änderung der Richtlinie 2004/37/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Karzinogene oder Mutagene bei der Arbeit. Die Stoffliste wurde auf 22 Stoffe erweitert und neben Dieselmotoremissionen (Grenzwert für Luft am Arbeitsplatz bei 0,05 mg C/m³ Atemluft) auch PAK-haltige Gemische (Hinweis: Hautkontakt) aufgenommen.

In der Begründung der IARC wird explizit auf die epidemiologische Meta-Studie von LeMasters et al. eingegangen [LeMasters, 2006]. Diese wurde hierzu neu ausgewertet. Da die Ergebnisse statistisch eingeschränkt gesichert sind, wurde Brandrauch in die Gruppe 2B eingestuft, als möglicherweise krebserzeugend. Es wird ein signifikantes Risiko für Hodenkrebs, Prostatakrebs und Non-Hodgkin-Lymphome (Hirntumore) angenommen. Inzwischen gibt es weitere international anerkannte Studien zum Krebsrisiko bei Feuerwehreinsatzkräften, darunter von Daniels et al. [Daniels, 2014], Glas et al. [Glass, 2014]. Einen Überblick gibt die Studie des IRSST aus Quebec, Kanada [IRSST, 2018].

Die Studien kommen dabei zu teils deutlich abweichenden Ergebnissen bezüglich der Krebsarten. Mögliche Ursachen sind die unterschiedliche Einsatzspektren und die angewandte Einsatztaktik in den verschiedenen Ländern. Dabei können ereignis- bzw. brandstoff-spezifisch andere Schadstoffe eine größere Rolle spielen. Nicht außer Acht gelassen werden dürfen zudem unterschiedliche Standards und Verhaltensweisen im und nach dem Einsatz sowie das karzinogene Potenzial von Schichtarbeit infolge einer Minderung der Immunabwehr durch die lichtinduzierte Deregulation aktivitätssteuernder Gene [IARC, 2010/98].

Die Bildung von PAK bei Bränden sowie ihre krebserzeugende Wirkung ist seit langem bekannt. Die Dimension des Problems wurde lange Zeit verkannt und Belastungen als unvermeidbar hingenommen. Erst nach dem Seveso-Störfall 1976, der Veröffentlichung der Wirkungsäquivalente für 16 PAK nach EPA 1984 [USEPA-PAK, 1984] und dem Großbrand bei Sandoz 1986 gewannen Ultragifte als einsatzbedingte Belastungen größere Aufmerksamkeit. Der Focus der Diskussion lag stärker auf den „neuen“ Schadstoffen, wie den polychlorierten Dibenzodioxinen und polychlorierten Dibenzofuranen (PCDD/ PCDF bzw. „Dioxine“) sowie deren bromierte Vertreter. Infolge erheblicher Dioxin-Bildung standen zudem regelmäßig Brände und Freisetzungen Polychlorierter Biphenyle (PCB) in den Schlagzeilen. Eine größere Rolle spielten zudem halogenierte Insektizide in Holzschutzmitteln, wie DDT, Pentachlorphenol (PCP) sowie Asbest. Wichtige Erfolge waren die Verwendungsverbote polybromierter Flammenschutzmittel, PCB, halogener Holzschutzmittel sowie vieler Asbestanwendungen. Die Dioxin-Problematik entspannte sich zudem durch die Minderung der HCl-Emissionen bei Bränden von PVC infolge Zusatz von Säurefängern. Dennoch werden Dioxine auch heute noch bei jedem Brand im Wohn- und Gewerbebereich gebildet, allerdings in aller Regel in geringer Quellstärke.

Die Gefährdung der Einsatzkräfte durch karzinogene Brandfolgeprodukte hat sich insofern in den letzten Jahren scheinbar verringert. Andererseits rückten zeitweise andere Stoffe nach, wie etwa Perfluorooctansäure (PFOA) infolge verstärkten Einsatzes von A3F-Schaummitteln sowie wasser- und ölabweisender Ausstattung von Textilien aller Art. Parallel hat der Einsatz von Plastik in Wohnräumen zugenommen [IARC, 98/2010]. Zudem bildeten die PAK für das Krebsrisiko von Feuerwehreinsatzkräften schon immer den entscheidenden Faktor. Das Gefährdungsrisiko ist also potenziell ähnlich geblieben. Dem steht ein möglicherweise erhöhter Schutzgrad der Einsatzbekleidung mit Membranen gegenüber. Deren Schutzgrad sowie in der Folge die Gewichtung der potenziellen Aufnahmewege für PAK und andere hochsiedende Karzinogene ist allerdings völlig unklar. Hier setzen das vorliegende Forschungsprojekt sowie ein mehrgliedriges Forschungsvorhaben des DGUV in Zusammenarbeit mit Feuerwehren in Deutschland an [DGUV_PAK].

Die Gefährdungsbeurteilungen der Feuerwehren für Brände stützen sich auf das Regelwerk der GefStoffV sowie Empfehlungen von Fachorganisationen und –verbänden. Hervorzuheben ist hier insbesondere das vfdb-Merkblatt „Einsatzstellenhygiene“ [vfdb, 2014/MB]. Es zielt auf eine Expositionsminimierung durch konsequente Einsatzstellenhygiene und Schwarz-Weiß-Trennung bis hinein in die Wachen. Die Vorgehensweise ist wohl begründet. Gestützt wird sie durch die Erkenntnis, dass die höchsten Konzentrationen für PAK und andere Hochsieder, wie der PCDD/ PCDF, regelmäßig im Nahbereich von wenigen Metern zum Brandherd zu erwarten

sind [Wobst, 2001]. Um die Problematik der Kontamination und Kontaminationsverschleppung sowie Inkorporation brandbedingter Schadstoffe befriedigend zu lösen, ist im Übrigen ein ganzheitlicher Ansatz nötig. Wichtige Ansatzpunkte sind die Optimierung der PSA, die Überprüfung der Einsatz- und Löschtaktik sowie der PSA-Aufbereitung.

2. Brandrauch

2.1 Schadstoffe im Brandrauch

Brandrauch ist ein komplexes Gemisch aus gasförmigen, dampfförmigen, in kondensierter Form (Tröpfchen) sowie in fester Form (Ruß, Asche, Staub) vorliegenden Stoffen in Luft bzw. Restluft (kombiniertes Feststoff- und Flüssigkeitsaerosol). Feststoffe und Tröpfchen liegen dabei in so fein zerteilter Form vor, dass sie vom Luftstrom getragen verteilt werden. Die Feststoffkomponenten, wie insbesondere Rußteilchen, sind adsorptiv wirksam. Mit fortschreitender Abkühlung der Brandgase liegt ein zunehmender Teil in kondensierter und adsorbierter Form vor. Darüber hinaus kommt es zur Kondensation sowie Niederschlagung an Oberflächen des umgebenden Raumes bzw. in Abstromrichtung. Insofern ändern sich die Zusammensetzung des Brandrauches mit fortschreitender Abkühlung bzw. im Abstrom.

Die folgende Abbildung 1 zeigt für eine kleine Stoffauswahl Konzentrationsverläufe im Brandrauch der Versuchsbrände zur Beladung von PSA-Materialien. Die Messungen erfolgten mit dem FTIR-Spektrometer DX4000 unter Nutzung einer Auswertesoftware zur quantitativen Gemischanalytik. Die Ergebnisse belegen, dass bei der Innenbrandbekämpfung eine Fülle weiterer Gefahrstoffe entstehen, die im Rahmen einer Gesamtbetrachtung von Bedeutung sein können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dem Messverfahren bzw. seiner Umsetzung nur ein Teil der potenziell relevanten Schadstoffe zugänglich ist. Berücksichtigt wurden in der Auswertung:

- die Kohlenwasserstoffe Ethen, Propen, Benzol (karzinogen), Toluol, Furan (karzinogen) und Naphthalin (Verdacht auf krebserregende Wirkung beim Menschen), die der Dokumentation der Verbrennungsbedingungen dienen sowie Hinweise auf die Hauptreaktionswege zur PAK-Bildung geben,
- einige Reizstoffe, die bei Bränden in erhöhtem Maße gebildet werden, wie Acetaldehyd (karzinogen), Acrolein sowie eingeschränkt Formaldehyd (karzinogen),
- ausgewählte anorganische Verbrennungsgase bzw. Produkte unvollständiger Verbrennung mit hoher Reizwirkung (NO, NO₂) sowie
- hoher akuter Toxizität (HCN, CO).

Kohlenmonoxid wurde nicht in diesem Diagramm dargestellt, weil es bei unterventilierten Bedingungen in enormen Konzentrationen auftritt (vgl. Kapitel 4).

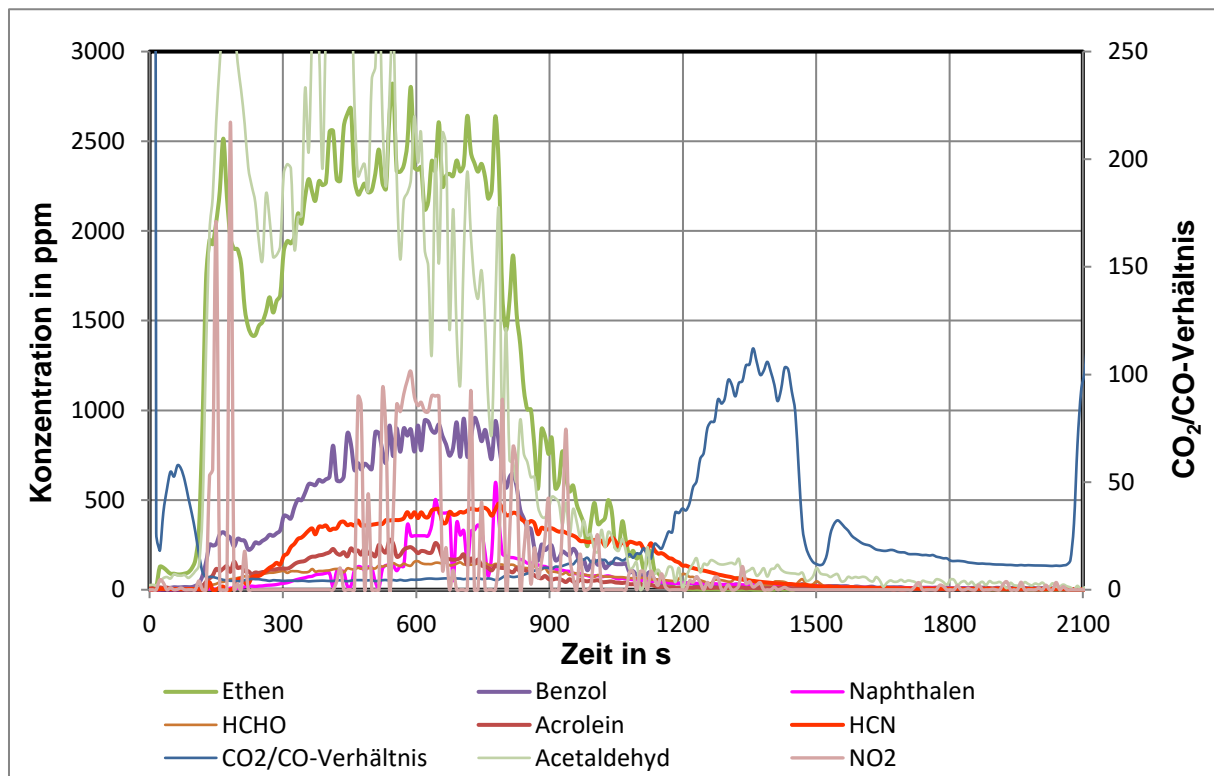


Abbildung 1 Erweiterte Brandchemie, Versuch V0.6, FTIR-Spektrometer DX4000

In ihrer Begründung von Brandrauch als möglicherweise krebserregend (Kategorie 2B) ging die IARC auch auf die Zusammensetzung von Brandrauch ein. Sie hob die komplexe chemische Zusammensetzung von Brandrauch hervor, mit vielen bekannten, aber auch vorwiegend unbekannten toxischen Stoffen. Zugleich bestätigte die Einstufung das Ergebnis verschiedener vorliegender epidemiologischer Studien zu Krebs bei Feuerwehreinsatzkräfte, die dies für verschiedene Krebsarten erwiesen haben (vgl. Einführung).

Neben den Permanentgasen der Luft enthält Brandrauch einige anorganische Verbrennungsprodukte in teilweise hoher Konzentration sowie zahlreiche organische Stoffe. Letztere sind Produkte der unvollständigen Verbrennung und liegen als Spurenbelastung vor. Einige der Brandfolgeprodukte haben akut toxische Wirkung, sind reizend, erstickend oder anderweitig toxisch. Bei dem im Brandrauch zu erwartenden Konzentrationsniveau sind einzelne dieser Schadstoffe wie insbesondere Kohlenmonoxid (CO) und auch Cyanwasserstoff (HCN) sogar in kurzer Einwirkzeit tödlich. Beide Stoffe sind tückisch, da sie im Körper chemisch gebunden werden und sich anreichern. HCN bzw. Cyanid blockiert dabei die Zellatmung („innere Erstickung“, Kennzeichen: hellrote Haut infolge hoher Sauerstoffsättigung des Blutes). Kohlenstoffmonoxid bindet sehr fest an das Hämoglobin (26.000-fach

stärker als Sauerstoff), so dass es zu einer „äußeren Erstickung“ kommt. Die Dosis-Wirkungs-Kurve für den Eintritt der Bewusstlosigkeit ist für HCN viel steiler als für CO. Obwohl die CO-Konzentrationen unter Einsatzbedingungen um Größenordnungen höher sind, bildet HCN daher nach CO die zweitwichtigste Todesursache bei Rauchgasintoxikation. Zudem ist es gut hautaufnahmefähig, so dass auch der Hautpfad zu beachten ist. [Purser, 2016; Purser, 2002]

Tabelle 1 Wirkung von HCN-Konzentrationen in der Atemluft [Purser, 2016]

| HCN in ppm | Effekt |
|-------------------|---|
| 100 | Bewusstlosigkeit nach 20-30 min (Primaten und Menschen) |
| 200 | Bewusstlosigkeit nach 2 min |
| >300 | Tod |
| 444 | ein Verunfallter überlebte |
| 530 | ein Verunfallter überlebte 1,5 min, sein Hund starb |
| 539 | LC50 (Mensch), empfohlen von McNamara, Edgewood Arsenal, Aberdeen |
| 1000 | Ein Atemzug kann zur Bewusstlosigkeit führen. |

Allerdings vermag HCN nur bei Brandstoffzusammensetzungen mit hohem Stickstoffanteil die Rauchgastoxizität bei ventilationsgesteuerten Bränden zu bestimmen. In der Praxis ist allerdings vielfach nicht klar, ob die Intoxikation bereits während der Brandbekämpfung bzw. über die Haut oder erst nach dem Einsatz, beispielsweise durch Einatmen von aus der PSA ausgasendem HCN, erfolgte. Ein Beispiel ist der Brandeinsatz in der Wollkämmerei Leipzig 1986, bei dem große Mengen Wolpryla, einer PAN-Faser, verbrannten und selbst im Freien noch hohe HCN-Konzentrationen gemessen wurden. Im Verlauf des Einsatzes wurden 26 Einsatzkräfte ohnmächtig, überwiegend erst nach Rückkehr aus dem Brandeinsatz und Absetzen des PA. [Wollkämmerei, 1986]

Bei vielen Schadstoffen zeigt sich die toxische Wirkung erst auf längere Sicht (chronische Toxizität), weil sie mutagen, teratogen bzw. karzinogen wirken. Sie sind ebenfalls potenziell tödlich, allerdings erst auf lange Sicht und nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Karzinogene können direkt Krebs erzeugen oder die Krebserzeugung fördern. Mutagene lösen Genmutationen oder Chromosomenaberrationen aus, verändern das Erbgut, was ebenfalls zu Krebserkrankung führen kann. Teratogene wiederum können Fehlbildungen beim Embryo hervorrufen. Entsprechende Stoffe zählen zu den besonders besorgniserregenden Stoffen (SVHC, Substance of Very High Concern) nach REACH-Verordnung.

Das dem vorliegenden Abschlussbericht zugrundeliegende Forschungsprojekt berücksichtigt nur Karzinogene, insbesondere PAK. Im Brandrauch kommen allerdings weit mehr Karzinogene vor. In ihrer Begründung zur Einstufung von Brandrauch als möglicherweise krebserregend (Kategorie 2B) führte die IARC beispielhaft hohe Gehalte atembarer Partikel (Ruß, Asbest, SiO₂-Staub, kristalline Verbindungen), Formaldehyd, Benzol, Benzo(a)pyren und 1,3-Butadien als Karzinogene der Kategorie 1 an, d.h. als gesichert karzinogen beim Menschen. Außerdem wurde Dieselruß in den Monographien des IARC als eindeutig karzinogen für den Menschen eingestuft [IARC, 98/2010]. Zu berücksichtigen sind hier auch einige Metalle und ihre Verbindungen, wie etwa Cadmium, Blei, Chrom u.a.. Weitere verbreitet im Brandrauch vorkommende Stoffe, mit zumindest begründetem Verdacht auf eine karzinogene Wirkung beim Menschen, sind Benzofuran, Styren und Isopren (Kategorie 2B).

Zu nennen sind hier auch Polybromierte Diphenylether (PBDE), die in der Vergangenheit als Flammschutzmittel in vielen Kunststoffen und Textilien eingesetzt wurden. Hierbei handelt es sich wie bei den PAK, PCDD/ PCDF sowie PCB, um eine Verbindungsklasse mit einer Vielzahl schädlicher Einzelverbindungen. Einzelne niedrig bromierte Vertreter, bei denen ein Verdacht auf Karzinogenität besteht, sind allerdings seit vielen Jahren verboten. Da die Krebsentstehung ein langfristiger Prozess ist, soll im Zusammenhang mit dem Befund eines erhöhten Krebsrisikos bei Feuerwehreuten dennoch an diese Stoffe erinnert werden.

Die PCDD/ PCDF sind zwar nach vorherrschender Ansicht selbst nicht karzinogen, doch haben sie eine tumorpromovierende Wirkung, d.h. sie können die Wirkung eines Karzinogens steigern ohne selbst karzinogen zu sein. 2,3,7,8-TCDD gilt sogar als eine der am stärksten tumorpromovierenden Substanz. Bei Ratten können Dioxine gesichert Krebs auslösen (Leberkrebs, Karzinome in Lunge, Schilddrüse und Nebenniere). Ob sie dies beim Menschen können, ist nicht abschließend geklärt. Einige Studien fanden bei stark exponierten Personen ein erhöhtes Auftreten von Leukämie, Tumoren der Atmungsorgane und der Gallenblase sowie des Weichteilsarkoms [Wikipedia, 2020: Dioxine].

Nicht vergessen werden sollten auch in der Vergangenheit im Dachstuhlbereich verbreitet eingesetzte Holzschutzmittel auf Basis chlorierter Kohlenwasserstoffe, wie insbesondere Pentachlorphenol (PCP) und auch DDT (z.B. in Hylotox 59), die beide als vermutlich Krebs erzeugend (H351) eingestuft sind.

Und selbst die Ausrüstung der Feuerwehr war zumindest in der Vergangenheit eine Quelle von Karzinogenen. Zu nennen sind hier AFFF-Schaummittel mit ihren Gehalten an Perfluorooctansulfonsäure (PFOS), aber auch die wasser- und ölabweisende Imprägnierung der Feuerwehreinsatzkleidung mit perfluorierten Tensiden (ebenfalls PFOS-haltig). Diese enthielten darüber hinaus herstellungsbedingt sowie als Abbauprodukt in aller Regel

Perfluorooctansäure (PFOA). Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) wird noch heute bei der Verchromung, in der Analogfotografie und in Hydraulikflüssigkeiten für die Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Die Europäische Chemikalienagentur ECHA (European Chemicals Agency) hat PFOA als krebserzeugend und erbgutverändernd eingestuft [ECHA, 2011]. Auch für PFOS wird eine karzinogene Wirkung vermutet [Wikipedia, 2020: PFOS]. Heute verwendete Imprägniermittel setzen auf Fluortelomeralkohole (FTOH), Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) u.a.. Die kürzeren Alkylketten machen die Verbindungen weniger toxisch, doch sind sie zumindest umweltgefährdend. Viele zählen zu den SVHC-Stoffen. Zudem können sie je nach Herstellungsverfahren Verunreinigungen durch Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) enthalten.

Die mit Abstand wichtigsten Karzinogene entstammen der Verbindungsklasse der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK).

2.2 PAK

2.2.1 Vorkommen und Bildung

PAK werden bei jedem Brand gebildet und sind chemisch relativ stabil und kommen daher ubiquitär, also überall, vor. Jeder Mensch nimmt sie täglich mit der Nahrung, über die Atemwege und Haut auf. Bei der Brandbekämpfung, der Einsatznachsorge sowie infolge Kontakt mit kontaminierten Materialien besteht für Feuerwehreinsatzkräfte allerdings das Risiko einer erhöhten Aufnahme.

Ihre Synthese im Brandrauch erfolgt aus den Pyrolysebestandteilen organischer Brandstoffe. Die Reaktionsverläufe sind hoch komplex und vom Brandstoff(gemisch) und den Verbrennungsbedingungen abhängig. Insofern wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Reaktionsschemata entwickelt. Zentrale Bausteine sind dabei v.a. C2-, C3- und C4-Kohlenwasserstoffe [Bockhorn, 2007; D'Anna, 2007; Richter, 2000]. Ein wesentlicher Zwischenschritt ist der aromatische Ringschluss. Er ist energetisch begünstigt. Die höchsten Konzentrationen im Brandrauch erreicht regelmäßig Benzol, gefolgt von Toluol. Den kleinsten PAK (Naphthalin) besteht aus zwei Benzolringen. Die Reaktionswege zu dessen Entstehung sind vielfältig. Thermodynamische und kinetische Effekte spielen bei der Entstehung der PAK durch Pyrolyse eine zentrale Rolle. Wichtige Einflussfaktoren sind die Stabilität intermediärer Pyrolyseprodukte und deren Konzentration, strukturelle Besonderheiten im Ausgangsmolekül, die bestimmte Zerfallswege begünstigen bzw. Strukturelemente, wie aromatische Ringe, bereits enthalten (Precursor-Verbindungen). Insofern ergibt sich auch eine gewisse Brandstoffspezifität. Die Verbrennung sauerstoffhaltiger Brandstoffe führt oft zu geringeren

PAK-Ausbeuten, da sie bereits teiloxidiert sind. Brandstoffe mit aromatischen Strukturelementen hingegen zeigen eine höhere PAK-Ausbeute.

Tabelle 2 PAK- und Kohlenwasserstoff (KW)-Bildung bei der oxidativen Zersetzung von Polyethylen-Pulver im Quarzrohr [Piao, 1999]

| Temperatur | 600 °C | | 700 °C | | 800 °C | | 900 °C | |
|------------------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| Stoff | KW | PAK | KW | PAK | KW | PAK | KW | PAK |
| Ausbeute [mg/g] | 85,88 | 7,98 | 72,07 | 8,49 | 16,93 | 7,49 | 0,58 | 123,41 |
| Ausbeute [%] | 93,9 | 7,1 | 89,5 | 10,4 | 69,3 | 30,7 | 0,5 | 99,5 |

Unabhängig von diesen stoffspezifischen Einflüssen werden Ausbeute und Quellstärke v.a. von den Verbrennungsbedingungen, wie insbesondere Sauerstoffversorgung und Temperatur sowie der Verweilzeit unter diesen Bedingungen bestimmt. Schließlich handelt es sich bei der PAK- sowie auch Dioxin-Bildung um eine In situ-Synthese im Brandrauch. Die PAK-Bildung ist dabei bei Temperaturen oberhalb 800 °C gegenüber der Bildung von kettenförmigen Kohlenwasserstoffen begünstigt. Besonders Temperaturen um 900 °C führen zu hohen Quellstärken und Ausbeuten. Darüber hinaus verschiebt sich das PAK-Spektrum mit steigender Temperatur zu mehrkernigen PAK, die aus toxikologischer Sicht am bedenklichsten sind (vgl. Tabelle 2 und Abbildung 2). Zudem entstehen mehr PAK, die der Routineanalytik nicht zugänglich sind, jedoch teilweise ebenfalls stark karzinogen sind.

Parallel nimmt mit steigender Aromaten- und PAK-Bildung bzw. Sauerstoffmangel, Temperatur und Verweilzeit die Bildung, Ausbeute und Quellstärke von Ruß zu. Ruß ist als logische Endstufe der PAK-Bildung zu verstehen. Dennoch ist eine hohe Rußausbeute nicht zwingend mit einer hohen PAK-Belastung verbunden, dazu müssen auch die Temperaturbedingungen erfüllt sein. Die Rußteilchen selbst unterliegen verschiedenen Wachstumsmechanismen wie Anlagerung von Kohlenwasserstoffen, PAK und Partikeln (Koagulation) sowie der Zusammenballung von Rußpartikeln außerhalb der Reaktionszone [Bockhorn, 2007; Richter, 2000].

Verbindendes Merkmal der Stoffklasse ist das Vorliegen kondensierter aromatischer Ringsysteme im Gesamtmolekül. Das einfachste PAK ist das Naphthalin. Meist spricht man nur über die reinen Kohlenwasserstoffe, doch gibt es auch Heteroverbindungen (sauerstoff-, schwefel- und stickstoffhaltige PAK), Verbindungen mit Seitenketten sowie mehrfacher Funktionalität (vgl. Folgekapitel). Über sie ist noch wenig bekannt, doch gibt es auch hierunter

Vertreter mit hohem karzinogenen Potenzial [Fiedler, 1990; LAU BW, 1997; DFG, 2008]. Allerdings erfordern sie einen hohen Heteroatomgehalt in den Brandstoffen.

Zudem ist der PAK-Größe nach oben keine Grenze gesetzt. Der größte Teil der PAK ist daher analytisch nur schwer bzw. nicht zugänglich. Nach dem Stand der Forschung geht allerdings ein wesentlicher Teil der karzinogenen Gefährdung im Brandeinsatz von wenigen, vergleichsweise gut analytisch zugänglichen PAK-Einzelverbindungen aus.

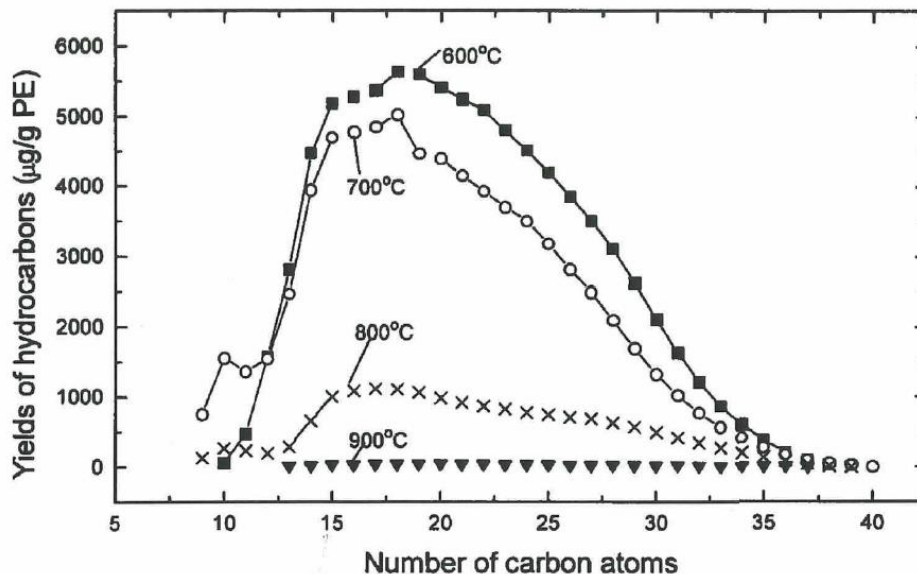


Abbildung 2 PAK- und Kohlenwasserstoff (KW)-Bildung bei der oxidativen Zersetzung von Polyethylenpulver im Quarzrohr [Piao, 1999]

2.2.2 Bewertung von PAK-Gemischen

Von der Vielzahl der möglichen PAK-Verbindungen nutzt man für toxikologische Bewertungen nur einen kleinen Teil analytisch einfach zugänglicher Einzelverbindungen. Zu ihnen zählen ausschließlich Kohlenwasserstoffe. Die Vorgehensweise ist daher bereits aus dieser Sicht mit erheblichen Unsicherheiten behaftet und erfordert Sicherheitsaufschläge.

Dies gilt umso mehr, als je nach Herkunft, (technischem) Prozess und den konkreten Reaktionsbedingungen das Verhältnis der Einzelverbindungen in charakteristischer Weise verändert sein kann und insofern andere PAK in stärkerem Maße auftreten und die Toxizität bestimmen können. Der Effekt ist von berufsbedingten PAK-Expositionen verschiedener Gewerbe sowie der Verbrennung unterschiedlicher Stoffe, wie Kohlenfeuer, Zigarettenrauch

u.a. dokumentiert [IARC, 98/2010; Grimmer, 1985]. Grundsätzlich sollten möglichst viele Einzel-PAK in die Bewertung einfließen, um den Probencharakter einschätzen zu können.

Da die Karzinogenität von Benzo(a)pyren gegenüber den meisten anderen PAK-Verbindungen sehr viel größer ist (vgl. Wirkungs- bzw. Toxizitätsäquivalente in Tabelle 3), scheint es auf den ersten Blick naheliegend, für toxikologische Betrachtungen vereinfachend allein den Benzo(a)pyren-Gehalt zu berücksichtigen. Dies ist allerdings unzureichend. Zum einen ist nur ein Teil der PAK-Fracht analytisch zugänglich und diese erklären auch nur etwa die Hälfte des karzinogenen Potenzials vieler PAK-Gemische [Fiedler, 1990; Wobst, 2001]. Zum anderen wird die Karzinogenität von Benzo(a)pyren von Begleitkomponenten und dem PAK-Profil einer Probe beeinflusst [IARC, 98/2010; DFG, 2008]. In der Praxis werden daher oft auch nichtkarzinogene PAK in die Bilanzierung einbezogen, wie beispielsweise bei den Grenzwerten für die GS-Zeichenvergabe nach AfPS GS, 2014 (vgl. Tabelle 5 im Folgekapitel und Tabelle 11 im Anlagenteil 1) sowie OekoTex100-Standard zur Zertifizierung von Textilien [OekoTex100]. Zudem erreicht man, in Verbindung mit einer hohen Grenzwertsetzung für an sich gering karzinogene PAK sowie einer Summengrenzwert-Definition unter deren Einschluss, dass die Unwägbarkeiten PAK-haltiger Gemische bzw. Proben ausgeglichen werden.

Einen solchen Ansatz verfolgte bereits das Konzept US EPA von 1984 [USEPA_PAK, 1984]. Es berücksichtigt 16 PAK, karzinogene sowie nichtkarzinogene. Um die Karzinogenität eines Gemisches mit möglichst geringem analytischen Aufwand zu bewerten, ordnete man nicht nur Benzo(a)pyren, sondern auch den übrigen karzinogenen PAK den Wert 1 (karzinogen) zu. Den nichtkarzinogenen PAK wurde der Wert 0 zugeordnet, doch mussten sie analytisch erfasst werden. Die veröffentlichten Toxizitätsäquivalente hatten damit nicht den Anspruch „richtig“ zu sein. Heute werden in der Literatur korrekte Werte für Wirkungs- bzw. Äquivalenzfaktoren (T_{eq}) angegeben. Diese sind allerdings je nach Autor bzw. Probenherkunft und PAK-Gemisch stärker variierend.

Aufgegriffen und verfeinert wurde das Prinzip in der Grenzwertsetzung nach ProdSichG, konkret der AfPS GS 2014:01, die auch Grenzwerte für nichtkarzinogene PAK definiert sowie Summengrenzwerte unter deren Einbeziehung. In ähnlicher Weise ist der OEKO-TEX 100-Standard des international operierenden Forschungs-, Labor- und Zertifizierungsdienstleisters OEKO-TEX® Association, der Produktlabel bzw. Textilsiegel vergibt, konzipiert. [OekoTex100]

Dennoch bleiben auch bei einer solchen Vorgehensweise Unwägbarkeiten bei der Bewertung von PAK-Gemisch-Belastungen. So ist die karzinogene Wirkung von Benzo(a)pyren wesentlich vom gleichzeitigen Vorliegen und der Aufnahme von Phenol abhängig [IFV, 2018]. Insofern verwundert es nicht, dass es in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich beträchtliche

Unterschiede in der Höhe der PAK-Grenzwerte sowie der Anzahl zu berücksichtigender Einzelverbindungen gibt.

Tabelle 3 Kenndaten ausgewählter PAK [GESTIS, 2020]

| PAK | Zahl aromat. Ringe | karzin./ T _{eq} | F [°C] | Kp [°C] | p (25 °C) [Pa] | p sonstige [Pa] | log Kow |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------|------------|----------------------|------------------------------|------------|
| Naphthalin | 2 | vermutlich | 88 | 218 | 10,4 | 7,2 (20 °C) | 3,4 |
| Acenaphthylen | 3 | nein | 92 | 280 | | | - |
| Acenaphthen | 3 | nein | 95 | 278 | 0,3 | | 4,2 |
| Fluoren | 3 | nein | 116 | 295 | 9,6x10 ⁻² | | 4,2 |
| Phenanthren | 3 | nein | 101 | 332 | 1,6x10 ⁻² | | 4,6 |
| Anthracen | 3 | nein | 217 | 340 | 8x10 ⁻³ | 10 (126 °C), 100 (151 °C) | 4,5 |
| Fluoranthren | 4 | nein | 111 | 375 | 6,5x10 ⁻⁴ | | 5,0 |
| Pyren | 4 | nein | 156 | 404 | 6,0x10 ⁻⁴ | | 5,2 |
| Benzo[a]anthracen | 4 | ja/0,145 | 160 | 438 | 2,8x10 ⁻⁵ | 2,9x10 ⁻⁶ (20 °C) | 5,6 |
| Chrysen | 4 | ja/0,004 | 256 | 448 | 8,4x10 ⁻⁵ | 7x10 ⁻⁴ (20 °C) | 5,9 |
| Benzo[b]fluoranthren | 5 | ja/0,141 | 168 | 481 | 6,7x10 ⁻⁵ | | 6,1 |
| Benzo(j)fluoranthren | 5 | ja | 166 | 480 | 2,0x10 ⁻⁶ | | 6,1 |
| Benzo[k]fluoranthren | 5 | ja/0,061 | 217 | 480 | 1,3x10 ⁻⁸ | | 6,8 |
| Benzo(e)pyren | 5 | ja/0,004 | 178-180 | | | | - |
| Benzo[a]pyren | 5 | ja/1,0 | 177 | 495 | 7,3x10 ⁻⁷ | | 6,5 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | 5 | ja/1,11 | 270 | 524 | 1,3x10 ⁻⁸ | | 6,5 |
| Indeno[1,2,3-c,d]pyren | 6 | ja/0,232 | 163 | 536 | 1,3x10 ⁻⁸ | | 6,6 |
| Benzo[g,h,i]perylene | 6 | ja/0,022 | 278 | 500 | | | 7,2 |

Allein für das Inverkehrbringen von Erzeugnissen sind in Deutschland bzw. Europa drei Standards heranziehbar. Den großen Rechtsrahmen setzt die EG bzw. EU mit der Novelle zur REACH-VO [EG, 1272/2013]. In Deutschland ist für die GS-Zeichen-Vergabe nach ProdSichG zudem die AfPS GS 2014:01 zu beachten. Für Hersteller hat der international stark beachtete OEKO-TEX100-Standard Bedeutung. Nach EU sind 8, nach GS 18 und nach OEKO-TEX 100

Standard 24 Einzelverbindungen zu berücksichtigen. Bis auf die EG-VO umfasst die Palette zu analysierender PAK sowohl karzinogene als auch nicht karzinogene PAK. Zudem werden für verschiedene Produktgruppen bzw. Gefährdung infolge Hautkontakt unterschiedliche Grenzwerte zu Grunde gelegt. Das Konzept des Textil-Zertifizierungssystems OEKO-Tex weicht hier ab, da gleiche Grenzwerte für Erzeugnisse mit bzw. ohne Hautkontakt (Produktklasse II/ III) sowie Ausstattungsgegenstände (Produktklasse IV) gelten. Es findet daher in dieser Arbeit keine Berücksichtigung. Zu den Grenzwerten nach EG bzw. EU sowie GS sei auf Abschnitt 3.4, verwiesen.

2.2.3 Aufnahmewege

Im Feuerwehreinsatz kommt der **Atemweg** als Aufnahmeweg für Karzinogene grundsätzlich nicht in Frage, da der Atemweg im Einsatz durch das Tragen des PA geschützt ist. Dennoch wird eine solche Aufnahme für Gase sowie Dämpfe flüchtigerer Stoffe diskutiert. Allerdings erst nach Ablegen des Pressluftatmers, infolge Einatmens aus der Einsatzbekleidung ausgasender Stoffe. Darüber hinaus ist dies für feste, anorganische Karzinogene, wie Asbest zu berücksichtigen, insbesondere wenn keine geeignete Aufbereitung der PSA nach dem Einsatz erfolgt. Zu berücksichtigen ist auch, dass vielfach gar nicht bekannt ist bzw. wird, dass Asbest im Einsatzgeschehen eine Rolle spielte.

Auch die **orale Aufnahme** von Karzinogenen erklärt die signifikant erhöhte Krebsrate unter Feuerwehreinsatzkräften nicht. Sie kann bei Einhaltung einfachster Hygieneregeln nicht zu den dafür erforderlichen hohen Schadstoffaufnahmen führen. Dafür sind die Kontakt- bzw. Übertragungsflächen sowie –zeiten einfach zu gering. Nichtsdestotrotz muss dieser Pfad im Blick behalten werden, da es nicht nur um das Trinken und Essen unmittelbar nach dem Einsatz geht, sondern es infolge von Kontaminationsverschleppungen bis in den Nacheinsatz- und privaten Bereich zu einer längeren und wiederholten Aufnahme kommt.

Den wichtigsten Aufnahmeweg für Karzinogene im Zusammenhang mit dem Feuerwehreinsatz bildet nach derzeitigem Kenntnisstand die Aufnahme über die **Haut**. Als größtes Organ stellt die Haut eine große Eintrittspforte dar. Zudem ist die Rückhaltung der Haut selbst für die hydrophoben PAK begrenzt, erst recht unter den Bedingungen der Brandbekämpfung mit erhöhter Körpertemperatur und Stoffwechsel sowie aufgeweichter und stark durchbluteter Haut [Eijnde, 2018]. Nach Untersuchungen von Willems [Willems, 2017], im Rahmen einer Studie im Auftrag des Niederländischen Feuerwehrverbandes [IVF, 2018], wird die Hautaufnahme für PAK als relevanter Aufnahmeweg während der Brandbekämpfung angesehen. Viele Autoren haben gezeigt, dass während der Brandbekämpfung PAK auf die Haut gelangen und verstoffwechselt werden [Laitinen, 2010; Fent, 2013; Fent, 2017; Baxter,

2014; Wingfors, 2018]. Es stellt sich die Frage, wie hochsiedende Stoffe, wie die PAK, bis zur Haut gelangen können, d.h. welche Kontaminationspfade hierfür in Frage kommen und wie ihre Gewichtung ist. Für die Nacheinsatz-Exposition ist dies durch Kontakt ungeschützter Haut mit kontaminierten Oberflächen aller Art zu erklären. Während des Einsatzes kommen hierfür prinzipiell drei Wege in Frage, durch den PSA-Aufbau, über unzureichend geschlossene Übergänge der PSA-Teile sowie durch Feuerschutzhauben geringer Schadstoffrückhaltung.

Da im heißen Brandrauch ein erheblicher Teil der PAK-Last dampfförmig vorliegt, bieten selbst Nano-Vlies-Materialien nur einen unzureichenden Schutz. Sie halten lediglich die partikelgebundene PAK-Fracht auf Abstand. Es gibt jedoch inzwischen Feuerschutzhauben mit Membran. Auch für deren Bewertung ist die Klärung des Schutzgrades der Membranen von Bedeutung.

Der unzureichende Abschluss der PSA-Übergänge ist ebenfalls begrenzt. Die verschiedenen Formen von Bündchen, Stulpen oder Zügen in den Jacken sollten allerdings auf ihre Rückhaltefähigkeit überprüft werden. Anzustreben ist auch eine möglichst passgenaue PSA sowie weiche, anschmiegsame Bekleidungsmaterialien, da „Pumpbewegungen“ der PSA bei Bewegung die Wirkung unzureichend verschlossener Übergänge verstärken. Auch die Overall-Form u.Ä. ist daher überlegenswert, zumindest als Unteranzug. In einem aktuellen Projekt unter Förderung des BMBF wird an einer solchen funktionalen Unterwäsche bzw. Vliesstoffen als wechselbare Innenlage für Schutzbekleidungen geforscht [3D-PAKtex, 2020].

Abbildung 3 und Abbildung 4 belegen den unzureichenden Schutz klassischer Einsatzbekleidungskonzepte. Mittels FAST-Test (Fluorescent Aerosol Screening Test) wurde 2015 am RTI International [RTI_FAST, 2015] in den USA übliche Einsatzbekleidung zur Brandbekämpfung auf Dichtigkeit getestet. Dazu erfolgte die Anströmung eines Probanden in PSA unter Ausführung eines normierten Bewegungsprofils mit Fluoreszenzpartikeln. Anschließend wurde die Kontamination der Haut durch Schwarzlichtaufnahmen (UV) sichtbar gemacht. Bei der Bewertung der Bilder ist zu berücksichtigen, dass einige Hautbereiche eine natürliche Fluoreszenz zeigen, wie Ellenbogen (außen), Fußsohlen und Handflächen sowie Nägel. Auch Fasern können mitunter helle Flecken ergeben. Daher wurden von den Probanden vergleichend vor dem Test Schwarzlichtaufnahmen erstellt.

Die Bilder decken die Unzulänglichkeiten eines mehrteiligen Einsatzbekleidungssystems hinsichtlich der Rückhaltung selbst partikulärer Schadstoffe klar auf. Für Gase und Dämpfe gilt dies in noch stärkerem Maße, da sie frei beweglich sind.



Abbildung 3 Details der Einsatzbekleidung des Probanden vor dem Versuch, Fotos und Test RTI International [RTI_FAST, 2015]

Die Testbedingungen im Detail:

- 2,5-µm Partikel aus amorphem Silica; getränkt mit Na-Fluorescein zur Quantifizierung sowie Tinopal zur Sichtbarmachung mit Schwarzlicht (qualitativ);
- Wind- bzw. Anströmgeschwindigkeit: 10 mph (etwa 4,5 m/s)
- Partikelstrom: $\sim 5.000 \text{ mg} / \text{m}^3 \text{ min}$
- 21 °C, 50% relative Feuchte
- 30 Minuten Exposition
- Bewegungsprogramm aus Stehen, Gehen und Laufen (auf Stelle), Knien, Sitzen, Strecken, Rumpfbeugen- und -drehen sowie auf Bauch und Rücken legen.

Die Eintrittspforten sollten weitgehend geschlossen werden. Davon unabhängig ist es von großem Interesse, wie hoch das Schutzniveau der Bekleidungs aufgebauten und Membranen ist und ob es Unterschiede zwischen den Hauptmembranarten und Materialaufbauten gibt. Dies für die Stoffklasse der PAK zu ermitteln, ist ein wesentliches Ziel dieser Arbeit.

Zu beachten sind zudem die Gefahren bei Nachlöscharbeiten und an kalten Brandstellen [vgl. vds-RL 2357]. Neben dem Kontaminationsrisiko darf hier der Schutz der Atemwege nicht vernachlässigt werden. Auch das Kontaminationsniveau bei Heißbrandausbildungen in feststoffbefeuerter BÜA steht dem realer Brandeinsätze in nichts nach [Laitinen, 2010; Kirk, 2015; Kükelhahn, 2018; vgl. auch Ergebnisse in Kapitel 5).

Hinzu kommt die Nach-Einsatz-Exposition, vor allem infolge Kontakt ungeschützter Haut mit kontaminierten Oberflächen aller Art. Hier sind bereits verhältnismäßig geringe

Kontaminationsgrade beachtenswert, da sich die Dauer der Exposition(en) auf die Höhe der Hautaufnahme auswirkt. Die Kreuzkontamination von Fahrzeugen, Wachen und des Privatbereichs ist daher durch eine konsequente Ablage, Verpackung sowie gesonderten Transport kontaminierter PSA und Gerät zu minimieren. Beim Ablegen und Verpacken sollten die Grundsätze des GSG-Einsatzes der kontaminierten PSA beachtet werden.

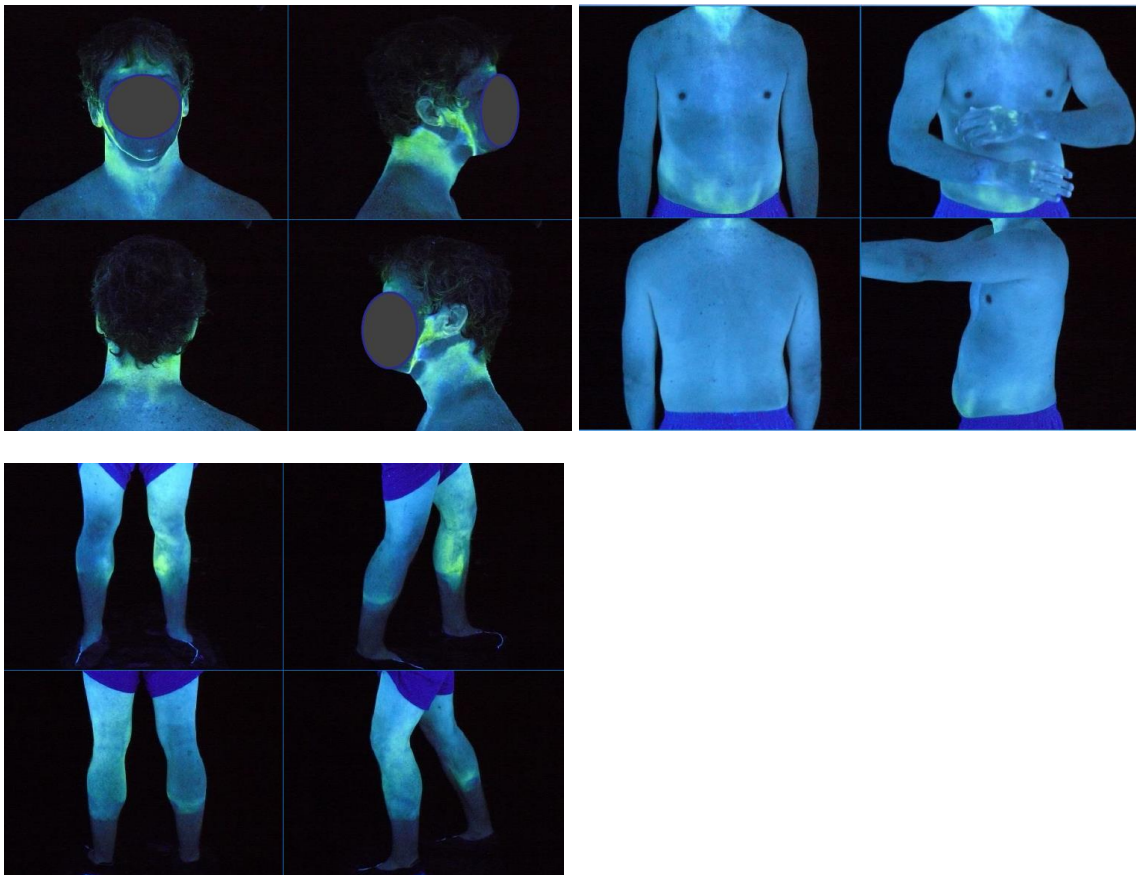


Abbildung 4 Kontamination der Haut beim Tragen von PSA im Windkanal, FAST-Test mit Fluoreszenz-Partikeln, Fotos und Test RTI International [vgl. RTI_FAST, 2015]

In diesem Zusammenhang ist die begrenzte Dekontaminationsleistung der Nasswäsche zu berücksichtigen [Laitinen, 2018; IFV, 2018]. Die PSA ist nach einer klassischen Nasswäsche nicht schadstofffrei. Relevant ist dies insbesondere für PAK und andere Hochsieder, wie PCDD/ PCDF sowie faserförmige Karzinogene, wie insbesondere Asbest (vgl. Kapitel 5).

Die Hautaufnahme während des Einsatzes ist auch für flüchtige Karzinogene zu beachten. Verschiedene Autoren berichten dies für Benzol, das in hohen Konzentrationen im Brandrauch vorkommt, karzinogen und gut hautgängig ist [NIOSH_2013; Fent, 2015; Keir, 2017 und Fent, 2019]. Fent hat in der neueren Arbeit zweifelsfrei nachgewiesen, dass es regelmäßig zur

Benzolaufnahme während der Brandbekämpfung unter Tragen von Pressluftatmern kommt. Auch in der Studie im Auftrag der niederländischen Feuerwehren [IFV, 2018; Eijnde, 2018; Willems, 2017] wird das Risiko einer relevanten Hautaufnahme während der Brandbekämpfung für Benzol sowie weiterer flüchtige Schadstoffe eingeräumt. Als Hauptgefahr wird hier allerdings in der Nach-Einsatz-Aufnahme über die Atemwege infolge aus der PSA ausgasender Dämpfe gesehen. Zum Schutz sollte bis zum Ablegen der PSA der Atemschutz getragen werden.

3. Untersuchungskonzept

3.1 Vorgehen

Gegenstand des Forschungsprojektes war die PSA-Kontamination der Feuerwehr bei Bränden. Bezugsszenario für die Ermittlung des typischen Kontaminationsniveaus von Einsatzkräften war die Innenbrandbekämpfung im Wohnbereich. Das Szenario bildet das Gros des Brand- und Einsatzgeschehens von Feuerwehren in Deutschland ab, ohne Worst Case-Charakter zu haben. Dennoch ist es mit einem intensiven Kontakt mit heißen Brandgasen und in der Folge stärkerer Kontamination der PSA mit Brandfolgeprodukten verbunden. Zugleich ist das Szenario durchaus vielfältig und die Übergänge zu Einsätzen im gewerblichen Bereich sind fließend.

Wesentliche Einflussfaktoren sind die Ausdehnung des Wohnungsbrandes zu Beginn der Löschmaßnahmen, die Lüftungsbedingungen, die Zusammensetzung sowie die Höhe der Brandlast. Die in den letzten Jahrzehnten beobachtete raschere Brandausbreitung, erhöhten Verbrennungstemperaturen und erhöhte Schadstoffbildung und –quellstärke stehen dabei in Bezug zur verstärkten Nutzung von Kunststoffen [IARC, 98/2010]. Verstärkend wirken die verbesserte Gebäudedämmung sowie verminderte Wärmekapazität der Raumumhüllung, wie etwa in ausgebauten Dachgeschossen sowie bei Nutzung leichter Trennwände. In der Folge ist der Brandzustand, der bei Eintreffen der Feuerwehr angetroffen wird, heute oft fortgeschritten. Die flächendeckende Installation von Rauchmeldern hat die Lage etwas entspannt, ohne die Gesamtproblematik lösen zu können.

Bei Wohnungsbränden ist von einer ventilationsgesteuerten Verbrennung auszugehen. Dies ist ein wesentlicher Grund der erhöhten Schadgasbildung bzw. –ausbeute. Dabei sind die Hauptschadstoffe und die Größenordnung ihrer Bildung ähnlich [Schuppe, 1993]. Die Beschränkung auf PAK als Träger der karzinogenen Hauptlast ist zulässig [Wobst, 2001].

Brände im Gewerbebereich und der Industrie sind demgegenüber häufig durch eine besondere Brandstoffzusammensetzung, erhöhte Brandlasten sowie brandfördernde

Anordnung gekennzeichnet. Lange Einsatzzeiten, hohe Schadstoffquellstärken sowie die mögliche Bildung weiterer relevanter Schadstoffe sind typische Kennzeichen. Brände im Freien, von Recycling- und Schreddermaterialien, Waldbrände u.Ä. scheinen wegen des besseren Schadstoffabzuges weniger problematisch, doch sollten sie nicht unterschätzt werden, da sie unter Umständen mit langen Kontaktzeiten sowie zum Teil Abstrichen beim Körperschutz und der Einsatzstellenhygiene verbunden sind. Hinzu kommt im Abfall- bzw. Recyclingbereich die mögliche Bildung anderer Schadstoffe (z.B. Dioxine) bzw. deren Bildung in erhöhter Quellstärke.

Im hier vorgestellten Forschungsprojekt erfolgte eine Fokussierung auf Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), da sie bei Bränden im Wohnbereich nach dem Stand der Forschung die karzinogene Hauptschadstofffracht bilden [Wobst, 2001]. Hauptaufnahmeweg für die hochsiedenden PAK ist die Haut. Klar war zudem, dass es bereits während des Einsatzes zu Hautkontaminationen und in der Folge einer Hautaufnahme sowie Verstoffwechselung von PAK kommt. Zu beachten sind zudem die Expositionen nach den Einsätzen infolge von Kontaminationsverschleppungen [NIOSH, 2013, Fent, 2015 u.a.].

Unklar ist zudem die Gewichtung der potenziellen Kontaminationspfade und Aufnahmewege. Für die Kontamination der Haut während des Einsatzes waren die teilgeschützten Übergänge zwischen den PSA-Teilen (vgl. FAST-Test). Ungeklärt blieb die Frage einer möglichen Permeation der Schadstoffe durch den PSA-Aufbau bzw. die Membranen. Hier setzt das vorliegende Forschungsprojekt an. Ziel des Projektes ist zudem für Deutschland, unter den bestehenden einsatztaktischen und technischen Bedingungen, zu klären, welches Kontaminationsniveau der Einsatzbekleidung nach der Brandbekämpfung typisch ist und ob es zur Überschreitung zulässiger Höchstgehalte an PAK kommt.

Zur Lösung der Aufgabenstellung wurden im Technikum unter einsatznahen Brandbedingungen Materialproben von Einsatzkleidung mit Brandrauch beaufschlagt und kontaminiert. Durch die lagenweise Untersuchung des Kontaminationsniveaus sollte ermittelt werden, wie weit die PAK während der Brandbekämpfung in Richtung Haut vordringen und wie hoch der Schutzgrad bzw. die Schutzfaktoren der üblichen Einsatzbekleidung bzw. Einsatzbekleidungsaufbauten ist.

Die Materialproben wurden hierzu auf thermisch isolierte Kästen als Körpersimulator gespannt. Einsatznahe Temperatur-Bedingungen und die Auslegung als Doppelversuch, trocken sowie unter Löschmittelaufgabe, sorgten für den Praxisbezug. Die Einbeziehung einer Vielzahl unterschiedlicher Materialaufbauten zielte auf mögliche Unterschiede im Schutzniveau der in Deutschland verwendeten PSA bzw. integrierten Membranen.

Zur Einordnung des Kontaminationsniveaus der Technikumsversuche dienten Proben aus der realen Einsatzpraxis (ungewaschene Einsatzjacken). Gewaschene Einsatzjacken wiederum sollten eine mögliche Langzeitexposition infolge Restkontamination der gereinigten PSA klären.

Die Bewertung der Kontamination erfolgte durch Vergleich mit Grenzwerten für das Inverkehrbringen von Erzeugnissen mit Hautkontakt, v.a. nach ProdSichG bzw. der zugehörigen Prüfrichtlinie AfPS GS 2014:01.

3.2 Materialien und Proben

Für die Repräsentativität der Untersuchungen im Technikum wurden zwölf verschiedene Materialaufbauten ausgewählt (**Technikumsproben**). Diese berücksichtigten sämtliche derzeit bei Einsatzkleidung verwendeten Obermaterialien und Membranarten.

Zur Untersuchung wurden die Materialproben auf mit Aluminiumfolie verkleidete, thermisch isolierte Probenboxen gespannt, dem Brandrauchstrom ausgesetzt. Dies erfolgte für alle zwölf Proben parallel und somit unter nahezu ähnlichen Bedingungen. Die alukaschierten Holzboxen sorgten für ein vergleichsweise niedriges Temperaturniveau im Inneren und dienten als Körpersimulator (Kapitel 4.1 Versuchsdurchführung).

Klar war, dass die Kontaminationsbedingungen bei der Beladung im Technikum weit über denen der realen Brandbekämpfung liegen würden. Schließlich zählt es zum taktischen Grundwissen, sich unterhalb der Rauchgasschicht zu bewegen. Die Proben hingegen wurden im 45°-Winkel direkt im Rauchgasstrom positioniert, bei einem realitätsnahen Temperaturniveau. Darüber hinaus war die Verweilzeit der Proben durch die Branddauer bestimmt, d.h. gegenüber der Einsatzpraxis deutlich verlängert. Und auch die gewählten Brandbedingungen, mit stark unterventilierter Verbrennung, waren extrem. Die Bedingungen der Probenkontamination im Technikum stellen, aus Sicht der Brandbedingungen, der Beladungsform und der Beladungsdauer, eine Worst Case-Kontamination dar. Dies war für die Klärung der Kernfrage des Forschungsprojektes, der Möglichkeit einer relevanten Kontamination der Haut infolge Permeation durch den Bekleidungs Aufbau, jedoch zielführend und angestrebt.

Die Einordnung des erreichten Beladungs- bzw. Kontaminationsniveaus erfolgte durch Untersuchung von ungewaschenen Proben aus der Einsatzpraxis (**Praxisproben**). Im Rahmen des Forschungsprojektes gibt es insofern zwei Haupttypen von Proben, Technikumsproben sowie Praxisproben (ungewaschen, direkt aus der BBK).

Um Worst Case-Annahmen zu vermeiden, sollten bei den Praxisproben ursprünglich nur Einsatzjacken untersucht werden. Von diesem Ziel wurde im Laufe der Bearbeitung infolge geringen Probenaufkommens abgewichen und daher auch Einsatzhosen untersucht. Zudem bot die Berücksichtigung bereitgestellter weiterer PSA, wie Helme, Handschuhe u.a. die Möglichkeit einer Aussageverbreiterung. Dies gilt auch für einige PSA-Proben aus holzbefeuerten Brandübungsanlagen sowie bei Bränden aus dem gewerblichen Bereich.

Weiterhin wurde das Untersuchungsprogramm auf gewaschene Einsatzjacken aus der Brandbekämpfung ausgeweitet. Dies zielte auf die Ermittlung des Hintergrundbelastungsniveaus. Dies ist besonders beachtlich, da die Einsatzbekleidung viele Stunden getragen wird. Aus der Literatur ist bekannt, dass innere Schichten der PSA teils erheblich mit PAK kontaminiert sein können [Fent, 2013; Laitinen, 2010; Laitinen, 2018 u.a.]. Darüber hinaus liefert die Untersuchung indirekt Hinweise auf die Reinigungsleistung der Nasswäsche. Die Zahl der erhaltenen Proben blieb allerdings gering.

Die vereinbarten ungewaschenen Proben aus der Brandbekämpfung wurden kurz nach der Rückkehr auf die Wache bzw. noch am Brandort in gasdichte Beutel bzw. Säcke der Dimension 400x600 mm verpackt. Für die übrigen Proben erfolgte dies mit Probenerhalt am IBK. Die Proben wurden am IBK bis Beprobung und Analyse bei - 8 °C gelagert. Die aluminiumkaschierten Probensäcke sind infolge ihrer Dicke und den Schutz der Al-Folie durch eine Kunststoff-Beschichtung (Aufbau PET/Aluminium/PE) sehr robust. Zudem sind sie als sogenannte Brandschuttbeutel 4-seitig verschlossen und wurden erst vor Gebrauch geöffnet, so dass Kreuzkontaminationen ausgeschlossen werden können. Nach Verpackung der PSA wurde der Rand umgeschlagen und mittels eines Aluminiumklebebandes verschlossen.

Ein wesentlicher Teil der Praxisproben stammt von den Feuerwehren München und Berlin, wobei die Firma Texport, durch zeitnahe Bereitstellung von Ersatzbekleidung zum Austausch, unterstützte. Mit beiden Feuerwehren konnten im Vorfeld Vereinbarungen zur Probenahme sowie Probencharakteristik getroffen und die Verpackungssets bereitgestellt werden. Für die übrigen Praxisproben von Freiwilligen Feuerwehren aus dem gesamten Bundesgebiet war dies nicht möglich. Diese erreichten das IBK oft erst Wochen nach dem Ereignis. In der Zwischenzeit waren die Proben nur behelfsmäßig verpackt, so dass von Verlusten insbesondere bei den flüchtigeren, nichtkarzinogenen PAK auszugehen ist. Die Verluste sind nicht quantifizierbar. Insofern verbleibt eine Unwägbarkeit hinsichtlich einer möglichen Überschreitung der Grenzwerte für die PAK-Summen sowie Naphthalin.

3.2.1 Materialaufbauten

Im Technikum wurden zwölf Materialaufbauten von Einsatzbekleidung für die Brandbekämpfung untersucht. Berücksichtigt wurden hierbei neben einer Vielzahl von Membrankonfigurationen sämtliche in Einsatzkleidung eingesetzte Obermaterialien. Eine Aufstellung der untersuchten Materialien und ihres Aufbaus enthält Tabelle 12 im Anlagenteil 1. Ergänzend sind dort Fotos der Materialaufbauten abgelegt (Abbildung 40 bis Abbildung 42).

An dieser Stelle sei den Firmen Watex und Viking für die kostenfreie Bereitstellung von Probenmaterial gedankt. Ergänzend wurden hilfsweise konfektionierte Einsatzjacken weiterer PSA-Hersteller beschafft, um daraus Probenstücke zu gewinnen und eine Marktabdeckung sicherzustellen.

Einbezogen waren die aktuell genutzten Membranmaterialien bzw. -arten ePTFE, PUR und PE(S), jeweils in mindestens zwei Varianten. Chemisch handelt es sich dabei um Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyurethan (PUR) sowie bei den PE(S)-Materialien um Copolymere aus Polyester (PES) und Polyether, auch Polyetherester genannt. In der Textilindustrie wird hierfür meist der Kurznamen PE verwendet, der eigentlich für das Polymer Polyethylen steht. Ebenso werden Polyurethan- bzw. PUR-Membranen im Textilbereich meist mit PU bezeichnet, der in Amerika alternativ gebräuchlichen Kurzbezeichnung für die Polymerart.

Bei den vielfach vereinfachend als PTFE ausgewiesenen Membranen handelt es sich eigentlich um ePTFE-Membranen, d.h. gereckte bzw. expandierte Membranen, was das vorangestellte „e“ verdeutlicht. Dabei werden die Molekülketten in einem nachträglichen Verarbeitungsschritt orientiert, so dass zwischen ihnen Löcher auf molekularer Ebene entstehen (mikroporöse Membranen). Diese ermöglichen erst die für Membranen im Bekleidungsbereich erforderliche Gas- bzw. Dampf- Durchlässigkeit und Atmungsaktivität. Die hydrophilen Kunststoffe PUR und PE(S) gewährleisten die erforderliche Atmungsaktivität bzw. Wasserdampf-Durchlässigkeit durch ihre geschlossene, porenfreie Membranfläche. Man spricht hier von hydrophilen Membranen. Der Vorgang des Gas- bzw. Dampf-Durchtrittes wird physikalisch als Permeation bezeichnet.

ePTFE-Membranen werden auch als offenporige Membranen bezeichnet. Durch einen Layer aus Polyurethan (PUR) werden aus den ePTFE-Membranen „geschlossen-porige“ Membranen. Ursprünglich von der Firma Gore zur Gewährleistung der Flüssigkeitsdichtigkeit sowie als Schutz vor dem sogenannten Blocking (allmähliche Verstopfung der Poren durch Kalk- und Schmutzablagerungen unterschiedlichster Art) eingeführt, wurde die Beschichtung später als Schutz vor Penetration durch Krankheitserreger in Blut oder Sputum optimiert.

Heute ist das Beschichten offenbar Standard bei ePTFE-Membranen für PSA für die Brandbekämpfung. Dennoch zählt man ePTFE-Membranen grundsätzlich zu den offenporigen Membranen. Mögliche Gründe sind die geringe Dicke der PUR-Beschichtung und die Nichtberücksichtigung in Standards und insofern letztlich in Deutschland nicht reglementierte Qualität. Die Beschichtung wird selten ausgewiesen und beworben.

3.2.2 Beprobung

Zur Klärung der Ursache für die Kontamination innerer Schichten erfolgte eine lagenweise Beprobung und Analyse bereits für die **Technikumsproben**. Die lagenweise Untersuchung ist allerdings auch für den Vergleich mit Grenzwerten nötig, da diese grundsätzlich für die Einzelteile bzw. –lagen eines Produktes definiert sind. Relevant ist dies insofern v.a. für die äußere und innerste Lage, für die die Möglichkeit eines Hautkontaktes besteht.

Zur Erzielung einer möglichst niedrigen sowie für alle Analysen vergleichbaren Bestimmungsgrenze der Einzel-PAK wurden jeweils 3 g Probe gewonnen. Dies hatte aufgrund unterschiedlicher Flächengewichte der Einzellagen zur Folge, dass verschieden große Flächen beprobt wurden. Ergänzend zu den Einzellagen wurde Proben über alle Schichten untersucht – sogenannte Stanzproben bzw. „gesamt“. Da Beprobung und Extraktion verbrauchend sind, erfolgte die Beprobung der Einzellagen und der Probe „gesamt“ von unterschiedlichen Stellen. Dies sowie die variierenden Flächengewichte sind somit Quellen für Unsicherheiten, da bei der Probenbeaufschlagung eine leichte Inhomogenität unvermeidbar ist (vgl. Ergebnisdiskussion).

Die Beprobung von Einzellagen berücksichtigte nicht jede einzelne Materiallage, sondern Funktionslagen, zumal diese oft nicht oder nur lose miteinander verbunden waren. Äußere und innere Schicht wurden separat beprobt. Alle dazwischenliegenden Lagen wurden zusammengefasst beprobt. Die Beprobung der erfolgte i.d.R. als:

„außen“ (Obermaterial, ggf. oberhalb der Membran verarbeitete lose Lage bzw.

Spezialfall Material I - Membran an Obermaterial laminiert),

„mittig“ (Membran einschließlich damit fest verbundener Gewebe- oder Vliesschicht) und

„innen“ (Ausnahme: Material B – zwei innere Funktionslagen; ergänzend Summe).

Das Interesse galt vordringlich der Barrierewirkung der Membranen. Die PSA-Materialien unterschieden sich in ihrer Bauform. Die Materialien bestanden aus zwei bis vier Lagen. Die Betrachtung weiterer Schichten stößt an Grenzen, da die für 3 g Probe zu berücksichtigende Fläche aufgrund teilweise sehr dünner und leichter Einzellagen noch viel stärker variiert hätte.

Bei den **Praxisproben** wurde dieses Vorgehen dahingehend spezifiziert, dass Mischproben von verschiedenen Bereichen des PSA-Teiles gewonnen wurden, bei Einsatzjacken von 10 definierten Bereichen (Abbildung 5), bei Einsatzhosen von 5 Bereichen. Die Standard-Beprobungsstellen schlossen sowohl erwartbar stärker kontaminierte Bereiche als auch weniger kontaminierte Bereiche ein. Zudem erfolgte die konkrete Positionswahl unabhängig vom visuellen Belastungseindruck an vergleichbarer Position. Hierdurch wurden Worst Case-Bewertungen vermieden.

Die Beprobungsbereiche bei Einsatzjacken waren: Halskragen, Ärmel rechts und links, FuG-Tasche, Schultern links und rechts im Bereich der PA-Träger, Jackentasche rechts und links, der Jackensaum hinten sowie über dem Reißverschluss. Bei den Einsatzhosen wurden Gesäß rechts, Tasche rechts, Hosensaum rechts unten, Unterschenkel rechts außen sowie Oberschenkel rechts außen beprobt.



Abbildung 5 Beprobungsstellen für Mischproben von Einsatzjacken

Abweichend wurden zur Dokumentation der Inhomogenen Verteilung der Kontaminationen einige Einsatzjacken aus der Brandbekämpfung ergänzend an fünf Stellen mit erwartbar höherer Kontamination und häufigerem Hautkontakt beprobt (Hotspot-Beprobung). Die Hotspot-Beprobungen erfolgten an der Jackentasche rechts unten, Funkgeräte-Tasche, Ärmelunterseite rechts, Jackensaum vorn links sowie Schulter rechts unter PA-Träger.

3.3 Analytik

Die PAK-Analytik erfolgte nach den Grundsätzen der GS-Zeichenvergabe nach Produktsicherheitsgesetz [ProdSichG, 2015]. Die Grundlagen sind als Anlage in der Spezifikation des Ausschusses für Produktsicherheit (AfPS) in der AfPS GS 2014:01

„Prüfanweisung Harmonisierte Methode zur Bestimmung von Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Polymeren“ beschrieben.

Im Wesentlichen handelt es sich um eine Extraktion mit organischen Lösungsmitteln und anschließender Einengung der Extrakte (Aufkonzentration) sowie Analyse von Teilen der Extrakte, sogenannter Aliquote, mit einem GC-MS-System (GC-MS).

Folgende Abweichungen bezüglich der Probenextraktion erfolgten:

- Soxhlet-Extraktion statt Extraktion im Ultraschallbad bei 60 °C,
- n-Hexan als Extraktionsmittel statt Toluol,
- Extraktionsdauer ca. 1,5 h (Vielfachextraktion).

Die Änderungen führen zu Unterschieden bei der Wiederfindung bzw. in der Extraktionsausbeute, d.h. den Anteilen der aus der Probe extrahierbaren Schadstoffe im Verhältnis zur Gesamtbelastung der Probe. Dabei führt die Soxhlet-Extraktion regelmäßig zu deutlich höheren Ausbeuten – gerade bei den höherkondensierten PAK und schwieriger Matrix – als Extraktionen im Ultraschallbad [LAU BW, 1997]. Die Soxhlet-Extraktion bildet den Vergleichsstandard bei der Extraktion hochsiedender Stoffe.

Demgegenüber mindert die Verwendung von n-Hexan an Stelle von Toluol als Extraktionsmittel die Ausbeute etwas. Wesentlich für die Wiederfindung bei der Soxhlet-Extraktion ist zudem eine ausreichende Extraktionszeit bzw. Zyklenzahl. Beides sind wichtige Parameter, um das Extraktionsverfahren an die Probenmatrix und das verwendete Lösungsmittel anzupassen. Aufgrund der leichten Extrahierbarkeit aus Kunststoffen schreibt die AfPS GS 2014:01 lediglich eine 1-stündige Extraktion im Ultraschallbad vor. Die PSA-Proben im Forschungsprojekt wurden hingegen 1,5 h extrahiert. Zudem handelt es sich bei den zu extrahierenden Materialien um sehr dünne bzw. feine Materialien, deren Zerteilungsgrad noch durch Zerkleinerung auf eine Flächengröße von etwa 0,3 cm² erhöht wurde.

Die gaschromatische Trennung im GC-MSD-System erfolgte abweichend auf einer leicht polaren Trennsäule (DB-5®), einem in der Umweltanalytik vielfach eingesetzten Säulentyp. Die Trennung der Analyten war gewährleistet. Die Wiederfindung wurde durch Zusatz interner Standards (Int. Std.) zur zu extrahierenden Probe ermittelt und dokumentiert. Die Int. Std. bestanden aus drei über das Retentionszeitfenster verteilt ausgewählten deuterierten PAK.

In der Gesamtbetrachtung ist von einer gegenüber dem Standard erhöhten Wiederfindung auszugehen. Zur Fehlerabschätzung sei auf das Folgekapitel verwiesen.

3.4 Bewertung

Da die Bewertung des Kontaminationsniveaus der Praxisproben aus der Brandbekämpfung ohne Einbeziehung der Expertise von Toxikologen erfolgen sollte, wurde ein Vergleich der Messergebnisse mit Grenzwerten für den Hautkontakt realisiert. Als für die Fragestellung besonders geeignet wurden die Grenzwertkonzepte für in Verkehr zu bringende Erzeugnisse [EG, 1272/2013] sowie verschärfend in Deutschland für die GS-Zeichenvergabe nach Produktsicherheitsgesetz, niedergelegt in der AfPS GS 2014:01, ermittelt. Beide Grenzwertkonzepte werden in der Folge berücksichtigt (Tabelle 4 und Tabelle 5).

Die Standards gelten grundsätzlich nur für neue Erzeugnisse. Bereits genutzte PSA ist mit Novellierung der EG-VO sogar explizit vom Geltungsbereich ausgenommen [EG, 1513/2018]. Dies ändert allerdings nichts an der toxikologischen Wirkung entsprechender Kontaminationen.

Für die Einhaltung der Grenzwerte für in Verkehr zu bringende Erzeugnisse gibt der Gesetzgeber zudem den Bezug auf Einzelkomponenten eines Produktes vor. Bezogen auf die Einsatzbekleidung bedeutet dies, dass neben der Gesamtbelastung (über alle Schichten) v.a. die Belastungen der nicht fest miteinander verbundenen Einzellagen bei der Bewertung der Einhaltung von Grenzwerten zu bewerten sind. Grundsätzlich gelten die Grenzwerte dabei nur für Materialien mit Hautkontakt. Im engeren Sinne wären dies die Obermaterialien sowie die innersten, hautnahen Schichten der Einsatzbekleidung. Allerdings ist das eine statische Betrachtungsweise, eine Momentaufnahme, die den laufenden Stoffaustausch zwischen den Schichten sowie den Kontaminationsweg über die Dampfphase außer Acht lässt. Daher sind die Belastungen sämtlicher Schichten sowie der Gesamtprobe ebenfalls relevant und werden hier in analoger Weise betrachtet. Dies gilt umso mehr, als sich die Membranen im Rahmen der Arbeit als Schadstoffsammler erwiesen haben.

Die beiden Grenzwertkonzepte unterscheiden sich stärker. Wesentlich ist, dass die AfPS GS 2014:01 auch Grenzwerte für nichtkarzinogene PAK einführt sowie Summengrenzwerte. Zudem sind die Grenzwerte für die GS-Zeichen-Vergabe in der relevanten Kategorie 2, d.h. bei vorhersehbarem längerem Hautkontakt von länger als 30 s (längerfristiger Hautkontakt), deutlich niedriger als nach EU-VO. Dies wird für die Bewertung einsatzbedingter Kontaminationen als zielführend angesehen, da hierdurch Unwägbarkeiten infolge Nichtberücksichtigung analytisch nicht zugänglicher PAK u.a. abgedeckt werden. Auch die Verknüpfung der Kategorisierung nach ProdSichG mit der Dauer des (vorhersehbaren) Hautkontaktes wird dem Charakter einsatzbedingter Expositionen besser gerecht. In der Diskussion der Messergebnisse wird insofern das Grenzwertkonzept der AfPS GS 2014:01 bzw. nach GS favorisiert, ohne den Bezug zu den EU-Grenzwerten gänzlich aufzugeben.

Die Bewertung von Kontaminationen der Einsatzbekleidung stützt sich auf Grenzwerte der Kategorie 2, die einen längeren (> 30 s) bzw. wiederholten kurzfristigen Hautkontakt verlangt. Dies liegt für die Kontamination innerer Bekleidungsschichten auf der Hand. Infolge des verbreiteten Tragens kurzer Unterwäsche ist die zu berücksichtigende Kontaktfläche regelmäßig sogar großflächig. Bei einem Weitertragen kontaminierter PSA nach dem Einsatz, wie dies in Deutschland teilweise noch verbreitet ist, ist darüber hinaus ein Direktkontakt mit dem kontaminierten Obermaterial gegeben. Zudem sind die Gefahren infolge Kreuzkontamination bzw. Kontaminationsverschleppung zu beachten. Dies gilt auch für eine unvollständig gereinigte bzw. dekontaminierte PSA.

Tabelle 4 Grenzwerte für PAK für Erzeugnisse [vgl. EG 1272/2013]

| PAK nach EG bzw. EU | Grenzwert für Erzeugnisse bzw. Anwender allgemein | Grenzwert für Spielzeuge, Artikel für Säuglinge und Kleinkinder |
|------------------------------|--|--|
| Benzo[a]pyren | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |
| Benzo[e]pyren | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |
| Benzo[a]anthracen | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |
| Chrysen | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |
| Benzo[b]fluoranthen | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |
| Benzo[j]fluoranthen | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |
| Benzo[k]fluoranthen | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |
| Dibenzo[a,h]anthracen | 1,0 mg/kg | 0,5 mg/kg |

Beide Grenzwertkonzepte definieren ausschließlich gewichtsbezogene Grenzwerte. Diese Form der Grenzwertsetzung führt zu einer Untergewichtung der Gefährdungen bei flächigen Erzeugnissen. Das Risiko der Aufnahme über die Haut ist bei flächigem Kontakt deutlich erhöht. Diese Unwägbarkeit ist hinzunehmen, sollte bei der Diskussion der Einhaltung von Grenzwerten jedoch beachtet werden.

Tabelle 5 Grenzwerte nach ProdSichG bzw. AfPS GS 2014:01

| Parameter | Kategorie 1 | Kategorie 2 | | Kategorie 3 | |
|---|--|--|------------------------------------|---|-----------------------------|
| PAK-Grenzwert [mg/kg] | Materialien, die dazu bestimmt sind, in den Mund genommen zu werden oder Materialien in Spielzeug mit best. gemäßem und längerfristigem Hautkontakt (<i>länger als 30 s</i>) | Materialien, die nicht in Kat. 1 fallen, mit vorhersehbarem Hautkontakt <i>länger als 30 s</i> (längerfristiger Hautkontakt) oder wiederholtem kurzfristigen Hautkontakt | | Materialien, die nicht in Kat. 1 oder 2 fallen, mit vorhersehbarem Hautkontakt <i>bis zu 30 s</i> (kurzfristiger Hautkontakt) | |
| PAK | | Spielzeug nach RL 2009/48/EG/EU | übrige Produkte nach ProdSG | Spielzeug nach RL 2009/48/EG/EU | übrige Produkte nach ProdSG |
| Naphthalin | < 1 | < 2 | < 2 | < 10 | < 10 |
| Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Pyren, Anthracen, Fluoranthren | < 1 Summe | < 5 Summe | < 10 Summe | < 20 Summe | < 50 Summe |
| Benzo[a]pyren | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Benzo[e]pyren | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Benzo[a]anthracen | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Benzo[b]fluoranthren | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Benzo[j]fluoranthren | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Benzo[k]fluoranthren | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Chrysen | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Benzo[ghi]perylene | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | < 0,2 | < 0,2 | < 0,5 | < 0,5 | < 1 |
| Summe 18 PAK | < 1 | < 5 | < 10 | < 20 | < 50 |

Im Übrigen erlauben die ermittelten gewichtsbezogenen Kontaminationen keinen absoluten Vergleich verschiedener PSA-Materialien hinsichtlich ihrer Rückhaltefähigkeit. Auch hierzu sind flächenbezogene Kontaminationen besser geeignet. Eine solche Umrechnung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit zur Berechnung von Schutzfaktoren (SF).

4. Untersuchungen zur Barrierewirkung (Technikum)

4.1 Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen zur Barrierewirkung erfolgten im Technikum mit Materialproben von Einsatzbekleidung. In den Untersuchungen wurden die Bedingungen der Innenbrandbekämpfung, die für die Schadstoffbildung entscheidend sind, wie Brandstoffzusammensetzung, Ventilationsbedingungen und Verbrennungstemperatur, realitätsnah nachgestellt. Demgegenüber waren die Einwirkzeit des Brandrauches und die Beladungsintensität wesentlich erhöht. Dies hatte versuchstechnische Gründe. Außerdem wurde erwartet, dass durch die erhöhte Beladung die Wanderung der Schadstoffe zu inneren Schichten besser sichtbar würde. Zur Einordnung der Kontaminationshöhen dienten Proben aus der Einsatzpraxis (vgl. Folgekapitel).

Die Brandversuche erfolgten in einem zur HHR-Box umgestalteten 20-Fuss-Überseecontainer (Abbildung 6). An diesen wurde ein zweiter Container als Targetraum angeschlossen (Abbildung 7). Hier wurden die auf einseitig offenen Holzboxen gespannten PSA-Materialproben im Rauchgasstrom beladen. Dabei erfolgten zwei Versuche, mit und ohne Löschmittelaufgabe. Die Details sind der Versuchsbeschreibung im folgenden Abschnitt zu entnehmen.

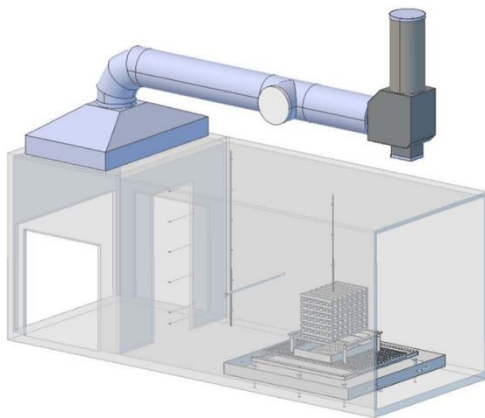


Abbildung 6 Raumstruktur und Funktionselemente des Brand- und Essenraumes [Zeichnung: Kohl, 2016]



Abbildung 7 Brandraum bzw. -container (rechts / hinten) sowie Targetraum (links / vorn)

4.1.1 Brandstoffzusammensetzung

Zur Realisierung definierter und reproduzierbarer Verbrennungsbedingungen war es erforderlich, standardisiert zu arbeiten. Es lag nahe, die Brandkrippen nach Anhang A der DIN EN 3-1 zu verwenden und die Brandstoffzusammensetzung durch Zusatz von Kunststoffmaterialien nachzustellen. Hilfreich war, dass die Brandstoffzusammensetzung in Innenräumen aktuell in einer Masterarbeit untersucht und eine solche gemischte Brandkrippe bereits konzipiert worden war [vgl. Masterarbeit: Braun, 2016].

Braun hat die Brandstoffzusammensetzung in Wohnräumen einschließlich Kinderzimmern mit etwa 30 M % Plastik ermittelt. Da der Aufwand einer solchen Erhebung enorm ist, blieb die Zahl der berücksichtigten Haushalte gering. Zudem war die soziale Struktur eingeschränkt. Das Spektrum der in der Arbeit bilanzierten Kunststoffe ist vergleichsweise gering. Die in Hartfaserplatten (MDF/ HDF) in beträchtlicher Größenordnung enthaltenen Kleberkomponenten wurden offenbar nicht bilanziert. Jedenfalls werden Harnstoff-Formaldehyd (UF), Phenol-Formaldehyd und Melamin-Formaldehyd nicht als relevante Kleberpolymere genannt. Insofern wurde der Ansatz für das vorliegende Projekt als geeignete Grundlage angesehen.



Abbildung 8 Mischbrandkrippe nach Masterarbeit, Foto: BAM/Otto-von-Guericke Universität Magdeburg [Braun, 2016]

Das von Braun konzipierte Brandobjekt berücksichtigte den ermittelten mittleren Kunststoffanteil durch Einschub von 10 mm-starken Plastikstäben (Abbildung 8). Hierdurch ist allerdings das für die Belüftung des Brandobjektes nötige freie Volumen stark eingeschränkt. Darüber hinaus waren das Format und die Größe der Krippe für die eigenen Brandversuche ungeeignet. Daher wurde eine an das Brandobjekt 8A bzw. später 5A angelehnte eigene gemischte Brandkrippe konzipiert. Die 30 M% Plastik wurde vorzugsweise durch Ersatz von Holzstäben durch gleich dimensionierte Stäbe aus Kunststoff erreicht. Wo dies von den Mengenverhältnissen nicht möglich war, wurden 10 mm-Kunststoffstäbe an 4x4 cm-Plastikstäbe geschraubt. Dies diente zugleich der Stützung von Plastikmaterialien mit niedriger Erweichungstemperatur. Die Luftkanäle blieben durch dieses Vorgehen sowie leichter Verschiebung der leicht verbreiterten Stäbe weitgehend erhalten. Unterstützt wurde dies noch dadurch, dass diese Stäbe ganz oben positioniert wurden (Abbildung 9).



Abbildung 9 Mischbrandkrippe des IBK Heyrothsberge, Foto: IBK

Tabelle 6 Brandstoffzusammensetzung der Mischbrandkrippe des IBK

| Brandlast-Bestandteile Wohnungsbrände | Massen- anteile, Studie [%] | Material Brand- krippe, Ist | Material-Anteile Mischbrandkrippe, Ist (Anlehnung an Brandobj. 5A) | | Massen- anteile, Ist [%] |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------------------|
| | | | Anzahl Stäbe (Länge 500 mm) | Masse, Ist [kg] | |
| Holzmaterialien | 70,00 | Holz | 6 Doppellagen à je 10 Stäbe 40x40 | 28,80 | 70,94 |
| PVC (Polyvinylchlorid) | 1,80 | PVC | 2 Stäbe 10x40 mm | 0,52 | 1,28 |
| PUR (Polyurethane): einschließl. PUR-Kaltschaum sowie Polyetherschaum | 4,50 | PUR | 2 Stäbe 40x40 mm | 1,76 | 4,33 |
| PP (Polypropylen) | 1,80 | PP | 1 Stab 40x40 mm | 0,73 | 1,80 |
| PE (Polyethylen) | 1,40 | PE | 2 Stäbe 40x40 mm | 1,48 | 3,65 |
| PA (Polyamid) | 0,90 | PA 6 | 1 Stab 40x40 mm | 0,56 | 1,38 |
| PES (Polyester): Polyester einschließl. diverser Kunstharze, Polyacrylate, auch PET, PMMA und PC) | 5,80 | hier: PET | 2 Stäbe 40x40 mm | 2,20 | 5,42 |
| PMMA (Polymethyl- methacrylat, Acryl, Polyacryl), vgl. PES | 0,00 | hier: PMMA | 1 Stab 40x40 mm | 0,95 | 2,34 |
| ABS (Acrylnitril-Butadien- Styrol) | 4,50 | ABS | 1 Stab 40x40 mm | 0,84 | 2,07 |
| PC (Polycarbonate) | 8,00 | PC | 8 Stäbe 10x40 mm | 1,92 | 4,73 |
| PS (Polystyrol), vgl. EPS/EPS sowie HIPS, und Copolymere ABS, SBR, SAN u.a. | 1,40 | PS | 4 Stäbe 10x40 mm | 0,84 | 2,07 |
| Anteil Kunststoffe [kg] | 30,10 | | | 11,80 | |
| Anteil Kunststoffe [%] | 30,07 | | | 29,06 | |

Die Brandstoffzusammensetzung wurde gegenüber der BAM-Analyse leicht verändert. Die Abwandlung der Zusammensetzung erfolgte durch Verwendung ähnlicher Kunststoffe. Die Änderung des Aromaten-Gehaltes als Precursor-Strukturen für die PAK-Bildung blieb gering. Die verwendete Brandstoffzusammensetzung zeigt als Auszug Tabelle 6. Die vollständigen Angaben sind in Tabelle 10 im Anlagenteil 1 enthalten.

Nach Vorversuchen in Anlehnung an ein Brandobjekt 8A wurde auf das kleinere 5A umgestellt. Infolge der Substitution von Holz durch Plastik, gegenüber dem Normbrandobjekt, kam es zu deutlich erhöhten Abbrandgeschwindigkeiten. Auch die erhöhte Brandlast hat zum Herausschlagen der Flammen bis in den Essenraum sowie zum wiederholtem „Atmen“ des Brandes geführt. Standardmäßig kamen daher in der Folge nur noch gemischte Brandkrippen in der Dimension des Normbrandobjektes 5A mit etwa 40 kg Brandlast und 30 M% Plastik zum Einsatz. Soweit Schwankungen der Holzdichte ein Nachsteuern erforderlich machten, erfolgte dies durch Variation der Zahl der Holz- bzw. PE-Stäbe.

4.1.2 Verbrennungsbedingungen

Die konzipierte Mischbrandkrippe mit einer Brandlast von ca. 40 kg und 30 M% Kunststoffen war eine geeignete Basis zur Erreichung praxisnaher Verbrennungsbedingungen. Die Brände erreichten über längere Zeit Temperaturen von über 800 °C, mit in der Spitze 850 – 880 °C. Dies gelang in ähnlicher Weise bei den Brandversuchen unter Löschmittelaufgabe. Die Verbrennungsbedingungen entsprachen dabei über lange Zeiten denen eines stark unterventilierten Brandes, so dass die PAK-Ausbeuten und –quellstärken als praxisnah und hoch angenommen werden können. Auch das Temperaturniveau des im Targetraum auf die Einsatzbekleidungsproben einwirkenden Brandrauches wird als praxisnah eingeschätzt.

Temperatur der Verbrennung

Zur Erzielung hoher PAK-Ausbeuten wurden Verbrennungs- bzw. Brandrauchtemperaturen von um die 800 °C angestrebt. Dies wurde bei allen Versuchen für eine längere Zeit erreicht (Abbildung 10). In der ersten Versuchsreihe mit PSA-Proben (V1.1 und V1.2) wurden die höchsten Temperaturen sowie eine längere Plateauphase erzielt (vgl. Abbildung 43 und Abbildung 44 im Anlagenteil 1). Bei den Wiederholungversuchen V1.4 und V1.5 war die Brandentwicklung etwas verzögert (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46 im Anlagenteil 1), was auf stark veränderte Witterungsbedingungen sowie Störungen in der Rauchgasabsaugung zurückgeführt wird. In der Folge war auch das Temperaturniveau im Brand- und Targetraum etwas reduziert. Ähnliche Effekte hatten die Löschmittelaufgaben. Die Temperaturen im

Brandraum sowie des in den Targetraum abgeleiteten Brandrauches wurden mit Thermoelementen detailliert dokumentiert (vgl. Abbildung 51 sowie Tabelle 8 im Anlagenteil 1).

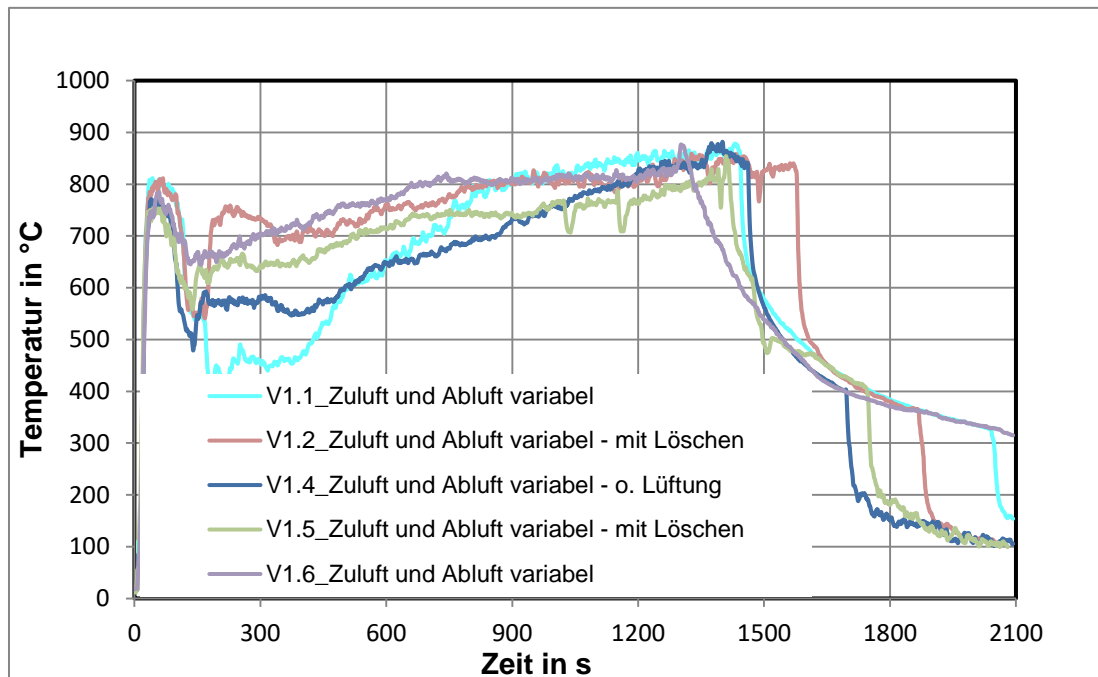


Abbildung 10 Temperaturverlauf Brandraum (T01 in 2,2 m Höhe über Brandobjekt), Brand ohne/ mit Löschwassereintrag („trocken / nass“), Hauptversuche V1.1 bis V1.6 (ohne V1.3)

Die Versuche erfolgten jeweils als Doppelversuch, mit und ohne Löschmittelaufgabe bzw. „trocken“ bzw. „nass“. Die Löschmittelaufgaben dienten der Simulation des Einflusses von Löschmaßnahmen auf die Schadstoffbildung. Eine Löschung wurde nicht angestrebt. Der erste Löschmittelstoß erfolgte nach Erreichen von ca. 800 °C und Durchwärmung der Struktur des Brand- und Targetraumes, d.h. nach etwa 10-12 Minuten. Die Löschimpulse waren dabei so bemessen, dass die Brandtemperatur nicht unter ca. 400 °C fiel. Der folgende Löschimpuls erfolgte erst nach Wiedererreichen von ca. 800 °C. Die Löschmittelaufgabedauer variierte entsprechend zwischen 10 und 30 Sekunden.



Abbildung 11 Mischbrandkrippe auf Brandwaage im Brandraum, im Hintergrund Löschwasser-Einspeisevorrichtung

Der Löschwasserdurchsatz der eingesetzten Axial-Vollkegeldüse der Firma Lechler betrug ca. 5 l/min bei auf 2 bar eigestelltem Druck, der Sprühwinkel 60° (Typ 490.608, vgl. Datenblatt im Anlagenteil 1, Tabelle 9). Dies führte, bei mittiger Positionierung der Austrittsöffnung vor dem Brandobjekt im Abstand von etwa 1,25 m, zu einer vollständigen Abdeckung einer Seite des Brandobjektes durch den Sprühkegel des Löschmittels. Etwa 1/5 des eingesetzten Wassers traf das Brandobjekt direkt. Infolge der Positionierung der Löschdüse nahe sowie mittig vor der Brandkrippe erreichte ein beträchtlicher Teil des Löschmittels die Tiefe des Brandobjektes. Ein weiterer Teil des Löschwassers gelangte, infolge Abprallens von den Wänden von der Seite und von oben, auf das Brandobjekt. Zudem kam es zu einer Kühlung der Raumstruktur infolge des Ansprühens. Die Löschmittelaufgabe zeigte daher eine hohe Wirksamkeit. Die Temperaturen im Brandraum, die Abbrandrate sowie der Brandrauchvolumenstrom waren jeweils über längere Zeit deutlich abgesenkt. Andererseits führte die Löschmittelaufgabe wiederholt zu Dampfstößen. Der Einfluss der Löschmaßnahmen auf die Quellstärke der Schadgase und die Aerosol-Ablagerung waren entsprechend komplex.

Ventilationsbedingungen

Ergänzend zur Messung physikalischer Größen erfolgten Analyse und Datenaufnahme in situ für die Konzentrationen von Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und weiteren ausgewählten Stoffen. Die Analyse der ermittelten Kohlenwasserstoffe diente zudem der Berechnung des Parameters Summe der Kohlenwasserstoffe (KW-Summe). Die O₂-Konzentration wurde parallel mit einer in das Gesamtsystem integrierten O₂-Sonde erfasst (Messprinzip Paramagnetismus). Insgesamt wurden 35 Stoffe quantitativ ausgewertet, davon 23 organische

Stoffe. Diese berücksichtigten die wichtigsten bei unterventilierten Bränden in höherer Quellstärke gebildeten Stoffe. Die ausgewählten organischen Stoffe deckten zudem einen Großteil der gebildeten KW-Fracht ab. Im Parameter KW-Summe werden sie zusammengefasst.

Genutzt wurde für die Analysen ein FTIR-Spektrometer DX4000 der Firma Gasmet (Abbildung 12). Zur Berechnung der Konzentrationen der Einzelstoffe und grafischen Darstellung der Ergebnisse diente die Auswertesoftware Calcmel, der eine Vielkomponenten-Analyse zugrunde liegt. Um flüchtige organische Stoffe, sogenannte VOC, in höherer Konzentration sicher quantitativ erfassen zu können, lag die Arbeitstemperatur des Gesamtsystems einschließlich Probenahme bei 180 °C. Die Probenahme erfolgte aus dem Brandraum austretenden Rauchgasstrom.



Abbildung 12 Messanordnung zur Rauchgasanalyse mit FTIR-Spektrometer DX4000

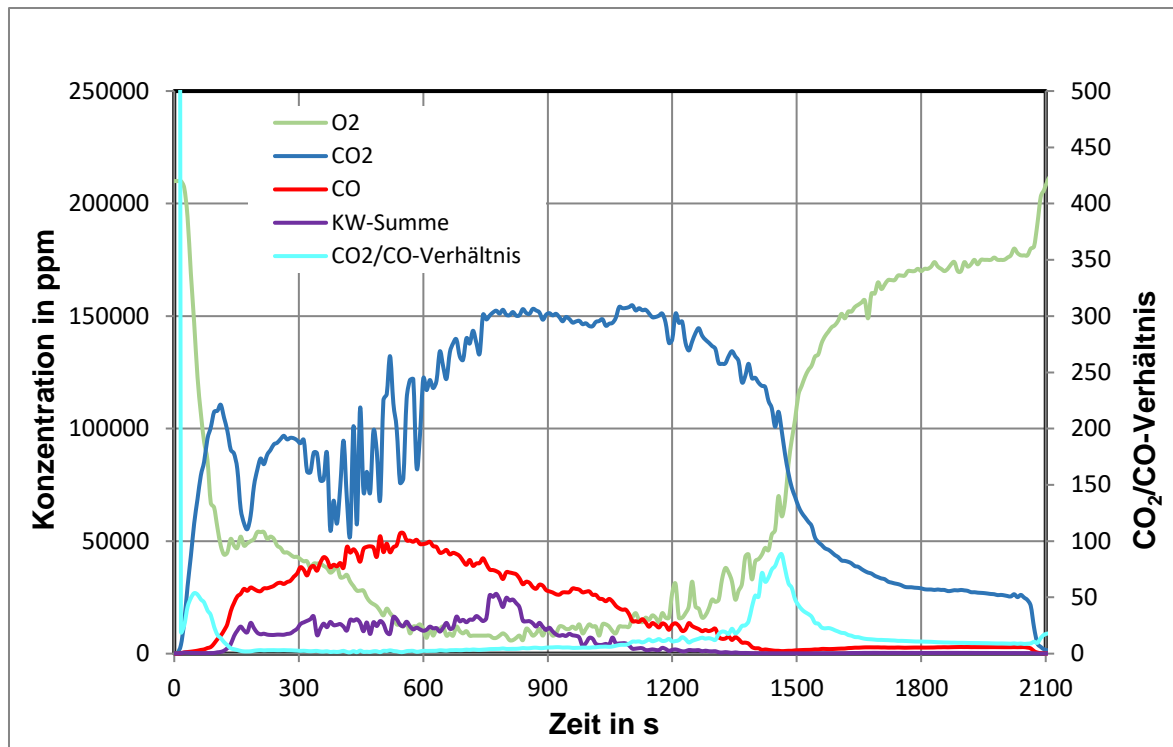


Abbildung 13 Brandchemie bei Versuch V1.1 („trocken“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O₂-Sonde

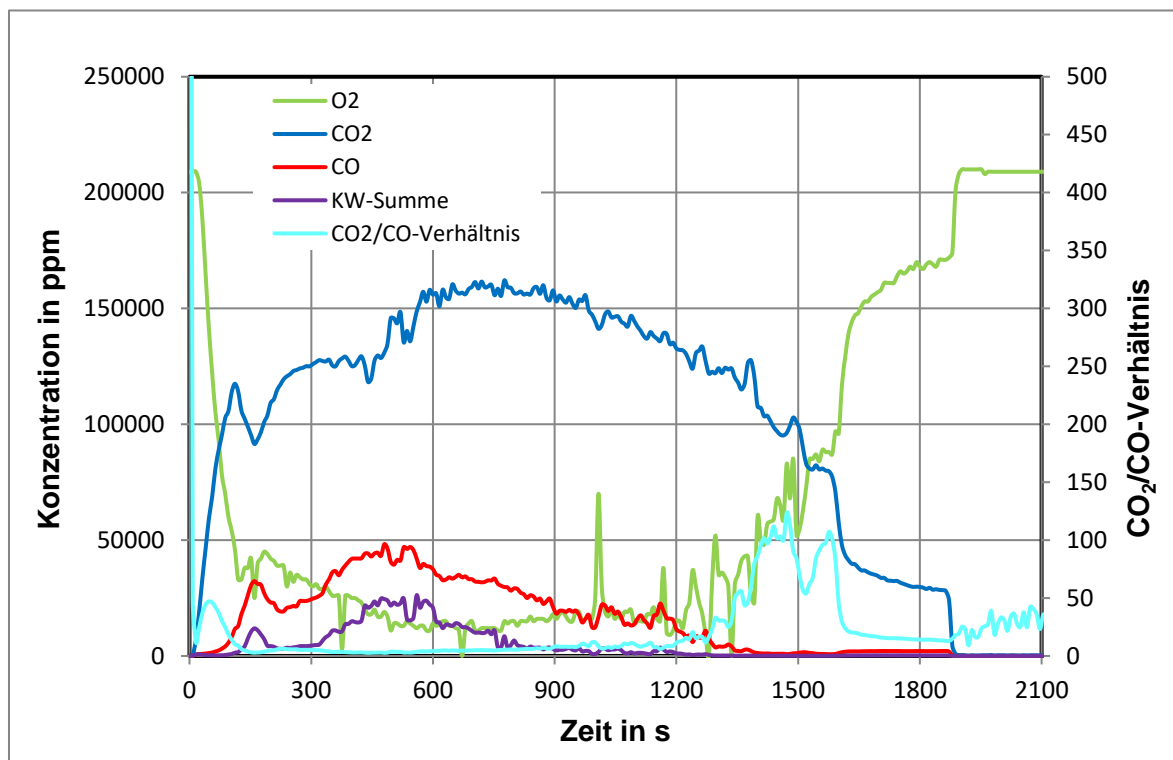


Abbildung 14 Brandchemie bei Versuch V1.2 („nass“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O₂-Sonde

Die während der Versuche ermittelten Konzentrationen für CO_2 und CO , das daraus zugängliche CO_2/CO -Verhältnis, die Konzentrationen von Sauerstoff der Parameter Summe der KW, erlaubten gemeinsam mit der Temperaturentwicklung im Brandraum einen direkten Einblick in den Brandverlauf und die Ventilationsbedingungen (vgl. Abbildung 13 bis Abbildung 16). Dies ermöglichte über variable Zuluftöffnungen ein Nachsteuern der Sauerstoffversorgung während des Brandes.

Zur Realisierung der unterventilierten bzw. ventilationsgesteuerten Brände im Technikum waren die Zu- und Abluftöffnungen limitiert. Entsprechend wurden die Öffnungen in den Außenwänden des Essenraumes, des Vorraumes der als Brandraum dienenden HRR-Box, bis auf variable Öffnungen, und die bodennahe Verbindung zum Targetraum geschlossen. Die Öffnungsfläche für Zu- und Abluft betrug zu Brandbeginn etwa 1 m^2 , wovon ca. $0,6 \text{ m}^2$ auf den Übergang zwischen Essen- und Targetraum und ca. $0,2 \text{ m}^2$ auf die variable Öffnungsfläche auf der gegenüberliegenden Seite am Boden des Essenraumes entfiel. Den Rest machten zu Brandbeginn belassene Undichtigkeiten der durch Blechabhängungen verschlossenen Öffnungen im Deckenbereich des Essenraumes aus. Diese zunächst belassenen Undichtigkeiten und die geöffnete variable Zuluftöffnung am Boden des Essenraumes waren für eine ungestörte Brandentwicklung erforderlich. Mit Erreichen der Zieltemperatur von etwa $800 \text{ }^\circ\text{C}$ nach etwa 12 Minuten wurden sie verschlossen, um eine Streckung der unterventilierten Vollbrandphase zu erzielen. Der Brandrauch wurde ab diesem Zeitpunkt vollständig durch den Targetraum geführt.

Aufgrund der Zündung des Brandobjektes mit Hilfe eines Flüssigkeitsbrandes (1,8 l Heptan in Brandwanne unter der Brandkrippe, Vorbranddauer etwa 2 min) und dessen hoher Abbrandrate lag bereits kurz nach Brandbeginn ein unterventilierter Brand vor. Nach weitgehendem Abbrand des Heptans verbesserte sich die Sauerstoffversorgung zunächst, um mit zunehmender Branddauer und Übergang in den Vollbrand der Brandkrippe erneut in den stark unterventilierten Bereich zu gelangen.

Mit Ausklingen des Brandes (starke Minderung der Abbrandrate) verbesserten sich die Ventilationsbedingungen erneut (Ansteigen der O_2 - und CO_2 -Konzentration, Sinken der CO -Konzentration und starker Anstieg des CO_2/CO -Verhältnisses). Zur Probenbergung wurden nach etwa 23-25 Minuten die Türen des Brandraumes geöffnet und die Abhängungen des Targetraum-Ausganges entfernt. Insgesamt befanden sich die Proben etwa 33 bis 35 Minuten im Brandrauchstrom.

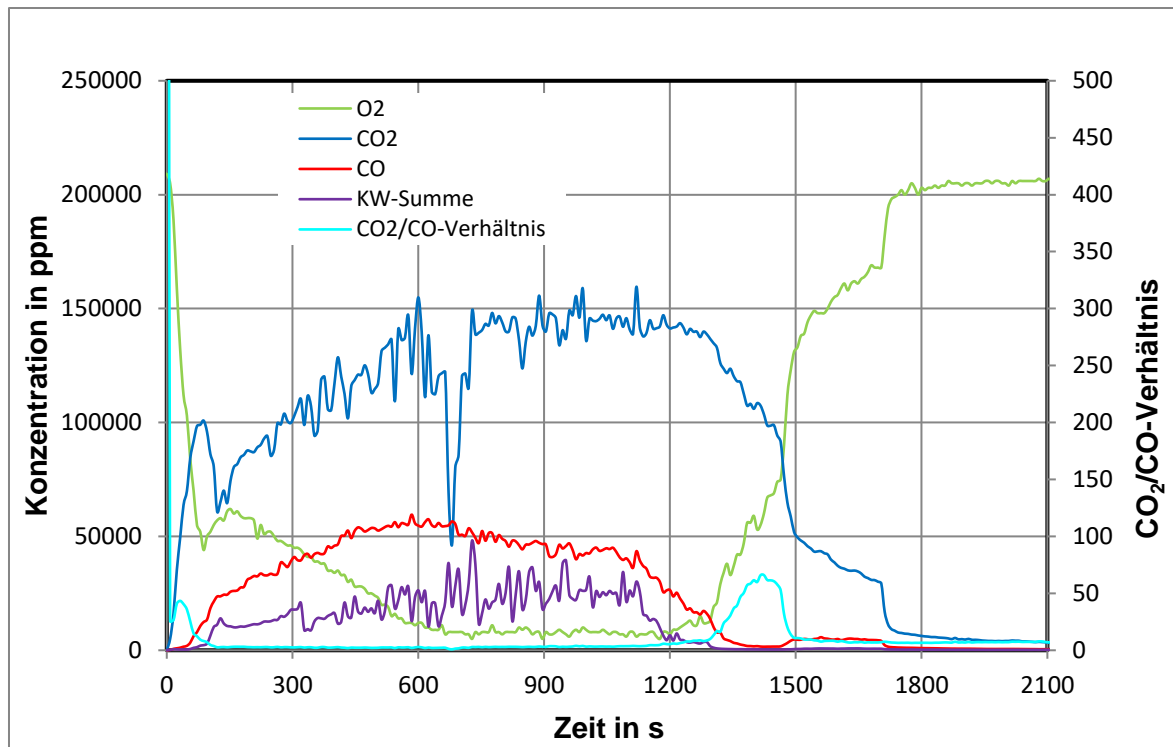


Abbildung 15 Brandchemie, Versuch V1.4 („trocken“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O₂-Sonde

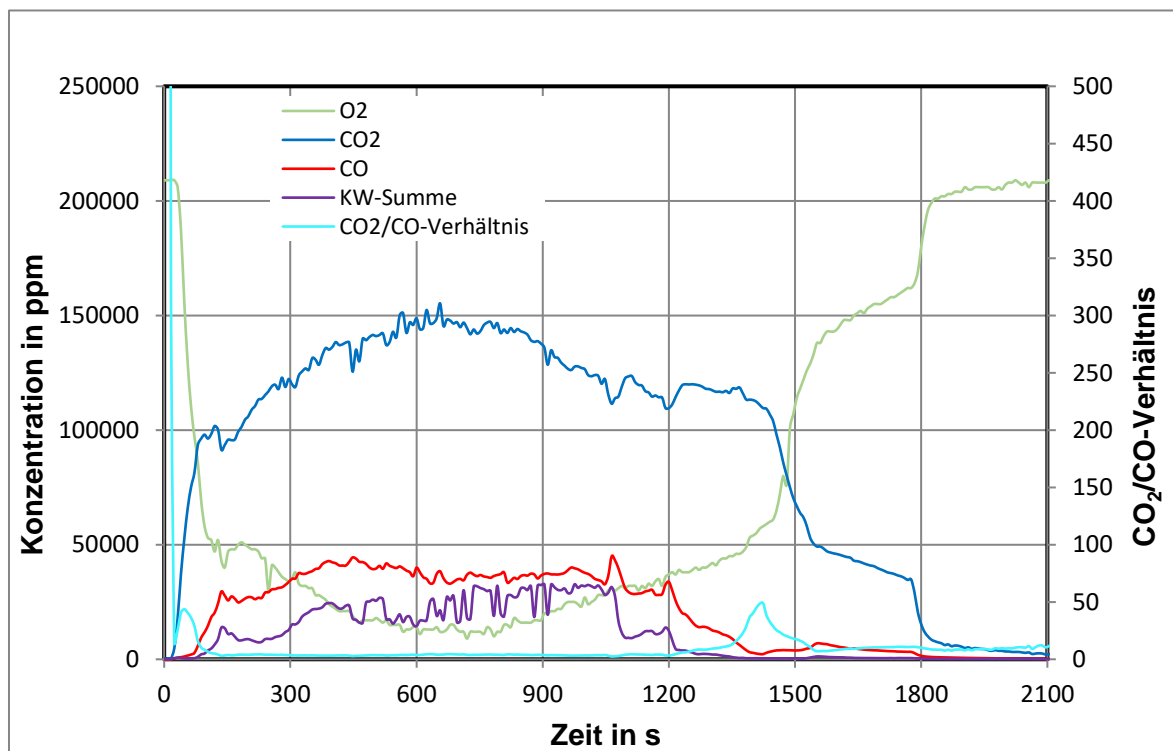


Abbildung 16 Brandchemie, Versuch V1.5 („nass“), Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000 sowie O₂-Sonde

4.1.3 Beladungsbedingungen

Abbildung 17 zeigt die Raumanordnung bei der Beaufschlagung der PSA-Materialproben mit Brandrauch. Details zur Position des Probenständers und der Proben sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen. Die Versuchsanordnung war so konzipiert, dass der gebildete Brandrauch weitgehend über den Essenraum und den Targetraum abzog. Die bodennahen Öffnungen fungierten als kombinierte Zuluft-/ Abluftöffnungen.

Der entstehende Brandrauch sammelte sich zunächst im Essenraum, wobei es zu einer Rückvermischung und Konzentrationsausgleich kam. Die Rauchgasschicht senkte sich rasch, so dass der Brandrauch über die zwischen beiden Containern befindliche niedrige Öffnung am Boden in den Targetraum abströmte (BxH: 1,20 m x 0,5 m = 0,6 m²). Hinter der bodennahen Öffnung stieg er zunächst wieder auf. Die am Ausgang des Targetraums befindliche weitere Restriktion mit Öffnung am Boden (BxH: 2,44 m x 0,6 m = 1,46 m²) verhinderte den freien Abzug. Daher füllte sich der Container bis zu einer Höhe von etwa 0,45 m mit Brandrauch, bevor er abziehen konnte.

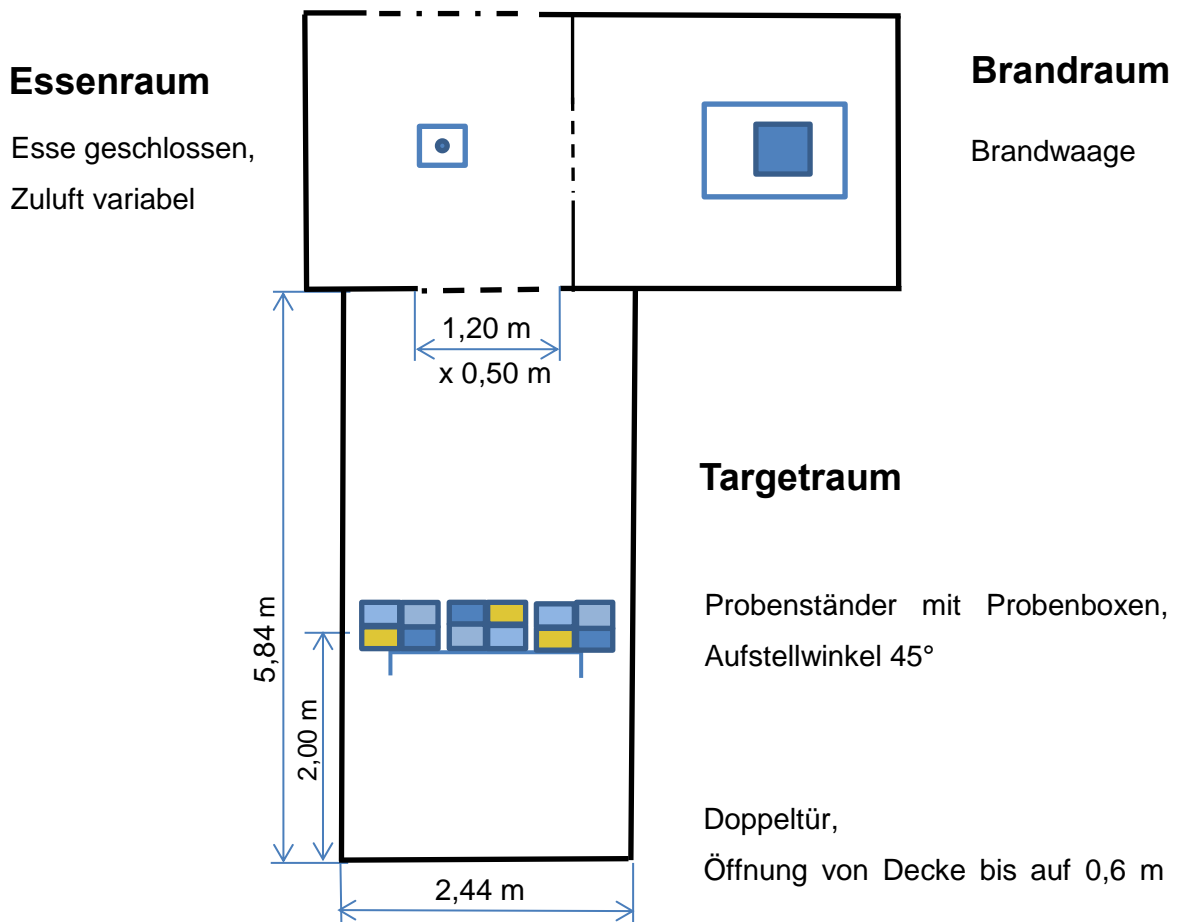


Abbildung 17 Raumanordnung auf Basis von 20-Fuß-Seecontainern, Aufriss

Um Störungen der Beladung durch Turbulenzen infolge erzwungenen Abstiegs der Rauchgase im Ausgangsbereich zu vermeiden, wurde der Probenständer in gut 2 Meter Abstand zum Ausgang positioniert. Das mit Hilfe dreier Thermoelement-Ketten in Strömungsrichtung dokumentierte Temperaturfeld zeigte hier eine stabile Schichtung, dem ein stabiles, turbulenzarmes Strömungsfeld entsprach. Diese Anforderungen erfüllten alle Positionen zwischen etwa 2 und 4 Meter vor dem Ausgang.

Die Feinabstimmung der Einwirktemperatur erfolgte über die Ständerhöhe. Die Proben wurden in einer mittleren Höhe von 1,35 m quer zur Strömung in einem 45°-Winkel positioniert.

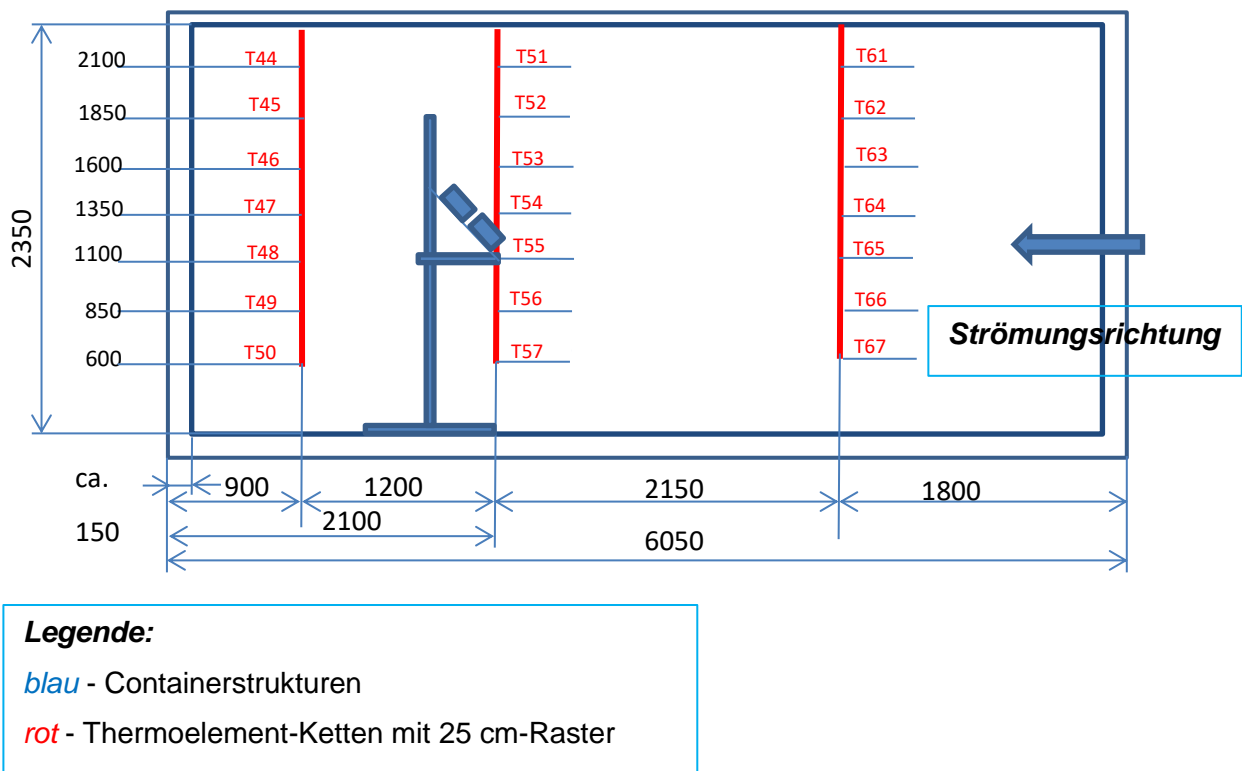


Abbildung 18 Targetraum mit Probenständer sowie Thermoelementbestückung, Seitenansicht, nicht maßstabsgerecht

Um den realen Beladungsbedingungen möglichst nahe zu kommen, wurden die PSA-Materialproben auf thermisch isolierten, einseitig offenen Probenboxen der Dimension (LxBxH: 20 cm x 20 cm x 12 cm) gespannt. Die Isolation bestand in der Kombination aus 2 cm starker Fichtenholzbeplankung mit beidseitiger Verspiegelung und Abdichtung mit Aluminiumfolie, einer 3 cm MDF-Platte als isolierender Auflagefläche und der 10 cm dicken Luftschicht im Kasten. Zudem wurde die Bespannung an den Kastenrändern umgelegt und mittels Winkelprofilen angepresst, so dass ein konvektiver Gasaustausch ausgeschlossen war.

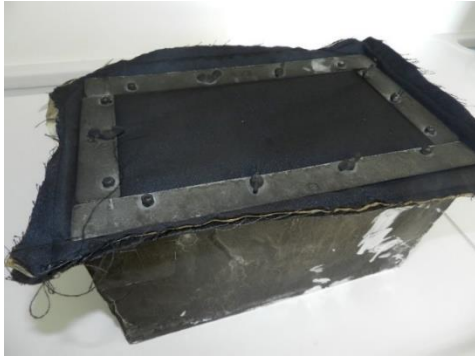


Abbildung 19 Probenbox aus Holz, Dimension LxBxH: (20 x 20 x 12) cm aus 2 cm dickem Fichtenholz

Der Probeständer ermöglichte 12 Material-Proben parallel zu beladen. Die Anordnung der Probenboxen erfolgte in Vierergruppen. Dies erlaubte die Auflageplatte zu dritteln und zwischen diesen einen etwa 8 cm breiten Abstand zu lassen (Abbildung 20). Hierdurch sowie in Verbindung mit der geringen Strömungsgeschwindigkeit im Targetraum sollten eine stärkere Beeinträchtigung des Strömungsfeldes und in der Folge unterschiedliche Beladungen der Proben verhindert werden. Die Ergebnisse bestätigen dies.

Wegen der großen Zahl zeitgleich zu beladender Materialproben mussten die Probenkästen in zwei übereinanderliegenden Reihen auf den Probenständer gestapelt werden. Daher unterschied sich geringfügig die Einwirktemperatur der oberen und unteren Probenreihe (vgl. Folgeabschnitt Beladungszeit). Der Einfluss ist jedoch, wie der infolge von Inhomogenität des Strömungsfeldes, begrenzt. In den Versuchsergebnissen wird ein solcher Zusammenhang zumindest nicht sichtbar.

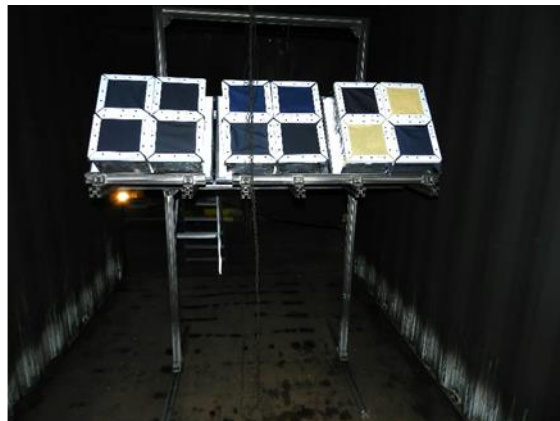
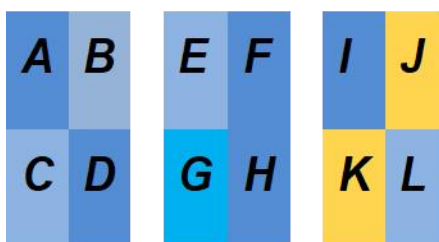


Abbildung 20 rechts Muster der Probenverteilung / links Probenständer mit Probenboxen im Targetraum, Anstellwinkel 45 °, zusätzliche 3 cm-Spanplatte zur Isolierung

Beladungszeit

Die Dauer der Brandraucheinwirkung (Einwirk- bzw. Beladungszeit) war, wie bereits im vorherigen Kapitel ausgeführt wurde, deutlich länger als bei realen Brandeinsätzen. Dies lag an der Positionierung der Proben im Rauchgasstrom, wodurch die Beladungszeit von der Branddauer und der Zeit zur Bergung der Proben bestimmt wurde. Das Öffnen der Brandraumtüren nach etwa 25 Minuten beendete zwar die Brandraucheinströmung in den Targetraum weitgehend, doch wirkte der vorhandene Brandrauch noch bis zur Öffnung der Containerabhängungen und Bergung der Proben auf die PSA-Materialien ein.

Insgesamt betrug die Beladungszeit insofern über 30 Minuten. In der Einsatzpraxis im Innenangriff unter Atemschutz im Brandraum sind demgegenüber kaum mehr als 10 Minuten realistisch. Die Länge der Beladungszeit war daher gegenüber der Einsatzpraxis etwa dreifach erhöht.

Schadstoffgehalt

Für die Höhe der Kontamination bzw. Beladung, mindestens ebenso wichtig wie die Beladungszeit, ist die Konzentration der Schadstoffe im Brandrauch. Diese wiederum ist maßgeblich von den Ventilationsbedingungen abhängig.

Im Kapitel 4.1.2 wurde der Zustand der Verbrennung bei den Beladungsversuchen als stark unterventiliert charakterisiert. Das CO_2/CO -Verhältnis lag zeitweise sogar unter 10. Damit verbunden waren eine hohe Ausbeute an Produkten der unvollständigen Verbrennung. Zusammen mit der hohen Abbrandgeschwindigkeit bewirkte dies hohe Quellstärken entsprechender Stoffe.

Abbildung 21 zeigt beispielhaft für den Brandversuch V1.1 und ausgewählte Schadstoffe, was sich hinter dem Parameter KW-Summe verbirgt. Ergänzend wurde das CO_2/CO -Verhältnis angegeben. Deutlich wird die Parallelität der Entwicklung zur KW-Summe bzw. der Konzentration organischer Produkte der unvollständigen Verbrennung. Diese sind zu einem erheblichen Teil Pyrolyseprodukte. Die hohen Konzentrationen an Kohlenwasserstoffen unterstreichen die hohe Intensität der Schadgasexposition in den Beladungsversuchen. Dies gilt in gleicher Weise für anorganische Produkte der unvollständigen Verbrennung [Schuppe, 1993].

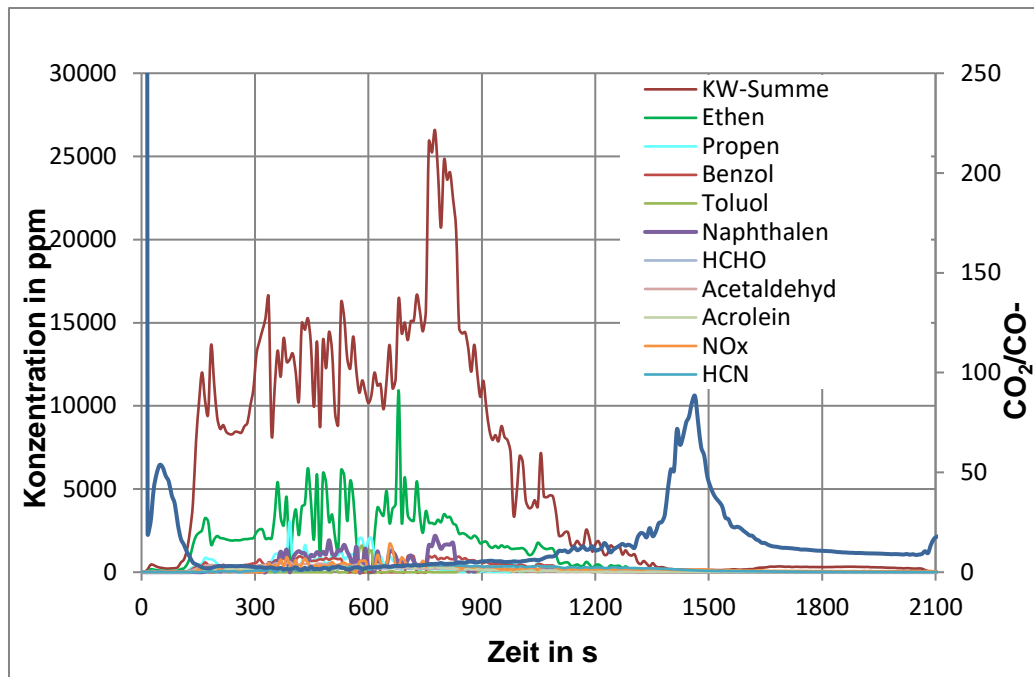


Abbildung 21 Konzentration ausgewählter Schadstoffe bei V1.1, Messung mit FTIR-Spektrometer DX4000

Temperaturniveau bei der Beladung

Ein wichtiger Parameter für die Intensität der Beladung ist zudem die Temperatur des einwirkenden Brandrauches. Sie bestimmt die Konzentration hochsiedender Schadstoffe in der Dampfform. Darüber hinaus beeinflusst sie über die Aufheizung der Bekleidungslagen den Ort, wo dampfförmige Schadstoffe kondensieren, d.h. wie weit sie in die Bekleidung vordringen. Zudem beeinflussen sie die Permeationsraten der Stoffe durch die Membran und die Kontamination innerer Bekleidungslagen und der Haut.

Abbildung 22 stellt die Temperaturverläufe aus Brand- und Targetraum gegenüber. Die drei Messpunkte T47, T54 und T64 charakterisieren dabei den Temperaturverlauf im Targetraum in 1,35 m Höhe in Abstromrichtung. Deutlich wird die ausgleichende Wirkung des großen Raumvolumens, die zu einer stabilen Schichtung führt.

Abbildung 43 bis Abbildung 46 im Anlagenteil 1 geben ergänzend den Temperaturverlauf im Targetraum in verschiedenen Höhen für die Hauptversuche V1.1/V1.2 und V1.4/V1.5 wieder. Hieraus ist der mittlere Temperaturunterschied des einwirkenden Brandrauches zwischen beiden Probenlagen und der Temperaturunterschied über die einzelnen Probenkästen ableitbar. Unter Berücksichtigung der Maße der Probenboxen von 20 cm x 20 cm und des Aufstellwinkels von 45° betrug der maximale Temperaturunterschied ca. 8 K und im Mittel nur etwa 4 K.

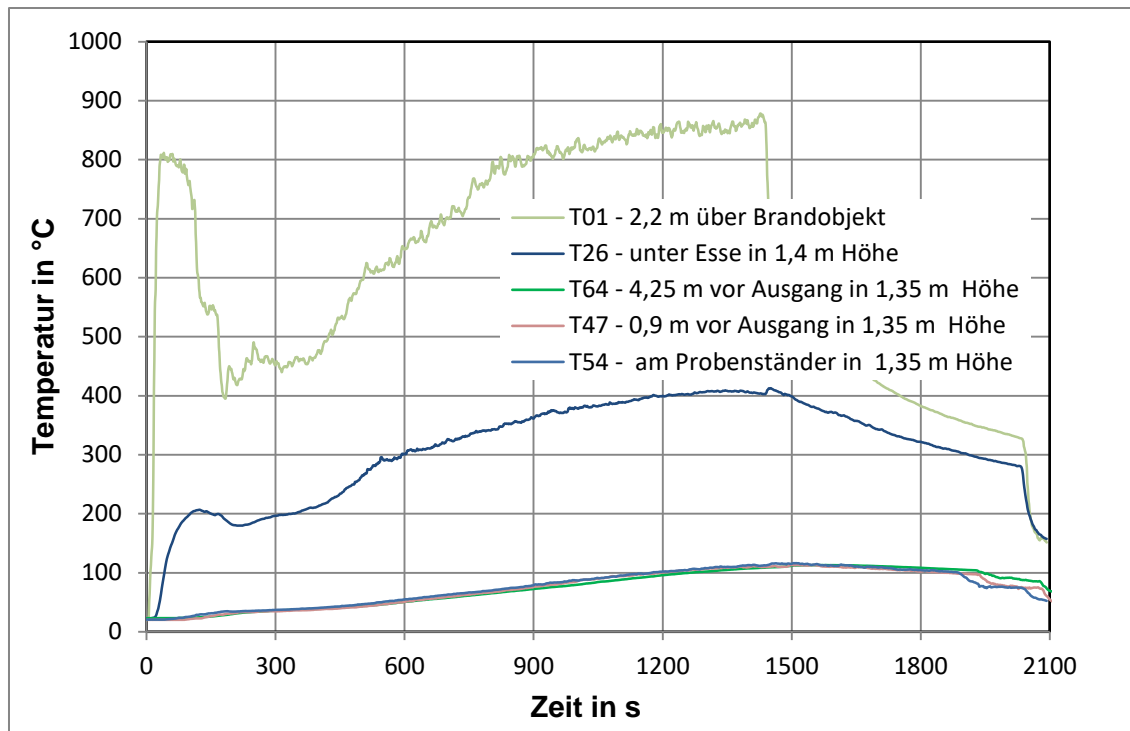


Abbildung 22 Temperaturverlauf in Rauchabzugsrichtung, Beispiel V1.1, Öffnen der Brandraumtüren nach 1440 Sekunden

Während die Temperaturen am Probenständer in 1,35 m Höhe in den Versuchen V1.1 und V1.2 im Maximum etwa 114 °C bzw. 109 °C erreichten, war die Brandentwicklung bei den finalen Versuchen V1.4 und V1.5 leicht verzögert. In der Folge waren die Temperaturen im Targetraum bzw. an den Proben auf 96 °C bzw. 74 °C deutlich erniedrigt. Dennoch erfüllen sie die Anforderungen einer praxisnahen Probenkontamination, wie ein Vergleich mit Temperaturmessungen bei ausgewählten Brand- und Löschversuchen sowie in BÜA zeigt (vgl. Tabelle 13 im Anlagenteil 1).

Bei der Diskussion ist zu berücksichtigen, dass bei der Probenbeladung im Technikum der heiße Brandrauch deutlich länger einwirkte. Zudem war die Einwirkung gleichförmiger, was die Durchwärmung tieferer Bekleidungslagen und der Membran förderte. Das Temperaturniveau in der Praxis ist demgegenüber stark schwankend, mit handlungsabhängigen, längeren Temperaturspitzen, wie Tabelle 13 ebenfalls zeigt. Die dort dokumentierten Temperaturen beziehen sich im Übrigen auf hochliegende, stärker exponierte Stellen der PSA, wie Lungenautomat, PA-Träger und Helm bzw. Raumluftmessungen in 1,50 m Höhe. Die Wärmeexposition der Einsatzbekleidung ist entsprechend geringer. Bereits für den Brustraum ist von etwa 20 K niedrigeren Durchschnittstemperaturen auszugehen. Zu berücksichtigen ist zudem, dass von frei liegenden Thermoelementen aufgezeichnete Messwerte bei Bränden mit Flammenerscheinungen und der dadurch resultierenden Wärmestrahlung tendenziell höher

liegen. Demgegenüber erfolgten die Temperaturmessungen im Targetraum ohne Flammenstrahlungsexposition.

Die folgende Abbildung 23 gibt den Temperaturverlauf innerhalb der PSA sowie in der Probenbox (Körpersimulator) in Abhängigkeit von der Temperatur des einwirkenden Brandrauches wieder. Die Untersuchung erfolgte beispielhaft für die Materialprobe C mit innen liegender thermischer Isolation (vgl. Materialaufbau in Tabelle 12 sowie Abbildung 40 Foto C im Anlagenteil 1). Deutlich wird die gute Isolationswirkung der Einsatzbekleidung zur Brandbekämpfung. Die Temperaturen in der PSA-Schichten laufen stärker nach. Außen- und Innentemperaturen unterscheiden sich in der Spitze um bis zu 50 K.

Das Temperaturniveau der Membran wurde nicht gemessen, ist jedoch aus den Temperaturen oberhalb und unterhalb der Membran abschätzbar. Die Temperatur der Membran lag nach der Abschätzung in der Spitze immer noch etwa 25 K unter der Außentemperatur. Eine gute Isolation der Membran durch Positionierung einer Isolationsschicht zwischen Oberstoff und Membran wäre unter dem Aspekt der Schadstoffpermeation optimal, weil Hochsieder, wie PAK, durch die Abkühlung in dieser Schicht an der Membran kondensieren würden. Diese Art der Anordnung ist z.B. aus Gründen der Durchfeuchtung von außen nicht praktikabel. Auch thermophysiologische Aspekte sprechen gegen diesen Aufbau.

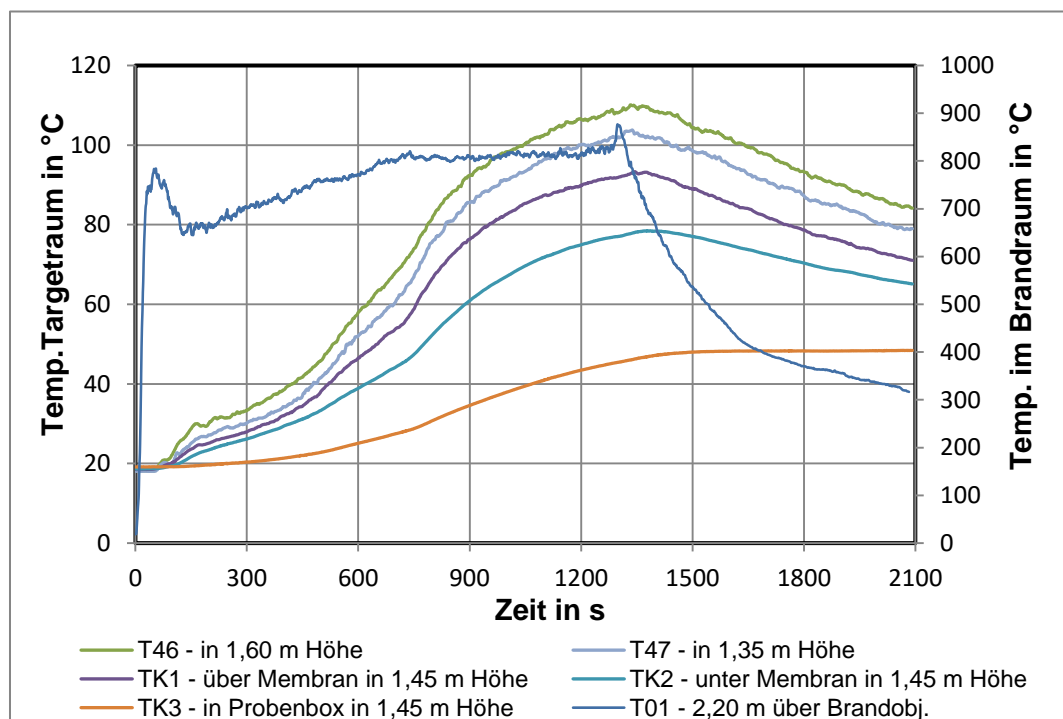


Abbildung 23 Temperaturverlauf in der PSA-Materialprobe C sowie über Brandobjekt bei trockener Beladung, Beispiel V1.6, Öffnen der Türen nach 1350 Sekunden

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das in den Versuchen im Technikum realisierte Beladungs- bzw. Kontaminationsniveau um ein Vielfaches über dem lag, was für die Innenbrandbekämpfung in Wohnräumen im Maximum möglich ist.

Neben der längeren Expositionszeit lag dies an den hohen Schadstoffgehalten im erzeugten Brandrauch und den anhaltend hohen Einwirktemperaturen. Eine weitere Ursache für die hohe Exposition der Proben ist die starre Aufstellung im Rauchgasstrom. Demgegenüber gehen die Einsatzkräfte in der Praxis nach Möglichkeit unter der Rauchgasschicht vor und weichen dem Dampfstoß beim Löschen aus. Dies erlaubt ein rascheres und gefährdungsärmeres Arbeiten. Insofern sind große Bereiche der PSA in der Einsatzpraxis einer eher moderaten Belastung mit Brandrauch ausgesetzt.

Aus der Auswertung der Kontaminationsniveaus der Proben aus dem Technikum zu Proben aus der Praxis ergibt sich ein etwa 20- bis 30-fach höherer Kontaminationsgrad bei den Beladungen im Technikum. Ausgehend von einer 2- bis 3-fachen Expositionszeit wäre die Intensität der Brandrauch-Einwirkung damit etwa um den Faktor Zehn gegenüber Wohnungsbränden erhöht.

Die Beladungsbedingungen im Technikum berücksichtigten im Übrigen nicht Kontaminationen durch direkten Kontakt mit Brandrückständen bzw. kontaminierten Gegenständen, wie sie etwa beim Kriechen, Knien etc. entstehen. Diese sind gegenüber der dampfförmigen Einwirkung grundsätzlich geringer zu gewichten, da sie v.a. eine Kontamination äußerer Schichten bewirken. Andererseits kann es beim Knien oder Sitzen in Pfützen zu einem Durchdringen der Membran und direkten Kontamination innerer Schichten und der Haut kommen. Beide Kontaminationswege führen jedoch v.a. zu lokalen Kontaminationsspitzen. Insofern ist der im Technikum realisierte Kontaminationsweg als einsatznah anzusehen.

4.2 Ergebnisse und Auswertung

4.2.1 Barrierewirkung

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Versuchen zur PSA-Kontamination im Technikum vorgestellt. Dies erfolgt getrennt für die Kontamination ohne und mit Löschmittelaufgabe. Die Analysenergebnisse sind in den Tabellen 14 bis 19 im Anlagenteil 1 abgelegt. Ermittelt wurde die Kontamination über alle Schichten (dargestellt als „gesamt“) sowie für drei aus mechanistischer Sicht definierten Hauptschichten:

- „außen“ – das Obermaterial
- „mittig (Membran)“ – die Membran einschließlich anlaminierte Schichten sowie
- „innen“ – Thermoisolation und Futter bzw. Liner.

Ein Blick auf die Messergebnisse zeigt, dass die erzielten Gesamtbeladungen bei trockener und nasser Beladung größenordnungsmäßig vergleichbar sind, ebenso das Muster der PAK-Verteilung. Dennoch gibt es Unterschiede. Diese sind auf die leicht verzögerte Brandentwicklung sowie Löschmitteleinträge mit zeitweiligem Rückgang der Abbrandrate und Brandrauchproduktion sowie Brand(rauch)temperatur zurückzuführen.

Der Schwerpunkt der gebildeten PAK lag auf den relativ kleinen, überwiegend nichtkarzinogenen PAK. Dies ist in ähnlicher Weise in der Praxis zu erwarten, da die PAK-Verteilung durch die Verbrennungsbedingungen bestimmt wird und diese weitgehend denen der Innenbrandbekämpfung entsprechen. Dennoch gibt es eine gewisse Bandbreite bzw. Ereignisspezifität bezüglich der PAK-Profile. Schließlich ist kein Brand wie der andere. Dies zeigen bereits Unterschiede im PAK-Profil beim Wiederholungsversuch. In der Einsatzpraxis sind deutlich größere Unterschiede zu erwarten, da Brandstoffzusammensetzung, Ventilationsbedingungen sowie Brandzustand stark variieren.

Trockene Beladung

Die erzielte Kontamination bei trockener Beladung in Versuch V1.4 zeigen die folgenden Liniendiagramme (Abbildung 24 bis Abbildung 27) sowie auszugsweise für die karzinogenen PAK die Balkendiagramme im Anlagenteil 1 (Abbildung 51 bis Abbildung 53).

Abbildung 24 dokumentiert die Gesamtkontamination der PSA-Proben im Versuch. Sie gibt Einblick in das Muster der PAK-Verteilung im einwirkenden Brandrauch. In den Grafiken der Funktionslagen ist dies durch die Eigenschaften der verschiedenen PAK und Rückhaltefähigkeit der Materiallagen überformt. Klar zu erkennen ist die Dominanz der kleinen, nicht karzinogenen PAK.

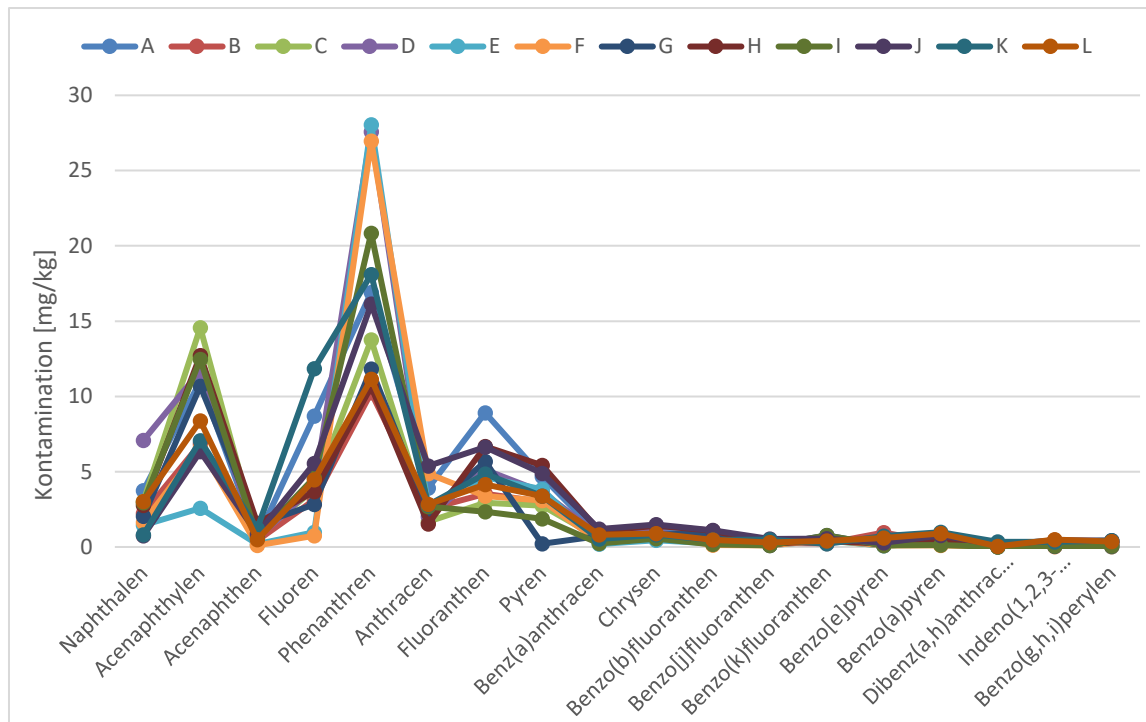


Abbildung 24 PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L, *gesamt*

In der folgenden Abbildung 25, der Auswertung für das Obermaterial bzw. sämtlicher loser Materiallagen oberhalb der Membranlage, fällt zunächst das Verhalten von Material I auf. Es scheint eine besonders hohe Sammelaktivität aufzuweisen. Dieses beruht allerdings auf der baulichen Besonderheit dieses Bekleidungsbaues mit lediglich zwei Lagen. Dabei ist die Membran direkt an das Obermaterial laminiert. Die Lage „außen“ ist also de facto die Kombination zweier Funktionslagen, was die hohen Werte für „außen“ erklärt.

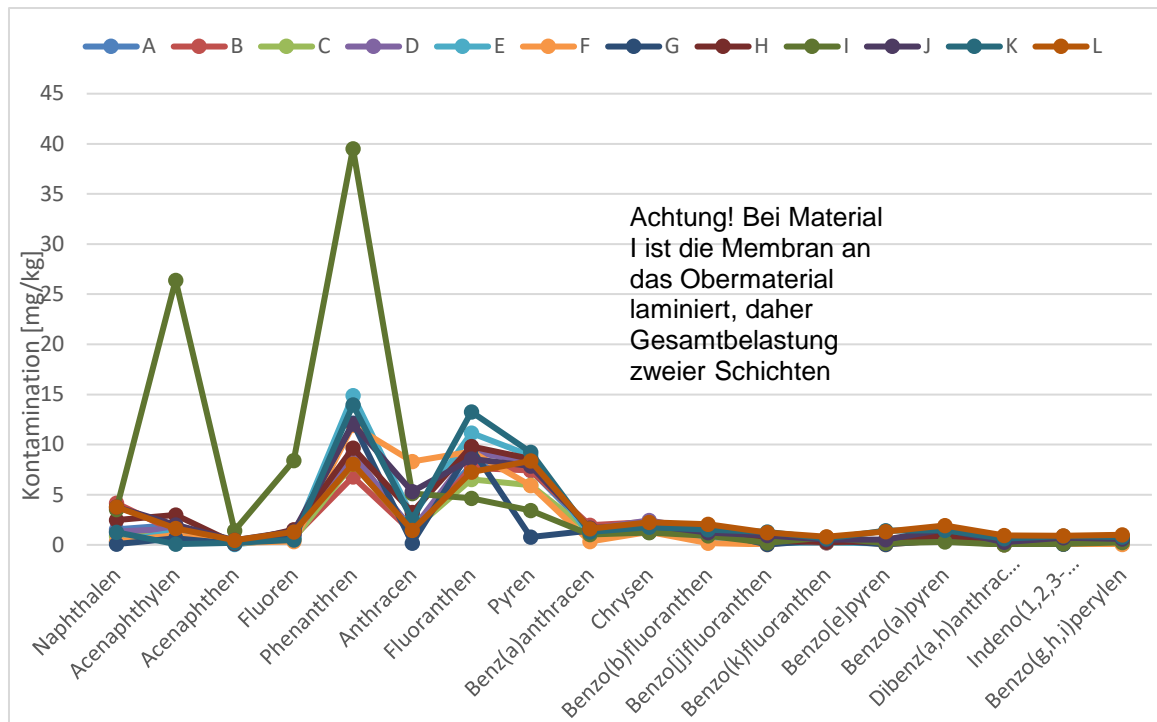


Abbildung 25 PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L, außen

Beim Vergleich der Kontaminationshöhen „gesamt“, mit denen der Einzellagen, wird die hohe Sammelaktivität der Membranen für PAK deutlich. Dies zeigt, dass die PAK die Obermaterialien relativ problemlos durchdringen. Unterstellt man eine wirksame Filterwirkung der Obermaterialien für Rußpartikel, so ist die von den Membranen aufgenommene PAK-Fracht Ergebnis einer Kondensation von PAK an der Membran. Dies zeigt, dass unter Einsatzbedingungen das Gros der PAK dammförmig bzw. als Flüssigkeits-Aerosol vorliegt und auf die PSA einwirkt.

Die Balkendiagramme (Abbildung 51 bis Abbildung 53 im Anlagenteil 1) sind für entsprechende Fragestellungen allerdings besser geeignet. Hierbei hilft die Beschränkung der Darstellung auf die karzinogenen PAK. Deutlich wird, dass es - unabhängig von der Dominanz der Membranlage als PAK-Speicher - für die karzinogenen PAK stärkere Unterschiede in der Rückhaltung durch das Obermaterial gibt. Ein möglicher Grund ist die unterschiedliche Dichtigkeit bzw. Maschenweite des Gewebes. Von Einfluss sind sicher auch weitere Materiallagen oberhalb der Membranlage.

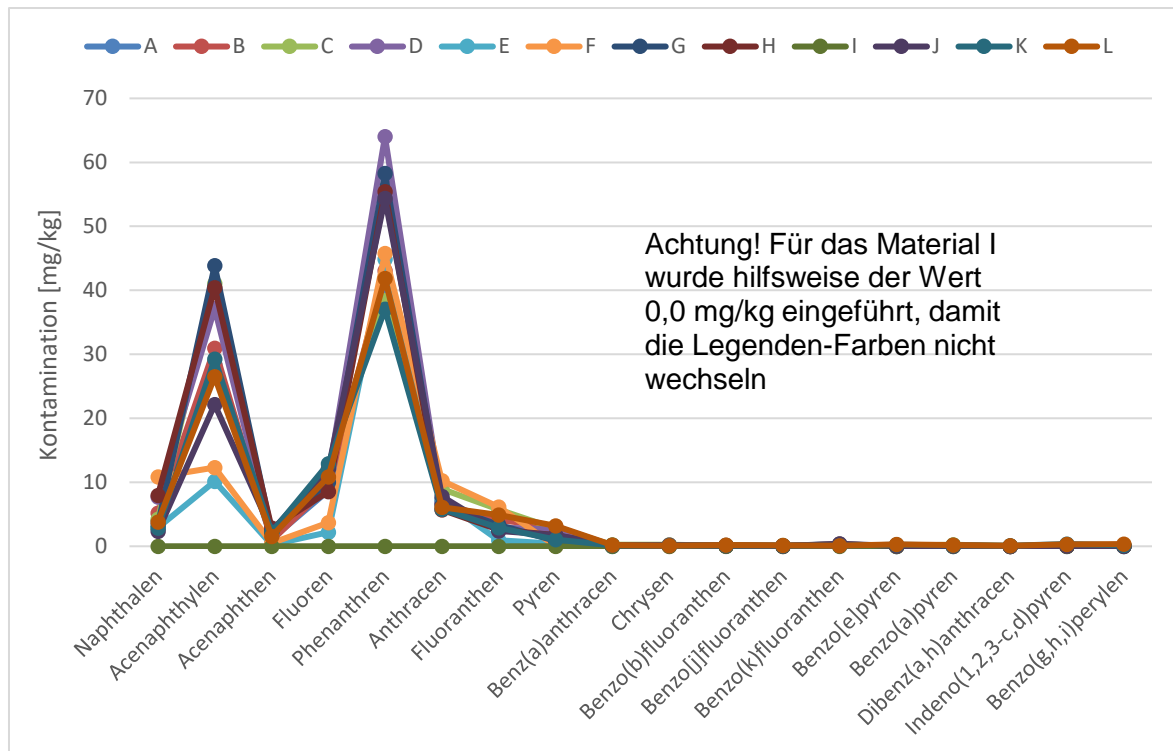


Abbildung 26 PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L (ohne I), mittig

Deutlich wird zudem, dass selbst unter den Bedingungen der um ein Vielfaches stärkeren Beladung im Technikum nur geringe Mengen karzinogener PAK (ab Benz(a)anthracen) bis zum Futtermaterial vordringen (vgl. Abbildung 26 und Abbildung 51 bis Abbildung 53 im Anlagenteil 1). Dies zeigt, dass in der Literatur veröffentlichte, teilweise hohe Kontaminationsgrade innerer Schichten und der Haut ihre Ursache nicht in der Durchdringung bzw. Permeation durch den Aufbau der Einsatzbekleidung haben können.

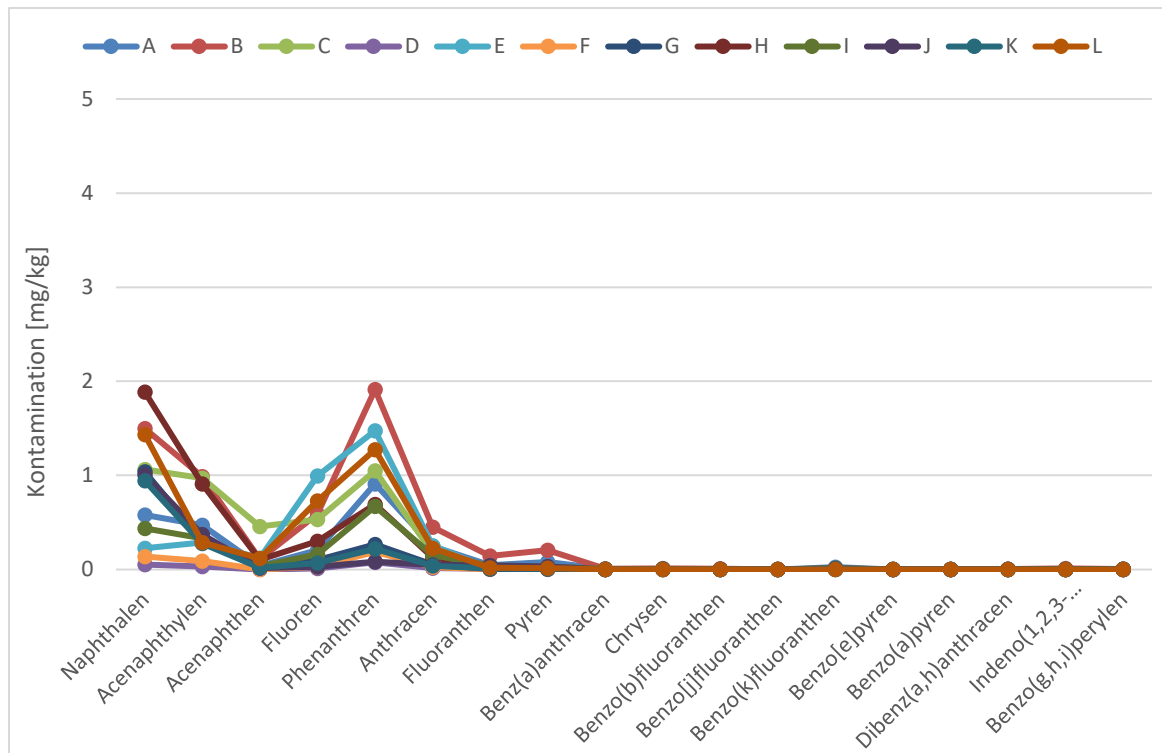


Abbildung 27 PAK-Kontamination – Technikum, trockene Beladung, Material A-L, innen

Nasse Beladung

Die folgenden graphischen Darstellungen geben die erzielten PAK-Kontaminationsgrade bei nasser Beladung wieder (Abbildung 28 bis Abbildung 31). Die Auswertung erfolgte wie zuvor lagenbezogen. Die Messergebnisse enthält Anlagenteil 1 (Tabelle 20 bis Tabelle 25). Auf eine ergänzende Darstellung in Form von Balkendiagrammen für die karzinogenen PAK wurde verzichtet, da die Liniendiagramme die Vergleichbarkeit der Ergebnisse hinreichend dokumentieren.

Das erzielte Gesamtbelastungsniveau und die Kontaminationsmuster sind vergleichbar zur trockenen Beladung. Das überrascht auf den ersten Blick, waren die Brandtemperatur und die Schadgasquellstärke doch zeitweilig abgesenkt. Allerdings führte die Löschmittelaufgabe nicht zu einer anhaltenden Reduzierung der Rauchgastemperatur. Zudem blieb, trotz zeitweilig verminderter Abbrandrate, die im Targetraum vorliegende Schadstoffkonzentration vergleichbar hoch, da der Brandrauch, aufgrund des besonderen Zuluft-/ Abluft-Regimes, im Container verblieb und auch in diesen Phasen auf die Bekleidungsproben einwirkte. Zudem war die Branddauer in der Folge leicht verlängert.

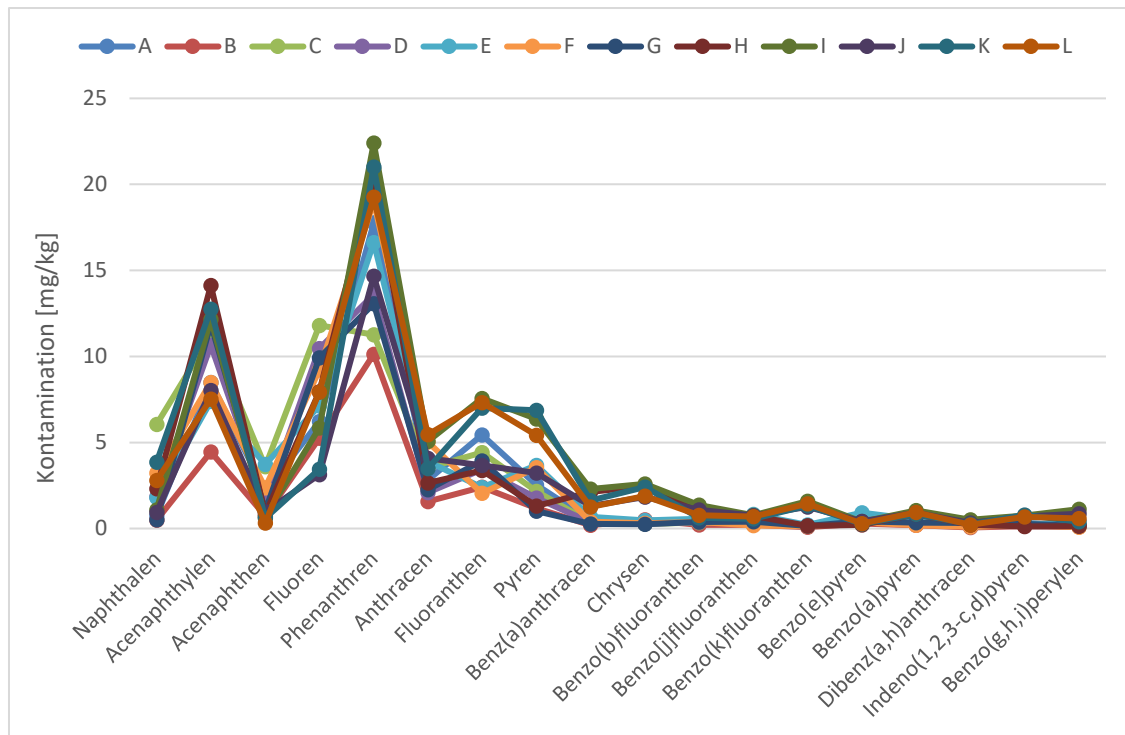


Abbildung 28 PAK-Kontamination – Technikum, nasse Beladung, Material A-L, *gesamt*

Allerdings gibt es durchaus Unterschiede zur trockenen Beladung, etwa eine noch geringere Kontamination innerer Lagen. Für die hochsiedenden karzinogenen PAK geht diese sogar gegen Null. Dies ist ein klarer Hinweis auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Rauchgaskühlung. Die verminderte Brandrauchtemperatur sorgt dabei einerseits für eine geringere Konzentration hochsiedender PAK in der Dampfphase. Andererseits führt sie zu einer geringeren Temperatur in der PSA und insbesondere der Membran und in der Folge zu einer geringeren Permeation.

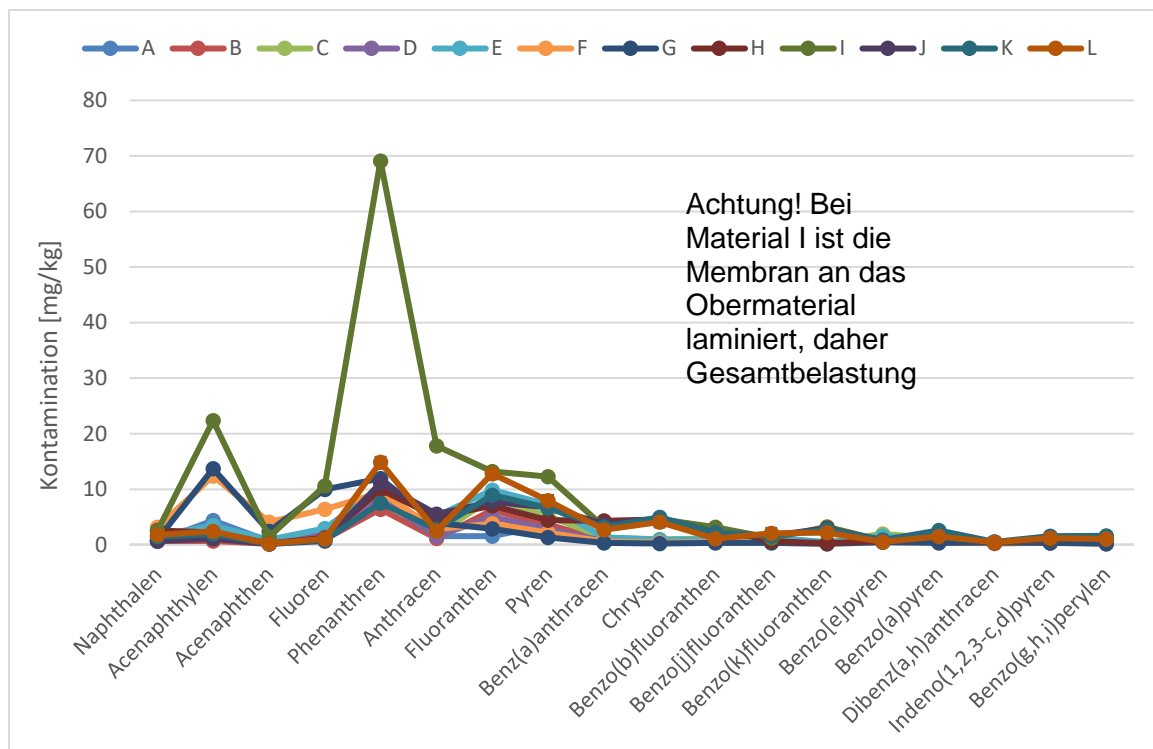


Abbildung 29 PAK-Kontamination – Technikum, nasse Beladung, Material A-L, *außen*

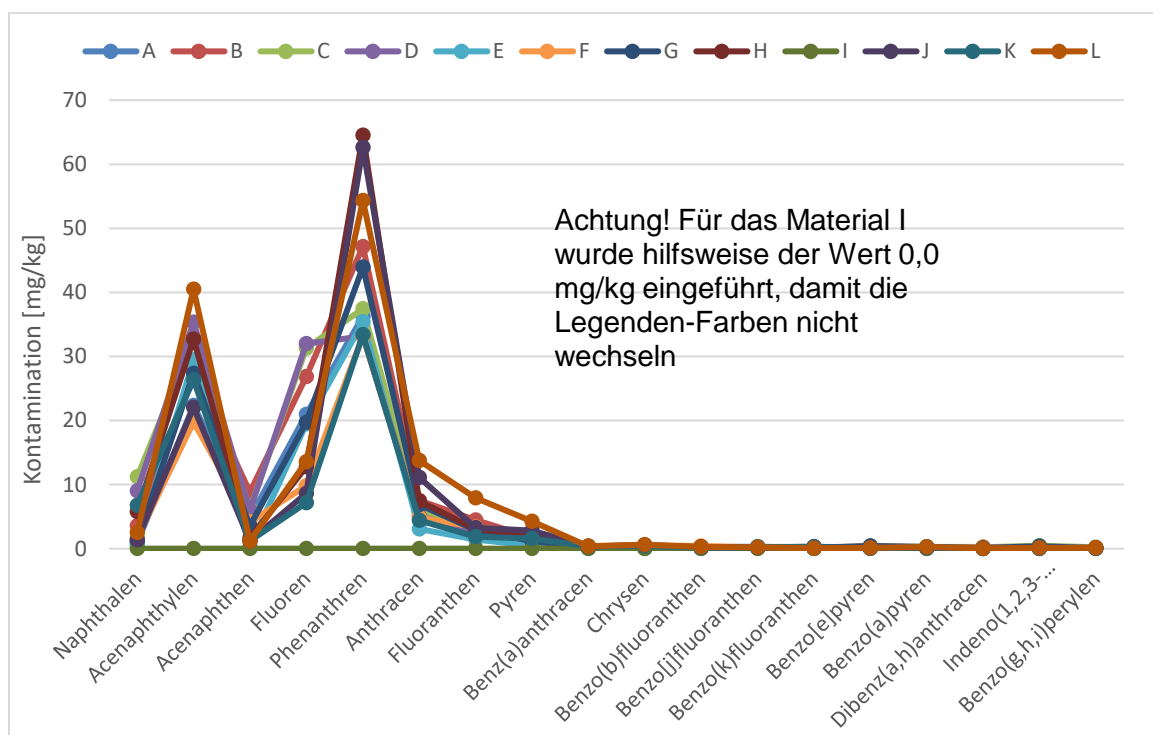


Abbildung 30 PAK-Kontamination-Technikum, nasse Beladung, Material A-L (ohne I), *mittig*

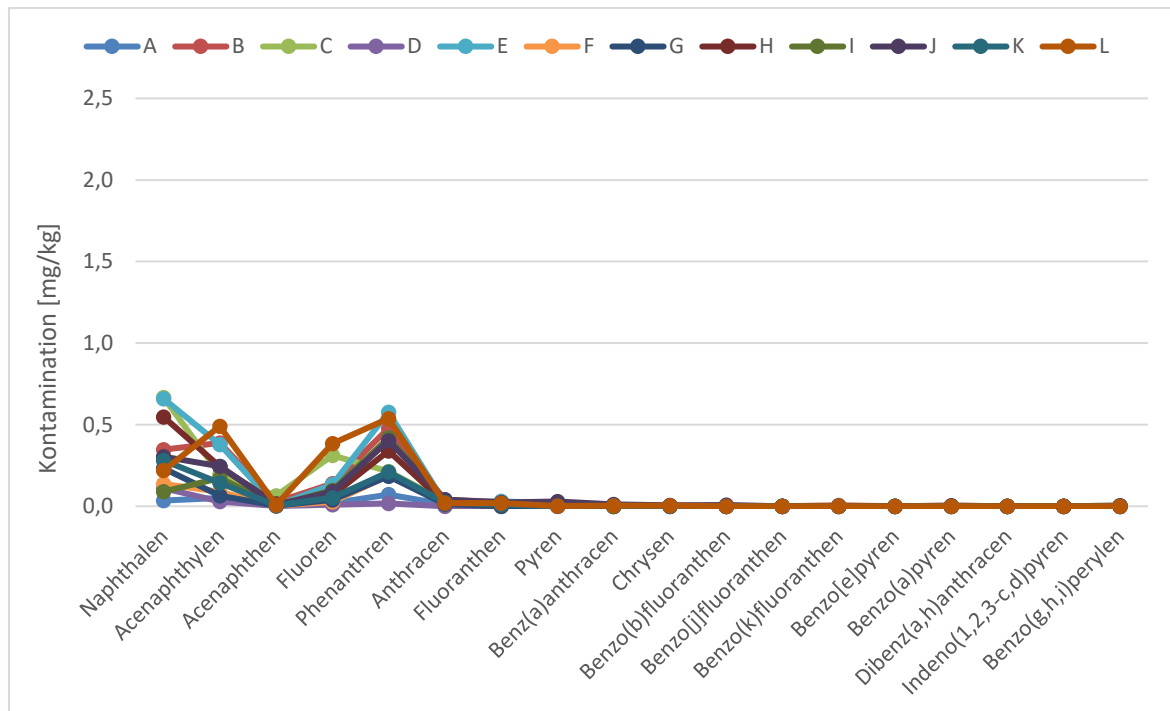


Abbildung 31 PAK-Kontamination – Technikum, nasse Beladung, Material A-L, *innen*

Die Unterschiede der Konzentrationen und der Profile der PAK-Einzelverbindungen beim direkten Vergleich der beiden Versuche (Nass und Trocken) sind nicht signifikant und können im Versuchszusammenhang vernachlässigt werden. Dies wird durch folgende Abbildung verdeutlicht, wo die gemittelten Konzentrationsverläufe dargestellt sind.

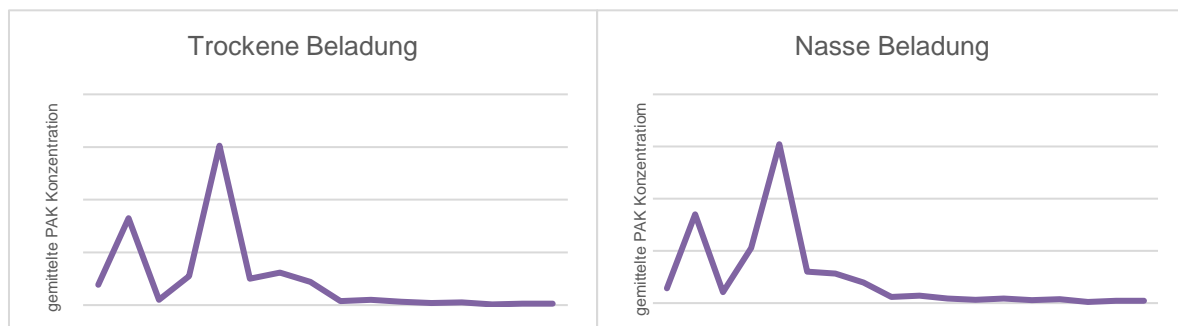


Abbildung 32 Gemittelte PAK-Gesamtkonzentration aller untersuchten Materialaufbauten (A bis L) im direkten Vergleich zwischen Nasser und Trockener Beladung

4.2.2 Schutzfaktoren

Schutzfaktoren (SF) sind im Zusammenhang mit der Auswahl von Atemschutzmitteln und Körperschutzmitteln bekannt. Sie sind hier als Quotient der Außen- und Innenkonzentration der Schadstoffe definiert [Dräger, 2015]. Das Konzept lässt sich auf den Schutz gegen die Durchdringung des Bekleidungsaufbaues bzw. der Membranen von Einsatzbekleidung für die Brandbekämpfung übertragen.

Da die Schutzfaktor-Ermittlung nicht das Hauptziel des Projektes bildete, wurde die Versuchsdurchführung nicht auf die Ermittlung von Dampfkonzentrationen der PAK in der PSA ausgerichtet. Als Lösung bot sich die Konzentrationsbestimmung über die Kontamination der Schichten der PSA. Das Vorgehen entspricht grundsätzlich dem der Simulation der Hautbelastung durch unter der PSA getragener Pads oder Unterbekleidung.

Die so berechneten SF können allerdings nur als grobe Näherungswerte betrachtet werden. Sie bilden die für die Hautkontamination relevante PAK-Dampfkonzentration in Hautnähe nicht real ab. Auch die auf diese Weise abgeschätzte Außenluftkonzentration ist nur bedingt richtig, da die Probenkontamination „außen“ nicht nur Folge einer adsorptiven Beladung aus der Dampfphase ist, sondern auch von Rußablagerungen sowie direkter Kondensation an den Membranen infolge der Taupunktsunterschreitung. Zu beachten ist zudem, dass die absoluten Werte von der Sammelaktivität der Materialien abhängen und vom Gewichtsanteil äußerer zu innerer Lagen überformt werden. Dies führt zu schwer abzuschätzenden Fehlern. Die berechneten Schutzfaktoren sind daher nur als behelfsmäßige Schutzfaktoren (SF_{Behelf}) zu betrachten.

Die Berechnung der SF erfolgte als Verhältnis der flächenbezogenen PAK-Belastungen außen + mittig (Membranlage) bzw. vereinfachend gesamt zur Flächenbelastung der inneren Lagen. Zur Berechnung wurden die gewichtsbezogenen PAK-Kontaminationen der PSA-Proben auf flächenbezogene Werte umgerechnet.

Zu berücksichtigen ist die Ergebnisunsicherheit der Messwerte. Gerade bezüglich der Konzentrationen der karzinogenen PAK ist diese aufgrund ihrer Lage an bzw. unter der Bestimmungsgrenze (BG) beträchtlich. Für die SF-Berechnung mussten für die karzinogenen PAK vielfach sogar Zahlenwerte angenommen werden (BG: 0,002 mg/kg). Für die Schutzfaktoren wird daher von einer Unsicherheit von bis zu 80 % ausgegangen. Die Unsicherheit dokumentierte sich in der beträchtlichen Unterschieden der hilfsweise berechneten Schutzfaktoren für die PAK-Einzelverbindungen. An dieser Stelle werden daher nur Mittelwerte für drei Gruppen starker unterschiedlichen Dampfdruckes und Karzinogenität angegeben – konkret für:

- Naphthalin (Verdacht auf karzinogene Wirkung beim Menschen),
- nichtkarzinogene PAK (Acenaphthylen bis Pyren) sowie
- karzinogene PAK (Benz(a)anthracen bis Benzo(g,h,i)perylen).

In Tabelle 26 und Tabelle 27 im Anlagenteil 1 sind die für diese drei PAK-Gruppen auf der Grundlage der Messergebnisse zur PAK-Kontamination der Einzelmaterialien bei trockener

sowie nasser Beladung berechneten Schutzfaktoren geordnet nach Art der Membran angegeben.

Die Ergebnisse belegen, dass sämtliche Membrantypen und -aufbauten einen ausreichenden Schutz gegen den Durchtritt karzinogener PAK bieten. Die ermittelten Schutzfaktoren lagen selbst bei höherer Temperatur für die untersuchten PSA-Materialien deutlich über 100. In aller Regel betrugen sie sogar ein Mehrfaches. Zudem zeigt sich ein Anstieg des Schutzgrades mit abnehmendem Dampfdruck der PAK. Die ermittelten SF sind für karzinogene PAK wesentlich höher als für nichtkarzinogene, kleinere PAK sowie insbesondere Naphthalin. Auch deutet sich ein Sinken der Schutzwirkung mit steigender Einwirktemperatur an.

Zudem gibt es Hinweise auf Unterschiede im Schutzniveau der PSA-Materialien und Membranen. Allerdings werden die Schutzfaktoren der Membranen durch den Lagenaufbau, deren anteilige Flächengewichte, ihre unterschiedliche PAK-Löslichkeit sowie eingeschränkte Zuordenbarkeit, überlagert.

Beispielsweise kann die Membran je nach Konzeption nach innen oder außen weisen (vgl. Tabelle 12, Abbildung 40 bis Abbildung 42, Anlagenteil 1). Weist sie nach innen, bildet sie einen klaren Abschluss nach innen. Weist sie nach außen, sind die an ihr laminierten Schichten eigentlich Teil von innen, konnten jedoch nicht als solche erfasst bzw. der Innenbelastung hinzugerechnet werden. Insofern können Schutzfaktoren von Aufbausystemen, bei denen die Membran nach außen weist, tendenziell höher ausfallen.

Auffällig ist der Aufbau I mit an das Obermaterial laminierter ePTFE-Membran, der in beiden Versuchsreihen etwas schlechter abschnitt. Die direkte Laminierung der Membran an das Obermaterial, wie bei Material I, ist ein extremes Beispiel für den PSA-Aufbau. Infolge fehlender Zwischenschichten sowie insbesondere eines isolierenden Luftpolsters ist eine stärkere Erwärmung der Membran als bei den übrigen Aufbauten zu unterstellen. Zudem ist die Membran direkter den PAK-Dämpfen ausgesetzt, so dass die verminderten SF nicht verwundern. Aus Sicht der Schadstoffrückhaltung sollte die thermische Isolation grundsätzlich oberhalb der Membran positioniert sein, zumindest soweit der Einfluss auf den Tragekomfort begrenzt bleibt. Dieser ist grundsätzlich höher zu gewichten, wie die hohe Sterblichkeit unter Feuerwehrleuten aufgrund von Herz-Kreislaufkrankungen bzw. -versagen zeigt [Kales, 2007]. Beim scheinbar etwas schlechteren Abschneiden der PES-Membranen (vgl. Material B und L) ist der höhere Gewichtsanteil der inneren Lagen zu berücksichtigen, wodurch die Innenkontamination erhöht wirkt. Der Effekt ist grundsätzlich auch beim Material I (ePTFE) zu berücksichtigen.

Aus Sicht der Schadstoffrückhaltung vorteilhaft scheint hingegen die Ausstattung der PSA mit nach außen weisenden Silicon-Dots auf der Membran. Die ermittelten Schutzfaktoren waren für die Materialien F und K am höchsten. Silicone sind als Schadstoffsammler bekannt. Entsprechend war die gewichtsbezogene Kontamination der Membran-Lage bei beiden Materialien deutlich erhöht. Zugleich waren die Innenkontaminationen deutlich erniedrigt. Das „Angebot“ eines weiteren Polymers in kompakter Form und hohem Sammelvermögen vor der Membran, d.h. eines „Fängers“, schützt offenbar die Membran vor Kontamination und mindert so den Stoffdurchgang. Etwas Vergleichbares wurde nicht beobachtet, wenn anstelle des kompakten Polymers ein Vlies trat. Zwar war der Gewichtsanteil der Vliesmaterialien gegenüber den kompakten Silicon-Dots deutlich geringer, doch ist dies nicht ursächlich. Es ist zu berücksichtigen, dass Schadstoffe unter Einsatzbedingungen (z.B. Hitze) leichter zu mobilisieren sind. Auch wenn die absoluten Werte der Schutzfaktoren dieser Materialien in Zweifel stehen, ist die Tendenz eindeutig. Die Aufbauform mit Silikondots ergab in beiden Durchgängen die höchsten SF.

Für flüchtigere Stoffe erwies sich das Schutzniveau, wie bereits erwähnt, als wesentlich geringer. So liegen die ermittelten Schutzfaktoren für Naphthalin vielfach unter 10. Dies ist angesichts der relativ hohen Grenzwerte für Naphthalin immer noch ausreichend. Für noch flüchtigere und gleichzeitig karzinogen bzw. giftige Stoffe kann der Schutzfaktor der PSA jedoch unzureichend sein. Belastbare Aussagen hierzu erforderten allerdings eigenständige Untersuchungen.

Da der Vorgang der Permeation stark temperaturabhängig ist, gelten die berechneten Schutzfaktoren nur für den untersuchten Temperaturbereich. Allerdings halten sich die beobachteten Änderungen des Schutzniveaus in Abhängigkeit von der Temperatur in Grenzen, so dass selbst für Extremeinwirkungen ein Schutzfaktor von über 100 zu erwarten ist. Das einwirkende Temperaturniveau sollte dennoch durch ein angepasstes taktisches Vorgehen und Verhalten begrenzt werden. Dies gilt umso mehr, als es auch flüchtigere Schadstoffe gibt.

Um eine Vorstellung von der Isolationswirkung des PSA-Aufbaus zu erhalten, wurde für den Muster-Materialaufbau C untersucht, wie sich die Temperaturen oberhalb und unterhalb einer kombinierten Funktionslage aus thermischer Isolation und Membran entwickeln (vgl. Abbildung 33 und Abbildung 34). Die Isolationswirkung erwies sich als beträchtlich.

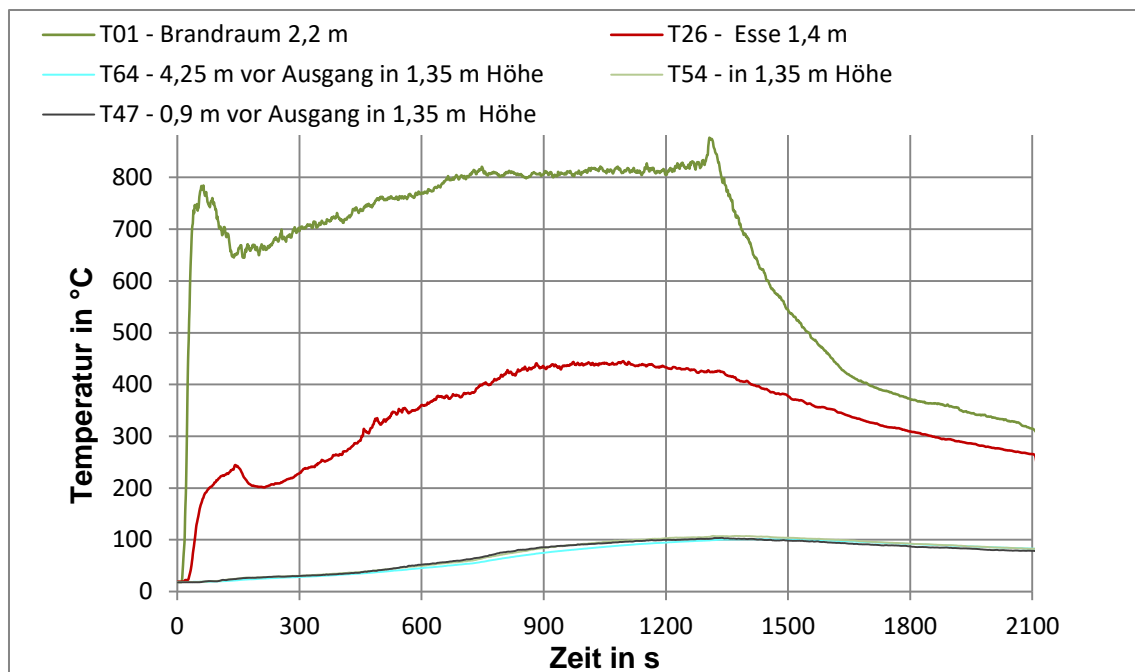


Abbildung 33 Temperaturverlauf in Rauchabzugsrichtung, Versuch V1.6

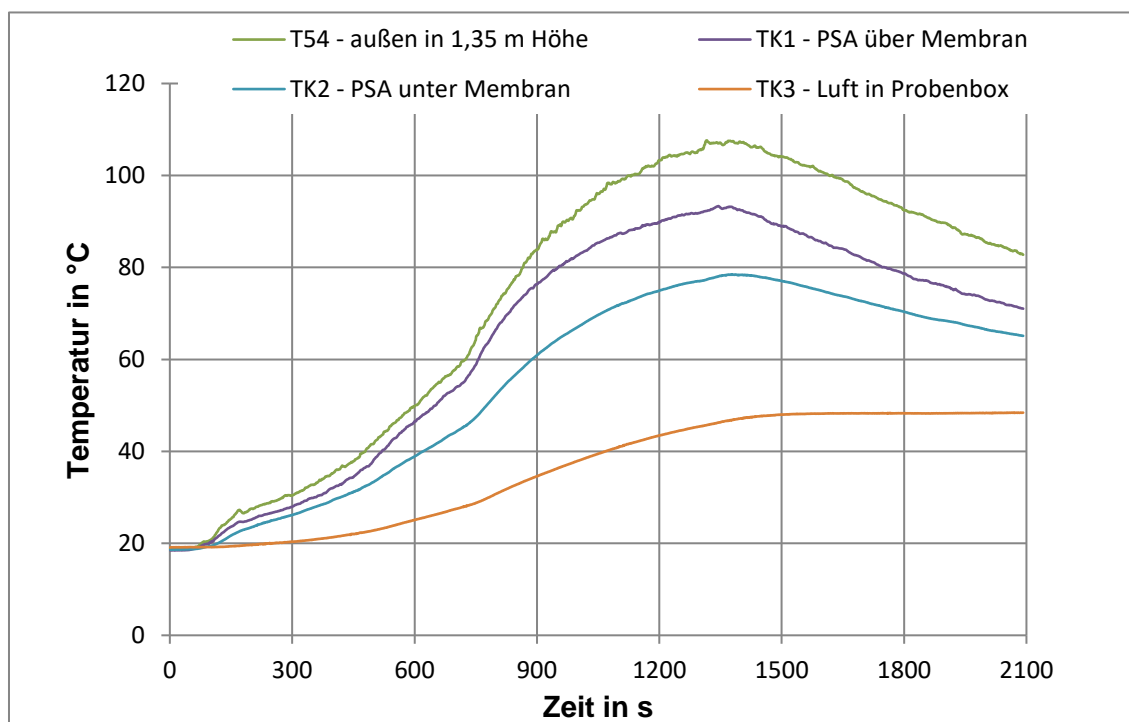


Abbildung 34 Temperaturverlauf in Material-Probe C in 1,30 m Höhe, Versuch V1.6

Schutzfaktoren in der Literatur

Wingfors et al. ermittelten bei Übungsbränden mit flüssigen und festen Brennstoffen in einem großen Brandübungscontainer ebenfalls Schutzfaktoren der PSA gegenüber PAK [Wingfors, 2018]. Genutzt wurde die in Schweden gebräuchliche zweiteilige Einsatzbekleidung, bestehend aus einer Innenbekleidung aus Baumwolle/Polyester-Gewebe, ergänzt um eine Brandschutzbekleidung mit ePTFE-Membran. Es erfolgten drei Versuchsdurchgänge mit i.d.R. zwei Probanden, über die gemittelt wurde.

Die ermittelten Schutzfaktoren liegen im Mittel bei 146, für Benzo(a)pyren bei 120. Die Ergebnisse lassen keinen Zusammenhang zwischen Dampfdruck und SF erkennen. Die unterschiedliche Berechnungsgrundlage, hier die Kontamination von Bekleidungsschichten, dort Luftkonzentrationen, erklärt die unterschiedlichen Ergebnisse nicht. Offenbar sind diese in der Versuchsdurchführung begründet.

Zur Konzentrationsermittlung bei [Wingfors, 2018] wurde die Probenluft mit elektronischen Probenahmepumpen von SKC auf PUR-Schaum-Adsorbern gesammelt. Die Probenahme unter der PSA erfolgte dabei personenbezogen in Brusthöhe mit erheblichen 2,5 l/min. Die Umgebungsatmosphäre wurde hingegen stationär im Raum an zwei Positionen (0,5 m und 1,15 m Höhe) angesaugt, gemischt, auf 1/10 verdünnt (nach Ejektor-Prinzip) und gekühlt gesammelt. Ergänzend wurden die Außen- und Innentemperaturen dokumentiert (140 - 180 °C zu 35 - 42 °C).

Die Raumluftkonzentration als Bezugskonzentration außen ist nur bei einer weitgehend homogenen Schadstoffbelastung im Versuchsraum korrekt. Die beiden Ansaughöhen berücksichtigten die unterschiedliche Handlungshöhe bei den Löscharbeiten, ohne exakt das Niveau in Brusthöhe abzubilden. Der Einfluss auf das Ergebnis wird allerdings als begrenzt angesehen.

Wesentlicher ist die Verwendung einer Sammelpumpe zur Probenahme unterhalb der PSA, da hierdurch der Bezug zur Durchtrittsfläche verloren geht. Bei der Außenluftansaugung stellte sich dieses Problem nicht, da der Ansaugvolumenstrom die Konzentration im Raum nicht beeinflussen kann. Im Inneren stört der erhebliche Pumpenvolumenstrom die Prozesse auf den inneren Lagen strömungsdynamisch sowie infolge der geschaffenen Konzentrationssenke. Auch erhöht sich die Triebkraft der Permeation, da die Luftkonzentration im Inneren de facto auf Null gehalten wird. Daraus ergeben sich Mehrbefunde in der Innenluft und somit scheinbar geringere Schutzfaktoren. Die Effekte sind zudem vom Pumpenvolumenstrom, aber auch von der Permeationsrate abhängig und insofern

stoffspezifisch. Beide Effekte heben sich zwar teilweise auf, doch sind die Zusammenhänge unkalkulierbar.

Schutzfaktorberechnungen auf Basis der Kontamination an bzw. unter die PSA gehefteter (Sammel)pads und anderer Passivsammler einschließlich der Nutzung der Unterbekleidung sowie eingeschränkt der Lagen der PSA als Beprobungsobjekt sind weniger fehlerbehaftet. Bei entsprechender Gestaltung liefern Konzentrationsmessungen in der Dampfphase allerdings die richtigeren Werte zur Abschätzung der Belastungssituation der Haut.

Schutzgrad gegenüber anderen Karzinogenen

Die Schutzfaktoren der PSA für die Brandbekämpfung gegenüber karzinogenen PAK sind erheblich. Einen vollständigen Schutz gegen Kontamination innerer Bekleidungslagen sowie der Haut bieten die Bekleidungsaufbauten jedoch nicht. Für die kleineren, flüchtigeren PAK sind die Schutzfaktoren bereits wesentlich geringer (vgl. Dampfdrücke von PAK nach Tabelle 11, Anlagenteil 1).

Verwunderlich ist dies nicht, da der Dampfdruck eines Stoffes aus physikalisch-chemischer Sicht Einfluss auf die Diffusionsgeschwindigkeit in den Membranen hat. Wesentlich für die Permeationsrate ist zudem die Löslichkeit. Beide Stoffeigenschaften laufen nicht zwangsläufig parallel. Innerhalb einer homologen Reihe ist dies allerdings der Fall, auch wenn die Sprünge in der Molekülgröße bei den PAK durchaus erheblich sind. Ähnliches ist für andere unpolare Kohlenwasserstoffe, wie Dioxine, PCB aber auch Benzol anzunehmen. Dies ist von Interesse, kommen diese Stoffgruppen doch regelmäßig im Brandrauch vor und haben ebenfalls eine chronisch-toxische Wirkung.

Aus der Gruppe der Polychlorierten Dibenzo-p-dioxine ist besonders das 2,3,7,8-Kongener relevant. Einige Fachgremien, wie die US-Umweltbehörde EPA, stufen zumindest 2,3,7,8-TCDD (auch 2,3,7,8-Cl₄DD geschrieben) als für Menschen krebserregend ein. 2,3,7,8-TCDD ist eine der am stärksten tumorpromovierende Substanz, wie aus Tabelle 7 ersichtlich wird [Ballschmiter, 2007]. Auch die übrigen Dioxine haben tumorpromovierende Wirkung. Der Dampfdruck von 2,3,7,8-TCDD ist dem von Anthracen und Fluoranthen vergleichbar, so dass eine ausreichende Rückhaltung angenommen werden kann. Auch in einer Studie für die niederländischen Feuerwehren [IFV, 2018; Eijnde, 2018] wird aus toxikologischer Sicht eine relevante Hautaufnahme von Dioxinen während der Brandbekämpfung ausgeschlossen.

Tabelle 7 Dioxine, Eigenschaften, [Ballschmiter, 2007]

| Stoff/ Eigenschaft | 1- Cl1DD | 2-Cl1DD | 2,3-Cl2DD | 2,3,7,8- Cl4DD | Cl8DD |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|---|
| Schmelzpunkt in °C | 105 | | 163 | 305 | 330 |
| Siedepunkt in °C | 315 | | 358 | 447 | 510 |
| p Sättigung (25 °C) in Pa | $1,0 \cdot 10^{-1}$ | | $9,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,2 \cdot 10^{-4}$ | $2,8 \cdot 10^{-7}$ bzw. $1,2 \cdot 10^{-7}$ |
| Wasserlöslichkeit (25°C) in ng/l | | 278.000 –318.000 | | 8–200 bzw. 690 | $7,4 \cdot 10^{-2}$ bzw. 0,4 (20 °C) |
| log K _{OW} | | 5,00 | 5,60 | 6,80 bzw. 6,64 | 8,20 bzw. 8,60 |

Bereits deutlich höher sind die Dampfdrücke von PCB (Polychlorierte Biphenyle), so dass hier davon auszugehen ist, dass PCB die Materialien der Einsatzbekleidung während der Brandbekämpfung relativ gut passieren. Auch bei PCB steht die chronische Toxizität im Vordergrund. Sie wirken teratogen und stehen zumindest im Verdacht, krebserregend zu sein. Aufgrund ihrer Fettlöslichkeit werden sie gut über die Haut aufgenommen und reichern sich im Körper an [Wiki, 2020]. Dabei stammen die PCB aus den Brandstoffen. Zwar ist ihre Verwendung seit Jahren verboten, doch sind längst nicht alle Gebäude saniert. PCB-Quellen sind heute v.a. Fugendichtmassen, (Parkett)kleber sowie Bauplastik.

Eine weitere relevante Schadstoffgruppe bilden polyfluorierte Kohlenwasserstoffe mit PFOA als herstellungsbedingte Verunreinigung bzw. Abbauprodukt. Der Dampfdruck von PFOA und PFAS ist vergleichsweise hoch (0,69 hPa bei 20 °C). PFOA kann vermutlich Krebs erzeugen. Beide Stoffe sind persistent, bioakkumulativ und reproduktionstoxisch. In der Vergangenheit spielten sie im Feuerwehraltag eine große Rolle (A3F-Mittel, Imprägnierung der PSA). Heute sind sie hier nur noch als Spurenverunreinigung zu finden. Bedeutsamer ist ihr Vorkommen in der wasser- und ölabweisenden Ausrüstung von Teppichen und Textilien, aus denen sie bei Bränden von Gebäuden, Fahrzeugen u.Ä. freigesetzt werden. Im Rahmen der Studie für die Niederländischen Feuerwehren wurde PFOA in Einsatzbekleidung nachgewiesen.

Kleinere Karzinogene, wie insbesondere Benzol, werden demgegenüber bei jedem Brand in erheblichem Maße gebildet. Infolge ihres hohen Dampfdruckes werden sie von den Membranen der Einsatzbekleidung praktisch nicht zurückgehalten. Fent et al. fanden entsprechend in der Ausatemluft von Einsatzkräften trotz des Tragens von Atemschutz bei der

PSA-Ablage signifikant erhöhte Gehalte an Aromaten wie Benzol und Styrol [Fent et al., 2019]. Diese sind zweifelsfrei Ergebnis der Hautaufnahme während des Einsatzes. Auch in der Studie im Auftrag der niederländischen Feuerwehren wird für Benzol unter Einsatzbedingungen eine relevante Hautaufnahme angenommen. Darüber hinaus besteht für weitere flüchtige Karzinogene die Möglichkeit der Hautaufnahme [IFV, 2018; Willems, 2017; Eijnde, 2018].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die PSA zur Brandbekämpfung keinen vollständigen Schutz vor den Schadstoffen im Brandrauch bietet. Vor karzinogenen PAK schützen die PSA-Materialien jedoch gut. Allerdings sagt die Rückhaltefähigkeit der PSA-Materialien nichts über den Schutzgrad der PSA als Gesamtsystem aus. Optimierungsbedarf besteht bei den Übergängen zwischen den PSA-Teilen, der Passgenauigkeit und infolge der üblichen Bewegungsabläufe bei der Brandbekämpfung. Auch eine einteilige PSA bzw. ein Unterziehoverall mit Membranlage sind hier vorstellbar. Im Übrigen sollten Brandschutzhauben und Handschuhe mit Membraneinlage bzw. zumindest Vliesmaterialien hoher Rückhaltung für ultrafeine Partikel, wie Nomex Nano Flex®, und Vergleichbares eingesetzt werden.

Für flüchtige und gasförmige Schadstoffe ist die Barrierewirkung des PSA-Aufbaus hingegen unzureichend. Der Erhöhung der Schutzwirkung des Schichtenaufbaus durch zusätzliche Membranlagen steht das Erfordernis ausreichender Atmungsaktivität gegenüber. Der Schutz vor kardiovaskulären Erkrankungen hat dabei aufgrund der hohen akuten Risiken Vorrang [Kales, 2007; Baxter, 2014]. Eine Lösung könnte möglicherweise in der (adsorptiven) Bindung oder Zerstörung eingedrungener Schadstoffe durch aktive Schichten oder Fasern bestehen [vgl. Forschungsprojekt 3D-PAKtex, 2020].

Nicht aus dem Auge verloren werden darf bei der Diskussion die große Bedeutung der Kontaminationsverschleppung für die Hautaufnahme hochsiedender Schadstoffe. Neben der Gewährleistung der Einsatzstellenhygiene und konsequenten Schwarz-Weiß-Trennung in allen Bereichen ist die Einführung effizienter Reinigungsverfahren logische Konsequenz.

4.3 Fehlerdiskussion

An dieser Stelle erfolgt eine zusammenfassende Diskussion der Verfahrensfehler. Neben Fehlern bei der Probenextraktion und Analyse werden die Bedingungen der Beladung im Technikum, Fehlermöglichkeiten bei der Probenahme und der Probenwahl berücksichtigt.

Der Fehler der Extraktion wird über die Wiederfindung beschrieben. Hierbei wird geprüft, wieviel des vor der Extraktion dem Extraktionsmittel zugesetzten Internen Standards bei der Analyse wiedergefunden wird. Dies berücksichtigt allerdings nicht, wie gut die Probenmatrix sich extrahieren lässt, sondern beschreibt lediglich Analyt-Verluste aus der Extraktionslösung.

Eine vollständige Extraktion findet praktisch nie statt. Zudem ist grundsätzlich für jede Probenmatrix der Extraktionsgrad durch Voruntersuchungen abzusichern und ein geeignetes Verfahren zu wählen. Die Vorgaben des Standards AfPS GS 2014:01 für die Extraktion zeigen allerdings, dass für Polymermaterialien von einer vergleichsweise einfachen Extrahierbarkeit ausgegangen werden kann. Ganz besonders gilt dies bei einem sehr hohen Zerteilungsgrad der Proben, wie im Falle der dünnen Bekleidungslagen, die zudem noch zerkleinert wurden. Insofern beruhen die in dieser Arbeit gewonnenen Analysendaten grundsätzlich auf einer repräsentativen Probenextraktion. Analytverluste bei der Extraktion werden durch die ermittelte Wiederfindung korrekt wiedergegeben. Allerdings wird die Wiederfindung nicht für jede Substanz abgebildet, sondern lediglich für drei über den Siedebereich verteilte deuterierte Analyte. Insofern besteht für die übrigen Einzelverbindungen eine gewisse Unsicherheit.

Für die Technikumsproben (vgl. Tabelle 20 bis Tabelle 25, Anlagenteil 1) lagen die dokumentierten Wiederfindungen bei über 70 %, für Benzo(a)pyren und erwartet auch für andere höherkondensierte PAK sogar meist über 85 %. Die Ergebnisunsicherheit der Extraktion lag somit bei etwa +/- 30 % und für die höheren, karzinogenen PAK bei etwa +/-15 %. Für die flüchtigeren PAK und insbesondere Naphthalin sind die Wiederfindungen geringer.

Die Fehlermöglichkeiten bei der Analytik sind ebenfalls vielfältig. Ein Großteil ist auf den Faktor Mensch zurückzuführen und kann durch ein standardisiertes Arbeiten (vgl. SOP) sowie Nutzung von Robotern zur Probenaufgabe minimiert werden. Dies ist in akkreditierten Laboren bzw. Analytikfirmen, wie der beauftragten Öhmi Analytik GmbH, gesichert. Analysenfehler haben allerdings auch andere Gründe. Hierzu zählen insbesondere hohe Konzentrationsunterschiede für die Einzelkomponenten in der zu analysierenden Probe. Entsprechende Probleme traten auch im Projekt auf. Zur Minimierung entsprechender Einflüsse erfolgten durch das beauftragte Labor bei erwartet höherer Probenkontamination zunächst Übersichtsanalysen mittels HPLC (Hochdruck-Flüssigchromatographie). Nach Festlegung der Verdünnung wurden Aliquote der Extrakte mit einem GC-MSD und HT5®-Säule untersucht, im Bedarfsfall bei verschiedener Verdünnung. Dies hatte allerdings Grenzen. Bei den Praxisproben kamen Störungen durch ereignisspezifische Gehalte weiterer Hochsieder hinzu, die sich teilweise nur sehr schlecht von den PAK isolieren ließen.

Der Analysenfehler steigt bei Annäherung an die Bestimmungsgrenze (BG) des Verfahrens. Zudem lassen sich Ergebnisse unter der BG nicht interpretieren. Daher wurde das Gesamtverfahren soweit optimiert, dass eine sehr niedrige Bestimmungsgrenze von 0,002 mg/kg pro PAK-Verbindung erreicht werden konnte. Dazu wurde die *Probenmenge* auf 3 g erhöht, was jedoch neue Probleme mit sich brachte. Die realisierte sehr niedrige BG ermöglichte deutlich detailliertere Einblicke als die nach GS-Zeichen geforderte

Bestimmungsgrenze von 0,2 mg/kg. Unterstützend wirkten die hohen Beladungen im Technikum, die auch für innere Schichten meist eine Überschreitung der BG sicherstellten.

Fehler der Extraktion und Analytik machen allerdings nur einen Teil des Gesamtfehlers aus. Zu berücksichtigen sind darüber hinaus Fehler infolge von:

- Analytverlusten bei Lagerung und Lufttrocknung,
- Inhomogenität der Probenbeaufschlagung und
- Kreuzkontamination beim Zuschnitt der Proben.

Entsprechende Fehler betreffen alle Einzelverbindungen, allerdings nicht immer in gleichem Maße. Sie sind grundsätzlich nicht fassbar und können theoretisch auch mehrere 100 % betragen. Bei den Technikumsproben wurden allerdings keine Hinweise auf eine entsprechende Fehlergrößenordnung festgestellt. Offenbar konnten entsprechende Fehler durch ein sauberes Arbeiten wirksam begrenzt werden. Dies kann auch für die Praxisproben unterstellt werden. Der Gesamtverfahrensfehler wird dennoch mit etwa 50 % angenommen.

Zur Begrenzung dieser Fehlereinflüsse erfolgte die Probenzerkleinerung unmittelbar nach Überführung der Proben und Probenahme, wodurch die Trocknungszeit minimiert wurde (Lufttrocknung bis zur Gewichtskonstanz). Die Zeit für die Probentrocknung und -zerkleinerung nahm für die Technikumsproben ca. 2-3 h in Anspruch (ab Probenbergung). Im Anschluss erfolgte die Einwaage der Proben und Bereitstellung für das beauftragte Labor, wo die Proben sofort nach Eingang mit n- Hexan überschichtet und das Int.Std.-Gemisch zur Absicherung der Wiederfindung hinzugegeben wurde. Ein vergleichbares Vorgehen erfolgte bei den Praxisproben. Die Zeit für die Lufttrocknung variierte hier allerdings stärker, so dass je nach Feuchtegrad eine 1- bis 5-stündige Lufttrocknung erforderlich wurde. Die Ursache ist in unterschiedlichen Einsatzbedingungen an der Einsatzstelle sowie den Zeiten bis zum Ablegen der PSA und deren Verpackung in gasdichte Säcke zu suchen.

Der zweite Fehlerbereich betrifft Inhomogenität des Strömungsfeldes bei den Versuchen im Technikum. Diese sind letztlich bei der großen Zahl parallel untersuchter Probenmaterialien unvermeidlich. Hier wirken Wandeffekte sowie die Ablenkung des Brandrauches infolge der quer zur Strömungsrichtung positionierten Proben. Allerdings war die Strömungsgeschwindigkeit infolge einer größeren gewählten Ausgangsöffnung am Container gegenüber der Einströmöffnung in den Targetraum deutlich erniedrigt. Unterstützt wurde die Beladung der Proben durch den Aufstellwinkel von 45°. Um die Inhomogenität des Strömungsfeldes zu begrenzen, wurde die Trägerplatte gedrittelt und zwischen den Teilplatten Abstand gelassen. Zudem betrug der Abstand zur Wand etwa 50 cm. Dennoch kam es zu visuell sichtbaren Inhomogenitäten in der Rußbeladung. Diese beruhten offenbar auf kleineren

Unebenheiten der aufgespannten Oberbekleidungsmaterial-Proben. Daraus resultierende Fehler werden durch den großen beprobten Probenflächenanteil (jeweils 3 g Probe) zumindest teilweise ausgeglichen. Hinzu kommt, dass die Beladung mit PAK nicht nur über die Partikel- und Tröpfchenfracht, sondern in erheblichem Maße direkt aus der Gasphase erfolgte.

Vergleichbare Einflüsse sind bei Praxisproben als Folge von Kontaminationen durch Kontakt mit Brandrückständen und stärker kontaminierten Oberflächen zu berücksichtigen. Diese Unsicherheit wurde durch die Mischbeprobung stark eingegrenzt.

Auch die Kreuzkontamination der Einzellagen beim Zuschnitt der Proben konnte durch ein strukturiertes Arbeiten begrenzt werden. Das Probenhandling erfolgte grundsätzlich von gering zu höher belasteten Schichten. Zudem wurden nach jedem Material die Handschuhe gewechselt. Besondere Aufmerksamkeit galt der Gewinnung innerer Schichten. Die vergleichende Betrachtung der Kontaminationshöhen der Einzellagen der Versuche (trocken/nass) ergab keine Hinweise auf entsprechende Ausreißer. Dies wird eher den Praxisproben unterstellt.

Einfluss auf das Messergebnis haben grundsätzlich auch die zur Analyse herangezogenen Probenflächen. Infolge der Vorgabe von 3 g Probe war die zu beprobende Fläche bei leichten Bekleidungslagen bzw. geringem Flächengewicht deutlich erhöht. Bei den Technikumsproben minderte dies allerdings den Gesamtverfahrensfehler, da es die Inhomogenität der Beladung ausglich. Bei Praxisproben mit stärkerer örtlicher Schwankung der Höhe der Kontamination kann dies den Fehler erhöhen. Auch hier wirkte die Mischbeprobung ausgleichend.

5. Kontaminations-Untersuchungen (Praxisproben)

5.1 Proben und Probenahme

Die Untersuchung von Feuerwehreinsatzbekleidung aus der Innenbrandbekämpfung, kurz Praxisproben, bildete die zweite Säule im Forschungsprojekt. Sie zielte auf die Ermittlung des typischen Kontaminationsniveaus unter den in Deutschland bestehenden taktischen, technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen. Zugleich sollten die Ergebnisse der Einordnung des im Technikum realisierten Beladungsniveaus dienen.

Entsprechend der Aufgabenstellung zielte die Probenakquise auf die Brandbekämpfung in Wohnräumen sowie Einsatzjacken (vgl. Protokoll sowie Hinweise zur Probengewinnung, Anlagenteil 2). Hier wurde ein mittleres, vergleichsweise stabiles Kontaminationsniveau erwartet. Dadurch sollte eine Worst Case-Betrachtungsweise vermieden und die Analysenkosten begrenzt werden. Unterstützt wurde dies durch eine Mischbeprobung von zehn unterschiedlich stark exponierten Bereichen jeweils einer kontaminierten Einsatzjacke

(vgl. Abschnitt 3.2). Das Vorgehen sorgte für eine hohe Repräsentanz der Werte im Sinne einer Durchschnittsbelastung der PSA.

Für die Abschätzung des Risikos der Hautaufnahme von PAK ist es allerdings genauso wichtig, die Größenordnung der Kontaminationsspitzen bzw. den Schwankungsbereich des Kontaminationsniveaus auf der PSA zu kennen. Daher erfolgte für ausgewählte Proben ergänzend eine Beprobung von Bereichen mit hohem Kontaminationsrisiko (Hotspot-Analysen, nur als Stanzproben über alle Schichten). Dabei wurden Flächenabschnitte gewählt, die bereits visuell stärker belastet waren.

Zur Erweiterung der Datenbasis wurden weitere PSA-Teile, wie Hosen (Mischbeprobung von 5 Stellen und Hotspotbeprobung), Feuerschutzhauben, Handschuhe, Einsatzstiefel und Helme untersucht. Die Beprobung dieser sonstigen PSA-Teile erfolgte als Stanzprobe über alle Schichten, die der Helme als Wischprobe der gesamten Helmaußenfläche. Dazu wurden, in Analogie zum Probengewicht der sonstigen Proben, 3 g eines Mikrofasertuches eingesetzt, welches mit Ethanol befeuchtet wurde.

Etwa die Hälfte der untersuchten Einsatzjacken stammten von den BF München und Berlin und somit von nur zwei Schutzkleidungsherstellern. Für diese PSA erfolgte, gestützt auf den bekannten Flächengewichten der Materialien und Lagen, eine Gegenrechnung der Analyseergebnisse für die Probe gesamt auf Grundlage der Ergebnisse der Einzellagen (Vergleich gemessen/ berechnet). Die berechneten Werte entsprechen im Mittel dem Dreifachen der gemessenen Konzentrationen. Dieser ermittelte Faktor ist ein Anhaltspunkt für die Schwankungen der Ergebnisse, welche sich insbesondere durch Inhomogenitäten bei der PAK-Verteilung in den untersuchten Materialien nach der Kontamination ergeben.

Bei der Einsatzkleidung von München liegt mit der Laminierung der Membran direkt an das Obermaterial zudem eine bauliche Besonderheit vor. Deutliche Unterschiede gab es bezüglich der Nutzungsdauer der Jacken. Während die Jacken aus München bereits leichte Verschleißspuren aufwiesen, war die Einsatzkleidung der Berliner Feuerwehr infolge laufender Umstellung auf eine neue PSA mit einer Nutzungszeit zwischen 1 und 2,5 Jahren deutlich jünger. Dies muss einen mehrfachen Brandeinsatz und Wäschen nicht ausschließen, wie zu Probe P8 belegt ist. Detaillierte Informationen zur Einsatz- und Waschhistorie sind allerdings nicht verfügbar. Doch kann bei den BF zumindest von einer regelmäßigen sowie einsatzbezogenen Nasswäsche ausgegangen werden.

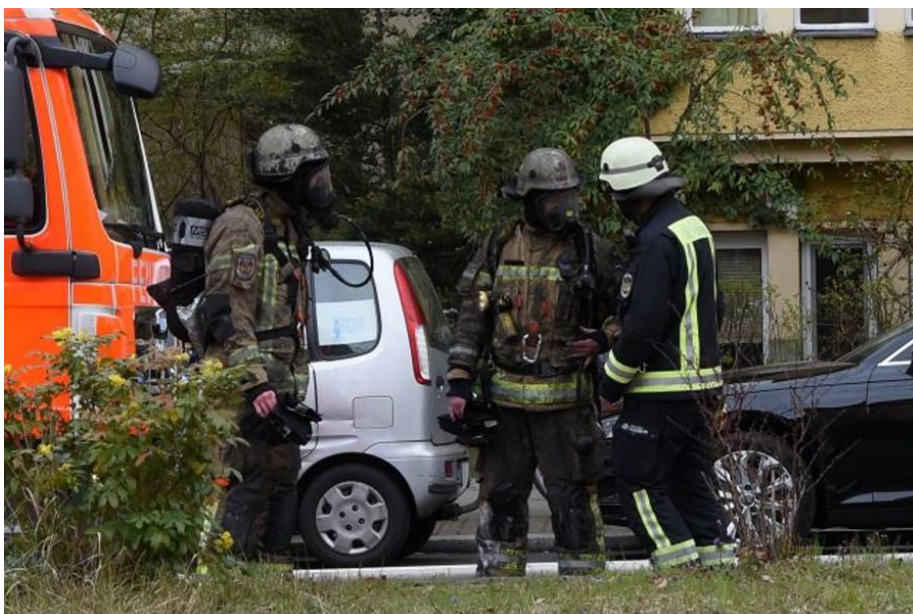


Abbildung 35 Angriffstrupp der BF Berlin nach BBK im ausgebauten Dachgeschoss, Bildmitte: Einsatzkraft mit Jacke P8; Foto: BF Berlin, Freigabe erteilt

Über Kontakte zu Vertretern der Feuerwehrunfallkassen wurde ergänzend kontaminierte PSA aus dem gesamten Bundesgebiet eingeworben. Überwiegend handelt es sich um PSA von Freiwilligen Feuerwehren. Oft wurden hier neben Jacken auch Hosen sowie weitere PSA-Teile bereitgestellt. Über die Wasch- und Einsatzhistorie ist wenig bekannt.

Tabelle 28 und Tabelle 29 im Anlagenteil 2 geben einen Überblick über die untersuchten Praxisproben. Ergänzend sind Einsatzszenario, Brandstoffzusammensetzung, Wäschehistorie sowie Alter und Verpackung der Proben angegeben. Die Mehrzahl der Proben ist der Innenbrandbekämpfung in Wohngebäuden (Altbau) mit Vollbrand zuzuordnen. Einige Proben stammen aus dem gewerblichen Bereich, wobei die Übergänge bekanntlich fließend sind (vgl. P5; eingeschränkt bei P3). Darüber hinaus wurden je eine Einsatzjacke und -hose aus einer Heißbrandausbildung in einer holzbefeuerten Brandübungsanlage (BÜA) untersucht (X-Proben) sowie auch einige gewaschene Einsatzjacken bzw. -hosen (W-Proben).

Eine klare Zuordnung der Proben zu Feuerwehren bzw. Einsätzen erfolgt aus Gründen des Datenschutzes nicht. Soweit dies für die Interpretation der Ergebnisse wichtig ist, wurde hiervon in erforderlichem Maße abgewichen.



Abbildung 36 Jacke P8 - bei Beprobung, bereits leicht getrocknet

Der visuelle Verschmutzungsgrad der untersuchten Einsatzbekleidung aus der Innenbrandbekämpfung war meist gering. Als Hauptgrund hierfür wird angesehen, dass die Einsätze in ihrer Dimension begrenzt und Taktiken, wie das kriechende Annähern an das Brandobjekt, überwiegend nicht praktiziert wurden. Die höchste visuelle Verschmutzung wies mit Abstand Probe P8 auf, die zudem sehr nass war. Auch nach weitgehender Trocknung zeigte die Probe eine deutlich sichtbare großflächige Kontamination mit Ruß (vgl. Abbildung 36 und Abbildung 37).

Typisch für die Mehrzahl der erhaltenen Einsatzproben aus der Innenbrandbekämpfung ist hingegen Probe 3 (Abbildung 37), die visuell vergleichsweise sauber erscheint. Entsprechende Proben wiesen in aller Regel auch eine geringe Feuchte auf. Allerdings kann der äußere Anschein auch trügen, insbesondere natürlich bei dunkelblauer.

Das meist geringe Kontaminationsniveau der erhaltenen Praxisproben aus der Innenbrandbekämpfung kann unterschiedliche Gründe haben. Wahrscheinlich ist, dass Wohnungsbrände in der Regel rasch eingegrenzt und gelöscht werden. Es kann auch bedeuten, dass die Möglichkeiten zur Minderung brandbedingter Kontaminationen, wie der unterstützende Außenangriff und die frühzeitige Belüftung von Brandräumen, bereits heute stärker genutzt wurden.



Abbildung 37 PSA der Berliner Feuerwehr, hier: Probe P3, gering belastet, relativ trocken

5.2 Ergebnisse und Diskussion

Anlagenteil 2 enthält neben den Messergebnissen (siehe Tabelle 30 bis Tabelle 42) die graphische Auswertung der Untersuchungsergebnisse der Praxisproben. Die Auswertung erfolgte in Form von Balkendiagrammen (vgl. Abbildung 55 bis Abbildung 75 im Anlagenteil 2). Zur leichteren Interpretation der Ergebnisse enthalten die Diagramme ausgewählte toxikologische Grenzwerte in Form von Grenzlinien.

Da sowohl Grenzwerte für Einzel-PAK als auch Summengrenzwerte relevant sind, erfolgte die Auswertung jeweils in zwei Formen – mit und ohne PAK-Summe und Summen-Grenzwert. Die Auflösung der Darstellungen wurde zweckentsprechend angepasst. Das Hauptkriterium bilden die Grenzwerte nach GS bzw. ProdSichG (vgl. Diskussion in Kap. 3.3 Bewertung). Neben dem Einzel-PAK-Grenzwert für die Kategorie 2 in Höhe von 0,5 mg/kg ist dies der Summengrenzwert für die 18 PAK nach GS von 10 mg/kg. Ergänzend wird auf den Grenzwert nach EU für 8 karzinogene Einzel-PAK hingewiesen, der der Höhe nach dem Grenzwert für karzinogene Einzel-PAK nach GS der Kategorie 3 entspricht.

Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass für die Praxisproben eine erhöhte Ergebnisunsicherheit besteht. Hintergrund ist, dass die Kontamination lokal stärker schwankt. Die Unterschiede zwischen der Belastung über alle Schichten (gesamt) und der Einzellagen sind daher erhöht. Verstärkt wird der Effekt durch variierende Flächengewichte der Bekleidungslagen (vgl. 4.3 Fehlerdiskussion zu Technikumsproben). Entsprechend wurden zum Teil deutliche Unterschiede zwischen der gemessenen Gesamtbelastung und der aus den Kontamination der Einzellagen berechneten Belastung „gesamt“ festgestellt.

Bei Betrachtung der Einzelergebnisse kontaminierter Einsatzjacken wird deutlich, dass die PAK-Belastung der Proben sowie die PAK-Muster variieren. Bei Mischbeprobung lag das ermittelte Belastungs- bzw. Kontaminationsniveau, bezogen auf Einzelverbindungen, der Einsatzjacken meist unterhalb der Grenzwerte für den Hautkontakt. Doch zeigte sich bereits hier eine enorme Spannbreite im Kontaminationsgrad. Für Einzelpunkte bzw. –bereiche der PSA ist daher von höheren Kontaminationsgraden auszugehen. Grenzwertüberschreitungen wurden nur für die Außen- und die Membranlage nachgewiesen.

Die Hotspotanalysen zur Abschätzung der Größenordnung der Ergebnisschwankungen erfolgten für die Proben **P2**, **P4** und **P7** für ausgewählte Bereiche vergleichend zu den Analysen von Mischproben. Die meisten Werte lagen zwischen dem 2-5-fachen des Ergebnisses der Mischbeprobung.

Die untersuchten Einsatzjacken aus der Innenbrandbekämpfung waren überwiegend visuell nur gering durch Rußanhaftungen kontaminiert, was auf eher kleine Einsatzlagen schließen lässt. Lediglich die Jacke **P8**, die von einem ausgedehnten Wohnungsbrand in einem ausgebauten Dachgeschoss stammt, wies stärkere Rußanhaftungen auf. Es kann von einer bereichsweisen Überschreitung der Grenzwerte der Kategorie 2 sowie vereinzelt der Kategorie 3 bezüglich der Außenlage sowie betrachtet über alle Schichten ausgegangen werden. Bei den Einsatzjacken **P1** bis **P4** sowie **P7** war das Kontaminationsniveau deutlich geringer. Bei einigen der Jacken sind lokale Grenzwertüberschreitungen möglich.

Die Probengruppe **P9** stammen ebenfalls aus der Innenbrandbekämpfung. Die Verweilzeit im Brandraum war verlängert. Insofern ist die höhere Belastung der Proben anteilig mit der besonderen Situation zu erklären. Zudem ist das Ereignis lange zurückliegend und die Lagerungsbedingungen unzureichend, so dass die Proben nicht mit den übrigen Proben aus der Innenbrandbekämpfung vergleichbar sind. Die Verteilung der Kontamination über die verschiedenen PSA-Teile deckt sich mit den Befunden zu anderen Ereignissen. Besonders hohe Kontaminationsgrade wiesen Handschuhe, Helme und Helmtuch auf. Dies erklärt sich aus ihrer exponierten Lage, den höheren Brandrauchtemperaturen und –belastungen bzw. dem direkten Kontakt mit Brandrückständen. Ähnlich verhält es sich mit der Einsatzbekleidung, wenn diese länger den Rauchgasen ausgesetzt ist (vgl. Proben **P5/ P6** aus dem gewerblichen Bereich).

Das Kontaminationsniveau der Proben aus der Innenbrandbekämpfung war meist gering. Die Messergebnisse bestätigten weitgehend den visuellen Eindruck. Die Spannbreite des Kontaminationsniveaus war überraschend groß. Die Kontamination innerer Bekleidungsschichten lag stets weit unter den Grenzwerten. Die Außenbelastung überschritt

hingegen mehrfach Grenzwerte. Das größte Risiko geht von Expositionen nach dem Einsatz aus. Hier hilft die Ablage der PSA unmittelbar nach dem Einsatz (Stichwort Einsatzhygiene).

5.2.1 Gewerblicher Bereich

Deutlich höhere Kontaminationsgrade sind im gewerblichen Bereich bzw. bei besonderer Brandstoffzusammensetzung zu erwarten. Ein Beispiel hierfür sind die Proben der Gruppen **P5** und **P6** – Jacken, Hosen und weitere PSA, von einem Brand in einem kombinierten Gebäude aus Lager-, Garage- und Umkleideräumlichkeiten eines Golfclubs (hoher Plastikanteil, ausgeschäumte Konstruktionsplatten). Bei den untersuchten zwei Einsatzjacken und -hosen wiesen eine der Jacken und beide Hosen starke Grenzwertüberschreitungen auf. Die Kontamination der Jacke erreichte sogar die Grenzwerte nach GS Kategorie 3 bzw. EU. Auffällig ist zudem das besondere PAK-Spektrum, mit erhöhtem Anteil vielkerniger PAK, welches auf erhöhte Verbrennungstemperaturen schließen lässt. Diese wiederum haben ihre Ursache im hohen Plastikanteil am Brandstoffgemisch. Ergänzend durchgeführte Analysen bei sonstigen PSA-Teilen, wie Feuerwehrhandschuhen und einem Helm, ergaben ebenfalls deutliche Grenzwertüberschreitungen. Die Flächenbelastung des Feuerwehrhelms lag bei erheblichen $0,24 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ und war leicht abwaschbar.

Das Kontaminationsrisiko ist im gewerblichen Bereich als erhöht einzustufen. Entscheidend sind jedoch Brandstoffzusammensetzung und Brandlast.

5.2.2 Holzbefeuerte BÜA

Die Untersuchung einer Jacke und Hose aus der Heißausbildung in einer holzbefeuerten BÜA (X-Proben) ergab ebenfalls PAK-Kontaminationen oberhalb der Grenzwerte und dies bereits in der Mischprobe. Lokal bzw. bereichsweise ist von noch stärkeren Überschreitungen auszugehen. Das Kontaminationsniveau lag deutlich über den Belastungen aus der Innenbrandbekämpfung. Untersuchungen von Laitinen et al. und Kükelhahn haben Ähnliches bereits zuvor nachgewiesen [Lai, 2017; Kü, 2018].

Die Belastungen der Einsatzhose waren wesentlich geringer als die der Jacke, die höheren Brandrauchtemperaturen und Schadstoffkonzentrationen ausgesetzt war.

Auffällig ist auch die anteilig außergewöhnlich hohe Belastung der Membran, die auf hohe Einwirktemperaturen des Brandrauches hinweist, welche mit erhöhten Dampfkonzentrationen an PAK einhergehen. Auch eine Akkumulation durch mehrere Durchgänge ist denkbar.

5.2.3 Gewaschene PSA

Die drei erhaltenen Proben gewaschener Einsatzbekleidung erlauben trotz ihrer geringen Anzahl interessante Hinweise auf die Kontamination gewaschener Einsatzbekleidung sowie indirekt der Leistung der Nasswäsche. Allerdings sind direkte Vergleiche nur bedingt möglich, da keine Ausgangsbelastungen bekannt waren, ebenso wie nur bedingte Informationen zur Einsatz- und Waschhistorie.

Bei den Proben **W1** und **W2** handelte es sich um ausgemusterte Einsatzjacken der BF München. Über Einsatzhistorie ist nichts bekannt. Das PAK-Muster spricht für ein länger zurückliegendes Einsatzgeschehen. Zudem kann eine regelmäßige Aufbereitung unterstellt werden. Während die Jacke **W1** bereits leicht verschlissen und offensichtlich länger getragen wurde, machte die Jacke **W2** einen nahezu neuwertigen Eindruck. Die Inaugenscheinnahme der Membran war aufgrund fehlender Revisionsöffnungen nicht möglich.

Auffällig ist bei beiden Jacken, dass ihre PAK-Belastung hinsichtlich höher siedender PAK-Verbindungen ansteigt. Da diese im Einsatzgeschehen in wesentlich geringerem Maße gebildet werden als die kleineren PAK, ist anzunehmen, dass sich das Muster erst nachträglich ausgebildet hat. Zu erklären ist der Befund mit der geringeren Zugänglichkeit der hochsiedenden PAK für die Nasswäsche sowie Abdunstung infolge höherer K_{ow} -Werte und sinkenden Dampfdruckes. Daher ist er ein klares Indiz für ein länger zurückliegendes Einsatzgeschehen. Hauptgrund für diesen Befund ist der besondere Aufbau der Münchner Einsatzbekleidung. Infolge der anlamierten Membran fallen die Kontaminationen von Außenmaterial und Membran in der Betrachtung zusammen. Die Membran als Haupt-PAK-Depot zählt bei der Bewertung der Kontamination des Außenmaterials mit. Da Kontaminationen der Membran bei Kontakt mit dem Oberstoff nicht übertragen werden können, besteht kein erhöhtes Risiko bei Hautkontakt, auch wenn aus rechtlicher Sicht eine Grenzwertüberschreitung vorliegt.

Die Probe **W3** hat eine extreme Nutzungshistorie. Diese begann etwa 2 Jahre vor der Untersuchung mit einer mehrtägigen Realbrand-Ausbildung bei der Firma BUILD in Boxmeer/NL. Die Ausbildung beinhaltete Löschübungen an realen Brandobjekten im Freien einschließlich Lachen- und Tankbränden sowie in einer holzbefeuerten BÜA. Nach Abschluss erfolgte eine professionelle Nassreinigung. In den folgenden 1 1/2 Jahren absolvierte die Einsatzkraft einer FF sieben Wärmegewöhnungs- und Löschtrainings in gasbefeuerten BÜA. Erst nach dem letzten Training erfolgte eine erneute Wäsche. Aufgeschreckt durch die aktuelle Diskussion um das erhöhte Krebsrisiko bei Feuerwehrleuten führte der leichte Brandgeruch und die stärker bräunlich verfärbte Membran zur Einschaltung des regional verantwortlichen

Arbeitsschutzvertreter und Untersuchung der PSA am IBK. Diese ergaben eine erhöhte Kontamination der gewaschenen PSA. Es sind punktuelle Überschreitungen von Grenzwerten nach GS der Kategorie 2 für Einzel-PAK nachgewiesen für die Außenschicht und die Membranen, allerdings nicht für die hautnahe Innenschicht. Wie bei den Proben **W1** und **W2** zeigte sich ein Anstieg der Kontamination in Richtung hochsiedender PAK. Zudem weist die Membran eine starke bräunliche Verfärbung auf (Membran als Schadstoffdepot, vgl. Abbildung 38). Dies sind Hinweise für eine unzureichende Reinigungswirkung der Nasswäsche. Zumindest zeigen sie, dass die PSA zeitnah nach jedem Einsatz aufzubereiten ist, um Grenzwertüberschreitungen für den Hautkontakt zu vermeiden.



Abbildung 38 Membran Innengewebe von Probe W3, Fotos: IBK

Bei der Probe **W4** handelt es sich um eine Einsatzjacke der BF Antwerpen, die im Auftrag der Firma Decontex, einem PSA-Aufbereiter aus Belgien, nach der Nasswäsche untersucht wurde. Die Ergebnisse wurden auf der Florian-Messe als Teil einer Präsentation vorgestellt [Pfeuffer, 2018]. Weder über den letzten Einsatz, die Beladung der Waschmaschine, noch über die Art der Beprobung ist Näheres bekannt. Unterstellt man eine Hotspot-Beprobung, relativiert sich die Belastung zwar, doch läge das Niveau immer noch weit über den Kontaminationsgraden der hier zufällig untersuchten gewaschenen Einsatzjacken. Da unbekannt ist, nach welchem Verfahren diese Werte ermittelt wurden, muss die Vergleichbarkeit hinsichtlich der Absolutkonzentrationen kritisch betrachtet werden. Trotz anderer PAK-Profile zeigen sich aber die gleichen Trends wie bei den bisher betrachteten Technikums- und Praxisproben.

Das Kontaminationsniveau gewaschener PSA kann insofern enorm sein, viel höher als die in dieser Arbeit zufälligen untersuchten drei Proben erwarten lassen. Auch wenn die Belastungen der Jacke **W4** wahrscheinlich nicht aus der Brandbekämpfung in Wohnräumen resultieren, setzen sie zumindest ein Achtungszeichen.

5.3 Wasch- und Dekontaminationsverfahren

Das bei gewaschenen Einsatzjacken im Einzelfall hohe Kontaminationsniveau dokumentiert die unbefriedigende Reinigungswirkung der Nasswäsche, die im Verfahrensprinzip begründet ist. Der Nasswäsche ist nur der Teil der Kontamination zugänglich, der partikelgebunden und an der Oberfläche adsorbiert vorliegt. Schadstoffe in der Tiefe der Materialien sind der Nasswäsche nur über den Umweg ihrer Diffusion zur Oberfläche zugänglich [Schuppe, 1998]. Der Reinigungsgrad ist wesentlich von der Polarität der Kontamination abhängig. Besonders aufwändig ist dies bei den vergleichsweise kompakten Membranen (sowie Silicon-Dots), wohingegen die Fasern der Gewebe und Vliese aufgrund des geringeren durchschnittlichen Weges bis zur Oberfläche eine bessere Zugänglichkeit für die Nasswäsche erwarten lassen.

Die Entfernung der Schadstoffe aus der Tiefe der Polymermaterialien ist ein Zeitprozess. Ganz besonders gilt dies für hochsiedende Stoffe, wie den PAK. Zudem wirken Verteilungsgleichgewichte zwischen den Polymerphasen und dem Waschwasser, die trotz der Verwendung von Tensiden für unpolare Stoffe, wie den PAK, bei der Nasswäsche auf Seiten der Polymermatrix liegen. Die Reinigungsleistung der Nasswäsche ist nicht nur stark von der Beladung der Waschmaschinen abhängig, sondern auch von der Zahl der Waschzyklen.

Dies belegen die Analysenergebnisse zu gewaschener PSA im Abschnitt zuvor v.a. jedoch Untersuchungen von Laitinen et al. Bei hoher Ausgangsbelastung können sogar PAK-Kontaminationen über den Grenzwerten zurückbleiben. Der PSA sieht man dies äußerlich nicht an. Farbveränderungen der Membranen sind zwar ein Hinweis auf ein erhöhtes Kontaminationsniveau, doch ist ungeklärt, ob erhöhte Kontaminationsgrade nicht auch bei fehlender oder geringer Verfärbung der Membran vorliegen können. Möglicherweise sind Verfärbungen vor allem ein Ergebnis erhöhter Temperatur-Exposition bei der Brandbekämpfung. In jedem Fall sind sie ein Alarmzeichen. Ähnlich verhält es sich bei Brandgeruch nach der Wäsche.

Laitinen et al. haben die Einflüsse auf die Reinigungs- bzw. Dekontaminationsleistung der Nasswäsche ausführlich untersucht [Laitinen, 2017; Laitinen, 2018; IFV, 2018]. Die Reinigungsleistung gemessen über alle Schichten zeigte sich stark abhängig von der Anzahl gemeinsam gewaschener PSA. So wurde im Fall der gemeinsamen Wäsche von zwei Einsatzjacken je nach Ausgangsbelastung eine Dekontamination von im Mittel 27 % bis 40 %, bei drei Jacken jedoch nur von 7 % und 15 % (betrachtet über alle Schichten) erreicht. Zudem stieg die Dekontaminationsleistung mit der Ausgangsbelastung. Die PAK-Kontamination innerer Schichten stieg bei der Wäsche hingegen stets an. Ursache ist die Kreuzkontamination zwischen unterschiedlich stark belasteten Bereichen und Lagen. Diese ist auch bei geschlossener Bekleidung hoch, da sie v.a. über das Waschwasser erfolgt. Die großen

Vertrauensbereiche resultieren wesentlich aus dem Umstand, dass die Vorher-/ Nachher-Beprobung an verschiedenen Stellen der PSA erfolgte bzw. erfolgen musste. Zudem wird angeführt, dass die Zeitspanne zwischen Kontamination und Wäsche erheblich war.

In früheren Untersuchungen in Finnland mit PSA aus holzbefeuerten BÜA hatte Laitinen eine deutlich bessere Reinigungsleistung für die Nasswäsche ermittelt (bis 80 %), allerdings für *einzel*n gewaschene PSA sowie bei geringer Maschinenbeladung. Zudem wurde damals nur die äußere Lage betrachtet, d.h. letztlich vor allem die Entfernung rußgebundener PAK.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand empfehlen sich daher folgende Mindestmaßnahmen:

- einsatznahe Wäsche, ggf. Grobreinigung der PSA vor Ort,
- Ablage und Verpackung noch am Einsatzort, zur Vermeidung von Kreuzkontaminationen durch Kontakt PSA zuvor schließen, Wäschebeutel zur Vermeidung von Kontakten während des Transportes sowie beim Handling,
- Begleit- bzw. Anhängkarte nutzen, um Wäscherei über Einsatzszenario und den vermuteten Kontaminationsgrad zu informieren,
- geringere Beladung der Waschmaschinen, stärker belastete Bekleidung getrennt waschen, Zyklenzahl dem Kontaminationsgrad anpassen.

Da die Reinigungswirkung der Nasswäsche jedoch letztlich begrenzt ist und die verbliebenen Kontaminationen je nach Ausgangsbelastung im Einzelfall sogar über den Grenzwerten für den Hautkontakt liegen können, ist ein wirksameres Reinigungsverfahren zumindest für stärker kontaminierte Einsatzbekleidung unabdingbar. Dies gilt umso mehr, als selbst bei Einhaltung von Grenzwerten Risiken bei (Langzeit)hautkontakt mit unzureichend gereinigter PSA sowie infolge schleichender Kreuzkontamination des gesamten Arbeits- und Lebensumfeldes bestehen.

Berichte, nach denen sich gute Ergebnisse unter Einsatz von **Vollwaschmitteln und 60 °C** in einer Haushaltswaschmaschine erzielen lassen, sind nachvollziehbar. Die Nutzung von Vollwaschmitteln schließen die Hersteller allerdings aus. Optische Aufheller und Oxidationsmittel schädigen die PSA. Darüber hinaus darf die PSA in aller Regel nur milder mechanischer Beanspruchung beim Waschen ausgesetzt werden. Die **Ozon-Behandlung** [Laitinen, 2018] ist aus Sicht des Autors ebenfalls keine geeignete Alternative.

Die Lösung liegt in der Verwendung extraktiver Verfahren, d.h. Waschverfahren unter Einsatz von Lösungsmitteln. Die Verfahren werden auch als **Trockenwäsche** bezeichnet, da die PSA die Waschmaschinen nach Entgasung trocken verlässt.

Eine bekannte Verfahrensvariante stellt die klassische **Chemische Reinigung** unter Einsatz von Organochlorverbindungen (heute Tetrachlorethen) und Kohlenwasserstoff-Gemischen dar. Sie ist für die heutige PSA oftmals sogar zugelassen.

Aus Umweltgesichtspunkten wird die Wäsche mit druckverflüssigtem Kohlendioxid, CO_2 (flüssig) favorisiert. Es handelt sich auch hier um ein etabliertes Verfahren. Es gibt weltweit Anbieter entsprechender Maschinen [z. B. Tersus_2020, Miele_2020]. Vorreiter in der Anwendung des Verfahrens zur Reinigung von Einsatzbekleidung der Feuerwehr ist in Europa die Firma Decontext, mit der auch einige deutsche PSA-Aufbereiter zusammenarbeiten [Decontext, 2020]. Mit der Firma Texport bietet diesen Service inzwischen auch ein am deutschen Markt operierender PSA-Anbieter [Texport, 2020] an.

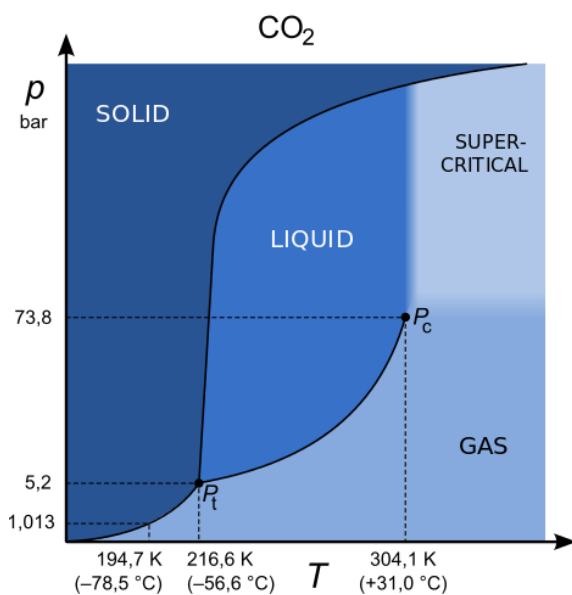


Abbildung 39 Phasendiagramm von Kohlendioxid, Prinzip-Darstellung; Graphik aus Wikipedia: Überkritisches Kohlenstoffdioxid, Bild: gemeinfrei

Die Reinigungswirkung der Trockenwäsche hat Grenzen. Ganz besonders gilt dies für die Wäsche mit druckverflüssigtem Kohlendioxid. Nach Betreiberangaben muss stärker kontaminierte PSA in der Regel mehrere Zyklen durchlaufen, um ein akzeptables Restbelastungsniveau zu garantieren. Da keine analytische Erfolgskontrolle stattfindet, richtet sich die gewählte Zyklenzahl neben der visuellen Belastungseinschätzung nach den Angaben zur Einsatzcharakteristik und Erfahrungswerten. Da der Trockenwäsche erdige Verunreinigungen, Schweiß und andere Flecken kaum bzw. schlechter zugänglich sind, ist die PSA ergänzend zuvor klassisch nass aufzubereiten. Zum Abschluss jeder Aufbereitung muss zudem die Imprägnierung erneuert werden, da diese bei der extraktiven Aufbereitung ebenfalls entfernt wird. Aus Umwelt- und Kostensicht empfiehlt sich die Trockenwäsche daher v.a. nach Brandeinsätzen mit anzunehmender erheblicher Kontamination. Die einsatzbezogene

Tiefenreinigung kann durch eine jährliche turnusmäßige CO₂-Wäsche der Einsatzbekleidung ergänzt werden.

Eine Verfahrensvariante stellt die Wäsche mit überkritischem Kohlenstoffdioxid dar. Da das Kohlendioxid hier bei der Dichte einer Flüssigkeit die Viskosität eines Gases annimmt, ist seine Fluidität und Extraktionswirkung vergleichbar der klassischer organischer Lösungsmittel, d.h. höher als von druckverflüssigtem Kohlendioxid. In der chemischen Analytik ersetzt das Verfahren heute vielfach organische Lösungsmittel zur Extraktion (vgl. SFE). Allerdings ist der anlagentechnische Aufwand deutlich höher, so dass sich die Verwendung überkritischen Kohlendioxids in der Textilreinigung nicht durchgesetzt hat.

6. Résumé

Die für verschiedene Länder in epidemiologischen Studien nachgewiesene erhöhte Gefährdung von Feuerwehrleuten, an Krebs zu erkranken, hat international zu intensiver Ursachenforschung geführt. Als Leitsubstanzen für die Karzinogenität von Brandrauch wurden die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) identifiziert. Als Hochsieder ist ihr Dampfdruck vergleichsweise gering, doch liegen sie unter den Bedingungen der Brandbekämpfung zu einem erheblichen Teil in Dampfphase vor. Da sie gut hautaufnahmefähig sind, können Kontaminationen der Haut über die Dampfphase, als auch durch Kontakt mit kontaminierten Materialien, zu einer direkten Inkorporation führen. Zudem besteht eine erhebliche Gefährdung durch Kontaminationsverschleppungen. Darüber hinaus besteht die Gefahr einer schleichenden Kontamination des Arbeits- und Lebensumfeldes über die Dampfphase.

In der Literatur wird im Zusammenhang mit Einsätzen zur Brandbekämpfung regelmäßig von einer Kontamination der Haut sowie innerer Schichten der Einsatzbekleidung mit PAK berichtet. Die Untersuchung von Praxisproben im Projekt bestätigten dies. Ungeklärt war, ob die PAK auch den Bekleidungs Aufbau zu durchdringen vermögen. Diese Frage ist für die Gewichtung der potenziellen Aufnahmewege und Ableitung von Schutzmaßnahmen von zentraler Bedeutung und stand daher im Zentrum des Forschungsprojektes.

Die Untersuchungen hierzu erfolgten in weiten Teilen im Technikum. Es wurden Bekleidungsmaterialien verschiedener Hersteller mit allen am Markt vertretenen Membranarten und Obermaterialien unter vergleichbaren Bedingungen dem Brandrauchstrom ausgesetzt und die resultierende PAK-Kontamination lagenweise ermittelt. Die Analysenergebnisse zeigen, dass sämtliche Materialaufbauten einen hohen Schutz gegen das Durchdringen bzw. die Permeation karzinogener PAK durch den Bekleidungs Aufbau bieten.

Die aus den Kontaminationshöhen der Bekleidungslagen berechneten Behelfs-Schutzfaktoren liegen deutlich über 100. Die in Proben aus der Praxis immer wieder nachgewiesenen hohen Kontaminationen innerer Bekleidungslagen mit PAK müssen daher auf anderem Wege entstanden sein.

Bekannte Eintrittspforten sind die Übergänge zwischen den Teilen der PSA sowie das „Pumpen“ der Einsatzbekleidung bei Bewegung, auch als Folge mangelnder Passgenauigkeit und Steifheit der Materialien (vgl. FAST-Test). Hier gibt es unterschiedlichste Optimierungsmöglichkeiten, wie z. B. die Verwendung einer Overallform. Es sollten nur noch PSA-Teile mit Membran eingesetzt werden.

Zur Einordnung der Ergebnisse und Klärung der Kontaminationswege wurden im Forschungsprojekt ergänzend eine beschränkte Anzahl an Einsatzjacken und -hosen sowie weitere PSA-Teile aus der Einsatzpraxis untersucht. Der Kontaminationsgrad der Proben aus der Brandbekämpfung in Wohnungen war nach visuellem Eindruck überwiegend gering. Überschreitungen von Grenzwerten wurden nur für die äußere und mittlere PSA-Lage nachgewiesen. Lediglich eine Probe entsprach äußerlich dem ursprünglichen Erwartungsbild. Die Messergebnisse bestätigten einen deutlich erhöhten Kontaminationsgrad. PAK-Kontaminationen über den Grenzwerten für den Hautkontakt sind insofern vor allem bei ausgedehnten Wohnungsbränden bzw. intensiven Einsatzhandlungen zu erwarten. Zudem ist mit erheblichen lokalen Schwankungen bzw. Kontaminationsspitzen zu rechnen. Das Kontaminationsniveau von Proben aus BÜA mit festen Brandstoffen zeigte sich vergleichbar dem der Brandbekämpfung bei ausgedehnten Wohnungsbränden. Bei den untersuchten Proben aus dem gewerblichen Bereich war das Kontaminationsniveau hingegen nochmals deutlich erhöht.

Die für PSA aus der Brandbekämpfung bei Wohnungsbränden nachgewiesenen meist geringen bzw. mäßigen Kontaminationen innerer Schichten bestätigen die Ergebnisse der Untersuchungen im Technikum. Das Risiko einer Kontamination der Haut mit karzinogenen PAK während des Einsatzes wird daher als gering angesehen. Wichtiger ist die Nach-Einsatz-Exposition, zumal hier der Faktor Zeit eine Rolle spielt. Insofern sollte die Einsatzbekleidung bereits Vorort gewechselt und einer adäquaten Reinigung zugeführt werden. Darüber hinaus ist eine strikte Schwarz-Weiß-Trennung in allen Arbeitsbereichen durchzusetzen.

Dies gilt umso mehr, als selbst bei der im Projekt in geringer Zahl untersuchten gewaschenen Einsatzbekleidung, teilweise Grenzwertüberschreitungen festgestellt wurden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen zur Effizienz der Nasswäsche von Laitinen et al. [Laitinen, 2018]. Danach besteht eine direkte Abhängigkeit der Reinigungsleistung von der Ausgangsbelastung, der Beladung sowie der Zahl der Reinigungszyklen. Zudem ist die Wäsche Quelle von

Kreuzkontaminationen zwischen stark und weniger stark kontaminierter PSA sowie Bekleidungsschichten. Die Nasswäsche erfüllt insofern die Anforderungen nicht mit ausreichender Sicherheit.

Stand der Technik zur PSA-Reinigung bzw. -Dekontamination nach Einsätzen zur Brandbekämpfung sind extraktive Verfahren, wie die Chemische Reinigung und die Wäsche mit druckverflüssigtem Kohlendioxid. Diese Verfahren sollten zumindest bei stärkerer PSA-Kontamination genutzt werden. Zu berücksichtigen ist bei den Entscheidungen, dass selbst bei Einhaltung von Grenzwerten Krebserkrankungen nicht völlig ausgeschlossen sind.

Zudem enthält Brandrauch weitere Karzinogene. In den Versuchen im Technikum zeigte sich bereits die Schutzwirkung der Einsatzbekleidung vor flüchtigeren PAK als begrenzt. PAK dieser Gruppe haben bis auf Naphthalin aus karzinogener Sicht keine Bedeutung. Die Grenzwerte für den Hautkontakt für Naphthalin sind sehr hoch, die EU-VO berücksichtigt es nicht einmal. Zugleich bedeutet der Befund jedoch, dass der Schutzgrad für PCDD/ PCDF, PCB u.a. Schadstoffen noch geringer ist und für flüchtige Stoffe wie Benzol u. Ä. praktisch keine Barriere besteht. Abschätzungen in einem Forschungsprojekt im Auftrag der niederländischen Feuerwehren sehen, unter Berücksichtigung des üblichen Konzentrationsniveaus, im Brandrauch für diese hochsiedenden Karzinogene aus toxikologischer Sicht dennoch kein Risiko einer relevanten Hautaufnahme während des Einsatzes. Für flüchtige, gut hautresorptive Stoffe, wie beispielsweise Benzol, wird dies als möglich eingeräumt [IFV, 2018]. Untersuchungen von Fent et al. bestätigen dies [Fent, 2019].

Zur Minderung der Belastung der Einsatzkräfte der Feuerwehr mit Karzinogenen aus der Brandbekämpfung ist ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich. Wechselbekleidung, Schwarz-Weiß-Trennung sowie eine Dekontamination der PSA sind wichtige Elemente. Genauso bedeutsam sind einsatztaktische Maßnahmen, wie eine wirksame Kühlung der Brandräume vor dem Betreten, eine frühzeitige Brandraumbelüftung, ein (unterstützender) Außenangriff sowie nicht zuletzt ein effizienter Löschangriff.

Literatur

- AfPS GS, 2014: Ausschuss für Produktsicherheit (AfPS), AfPS GS 2014:01, Richtlinie gemäß § 21 Abs. 1 Nr. 3 ProdSG, spezifizierte Grenzwerte und Analysenverfahren für die Prüfung und Bewertung von Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei der Zuerkennung des GS-Zeichens, 4. August 2014
- Alexander, 2016: Alexander B.M., Baxter C.S., Flame-retardant contamination of firefighter personal protective clothing - A potential health risk for firefighters, J. Occup. Environ. Hyg., 2016 Sep;13(9): 148-55
- D'Anna, 2007: D'Anna, A., Particle inception and growth: experimental evidence and a modelling attempt, aus: Bockhorn, 2007, S. 298-320
- ArbSchG, 2019: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit – Arbeitsschutzgesetz, zuletzt geändert am 20. November 2019
- Ballschmiter, 2007: Ballschmiter, K., Bacher, R.: Dioxine. Verlag Chemie (VCH), Weinheim 1996, ISBN 3-527-28768-X
- Baxter, 2014: Baxter, C.St., Hoffman, J.D., Knipp, M.J., Reponen, T., Haynes. E.N., Exposure of Firefighters to Particulates and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, J Occup Environ Hyg. 2014; 11(7): D85–D91
- Bockhorn, 2007: Bockhorn, H., Danna, A., Sarofim, A.F., Wang, H., Combustion Generated Fine Carbonaceous Particles, in: Proceedings of an International Workshop Held in Villa Orlandi, Anacapri, May 13-16, 2007, KIT Scientific Publishing, 720 S., 2009
- Braun, 2016: Braun, Chris, Entwicklung und Festlegung eines Bemessungsbrandes auf Basis einer neuartigen Mischbrandkrippe in Vorbereitung auf Brandversuche mit Druckluftschäumen, Masterarbeit, Uni Magdeburg sowie BAM, 2016
- Daniels, 2014: Daniels, R.D., Kubale, T.L., Yiin, J.H., Dahm, M.M., Hales, T.R., Baris, D., Zahm, S.H., Beaumont, J.J., Waters, K.M. and Pinkerton, L.E., Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950-2009), Occup. Environ. Med., 2014, 71(6): 388-397.
- Decontext, 2020: Firma Decontext, Brügge, PSA-Aufbereiter einschließlich Wäsche mit druckverflüssigtem Kohlendioxid, <https://www.decontext.com/en/decontext/deco2fire/12>
- DFG, 2008: Poyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), DFG, Loseblatt-Sammlg, Verlag Chemie, Weinheim, 45. Lfrg. 2008
- DGUV_PAK: Forschungsprojekte des DGUV im Zusammenhang mit der PAK-Belastung von Feuerwehreinsatzkräften bei der Brandbekämpfung, u.a. Expositionsabschätzung der Haut im Einsatz sowie ergänzendes Biomonitoring zur PAK-Aufnahme, DGUV, 2017-ff., vgl. Vorträge anlässlich Florian Messe, Dresden, 2018 von Pelzl, T. sowie Zöllner, S.
- DGUV_ZED: Zentrale Expositionsdatenbank, Datenbank zur zentralen Erfassung gegenüber krebserzeugenden Stoffen exponierter Beschäftigter, DGUV, abgerufen 14.12.2020, [https://www.dguv.de/ifa/gestis/zentrale-expositionsdatenbank-\(zed\)/index.jsp](https://www.dguv.de/ifa/gestis/zentrale-expositionsdatenbank-(zed)/index.jsp)
- DIN EN 3-1, 2007: DIN EN 3-1:1996-07, Tragbare Feuerlöscher - Teil 1: Benennung, Funktionsdauer, Prüfobjekte der Brandklassen A und B, Anhang A; Deutsche Fassung EN 3-1:1996, Ausgabe 2007
- Dräger, 2015: Dräger, Schutzfaktoren für die Auswahl von Atemschutzgeräten, Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck, 2015, <https://www.draeger.com/Library/Content/schutzfaktoren-k16-999-de.pdf>

ECHA, 2011: RAC adopts 13 scientific opinions on the harmonised classification and labelling of industrial chemicals and pesticide active substances, European Chemicals Agency (2011), https://echa.europa.eu/en/web/guest/view-article/-/journal_content/4709c09f-6dde-4aab-8d8c-4991b7622f45

EG, 1907/2006: 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

EG, 1272/2013: Verordnung (EG) Nr. 1272/2013 zur Änderung von Anhang 17 (Eintrag Nr. 50) der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) hinsichtlich PAK. Geltend für Erzeugnisse, die ab 27.12.2015 in Verkehr gebracht werden.

EG, 1513/2018: Verordnung (EG) Nr. 1513/2018 vom 10. Oktober 2018 zur Änderung des Anhangs XVII der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) hinsichtlich bestimmter als karzinogen, keimzellmutagen oder reproduktionstoxisch (CMR) eingestufte Stoffe der Kategorie 1A oder 1B

EG, 130/2019: Richtlinie (EG) 2019/130 vom 16. Januar 2019 zur Änderung der Richtlinie 2004/37/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Karzinogene oder Mutagene bei der Arbeit – Erweiterung der Liste auf 22 Stoffe – u.a. Aufnahme von Dieselmotoremissionen (Luftgrenzwert) sowie PAK-haltige Gemische (Hautkontakt)

Eijnde, 2018: Eijnde, W. van den, Heus, R., Falcone, D., Peppelman, M., Erp, P. van, Skin barrier impairment due to the occlusive effect of firefighter clothing, University Nijmegen Medical Centre, Department of Dermatology, 2018, Teil des Forschungsprojektes "Blootstelling rook" im Auftrag der Niederländischen Feuerwehren, vgl. IFV, 2018

Engler, 1990: Engler, A., Pieler, J., Einbrodt, H.J., Gefährdungsabschätzung von Brandgasen und Brandrückständen unter humantoxikologischen Gesichtspunkten, Wissenschaft und Umwelt, 4/1990, 191-204

Fabian, 2014: Thomas Z. Fabian, Jacob L. Borgerson, Pravinray D. Gandhi, C. Stuart Baxter, Clara Sue Ross, James E. Lockett, James M. Dalton, Characterization of Firefighter Smoke Exposure, Fire Technology, July 2014, Volume 50, Issue 4, pp 993–1019 | Cite as

Fent, 2013: Fent, K. W., Eisenberg, Evans, D., Sammons, D., Shirley, R., Striley, S., Snawder, J., Mueller, Ch., Kochenderfer, V., Pleil, J., Stiegel, M., Horn, G.P., Evaluation of Dermal Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fire Fight, NIOSH, Report No. 2010-0156-3196 Summary, December 2013

Fent, 2014: Fent K.W., Eisenberg J., Snawder J., Sammons D., Pleil J.D., Stiegel M.A., Mueller C., Horn G.P., Dalton J., Systemic exposure to PAHs and benzene in firefighters suppressing controlled structure fires. Ann. Occup. Hyg., 2014 Aug;58(7):830-45

Fent, 2015: K. Fent, G. Horn, K. Kirk, M. Logan: Off-Gassing Contaminants from Firefighters', Personal Protective Equipment. Fire Engineering, 2015

Fent, 2017: K.W. Fent, B. Alexander, J. Roberts, Sh. Robertson, Ch. Toennis, D. Sammons, St. Bertke, St. Kerber, D. Smith & G. Horn, Contamination of firefighter personal protective equipment and skin and the effectiveness of decontamination procedures, JouJ Occup. Environ. Hyg, 2017, 14:10, 801-814

Fent, 2019: K.W. Fent, Ch. Toennis, D. Sammons, Sh. Robertson, St. Bertke, Antonia M. Calafat, J.D. Pleil, G. Wallace, St. Kerber, D.L. Smith, G.P. Horn, Firefighters' and instructors absorption of PAHs and benzene during training exercises, u.a. vom NIOSH, International Journal of Hygiene and Environmental Health 222 (2019) 991–1000

Fiedler 1990: Fiedler, H., W. Mücke, O. Hutzinger, 1990: Nitro-PAK aus Verbrennungsmotoren - Bildung, Umweltverhalten und Wirkungen. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Band 67. München

Fromme, 2010: Fromme, H., Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), aus: Praxishandbuch Schadstoffe: Erkennen, Bewerten, Sanieren, Architektenkammer Berlin, 2010, Books on Demand GmbH, ISBN 978-3-8391-7320-6

FwDV500: Feuerwehrdienstvorschrift 500, Einheiten im ABC-Einsatz, Ausgabe 01.2012

GESTIS, 2020: GESTIS, Datenbank mit Informationen zu chemischen Stoffen, Institut für Arbeitsschutz der DGUV, IFA, 2020, <https://gestis.dguv.de/search>

GefStoffV, 2010: Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV), Neufassung 26.11.2010

Glass, 2014: Glass, D.C., Sim, M.R., Pircher, S., Monaco, A.Del, Dimitriadis, Chr., Miosge, J., Australian Firefighters' Health Study, Final Report, Monash University, Melbourne, Australien, Dez. 2014, 175 S.

Glass, 2016: Glass, D.C., Pircher, S., Monaco, A.Del, Hoorn, S.V., Sim, M.R., Mortality and cancer incidence in a cohort of male paid Australian firefighters, Occupational and Environmental Medicine 2016;73:761-771

Greim, 1996: Greim, H., Deml, E. et al., Toxikologie – Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Mediziner, ISBN 3-527-28483-4, VCH, Weinheim, 1996

Grimmer, 1985: Grimmer G., Brune H., Deutsch-Wenzel R., Dettbarn G., Misfeld J., Abel U., Timm J., The contribution of polycyclic aromatic hydrocarbon fractions with different boiling ranges to the carcinogenic impact of emission condensate from coal fired residential furnaces, Cancer Lett 28: 203 – 211, 1985

Guidotti, 2016: Guidotti, T.L. (Editor), Linkopv, I., Keisler, J., Lambert, J.H., Morton, A., Health risks and fair compensation in the fire service, ISBN 978-3-319-36340-0, Springer Verlag, 2016

IARC, 98/2010: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 98: Painting, Firefighting and Shiftwork, IARC Monographs Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans met in Lyon 2.-9. October 2007

IARC_213/2012: Pressemitteilung 213, 12. Juni 2012, Dieselruß ist karzinogen (1), es kann Hautkrebs auslösen und erhöht das Risiko für Blasenkrebs

IRSST, 2018: Überblicksstudie zur epidemiologischen Literatur zu Krebsrisiko bei Feuerwehrleuten, IRSST - Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, März 2018, englisch, Montréal, Québec

IFV, 2018: Forschungsprojekt "Blootstelling rook" im Auftrag der Niederländischen Feuerwehren, Zusammenfassung zur Studie "Blootstelling rook", übersetzt: Rauchexposition, IFV, Instituut Fysieke Veiligheid, Institut für Physikalische Sicherheit, NL, Mai 2018, Teilprojekte: Eijnde, 2018; Laitinen, 2017 und Willems, 2017

Johnson, 1990: Johnson, J.S. und Anderson, K.J., Chemical Protective Clothing, 2 Bd., im Auftrag der American Industrial Hygiene Association, Fairfax, Virginia, 1990

Kales, 2007: Stefanos N. Kales, M.D., M.P.H., Elpidoforos S. Soteriades, M.D., Sc.D., Costas A. Christophi, Ph.D. and David C. Christiani, M.D., M.P.H., Emergency Duties and Deaths from Heart Disease among Firefighters in the United States, N Engl J Med 2007, 356:1207-15

Keir, 2017: J.L.A. Keir, U.S. Akhtar, D.M.J. Matschke, T.L. Kirkham, H.M. Chan, P. Ayotte, P.A. White and J.M. Blais, Elevated Exposures to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Other Organic Mutagens in Ottawa Firefighters Participating in Emergency, On-Shift Fire Suppression, Environ. Sci. Technol., 2017, 51(21), 12745-12755

- Kirk, 2015: Kirk K.M., Logan M.B., Firefighting instructors exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons during live fire training scenarios, J Occup. Environ. Hyg. 2015;12(4): 227-34
- Kükelhahn, 2018: Kükelhahn, N., Schadstoffbelastung der Ausbilder von feststoffbefeuchten Brandübungsanlagen, Bachelor-Arbeit, HAW Hamburg Fakultät Life Sciences, April 2018
- Kohl, 2016: Kohl, K-J, Jahn, E., Kutz, M., Wienecke, F., Entwicklung von Grundlagen für Ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser, Brandschutzforschung der Bundesländer, IMK-Forschungsbericht 186, IdF Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, Jan. 2016
- Laitinen, 2010: Laitinen, J., Mäkelä, M., Mikkola, J., Huttu, I., Fire fighting trainers' exposure to carcinogenic agents in smoke diving simulators, Toxicology Letters 192 (2010) 61–65
- Laitinen, 2012: Laitinen, J., Mäkelä, M., Mikkola, J., Huttu, I., Firefighters' multiple exposure assessments in practice, Toxicology Letters, Volume 213, Issue 1, 13.08.2012, S. 129-133
- Laitinen, 2014: Laitinen J.A., Koponen J., Koikkalainen J., Kiviranta H., Firefighters' exposure to perfluoroalkyl acids and 2-butoxyethanol present in firefighting foams, Toxicol. Lett. 2014 Dec 1;231(2):227-32
- Laitinen, 2017: Laitinen, J., Determination of the fire residues from firefighting garments, IFV-Auftrag 2016-EO-31, Institut Fysieke Veiligheid, IFV, NL als Teil einer mehrgliedrigen Studie "Blootstelling rook" der Niederländischen Feuerwehren), REPORT TYHYG-2017-353079. Helsinki: Finnish Institute of Occupational Health. 2017, vgl. IFV, 2018
- Laitinen, 2018: Laitinen, J., Contamination and decontamination of firefighting garments – Laboratory tests, Finnish Institute of Occupational Health sowie IFV, NL, Präsentation auf internationaler Tagung, Lissabon, Mai 2018
- LAU BW, 1997: Stoffverhalten von Gaswerksspezifischen PAK, LAU Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1997
- LeMasters, 2006: LeMasters G.K., Genaidy A.M., Succop P., Deddens J., Sobeih T., Barrier-Viruet H., Dunning K., Lockey J., Cancer risk among firefighters: a review and meta-analysis of 32 studies. J. Occup. Environ. Med., 2006, 48(11), 1189-1202.
- Miele, 2020: Firma Miele, <https://www.jovoto.com/projects/washful-thinking/ideas/58963>
- Neske, 2014: Neske, M., Experimentelle Untersuchungen und theoretische Modellierung zu den Auswirkungen von Wärmeexposition auf Pressluftatmer, Vollmasken und Lungenautomaten, Promotion, Universität Magdeburg, IdF Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2014
- NIOSH, 2013: Fent, K. W., Eisenberg, Evans, D., Sammons, D., Shirley, R., Striley, S., Snawder, J., Mueller, Ch., Kochenderfer, V., Pleil, J., Stiegel, M., Horn, G.P., NIOSH, Report No. 2010-0156-3196, Dec. 2013
- OekoTex100: Oeko-Tex®-Standard 100, Prüfstandard der OEKO-TEX® Association für Textilien und Lederwaren, Zürich, Edition 03/2017, 31.08.2017, <https://www.oeko-tex.com/de/unsere-standards/standard-100-by-oeko-tex>
- 3D-PAKtex, 2020: Forschungsprojekt 3D-PAKtex, Förderer BMBF, Projektträger VDE/VDI, Projektnehmer u.a. Norafin Industries GmbH, Mildenau, persönliche Information, 2020
- Pelzl, 2018: Pelzl, Tim: Biomonitoring im Feuerwehrdienst, DGUV, Fachbereich Feuerwehren, Hilfeleistungen, Brandschutz, Präsentation, Florian Messe, Dresden, 2019
- Piao, 1999: Piao, Mingjun, Chu, Shaogang, Zheng, Minghui, Xu, Xiaobai, Characterization of the combustion products of Polyethylen, Chemosphere, Vol. 39, No. 9, S. 1497-1512
- Pfeuffer, 2018: Pfeuffer, M., Lösungsansätze aus der Praxis für die Praxis, Vortragsskript, 21. Fachtagung Atemschutz, Florian, Dresden, 2018, hier: Analysenergebnisse der Firma

Decontext, Belgien, zur PAK-Belastung einer Einsatzjacke der Fw Antwerpen, <https://www.lfs.sachsen.de/download/lfs/Tagesordnung21FT.pdf>

ProdSichG, 2015: Gesetz zu Sicherheitsanforderungen von technischen Arbeitsmitteln und Verbraucherprodukten vom 08.11.2011, geändert am 31.8.2015

Purser, 2002: Purser, D.A., Kapitel VI, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2002

Purser, 2016: Purser, D.A., Kapitel 10 „HCN - Physiological effects of acute exposure during fires“, aus Toxicology, Survival and Health of Combustion Products, ISBN 978-1-84973-569-8, Ausgabe 23, Royal Society of Chemistry, 2016

Reuter, 2017: Reuter, J., Einsatzstellenhygiene – Einschätzung der Toxizität und Erstellung eines Konzepts zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppung bei Brandeinsätzen von Feuerwehren, Bachelor-Arbeit, Bergische Universität Wuppertal, 2017

Richter, 2000: Richter, H., Howard, J.B., Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot – a review of chemical reaction pathways, Progress in energy and combustion science 26 (2000) 565-608

Rooj, van, 2005, van Rooij, J.G.M., van Lieshout, E., Bodelier-Bade, M.M., Jongeneelen, J., Toxicological profile of PAH, Scand J Work Environ Health 1993;19(3):200-207

Rosotti, 1993: Rossotti, H., Feuer, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1993

RTI_FAST, 2015: RTI-Projekt-Nr. 0212534.112, J. Hill und J. O. Stull, RTI International, Bereich International Personnel Protection, 2015: https://www.responderwipes.com/wp-content/uploads/2016/07/RTI_Test_Report-FAST-Jan2015.pdf; Resüme in: <https://www.responderwipes.com/fluorescent-aerosol-screening-test-fast-report/>

Schuppe, 1993: Schuppe, F., Schadgase im Brandfall – Brandstoffspezifik, Relevanz und Bewertungskonzept, im Auftrag des Bundeamtes für Zivilschutz, Bonn, BZS-Projekt 4a92, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1993

Schuppe, 1998: Schuppe, F., Entwicklung von Dekontaminationsmitteln und -verfahren bei Austritt von Industriechemikalien, Abschlussbericht, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, IdF-Bericht 356, Heyrothsberge, 1997, im Auftrag des Bundeamtes für Zivilschutz, Bonn, Projekt 3/91/93, Zivilschutzforschung, gekürzt: Neue Folge Bd. 40, 1998

Someya, 1993: aus: Someya, T. (Hrsg.), Advanced Combustion Science, capture 5: Soot Formation Fundamentals, M. Ikegami (Hrsg.), Springer-Verlag, Tokyo, 1993

Tersus 2020: <https://domglover.com/tersus-solutions-and-the-liquid-co2-washing-machine/>

Texport, 2020: Firma Texport, Salzburg, Hersteller von Feuerwehreinsatzbekleidung, einschließlich Wäsche mit druckverflüssigten Kohlendioxid, persönliche Information, www.texport.at

USEPA_PAK, 1984: US Environmental Protection Agency, Health effects assessment for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), EPA 549/1-86-013, 1984

vds, 2357: Verband der Sachversicherer, vds, Richtlinien zur Brandschadensanierung, vds 2357, Ausgabe 2014-06

vfdb, 10/03: Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes, vfdb, Richtlinie, Schadgase bei Bränden

vfdb, MB/2014: vfdb-Merkblatt, Empfehlung für den Feuerwehreinsatz zur Einsatzhygiene bei Bränden, vfdb-Referat 10, März 2014

Wey, 1996: Wey M-Y., Chao C-Y., Yu L-J. (1996): The influence of heavy metals on PAH formation during incineration, Toxicol. Environ. Chem. 56, 35-45.

Wichmann, 1995: Wichmann H., Lorenz W., Bahadir M., Release of PCDD/F and PAH during vehicles fires in traffic tunnels, Chemosphere 31, 2755-2766

Wiki, 2020: Wikipedia-Recherchen in 2020: Dioxine, PCB, PFOS u.a.

Willems, 2017: Willems, J., Literatuur- en modelstudie naar opnameroutes van toxische stoffen in rook door brand. PreventPartner, Teil der mehrgliedrigen Studie "Blootstelling rook" der Niederländischen Feuerwehren, vgl. IFV, 2018

Wingfors, 2018: Wingfors, H., Rattfelt Nyholm, J., Magnusson, R. & Hammar Wijkmark, C., Impact of Fire Suit Ensembles on Firefighter PAH Exposures as Assessed by Skin Deposition and Urinary Biomarkers, swedish defence research agency, Annals of Work Exposures and Health, 2018(62)2, 221-231

Wobst, 2001: Wobst, Matthias; Brandinduzierter Schwermetalltransport und Einfluss auf die Bildung und das Ausbreitungsverhalten von PAK und PCDD/F, TU Braunschweig, Dissertation, 2001

Wobst, 1999: Wobst M., Wichmann H., Bahadir M. (1999): Surface contamination with PASH, PAH and PCDD/F after fire accidents in private residences, Chemosphere 38, 1685-1691.

Wollkämmerei, 1986: Einsatznachschaue zum Brand der Wollkämmerei leipzig 1986, Mitteldeutscher Rundfunk, Magazin Echt: <https://www.youtube.com/watch?v=XZvAqfBOwY>; <https://www.youtube.com/watch?v=JUBA-iwzChs>

Zelinski, 1995: Zelinski, V., Entstehung und Ausbreitung polybromierter Dibenzo-p-dioxine und -furane und polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe bei Fahrzeugbränden in Verkehrstunnelanlagen, Dissertation TU Braunschweig.

Zöllner, 2018: Zöllner, S., Nachweisführung beim Umgang mit krebserregenden Stoffen – Zentrale Expositionsdatenbank, ZED des DGUV, Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA), Präsentation, Florian Messe, Dresden, 2019

Anlagen Teil 1 - Technikumsproben

Tabelle 8 Messstellen für Containerversuche

| lfd. Nr. | Bez. | Erläuterung |
|-----------------|-------------|--|
| 1 | T01 | TE über Brandquelle, Höhe 2,2 m |
| 2 | T02 | TE über Brandquelle, Höhe 1,8 m |
| 3 | T03 | TE über Brandquelle, Höhe 1,4 m |
| 4 | T04 | TE über Brandquelle, Höhe 1,0 m |
| 5 | T05 | TE Kette in der Ecke Brandraum, Höhe 2,2 m |
| 6 | T06 | TE Kette in der Ecke, Höhe 1,8 m |
| 7 | T07 | TE Kette in der Ecke, Höhe 1,4 m |
| 8 | T08 | TE Kette in der Ecke, Höhe 1,0 m |
| 9 | T09 | TE Kette in der Ecke, Höhe 0,6 m |
| 10 | T10 | TE Kette in der Ecke, Höhe 0,2 m |
| 11 | T11 | TE Durchgangstür Höhe 1,9 m |
| 12 | T12 | TE Durchgangstür Höhe 1,5 m |
| 13 | T13 | TE Durchgangstür Höhe 1,1 m |
| 14 | T14 | TE Durchgangstür Höhe 0,9 m |
| 15 | T15 | TE Durchgangstür Höhe 0,7 m |
| 16 | T16 | TE Durchgangstür Höhe 0,3 m |
| 17 | T17 | TE Abgasrohr |
| 18 | T18 | TE unter Esse, 2950 mm über Boden |
| 19 | T19 | TE unter Esse, 2800 mm über Boden |
| 20 | T20 | TE unter Esse, 2600 mm über Boden |
| 21 | T21 | TE unter Esse, 2400 mm über Boden |
| 22 | T22 | TE unter Esse, 2200 mm über Boden |
| 23 | T23 | TE unter Esse, 2000 mm über Boden |
| 24 | T24 | TE unter Esse, 1800 mm über Boden |
| 25 | T25 | TE unter Esse, 1600 mm über Boden |
| 26 | T26 | TE unter Esse, 1400 mm über Boden |
| 27 | T27 | TE unter Esse, 1200 mm über Boden |
| 28 | T28 | TE unter Esse, 1000 mm über Boden |
| 29 | T29 | TE unter Esse, 800 mm über Boden |
| 30 | T30 | TE unter Esse, 600 mm über Boden |
| 31 | T31 | TE direkt neben Holzkrippe, 1400 mm über Boden |
| 32 | T32 | TE direkt neben Holzkrippe, 1800 mm über Boden |
| 33 | T33 | TE direkt neben Holzkrippe, 2200 mm über Boden |
| 34 | T34 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe, 1400 mm über Boden |
| 35 | T35 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe, 1600 mm über Boden |
| 36 | T36 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe, 1800 mm über Boden |
| 37 | T37 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe, 2000 mm über Boden |

Fortsetzung Tabelle 8 Messstellen für Containerversuche

| Ifd. Nr. | Bez. | Erläuterung |
|-----------------|-------------|--|
| 38 | T38 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe, 2200 mm über Boden |
| 39 | T39 | TE links versetzt zu Holzkrippe, 1400 mm über Boden |
| 40 | T40 | TE links versetzt zu Holzkrippe, 1600 mm über Boden |
| 41 | T41 | TE links versetzt zu Holzkrippe, 1800 mm über Boden |
| 42 | T42 | TE links versetzt zu Holzkrippe, 2000 mm über Boden |
| 43 | T43 | TE links versetzt zu Holzkrippe, 2200 mm über Boden |
| 44 | T44 | TE extra Container, Esse-Seite, oben, 25 cm von Decke |
| 45 | T45 | TE extra Container, Esse-Seite, 50 cm von Decke |
| 46 | T46 | TE extra Container, Esse-Seite, 75 cm von Decke |
| 47 | T47 | TE extra Container, Esse-Seite, 100 cm von Decke |
| 48 | T48 | TE extra Container, Esse-Seite, 125 cm von Decke |
| 49 | T49 | TE extra Container, Esse-Seite, 150 cm von Decke |
| 50 | T50 | TE extra Container, Esse-Seite, unten, 175 cm von Decke |
| 51 | T51 | TE extra Container, Eingangstor-Seite, oben, 25 cm von Decke |
| 52 | T52 | TE extra Container, Eingangstor-Seite, 50 cm von Decke |
| 53 | T53 | TE extra Container, Eingangstor-Seite, 75 cm von Decke |
| 54 | T54 | TE extra Container, Eingangstor-Seite, 100 cm von Decke |
| 55 | T55 | TE extra Container, Eingangstor-Seite, 125 cm von Decke |
| 56 | T56 | TE extra Container, Eingangstor-Seite, 150 cm von Decke |
| 57 | T57 | TE extra Container, Eingangstor-Seite, unten, 175 cm von Decke |
| 58 | T58 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe Richtung Esse, 2200 mm über Boden |
| 59 | T59 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe Richtung Esse, 1800 mm über Boden |
| 60 | T60 | TE rechts versetzt zu Holzkrippe Richtung Esse, 1400 mm über Boden |
| 61 | T61 | TE extra Container, kurz hinter Eingang von Esse, 25 cm von Decke |
| 62 | T62 | TE extra Container, kurz hinter Eingang von Esse, 50 cm von Decke |
| 63 | T63 | TE extra Container, kurz hinter Eingang von Esse, 75 cm von Decke |
| 64 | T64 | TE extra Container, kurz hinter Eingang von Esse, 100 cm von Decke |
| 65 | T65 | TE extra Container, kurz hinter Eingang von Esse, 125 cm von Decke |
| 66 | T66 | TE extra Container, kurz hinter Eingang von Esse, 150 cm von Decke |
| 67 | T67 | TE extra Container, kurz hinter Eingang von Esse, 175 cm von Decke |
| 58 | Waage | Massenverlust Brennstoff (Holz/ Plastik) |
| 59 | Bid01 | Strömung Durchgangstür Höhe 1,9 m, Messbereich 25 Pa |
| 70 | Bid02 | Strömung Durchgangstür Höhe 1,5 m, Messbereich 250 Pa |
| 71 | Bid03 | Strömung Durchgangstür Höhe 1,1 m, Messbereich 250 Pa |
| 72 | Bid04 | Strömung Durchgangstür Höhe 0,9 m, Messbereich 250 Pa |
| 73 | Bid05 | Strömung Durchgangstür Höhe 0,7 m, Messbereich 250 Pa |
| 74 | Bid06 | Strömung Durchgangstür Höhe 0,3 m, Messbereich 25 Pa |
| 75 | Bid07 | Strömung Abgasrohr, Messbereich 250 Pa |

Tabelle 9 Auszug aus Produktkatalog Düsen der Fa. Lechler


[info@lechler.de, https://www.lechler.com/de]



Axial-Vollkegeldüsen
Baureihen 490/491

Patentiert



| Strahl- winkel |  | Bestell-Nr. | | | | | | | | B Ø [mm] | E Ø [mm] | V [l/min] | | | | | | | | Strahldurch- messer D bei p= 2 bar | |
|-------------------|---|-------------|---------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|-----------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|------|--|------------------|
| | | Mat.-Nr. | | Code | | | | | | | | p [bar] | | | | | | | | | |
| | | 1Y | 30 | EN 10226 R 1/8 | EN 10226 R 1/4 | EN 10226 R 3/8 | EN 10226 R 1/2 | G 3/4 A ISO 228 | G 1 A ISO 228 | | | | | | | | | | | | |
| | | Type | Edelstahl 1.4404 | Messing 2.0401 | | | | | | | | | | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 7,0 | 10,0 | H = 200 mm |
| 60° | 490.644 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 2,30 | 2,30 | 2,30 | 3,03 | 4,00 | 4,70 | 5,77 | 6,60 | 7,61 | 220 | 560 | |
| | 490.684 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 2,60 | 2,60 | 2,87 | 3,79 | 5,00 | 5,88 | 7,21 | 8,25 | 9,52 | 220 | 560 | |
| | 490.724 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 2,95 | 2,80 | 3,62 | 4,77 | 6,30 | 7,41 | 9,09 | 10,40 | 11,99 | 220 | 560 | |
| | 490.764 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,25 | 3,25 | 4,59 | 6,06 | 8,00 | 9,41 | 11,54 | 13,20 | 15,22 | 220 | 560 | |
| | 490.804 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,70 | 3,70 | 5,74 | 7,58 | 10,00 | 11,76 | 14,43 | 16,51 | 19,04 | 220 | 560 | |
| | 490.844 | ● | ● | - | - | - | CG | - | - | 4,05 | 4,05 | 7,18 | 9,47 | 12,50 | 14,70 | 18,03 | 20,63 | 23,80 | 220 | 560 | |
| | 490.884 | ● | ● | - | - | - | CG | - | - | 4,65 | 4,65 | 9,19 | 12,13 | 16,00 | 18,82 | 23,08 | 26,41 | 30,46 | 220 | 560 | |
| | 490.924 | ● | ● | - | - | - | - | AK | - | 5,20 | 5,20 | 11,49 | 15,16 | 20,00 | 23,52 | 28,85 | 33,01 | 38,07 | 220 | 560 | |
| | 490.964 | ● | ● | - | - | - | - | AK | - | 5,80 | 5,80 | 14,36 | 18,96 | 25,00 | 29,40 | 36,07 | 41,26 | 47,59 | 220 | 560 | |
| | 491.044 | ● | ● | - | - | - | - | - | AM | 7,25 | 7,25 | 22,97 | 30,31 | 40,00 | 47,04 | 57,71 | 66,02 | 76,15 | 220 | 560 | |
| | 491.084 | ● | ● | - | - | - | - | - | AM | 8,15 | 8,15 | 26,72 | 37,89 | 50,00 | 58,80 | 72,14 | 82,53 | 95,18 | 220 | 560 | |
| 90° | 490.406 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,20 | 1,20 | 0,57 | 0,76 | 1,00 | 1,18 | 1,44 | 1,65 | 1,90 | 380 | 860 | |
| | 490.446 | - | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,30 | 1,30 | 0,72 | 0,95 | 1,25 | 1,47 | 1,80 | 2,06 | 2,38 | 380 | 860 | |
| | 490.486 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,45 | 1,45 | 0,92 | 1,21 | 1,60 | 1,88 | 2,31 | 2,64 | 3,05 | 380 | 860 | |
| | 490.526 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,70 | 1,55 | 1,15 | 1,52 | 2,00 | 2,35 | 2,89 | 3,30 | 3,81 | 380 | 860 | |
| | 490.566 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,90 | 1,90 | 1,44 | 1,89 | 2,50 | 2,94 | 3,61 | 4,13 | 4,76 | 380 | 860 | |
| | 490.606 | ● | ● | CA | - | CE | - | - | - | 2,10 | 2,05 | 1,81 | 2,39 | 3,15 | 3,70 | 4,54 | 5,20 | 6,00 | 380 | 860 | |
| | 490.646 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 2,40 | 2,40 | 2,30 | 3,03 | 4,00 | 4,70 | 5,77 | 6,60 | 7,61 | 390 | 960 | |
| | 490.686 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 2,70 | 2,70 | 2,87 | 3,79 | 5,00 | 5,88 | 7,21 | 8,25 | 9,52 | 390 | 960 | |
| | 490.726 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 3,20 | 2,80 | 3,62 | 4,77 | 6,30 | 7,41 | 9,09 | 10,40 | 11,99 | 390 | 960 | |
| | 490.746 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,15 | 3,15 | 4,08 | 5,38 | 7,10 | 8,35 | 10,24 | 11,72 | 13,52 | 390 | 960 | |
| | 490.766 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,40 | 3,40 | 4,59 | 6,06 | 8,00 | 9,41 | 11,54 | 13,20 | 15,22 | 390 | 960 | |
| | 490.806 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,90 | 3,90 | 5,74 | 7,58 | 10,00 | 11,76 | 14,43 | 16,51 | 19,04 | 390 | 960 | |
| | 490.846 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 4,65 | 4,00 | 7,18 | 9,47 | 12,50 | 14,70 | 18,03 | 20,63 | 23,80 | 390 | 960 | |
| | 490.886 | ● | ● | - | - | - | CG | - | - | 5,45 | 4,50 | 9,19 | 12,13 | 16,00 | 18,82 | 23,08 | 26,41 | 30,46 | 390 | 960 | |
| | 490.926 | ● | ● | - | - | - | CG | - | - | 5,90 | 4,50 | 11,49 | 15,16 | 20,00 | 23,52 | 28,85 | 33,01 | 38,07 | 390 | 960 | |
| | 490.966 | ● | ● | - | - | - | CG | AK | - | 6,55 | 4,85 | 14,36 | 18,96 | 25,00 | 29,40 | 36,07 | 41,26 | 47,59 | 390 | 960 | |
| | 491.006 | ● | ● | - | - | - | - | AK | AK | 7,55 | 5,50 | 18,09 | 23,87 | 31,50 | 37,05 | 45,45 | 51,99 | 59,97 | 390 | 960 | |
| | 491.046 | ● | ● | - | - | - | - | AK | - | 8,60 | 6,60 | 22,97 | 30,31 | 40,00 | 47,04 | 57,71 | 66,02 | 76,15 | 390 | 960 | |
| | 491.086 | ● | ● | - | - | - | - | - | AM | 9,45 | 7,25 | 26,72 | 37,89 | 50,00 | 58,80 | 72,14 | 82,53 | 95,18 | 390 | 960 | |
| 491.126 | ● | ● | - | - | - | - | - | AM | 10,40 | 8,00 | 36,18 | 47,75 | 63,00 | 74,09 | 90,89 | 103,98 | 119,93 | 390 | 960 | | |
| 491.146 | ● | ● | - | - | - | - | - | AM | 11,00 | 7,50 | 40,78 | 53,81 | 71,00 | 83,50 | 102,43 | 117,19 | 135,16 | 390 | 960 | | |
| 120° | 490.368 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 0,85 | 0,65 | 0,36 | 0,48 | 0,63 | 0,74 | 0,91 | 1,04 | 1,20 | 680 | 1220 | |
| | 490.408 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,20 | 1,20 | 0,57 | 0,76 | 1,00 | 1,18 | 1,44 | 1,65 | 1,90 | 680 | 1220 | |
| | 490.448 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,30 | 1,30 | 0,72 | 0,95 | 1,25 | 1,47 | 1,80 | 2,06 | 2,38 | 680 | 1220 | |
| | 490.488 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,45 | 1,45 | 0,92 | 1,21 | 1,60 | 1,88 | 2,31 | 2,64 | 3,05 | 680 | 1220 | |
| | 490.528 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,70 | 1,70 | 1,15 | 1,52 | 2,00 | 2,35 | 2,89 | 3,30 | 3,81 | 680 | 1220 | |
| | 490.568 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 1,90 | 1,90 | 1,44 | 1,89 | 2,50 | 2,94 | 3,61 | 4,13 | 4,76 | 680 | 1220 | |
| | 490.608 | ● | ● | CA | - | - | - | - | - | 2,10 | 2,05 | 1,81 | 2,39 | 3,15 | 3,70 | 4,54 | 5,20 | 6,00 | 680 | 1220 | |
| | 490.648 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 2,40 | 2,40 | 2,30 | 3,03 | 4,00 | 4,70 | 5,77 | 6,60 | 7,61 | 680 | 1330 | |
| | 490.688 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 2,75 | 2,75 | 2,87 | 3,79 | 5,00 | 5,88 | 7,21 | 8,25 | 9,52 | 680 | 1330 | |
| | 490.728 | ● | ● | - | CC | CE | - | - | - | 3,20 | 2,80 | 3,62 | 4,77 | 6,30 | 7,41 | 9,09 | 10,40 | 11,99 | 680 | 1330 | |
| | 490.748 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,20 | 3,20 | 4,08 | 5,38 | 7,10 | 8,35 | 10,24 | 11,72 | 13,52 | 680 | 1330 | |
| | 490.768 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,45 | 3,45 | 4,59 | 6,44 | 8,00 | 9,41 | 11,54 | 13,20 | 15,22 | 680 | 1330 | |
| | 490.808 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 3,90 | 3,90 | 5,74 | 7,58 | 10,00 | 11,76 | 14,43 | 16,51 | 19,04 | 680 | 1330 | |
| | 490.848 | ● | ● | - | - | CE | - | - | - | 4,70 | 4,00 | 7,18 | 9,47 | 12,50 | 14,70 | 18,03 | 20,63 | 23,80 | 680 | 1330 | |
| | 490.888 | ● | ● | - | - | - | CG | - | - | 5,10 | 4,50 | 9,19 | 12,13 | 16,00 | 18,82 | 23,08 | 26,41 | 30,46 | 680 | 1330 | |
| | 490.928 | ● | ● | - | - | - | CG | - | - | 5,80 | 4,75 | 11,49 | 15,16 | 20,00 | 23,52 | 28,85 | 33,01 | 38,07 | 680 | 1330 | |
| | 490.968 | ● | ● | - | - | - | CG | AK | - | 6,65 | 4,85 | 14,36 | 18,96 | 25,00 | 29,40 | 36,07 | 41,26 | 47,59 | 680 | 1330 | |
| 491.048 | ● | ● | - | - | - | - | AK | - | 9,20 | 5,85 | 22,97 | 30,31 | 40,00 | 47,04 | 57,71 | 66,02 | 76,15 | 680 | 1330 | | |
| 491.128 | ● | ● | - | - | - | - | - | AM | 10,80 | 7,75 | 36,18 | 47,75 | 63,00 | 74,09 | 90,89 | 103,98 | 119,93 | 680 | 1330 | | |
| 491.148 | ● | ● | - | - | - | - | - | AM | 11,40 | 7,65 | 40,78 | 53,81 | 71,00 | 83,50 | 102,43 | 117,19 | 135,16 | 680 | 1330 | | |

B = Bohrungs-Ø - E = engster Querschnitt

Weitere Düsengrößen und Werkstoffe (Sonderlegierungen, Kunststoffe) auf Anfrage erhältlich.



3.6

Bestell-
beispiel: Type 490.644 + Material-Nr. + 1Y + Code + CC - Bestell-Nr. 490.644.1Y.CC

Umrechnungsformel für diese Baureihe: $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0.4}$
(≤ 10 bar)

Tabelle 10 Mischbrandkrippe – vergleichende Angaben zur Zusammensetzung

| Brandlast-Bestandteile Wohnungsbrände | Beispiele der Material-Verwendung | N-Gehalt in M% | Massen- anteile gemäß Studie* [kg] | Massen- anteile gemäß Studie* [M%] | Massenanteile für 50 kg- Mischbrand- krippe, Soll [kg] | Dichte kompakt [g/cm ³] | Material- arten, Ist | Material-Anteile Mischbrandkrippe, Ist (in Anlehnung an Brandobj. 5A) | | Massen- anteile, Ist [M%] |
|---|---|-------------------|--|--|--|---|----------------------------|--|--------------------|------------------------------------|
| | | | | | | | | Anzahl Stäbe (Länge 500 mm) | Masse, Ist [kg] | |
| Holzmaterialien | v.a. Holz und Holzverbundwerkstoffe (vgl. Möbel, Türen, aminated/Klickparkett, Vertäfelungen) sowie Zellulose/Papier, Textilien/Teppiche (Naturfasern/Regenerat); ohne Fensterrahmen und Parkett, da diese kaum am Brand beteiligt sind | | 456,03 | 70,00 | 35,00 | ca. 0,60 | Holz (Nadelholz) | 6 Doppellagen à je 10 Stäbe 40x40 | 28,80 | 70,94 |
| PVC (Polyvinylchlorid) | v.a. Bodenbeläge (Vinyl), Kunstleder, LPS, Folien, Schuhsohlen, Billig-Gummistiefel, auch Fensterrahmen, Rohre, Schläuche, Kabelisolierung, Steckdosen | | 11,73 | 1,80 | 0,90 | ca. 1,3 | PVC | hier: 2 Stäbe 10x40 mm | 0,52 | 1,28 |
| PUR (Polyurethane): einschließlich PUR-bzw. Kaltschaum sowie Polyätherschaum) | Polstermat. (Schaum), Matratzen (Schaum), Montageschaum, Schuhsohlen, Gummistiefel, Kunstleder, Textilfasern, Lacke/ Kleber/ Beschichtungen/ Versiegelungen, nicht Vergussmassen, Fußbodenbeschichtung und -beläge, Dämmstoffe | ca. 10 | 29,32 | 4,50 | 2,25 | ca. 1,1 | PUR | 2 Stäbe 40x40 mm | 1,76 | 4,33 |
| PP (Polypropylen) | Heimtextilien, Teppiche/ Teppichböden, Haushaltswaren/ Spritzgussteile, Verpackungsmittel/ Folien/ Behälter, Fahrradhelme, nicht Kabelummantelungen | | 11,73 | 1,80 | 1,80 | ca. 0,91 | PP | 1 Stab 40x40 mm | 0,73 | 1,80 |
| PE (Polyethylen) | Spritzgussteile/ Haushaltswaren, Verpackungsmittel/ Stretchfolie, nicht Kabelummantelung, Rohre für Gas/Wasser | | 9,12 | 1,40 | 1,40 | 0,95 | PE | 2 Stäbe 40x40 mm | 1,48 | 3,65 |
| PA (Polyamid) - hier PA 6 | Teppiche/ Teppichböden, Textilien, hochwertige Spritzgussteile, Gehäuse | 12,4 | 5,86 | 0,90 | 0,90 | 1,13 | PA 6 | 1 Stab 40x40 mm | 0,56 | 1,38 |
| PES (Polyester): einschließl. diverser Kunstharze, Polyacrylate, grundsätzlich auch PET, PMMA und PC) - hier PET, andere Hälfte als PMMA | aus PES im engeren Sinne: Textilien/ Vliesstoffe/ Mikrofasern, Polstermat. (Schaum), Teppiche/ Teppichböden, Lacke/Lackbindemittel/ Kunstharze (Polyesterharz/UP-Harz/Pulverlacke, auch Alkydharze und Polyacrylate), isolierende Griffe, Gerätegehäuse, GFK-Teile; aus PET: Textilien/Sportkleidung, Verpackungsmat. (Folien, Flaschen u.a.) | | 37,79 | 5,80 | 1,75 | 1,38 | PES-ähnlich, hier: PET | 2 Stäbe 40x40 mm | 2,20 | 5,42 |
| PMMA (Polymethyl- methacrylat, Acryl, Polyacryl), vgl. auch PES | Verglasungen (Acryglas/Plexiglas), Sanitäröbekte (Badewannen, Waschbecken etc.), Haushaltswaren (Schüsseln, Behälter, Gehäuse), LED-Bildschirme, Brillengläser | | 0,00 | 0,00 | 1,50 | 1,19 | PES-ähnlich, hier: PMMA | 1 Stab 40x40 mm | 0,95 | 2,34 |
| ABS (Acrylnitril-Butadien- Styrol) | Gehäuse von Elektrogeräten und Computern, verchromte Plastik, Legosteine, ... | ca. 7 | 29,32 | 4,50 | 2,25 | 1,05 | ABS | 1 Stab 40x40 mm | 0,84 | 2,07 |
| PC (Polycarbonate) | CDs, Blue-ray Disks, transparente Legosteile, Verglasungen von Aquarien/Terrarien, nicht Verglasung von Balkon/Wintergarten/ Solarpaneele ... | | 52,12 | 8,00 | 2,00 | 1,20 | PC | hier: 8 Stäbe Stäbe 10x40 mm | 1,92 | 4,73 |
| PS (Polystyrol), vgl. auch EPS/EPS sowie HIPS und Copolymer ABS, SBR, SAN u.a. | Verpackungsmat. (Folien, Becher, glasklare Verpackungen, Schaum - Styropor/EPS-Hartschaum), Isolationsmat. Kühlschränke, nicht Dämmung Fußboden/Trittschall, Fassaden (Styropor/EPS-Hartschaum), Perimeterdämmung (im Erdreich - vgl. Styrodur/XPS-Hartschaum) | | 9,12 | 1,40 | 0,85 | 1,05 | PS | hier: 4 Stäbe Stäbe 10x40 mm | 0,84 | 2,07 |
| Summen | | | 643,02 | 100,10 | 50,60 | | | | 40,60 | 100,00 |
| Anteil Polymermaterialien [kg] | | | | 30,10 | | | | | 11,80 | |
| Anteil Polymermaterialien [%] | | | | 30,07% | | | | | 29,06% | |

Tabelle 11 PAK - Eigenschaften und Grenzwerte

| | Anzahl aromat. Ringe | karzinogen/ T _{eq} | F [°C] | K _p [°C] | p [Pa] bei 25 °C | P sonstig [Pa] | log Kow | US EPA | Grenzwerte nach EG/EU* [mg/kg] | Grenzwerte nach GS** Kat. 3 [mg/kg] | Grenzwerte nach GS** Kat. 2 [mg/kg] |
|------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|------------|-----------|---|--|---|
| Naphthalin | 2 | vermutlich | 88 | 218 | 10,4 | 7,2 (20°C), 11,3 (25°C) | 3,4 | ja | | < 10 | < 2,0 |
| Acenaphthylen | 3 | nein | 92 | 280 | | | | ja | | Summe < 50 | Summe < 10,0 |
| Acenaphthen | 3 | nein | 95 | 278 | 0,3 | | 4,2 | ja | | | |
| Fluoren | 3 | nein | 116 | 295 | 9,6x10 ⁻² | | 4,2 | ja | | | |
| Phenanthren | 3 | nein | 101 | 332 | 1,6x10 ⁻² | | 4,6 | ja | | | |
| Anthracen | 3 | nein | 217 | 340 | 8x10 ⁻³ | 10 (126°C), 100 (151°C) | 4,5 | ja | | | |
| Fluoranthren | 4 | nein | 111 | 375 | 6,5x10 ⁻⁴ | | 5,0 | ja | | | |
| Pyren | 4 | nein | 156 | 404 | 6,0x10 ⁻⁴ | | 5,2 | ja | | | |
| Benzo[a]anthracen | 4 | ja/0,145 | 160 | 438 | 2,8x10 ⁻⁵ | 2,9x10 ⁻⁶ (20°C) | 5,6 | ja | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Chrysen | 4 | ja/0,004 | 256 | 448 | 8,4x10 ⁻⁵ | 7x10 ⁻⁴ (20°C) | 5,9 | ja | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Benzo[b]fluoranthren | 5 | ja/0,141 | 168 | 481 | 6,7x10 ⁻⁵ | | 6,1 | ja | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Benzo(j)fluoranthren | 5 | ja | 166 | 480 | 2,0x10 ⁻⁶ | | 6,1 | | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Benzo[k]fluoranthren | 5 | ja/0,061 | 217 | 480 | 1,3x10 ⁻⁸ | | 6,8 | ja | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Benzo(e)pyren | 5 | ja/0,004 | 178- 180 | | | | | | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Benzo[a]pyren | 5 | ja/1,0 | 177 | 495 | 7,3x10 ⁻⁷ | | 6,5 | ja | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | 5 | ja/1,11 | 270 | 524 | 1,3x10 ⁻⁸ | | 6,5 | ja | 1,0 | 1,0 | < 0,5 |
| Indeno[1,2,3-c,d]pyren | 6 | ja/0,232 | 163 | 536 | 1,3x10 ⁻⁸ | | 6,6 | ja | | 1,0 | < 0,5 |
| Benzo[g,h,i]perylene | 6 | ja/0,022 | 278 | 500 | | | 7,2 | ja | | 1,0 | < 0,5 |
| Summe: | | | | | | | | | | < 50,0 | < 10,0 |

Legende zur Tabelle 11

| | |
|---------------------|--|
| * | Grenzwerte für 8 karzinogene PAK nach EG-VO (EG-Verordnung Nr. 1272/2013 zur Änderung von Anhang 17 der EG-Verordnung Nr. 1907/2006 (REACH), <i>hier</i> : Grenzwerte für Erzeugnisse allgemein, geltend jeweils für jeden Bestandteil des Produktes, z.B. der Einzellagen einer Bekleidung |
| ** | Die 18 PAK zur GS-Zeichenvergabe nach ProdSG sowie die gemäß AfPS GS 2014:01 definierten Grenzwerte für Erzeugnisse mit Hautkontakt, <i>hier</i> : Grenzwerte Kategorie 2: vorhersehbarer längerer Hautkontakt (> 30 Sek.) bzw. wiederholter kurzfristiger für Produkte allgemein |
| ja | Kategorie 1: kann Krebs erzeugen/kann wahrscheinlich Krebs beim Menschen erzeugen (entspr. Unterkategorien 1A/1B - H350/H350i) |
| vermutlich | Kategorie 2: kann vermutlich Krebs beim Menschen erzeugen/ Verdacht auf karzinogene Wirkung beim Menschen (H351) |
| nein | Es liegen keine Erkenntnisse über eine krebserzeugende Wirkung vor |
| T _{eq} | Toxizitäts- bzw. Wirkungsäquivalent bzgl. Karzinogenität bezogen auf Benzo[a]pyren, welches 1,0 gesetzt ist; aus: DFG-Report zu PAK (2008), hier nur neuere Angaben nach Krewski et al. (1989) |
| log K _{ow} | Verteilungskoeffizient zwischen n-Octanol und Wasser als Maß für die Lipophilie (Fettlöslichkeit, Werte >1) bzw. Hydrophilie (Wasserlöslichkeit, Werte <1) |
| p | Dampfdruck |
| F | Schmelzpunkt |
| K _p | Siedepunkt |
| weitere PC-Daten | Physikalisch-chemische Daten, berücksichtigte Quellen in Rangfolge: GESTIS-Stoffdatenbank; DFG-Report zu PAK (2008); Wikipedia engl./deutsch; LUA BW (1997) |
| US EPA-PAK | 16 PAK für die von der US Umweltbehörde 1984 erstmals Toxizitätsäquivalente in einem Standard festgelegt wurden (USEPA, US Environmental Protection Agency, Health effects assessment for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). EPA 549/1-86-013, 1984 |

*Quellen für die Stoffdaten: [GESTIS, 2020; Wiki, 2020]

Tabelle 12 Materialien für Schutzkleidung zur Brandbekämpfung, Leistungsstufe 2

| | Oberstoff | Nässesperre | Anmerkungen | FG [g/m ²] | Anteil [%] |
|----------|--|--|---|---|------------------------------|
| A | 64% Viskose FR 35 % m-Aramid 1 % Antistatik | PUR-Membran auf Aramid/Viskose-Vlies laminiert | Obermaterial: Lenzing FR/Aramid , Fa. Lenzing, 300 g/m ² Nässesperre: Fa. Lenzing, Membran auf Vlies aus m-Aramid/Viskose 50/50, Membran zeigt zum Futter Futter: Gewebe aus Viskose FR/m-Aramid 65/35, Fa. Lenzing, 148 g/m ² | O: 295 M/T : 162 F: 117 Σ = 574 | 51,4 28,2 20,4 |
| B | 99% m-Aramid 1 % Belltron (Antistatik) | PE(S)-Membran auf hauchdünnem PES- Gewebe | Oberstoff: Euramid Pro 210 antistatisch ; 210 g/m ² Nässesperre: PE(S)-Membran auf PES-Gewebe Futter: m-Aramid/Viskose FR-50/50-Maschenware versteppt mit Gewebe m-Aramid/Viskose FR 50/50, Fa. Lenzing, 270 g/m ² | O: 210 M/G : 127 V: 88 F/T: 286 Σ = 711 | 29,5 17,9 12,4 40,2 |
| C | 99 % m-Aramid 1 % Antistatik | ePTFE-Duo-Membran auf Aramid-Spinnvlies laminiert (3-D) | Oberstoff: Euramid Pro Nässesperre: ePTFE-Membran auf 100 % Aramid Spunlance, Futter: Gewebe aus m-Aramid/Viskose FR 65/35 verbunden mit m-Aramet-Spunlance auf der Innenseite | O: 182 M/V : 175 F: 210 Σ = 567 | 32,1 30,9 37,0 |
| D | 99 % m-Aramid 1 % Belltron (Antistatik) | PUR-Membran auf m-Aramid- Vlies laminiert (3-D) | Oberstoff: Euramid Pro USG Nässesperre: PUR-Membran auf m-Aramid-Vlies laminiert Futter: 100 % m-Aramid-Gewebe, 3-dimensional | O: 214 M/V : 177 F: 223 Σ = 614 | 34,9 28,8 36,3 |
| E | 75 % Nomex 23 % Kevlar 2 % P140 (Antistatik) | ePTFE-Membran* auf Aramid- Vlies laminiert (Gore-Tex Fireblocker N 2L) | Obermaterial: Nomex NXT , 195 g/m ² Nässesperre: Membran auf m-/p-Aramid-Vlies 85/15, 140 g/m ² Futter: Gewebe aus Nomex, Kevlar u. P140-Antistatikfaser im Verhältnis 93/5/2 (Aramid NX Comfort), 200 g/m ² | O: 230 M/T : 221 F/ M : 180 Σ = 631 | 36,5 35,0 28,5 |
| F | 89 % Nomex 9 % Kevlar 2 % Antistatik | ePTFE-Membran* unter Vlies mit Silicon-Dots nach außen laminiert (Gore-Tex Airlock 2L) | Obermaterial: Hainsworth Titan , 220 g/m ² Feuchtesperre: ePTFE-Membran auf Vlies aus 50 % Melaminharz, 25 % p-Aramid und 25 % m-Aramid, 225 g/m ² Liner: Gewebe aus Nomex/Viskose FR 50/50, 130 g/m ² | O: 227 S/ V/M : 251 F: 125 Σ = 603 | 37,6 41,6 20,7 |

Fortsetzung Materialien für Schutzbekleidung zur Brandbekämpfung, Leistungsstufe 2

| | Oberstoff | Nässesperre | Anmerkungen | FG [g/m ²] | Anteil [%] |
|----------|---|--|---|---|----------------------|
| G | 89 % Nomex 9 % Kevlar 2 % Antistatik | ePTFE-Membran* auf Vlies laminiert (Gore-tex) | Obermaterial: Hainsworth Titan , 220 g/m ² Nässesperre: ePTFE-Membran* auf Vlies laminiert Futter: | O: 203 V/M: 154 F: 210 $\Sigma = 567$ | 35,8 27,2 37,0 |
| H | 94% Nomex 5 % Kevlar 1 % Antistatik | PUR-Membran unter dünnem PES-Gewebe laminiert (Topaz PU) | Obermaterial: Hainsworth Titan , 220 g/m ² Nässesperre: Topaz 251, Membran an PES-Vlies, Fa. Trans-Textil Futter: Aramid-Vlies, Gewebe aus Nomex/Viskose FR 50/50, 300 g/m ² | O: 220 V/M: 148 T/F: 311 $\Sigma = 679$ | 32,4 21,8 45,8 |
| I | 93 % Nomex 5% Kevlar 2 % P14C | ePTFE-Membran* an Obergewebe laminiert | Obermaterial: Nomex Comfort mit anlaminierter Membran Nässesperre: ePTFE-Membran* an Obergewebe laminiert Futter: Nomex-Gestricke auf Nomex-Flächengewebe | O/M: 227 T: 344 $\Sigma = 571$ | 39,8 60,2 |
| J | 59 % p-Aramid 39 % PBO 2 % Antistatik | ePTFE-Membran* innen an rel. dünnem Aramid-Vlies laminiert (Gore-Tex Fireblocker) | Obermaterial: Millenia light der Fa. TenCate, kombinierte Hitze-Nässesperre - ePTFE-Membran* unter Aramid-Vlies Futter: 100 % Aramid-Gewebe | O: 185 V/M: 154 T/F: 237 $\Sigma = 576$ | 32,1 26,7 41,2 |
| K | 61 % p-Aramid 37 % PBI 2 % Antistatik | ePTFE-Membran* unter Aramid-Vlies mit Silicon-Dots nach außen laminiert | Obermaterial: PBI Matrix mit 205 g/m ² kombinierte. Hitze-Nässesperre Gore-Tex Airlock 2L: 255 g/m ² Futter: Gewebe aus Nomex/Viskose-FR 50/50, 125 g/m ² | O: 208 S/V/M: 262 V/F: 125 $\Sigma = 595$ | 35,0 44,0 21,0 |
| L | 99% Kermel HSK 1% Belltron | PES-Membran auf hauchdünnem PES-Gestrick (Sympatex) | Obermaterial: Kermel Heroskin bzw. HSK Nässesperre: PES-Membran auf hauchdünnem PES-Gestrick Futter: Kohlefaser-Nadelvlies auf Gewebe Aramid/Viskose FR 50/50 | O: 200 M/G: 142 T/F: 294 $\Sigma = 636$ | 31,5 22,3 46,2 |

* ePTFE-Membranen der Firma Gore mit Beschichtung aus PUR.

O – Obermaterial; M – Membran bzw. Nässesperre (Membran allein; soweit Teil mehrschichtiger Aufbauten, wurde dies kenntlich gemacht); V – Vlies; G – glattes dünnes Gewebe; S – (Silikon)-Dots als Abstandshalter zur Erzeugung isolierender Luftschichten; T - thermisch isolierendes Vlies F – Futter bzw. Liner – innerstes Gewebe, i. d. R. dünn sowie Kombinationen. Achtung! Reihenfolge der Nennung von außen nach innen; Hinweis: M/V i. a. R. laminiert, T/F meist versteppt

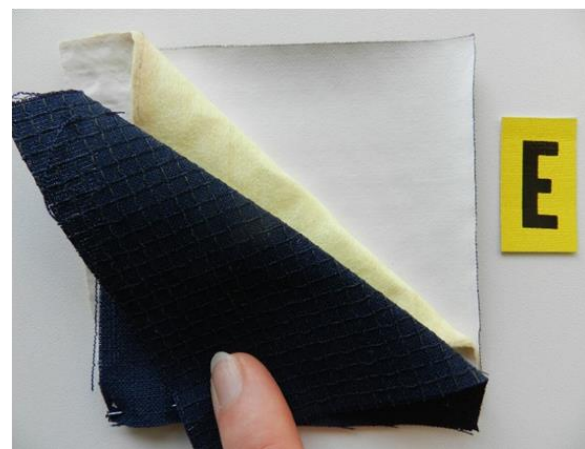
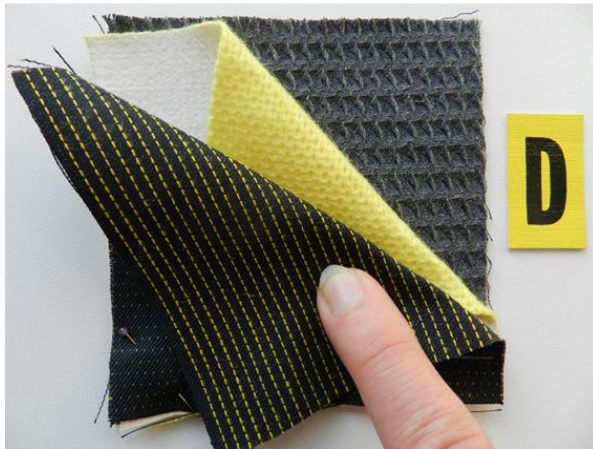
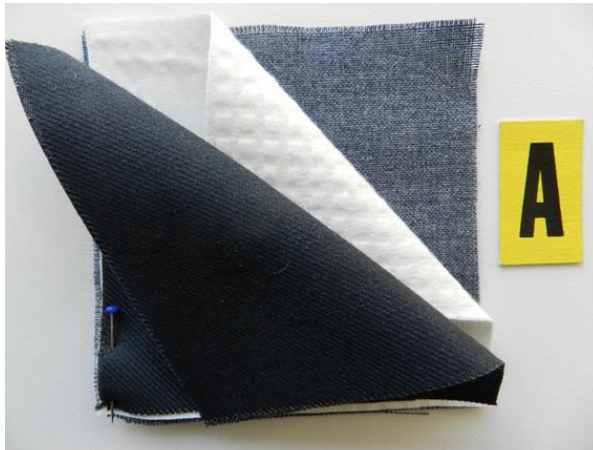


Abbildung 40 Aufbau im Technikum beladener Materialien sowie ausgewählter Praxisproben, hier Material A bis F

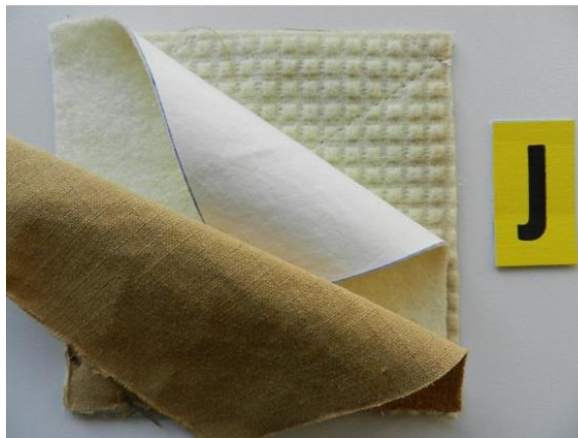
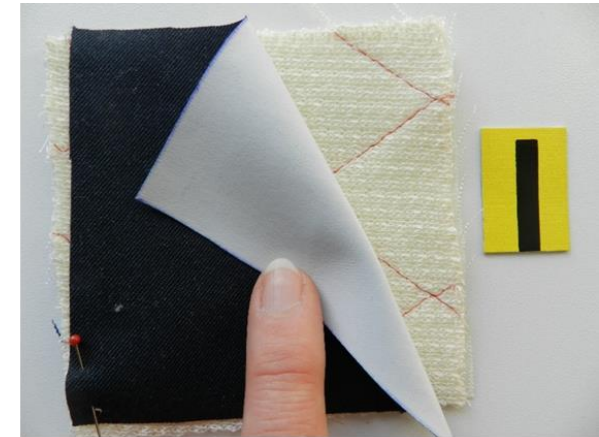
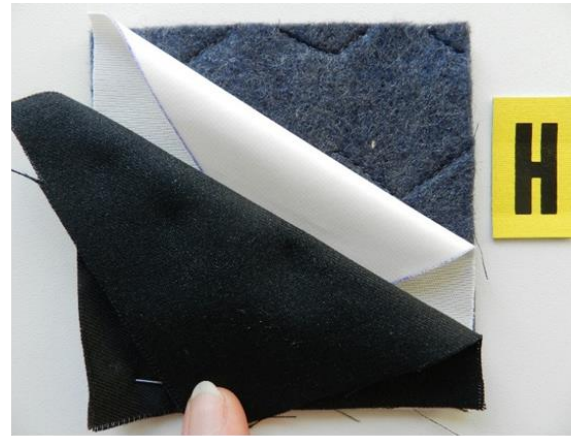
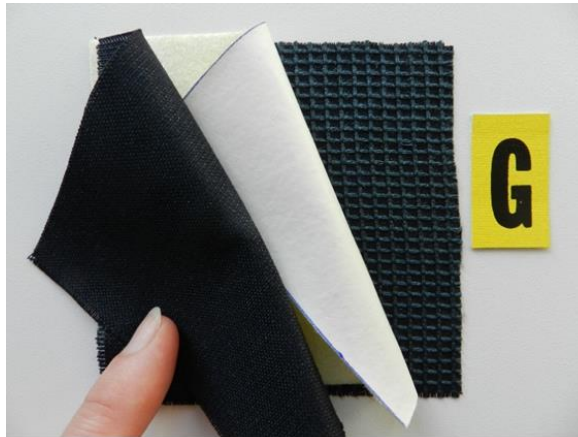


Abbildung 41 Aufbau im Technikum beladener Materialien sowie ausgewählter Praxisproben, hier Material G bis L

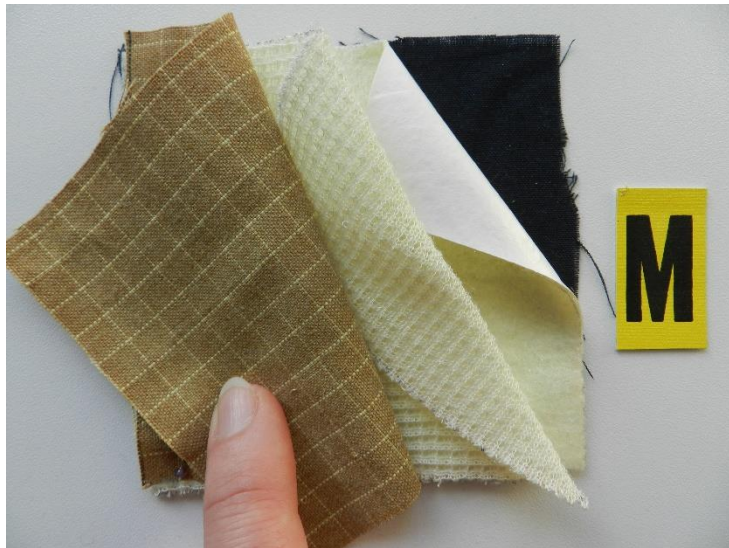


Abbildung 42 Aufbau im Technikum beladener Materialien sowie ausgewählter Praxisproben, hier Material M und N

Tabelle 13 Temperaturniveau im Übungs- und Einsatzgeschehen [Neske, 2014, S. 76]

| Übungsszenario | Messstelle | Mittelungsintervalle | | | T _{max} |
|---|--|--------------------------------------|--------------------------|--|------------------|
| | | 1 min | Gesamt | Individuell | |
| Feuerwehrtüchtungshaus (IBK), Wärmegewöhnung (Bilder 5.6, 5.7) | Behänderung Schulterbereich | 145,7 °C (384s - 443s) | 102 °C (29s - 480s) | 132 °C (237s - 480s) | 156,6 °C |
| | Raumtemperatur 1,5 m über Boden | 171 °C (721s - 780s) | 155 °C (501s - 1081s) | - | 177 °C |
| | Lungenautomat_außen | 126,8 °C (158s - 217s) | 75,5 °C (0s - 427s) | 102,5 °C (120s - 290s) | 147,3 °C |
| Holzbefeuerter Brandübungscontainer (BF Karlruhe); V4.1 (Bilder 5.15, 5.14) | Unter Nackenschutz auf Schutzkleidung | 134,3 °C (161s - 220s) | 82,2 °C (0s - 427s) | 105,4 °C (120s - 290s) | 153,8 °C |
| | T4 - Temperatur_Vorratn_Mitte, Höhe 1,5 m | 206,4 °C (274s - 333s) | 147,8 °C (0s - 427s) | 196,8 °C (180s - 427s) | 210 °C |
| Holzbefeuerter Brandübungscontainer (BF Karlruhe); V8 (Bilder 5.19, 5.18) | Lungenautomat_außen | 132,2 °C (239s - 298s) | 103,1 °C (0s - 385s) | 113,5 °C (76s - 351s) | 168,2 °C |
| | T4 - Temperatur_Vorratn_Mitte, Höhe 1,5 m | 112,8 °C (161s - 220s) | 102,5 °C (0s - 385s) | - | 120,6 °C |
| BF Magdeburg; 1.4 (Anhang A.3 Bild A.3.1) | Lungenautomat_außen | 77,5 °C (32s - 91s) | 47,3 °C (32 - 951s) | - | 174 °C |
| BF Magdeburg; 2.2 (Bild 5.25) | Lungenautomat_außen | 96,3 °C (132 - 191 s) | 55,3 °C (127 - 812s) | - | 159 °C |
| DMT; Brandtunnel (Bilder 5.28 - 5.31, Anhang A.3 Bilder A.3.2 bis A.3.5) | Sichtschleife Vollmaske, außen | > 140 °C* (18min 0s - 19min 0s) | - | > 100 °C* (10 min 30s - 13 min 30s) | 225 °C* |
| | Lungenautomat, außen | > 100 °C* (18min 0s - 19min 0s) | - | - | 140 °C* |
| | Druckbehälter Mitte (auf dem Druckbehälter) | > 120 °C* (12min 0s - 13min 0s) | - | > 110 °C* (11min 50s - 13min 40s) | 180 °C* |
| | Druckbehälter Mitte (auf dem Druckbehälter-schutz) | > 140 °C* (12min 0s - 13min 0s) | - | > 130 °C* (11min 30s - 13min 30s) | 190 °C* |
| | Helm, außen, hinten | > 200 °C* (18min 10s - 19min 10s) | - | > 150 °C* 11 min 30s - 21 min 0s | 295 °C* |
| | M3, stationäre Messstelle in 1,5 m über dem Boden | > 275 °C* (19min 30s - 20min 30s) | | > 250 °C* (10min 20s - 19min 50s) | 290 °C* |

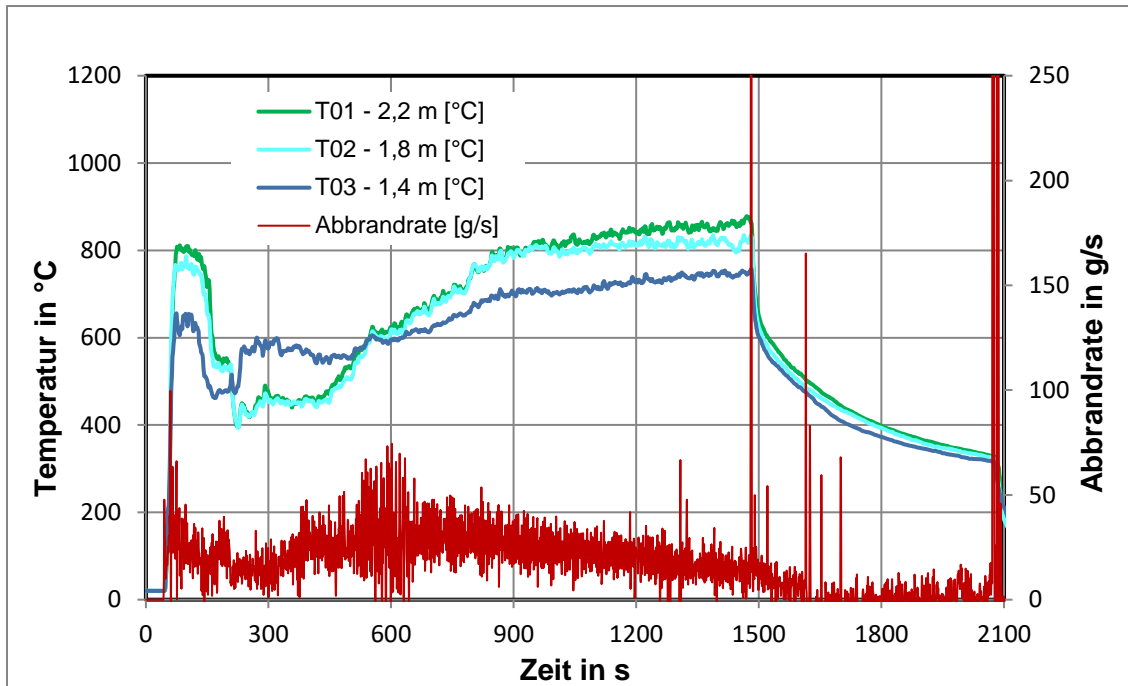


Abbildung 43 Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.1 („trocken“), Öffnen der Brandraumtüren nach 1450 Sekunden

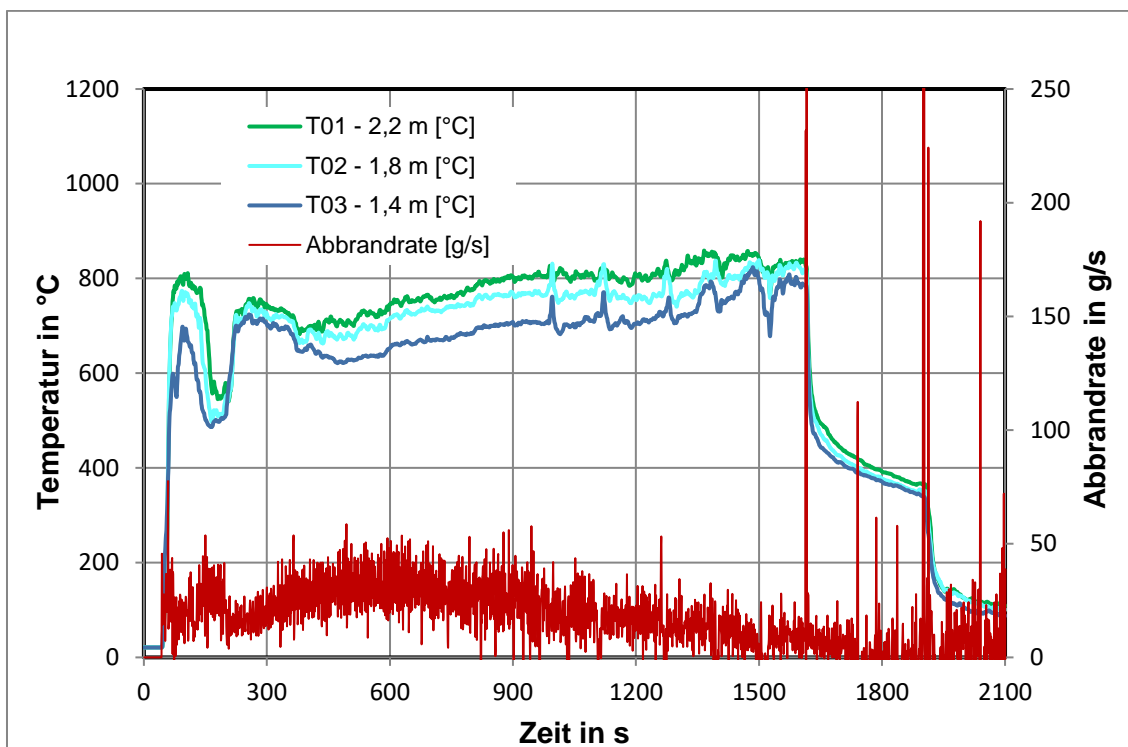


Abbildung 44 Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.2 („nass“), Öffnen der Brandraumtüren nach 1630 Sekunden

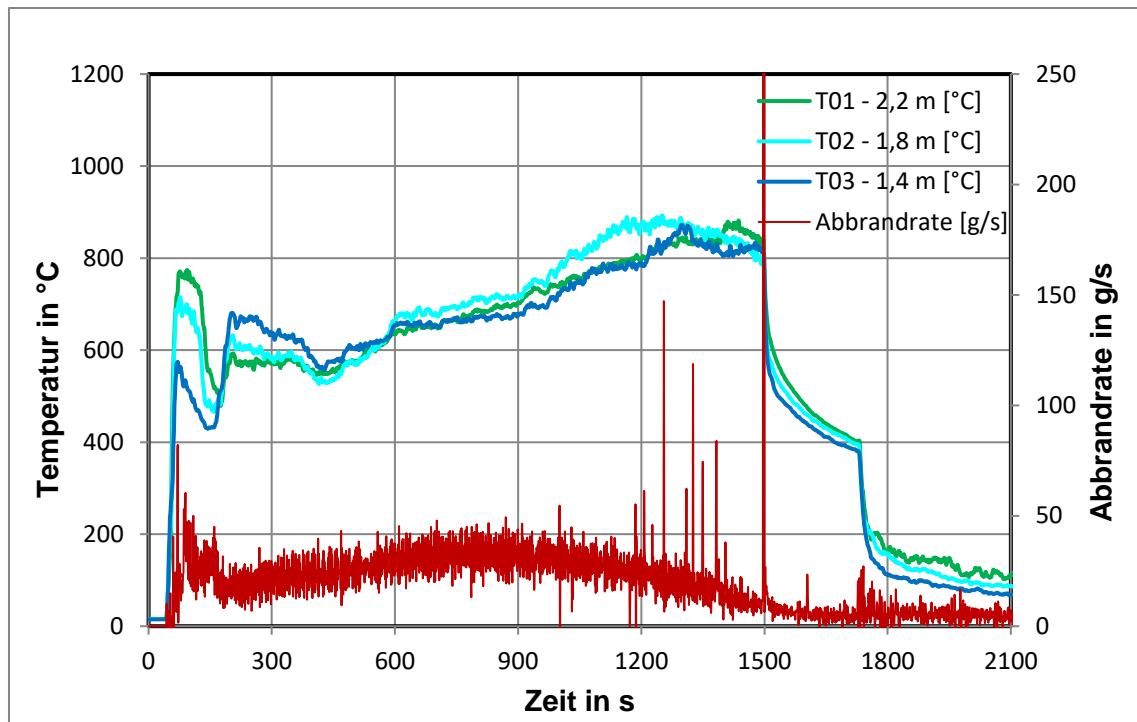


Abbildung 45 Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.4 („trocken“), Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1500 Sekunden

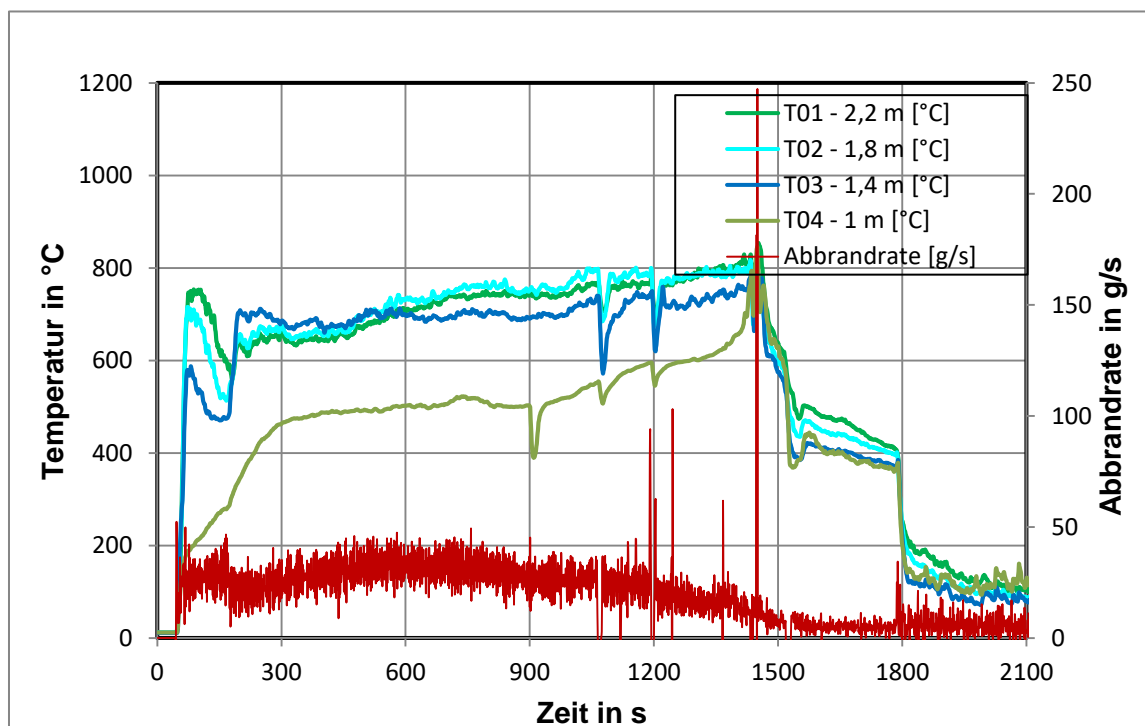


Abbildung 46 Temperaturverlauf im Brandraum sowie Abbrandrate, Versuch V1.5 („nass“), Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1420 Sekunden

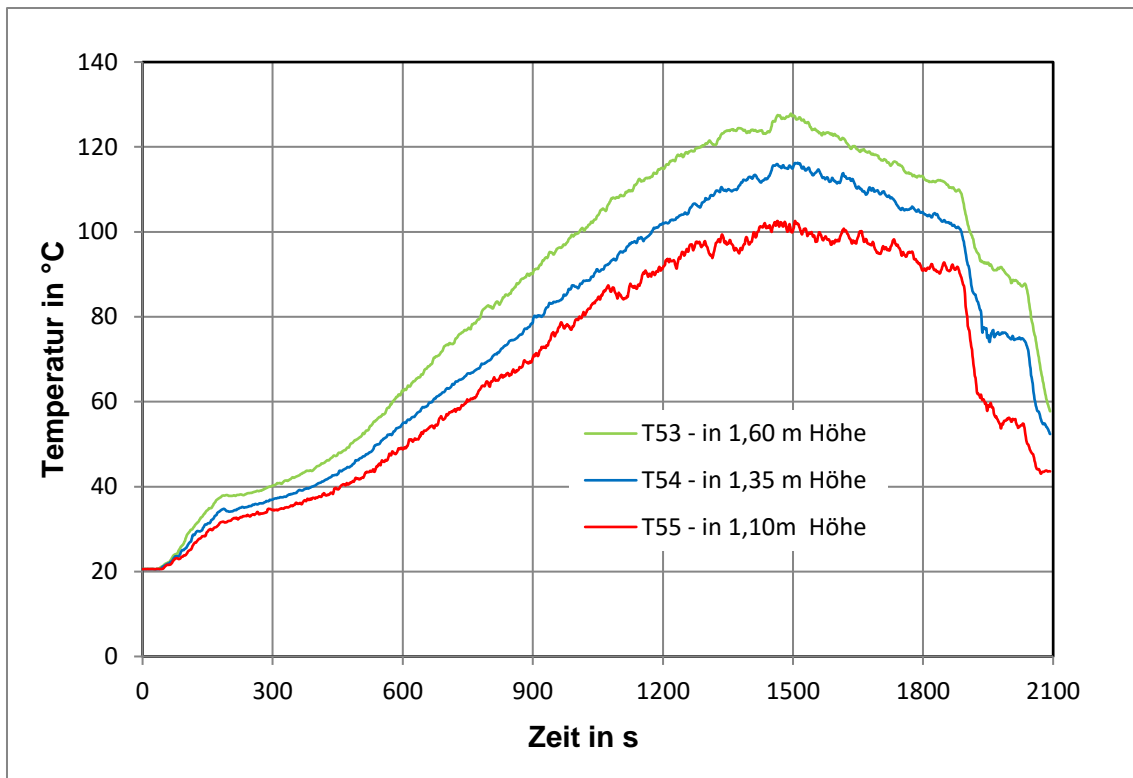


Abbildung 47 Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.1, trocken, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1450 Sekunden

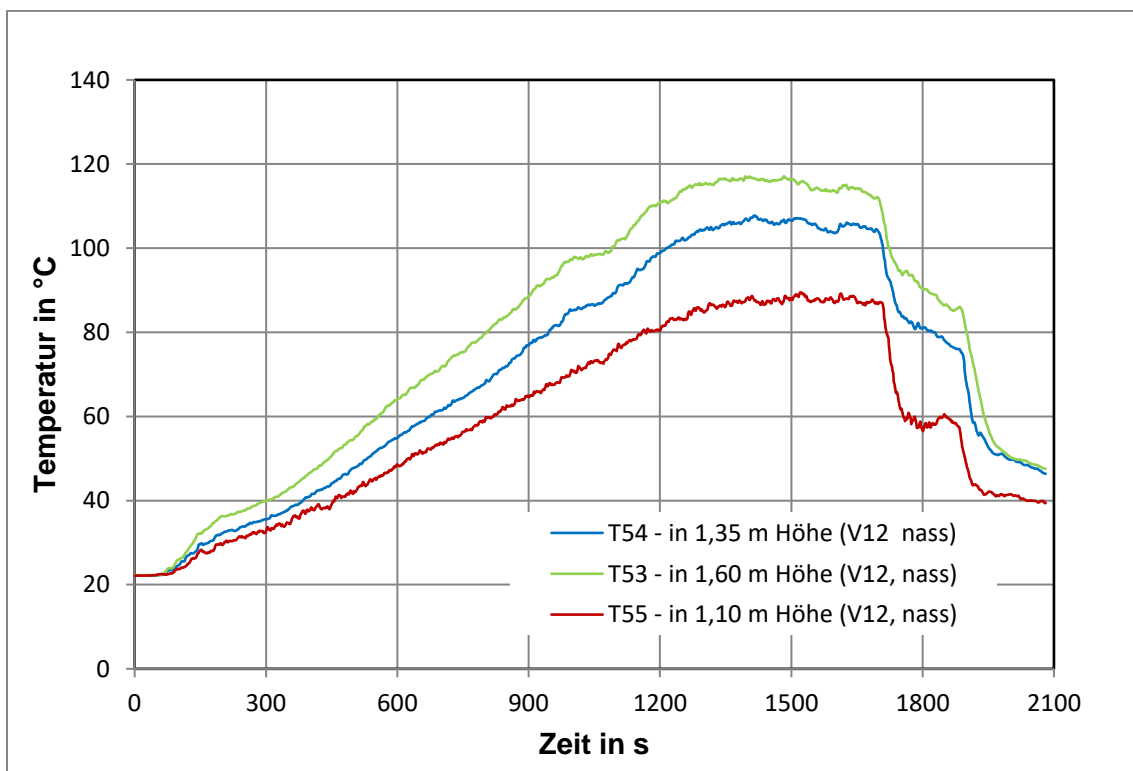


Abbildung 48 Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.2, nass, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1630 Sekunden

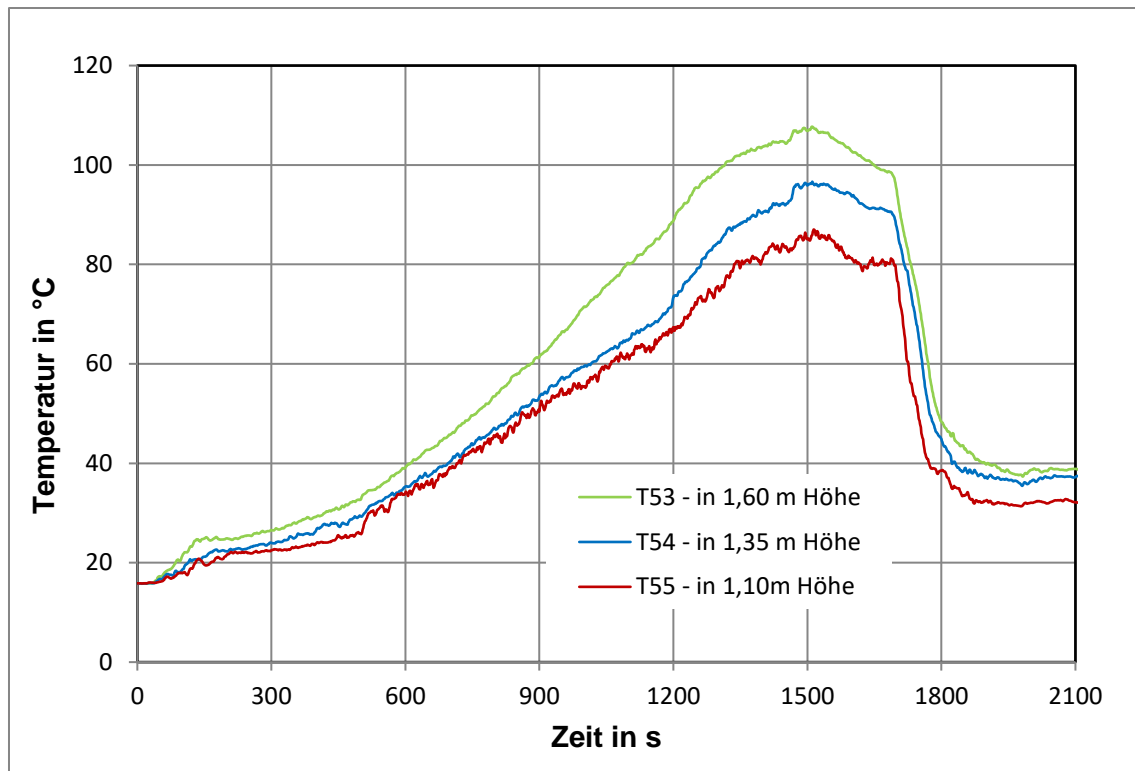


Abbildung 49 Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.4, trocken, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1500 Sekunden

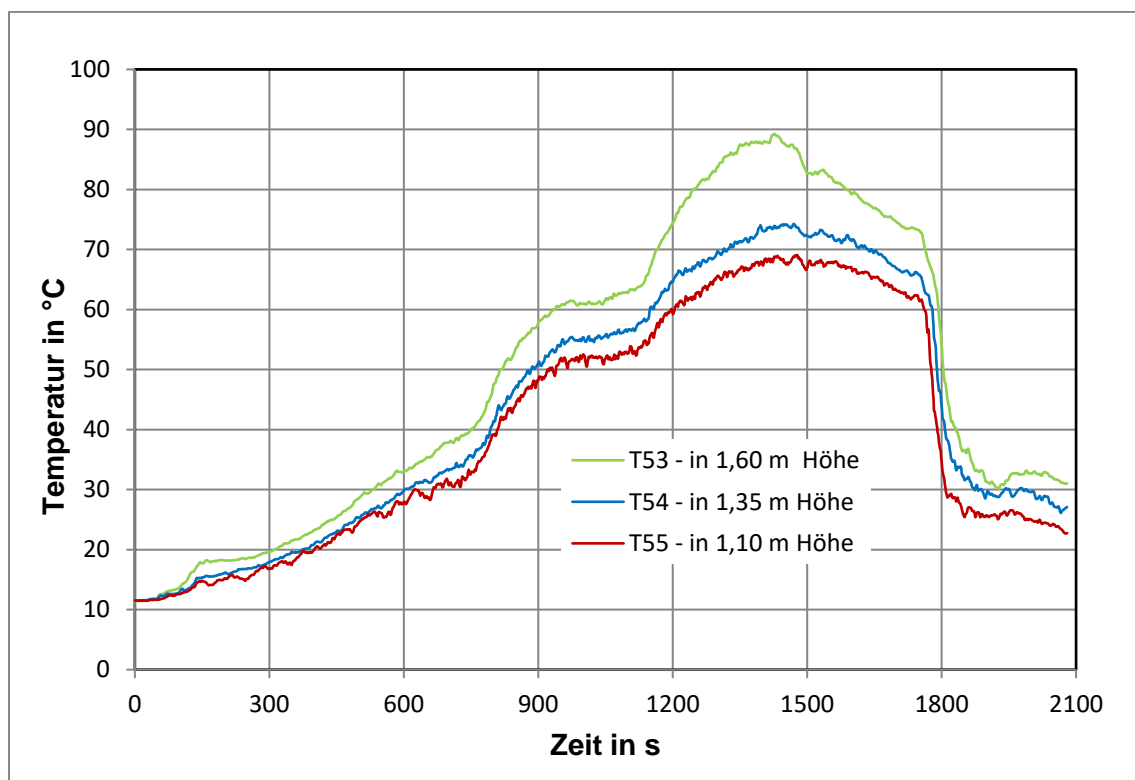


Abbildung 50 Temperaturverlauf am Probenständer, Beispiel V1.5, nass, Öffnen der Brandraumtüren nach ca. 1420 Sekunden

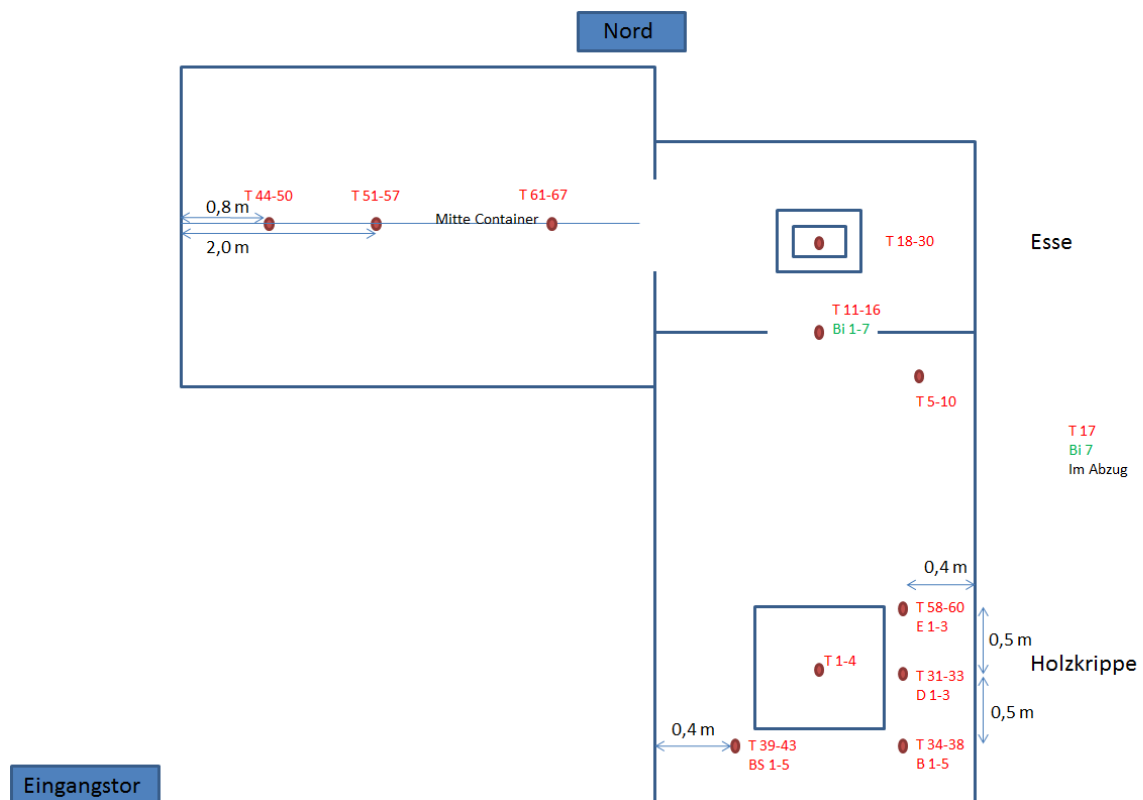


Abbildung 51 Messstellenplan Versuchsstand, Draufsicht (nicht maßstabsgerecht)

Tabelle 14 Technikum, Versuch V1.4, "trockene Beladung", Material A und B

| Material-Kennung | A | | | | B | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|-----------------------------------|----------|------------|----------|----------|-------|
| Membran-Typ | PUR, auf dünnem 3D-Aramid/Viskose-Vlies laminiert | | | | PE(S), auf hauchdünnem PES-Gewebe | | | | | |
| Probenbezeichnung | V14A | V14Aa | V14Ab | V14Ac | V14B | V14Ba | V14Bb | V14Bc | V14Bd | Summe |
| Analysenkennung | U19.2597 | U19.2598 | U19.2599 | U19.2600 | U19.2601 | U19.2602 | U19.2603 | U19.2604 | U19.2605 | |
| Bekleidungslage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen 1 | innen 2 | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | | | |
| Naphthalin | 3,734 | 1,550 | 3,941 | 0,581 | 2,243 | 4,157 | 5,198 | 0,366 | 1,131 | 1,497 |
| Acenaphthylen | 11,011 | 1,998 | 28,391 | 0,471 | 6,843 | 1,302 | 30,956 | 0,362 | 0,627 | 0,989 |
| Acenaphthen | 0,566 | 0,221 | 1,142 | 0,040 | 0,422 | 0,114 | 0,890 | 0,050 | 0,060 | 0,109 |
| Fluoren | 8,689 | 1,010 | 8,706 | 0,206 | 3,124 | 0,770 | 9,340 | 0,146 | 0,444 | 0,590 |
| Phenanthren | 16,914 | 8,078 | 40,476 | 0,911 | 10,249 | 6,772 | 43,073 | 0,706 | 1,207 | 1,913 |
| Anthracen | 3,923 | 1,712 | 7,374 | 0,245 | 2,513 | 1,257 | 6,681 | 0,174 | 0,276 | 0,449 |
| Fluoranthren | 8,904 | 7,976 | 2,548 | 0,046 | 3,540 | 7,671 | 4,079 | 0,100 | 0,044 | 0,144 |
| Pyren | 4,678 | 7,492 | 2,040 | 0,078 | 2,997 | 7,434 | 3,047 | 0,163 | 0,041 | 0,204 |
| Benz(a)anthracen | 0,818 | 1,448 | 0,137 | 0,003 | 0,541 | 1,956 | 0,125 | 0,007 | < 0,002 | 0,007 |
| Chrysen | 1,273 | 1,554 | 0,154 | 0,005 | 0,647 | 2,267 | 0,182 | 0,010 | 0,002 | 0,012 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,491 | 0,487 | 0,049 | 0,005 | 0,338 | 0,894 | 0,048 | 0,006 | 0,002 | 0,008 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,224 | 0,501 | 0,057 | < 0,002 | 0,287 | 0,297 | 0,063 | 0,003 | < 0,002 | 0,003 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,590 | 0,591 | 0,215 | 0,025 | 0,245 | 0,198 | 0,208 | 0,004 | < 0,002 | 0,004 |
| Benzo[e]pyren | 0,160 | 0,221 | 0,002 | < 0,002 | 0,961 | 0,334 | 0,024 | 0,002 | < 0,002 | 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,625 | 0,624 | 0,039 | 0,002 | 0,257 | 0,969 | 0,093 | 0,002 | < 0,002 | 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,057 | 0,088 | 0,010 | < 0,002 | 0,032 | 0,204 | 0,010 | 0,002 | 0,002 | 0,005 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,214 | 0,363 | 0,022 | 0,003 | 0,167 | 0,494 | 0,038 | 0,005 | 0,008 | 0,013 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,279 | 0,513 | 0,039 | 0,005 | 0,225 | 0,609 | 0,054 | 0,003 | 0,003 | 0,005 |
| Summe: | 63,15 | 36,43 | 95,34 | 2,63 | 35,63 | 37,70 | 104,11 | 2,11 | 3,85 | 5,96 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 77,43 | 75,90 | 74,90 | 81,70 | 73,80 | 73,25 | 74,18 | 82,57 | 80,52 | |
| D10-Anthracen | 85,45 | 86,12 | 93,58 | 81,81 | 92,60 | 82,35 | 81,40 | 76,19 | 81,11 | |
| D12-Benzo(a)pyren | 87,69 | 87,48 | 95,67 | 96,54 | 95,50 | 89,17 | 92,61 | 95,61 | 91,54 | |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 51,40 | 28,20 | 20,40 | 100,00 | 29,50 | 17,90 | 12,40 | 40,20 | |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 18,72 | 26,89 | 0,54 | | 11,12 | 18,64 | 0,26 | 1,55 | |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 46,15 | | | | 31,56 | | | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,37 | | | | 1,13 | | | | | |

Tabelle 15 Technikum, Versuch V1.4, "trockene Beladung", Material C und D

| Material-Kennung | C | | | | D | | | |
|---|--------------------------------------|--------------|---------------|-------------|------------------------------------|--------------|---------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE, auf 3D-Aramid-Vlies laminiert | | | | PUR, auf 3D-Aramid-Vlies laminiert | | | |
| Probenbezeichnung | V14C | V14Ca | V14Cb | V14Cc | V14D | V14Da | V14Db | V14Dc |
| Analysenkennung | U19.2606 | U19.2607 | U19.2608 | U19.2609 | U19.2610 | U19.2611 | U19.2612 | U19.2613 |
| Bekleidungs-lage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 3,032 | 0,921 | 4,253 | 1,064 | 7,073 | 1,329 | 7,693 | 0,051 |
| Acenaphthylen | 14,568 | 1,599 | 41,049 | 0,970 | 11,703 | 1,597 | 37,184 | 0,033 |
| Acenaphthen | 0,727 | 0,122 | 2,097 | 0,458 | 0,606 | 0,221 | 1,680 | < 0,002 |
| Fluoren | 3,840 | 0,599 | 12,071 | 0,531 | 3,988 | 0,928 | 11,035 | 0,013 |
| Phenanthren | 13,758 | 8,075 | 38,419 | 1,048 | 27,589 | 9,098 | 64,013 | 0,077 |
| Anthracen | 1,688 | 1,412 | 8,942 | 0,175 | 2,020 | 1,473 | 6,832 | 0,014 |
| Fluoranthren | 2,936 | 6,525 | 5,733 | 0,031 | 5,137 | 9,274 | 2,923 | 0,007 |
| Pyren | 2,751 | 5,969 | 2,747 | 0,020 | 3,653 | 8,331 | 2,606 | 0,005 |
| Benz(a)anthracen | 0,577 | 1,316 | 0,216 | < 0,002 | 0,821 | 1,594 | 0,153 | 0,002 |
| Chrysen | 0,688 | 1,629 | 0,246 | < 0,002 | 1,040 | 2,437 | 0,182 | 0,002 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,175 | 0,605 | 0,102 | < 0,002 | 0,249 | 1,431 | 0,082 | < 0,002 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,205 | 0,376 | 0,124 | < 0,002 | 0,299 | 0,520 | 0,083 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,423 | 0,279 | 0,174 | 0,002 | 0,456 | 0,372 | 0,313 | 0,004 |
| Benzo[e]pyren | 0,093 | 0,230 | 0,109 | < 0,002 | 0,185 | 0,393 | 0,045 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,286 | 0,571 | 0,259 | < 0,002 | 0,503 | 1,152 | 0,129 | 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,054 | 0,104 | 0,035 | < 0,002 | 0,055 | 0,055 | 0,002 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,171 | 0,296 | 0,068 | < 0,002 | 0,238 | 0,355 | 0,032 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,203 | 0,336 | 0,134 | < 0,002 | 0,271 | 0,283 | 0,016 | 0,002 |
| Summe: | 46,17 | 30,96 | 116,78 | 4,30 | 65,89 | 40,84 | 135,00 | 0,21 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 75,98 | 73,33 | 76,31 | 79,69 | 77,80 | 80,31 | 74,85 | 71,56 |
| D10-Anthracen | 79,23 | 83,12 | 83,60 | 80,19 | 86,89 | 83,05 | 81,22 | 80,47 |
| D12-Benzo(a)pyren | 91,99 | 91,26 | 86,27 | 83,02 | 91,42 | 88,71 | 92,02 | 92,71 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 32,10 | 30,90 | 37,00 | 100,00 | 34,90 | 28,80 | 36,30 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 9,94 | 36,09 | 1,59 | | 14,25 | 38,88 | 0,08 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 47,62 | | | | 53,21 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 0,97 | | | | 1,24 | | | |

Tabelle 16 Technikum, Versuch V1.4, "trockene Beladung", Material E und F

| Material-Kennung | E | | | | F | | | |
|---|---|--------------|--------------|-------------|--|--------------|--------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE auf 3D-Aramid-Vlies laminiert (Gore-Tex Fireblocker N 2L) | | | | ePTFE, unter Vlies m. Silicon-Dots laminiert (Gore Airlock 2L) | | | |
| Probenbezeichnung | V14E | V14Ea | V14Eb | V14Ec | VI14F | V14Fa | V14Fb | V14Fc |
| Analysenkennung | U19.2614 | U19.2615 | U19.2616 | U19.2617 | U19.2618 | U19.2619 | U19.2620 | U19.2621 |
| Bekleidungslage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 1,457 | 0,312 | 2,914 | 0,226 | 1,638 | 0,337 | 10,843 | 0,136 |
| Acenaphthylen | 2,576 | 1,307 | 10,129 | 0,288 | 6,595 | 0,987 | 12,320 | 0,089 |
| Acenaphthen | 0,187 | 0,052 | 0,261 | 0,122 | 0,110 | 0,194 | 0,507 | 0,003 |
| Fluoren | 0,975 | 0,698 | 2,189 | 0,994 | 0,756 | 0,324 | 3,689 | 0,028 |
| Phenanthren | 28,043 | 14,885 | 44,879 | 1,475 | 26,953 | 11,911 | 45,753 | 0,187 |
| Anthracen | 2,708 | 2,834 | 7,248 | 0,254 | 4,875 | 8,322 | 10,255 | 0,025 |
| Fluoranthren | 4,637 | 11,157 | 0,960 | 0,009 | 3,390 | 9,290 | 6,138 | 0,002 |
| Pyren | 3,829 | 8,891 | 0,402 | 0,005 | 3,092 | 5,936 | 0,036 | < 0,002 |
| Benz(a)anthracen | 0,195 | 0,988 | 0,010 | < 0,002 | 0,348 | 0,340 | 0,025 | < 0,002 |
| Chrysen | 0,442 | 1,327 | 0,044 | < 0,002 | 0,768 | 1,295 | 0,004 | < 0,002 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,231 | 0,570 | 0,021 | < 0,002 | 0,132 | 0,183 | 0,046 | < 0,002 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,111 | 0,181 | 0,039 | < 0,002 | 0,115 | 0,054 | 0,009 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,442 | 0,226 | 0,344 | < 0,002 | 0,474 | 0,654 | 0,355 | 0,004 |
| Benzo[e]pyren | 0,088 | 0,146 | 0,004 | < 0,002 | 0,103 | 0,061 | 0,004 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,276 | 0,439 | 0,007 | < 0,002 | 0,112 | 0,473 | 0,019 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,010 | 0,016 | < 0,002 | < 0,002 | 0,020 | 0,014 | 0,014 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,121 | 0,077 | 0,261 | < 0,002 | 0,023 | 0,126 | 0,026 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,021 | 0,110 | 0,012 | < 0,002 | 0,013 | 0,055 | 0,084 | < 0,002 |
| Summe: | 46,35 | 44,22 | 69,72 | 3,37 | 49,52 | 40,55 | 90,13 | 0,47 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 72,57 | 81,75 | 77,15 | 73,18 | 80,16 | 70,77 | 80,18 | 77,11 |
| D10-Anthracen | 84,03 | 79,51 | 91,30 | 81,23 | 91,81 | 91,97 | 83,93 | 81,66 |
| D12-Benzo(a)pyren | 93,61 | 96,93 | 92,86 | 87,82 | 90,07 | 89,02 | 94,58 | 90,12 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 36,50 | 35,00 | 28,50 | 99,90 | 37,60 | 41,60 | 20,70 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 16,14 | 24,40 | 0,96 | | 15,25 | 37,49 | 0,10 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 41,50 | | | | 52,84 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,12 | | | | 0,94 | | | |

Tabelle 17 Technikum, Versuch V1.4, "trockene Beladung", Material G und H

| Material-Kennung | G | | | | H | | | |
|---|--|--------------|---------------|-------------|---|--------------|---------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE, innen an Vlies laminiert (Gore-Tex) | | | | PU, an dünnem PES-Gewirk laminiert, n. innen (Topas PU) | | | |
| Probenbezeichnung | V14G | V14Ga | V14Gb | V14Gc | V14H | V14Ha | V14Hb | V14Hc |
| Analysenkennung | U19.2622 | U19.2623 | U19.2624 | U19.2625 | U19.2626 | U19.2627 | U19.2628 | U19.2629 |
| Bekleidungs-lage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 2,041 | 0,075 | 3,327 | 1,039 | 2,776 | 2,478 | 7,967 | 1,887 |
| Acenaphthylen | 10,667 | 0,643 | 43,884 | 0,309 | 12,723 | 2,969 | 40,434 | 0,910 |
| Acenaphthen | 1,462 | 0,117 | 2,229 | 0,026 | 1,581 | 0,161 | 2,825 | 0,102 |
| Fluoren | 2,836 | 1,125 | 9,991 | 0,099 | 3,690 | 1,529 | 8,536 | 0,302 |
| Phenanthren | 11,825 | 12,161 | 58,263 | 0,266 | 10,653 | 9,643 | 55,448 | 0,691 |
| Anthracen | 2,276 | 0,168 | 6,459 | 0,051 | 1,538 | 3,238 | 5,690 | 0,126 |
| Fluoranthren | 5,684 | 9,625 | 3,339 | 0,005 | 6,679 | 9,820 | 2,577 | 0,027 |
| Pyren | 0,224 | 0,771 | 0,834 | 0,004 | 5,431 | 8,557 | 1,725 | 0,019 |
| Benz(a)anthracen | 0,730 | 1,413 | 0,024 | < 0,002 | 1,069 | 1,466 | 0,079 | 0,002 |
| Chrysen | 0,814 | 1,261 | 0,069 | < 0,002 | 1,410 | 2,064 | 0,107 | 0,004 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,953 | 1,393 | 0,042 | < 0,002 | 1,080 | 1,699 | 0,153 | < 0,002 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,114 | 0,033 | 0,008 | < 0,002 | 0,223 | 0,423 | 0,050 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,773 | 0,495 | 0,247 | < 0,002 | 0,400 | 0,265 | 0,171 | 0,013 |
| Benzo[e]pyren | 0,111 | 0,041 | 0,015 | < 0,002 | 0,207 | 0,355 | 0,026 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,374 | 0,461 | 0,009 | < 0,002 | 0,355 | 0,962 | 0,080 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,015 | 0,165 | < 0,002 | < 0,002 | 0,131 | 0,158 | 0,012 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,035 | 0,078 | 0,014 | < 0,002 | 0,308 | 0,553 | 0,059 | 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,053 | 0,779 | 0,030 | < 0,002 | 0,375 | 0,597 | 0,035 | 0,003 |
| Summe: | 40,99 | 30,80 | 128,78 | 1,80 | 50,63 | 46,94 | 125,97 | 4,09 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 71,40 | 70,07 | 82,07 | 74,07 | 76,27 | 78,06 | 77,66 | 80,94 |
| D10-Anthracen | 89,35 | 89,29 | 85,89 | 92,50 | 78,51 | 88,51 | 83,36 | 90,06 |
| D12-Benzo(a)pyren | 91,17 | 94,74 | 93,75 | 98,72 | 89,01 | 95,34 | 93,64 | 89,42 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 35,80 | 27,20 | 37,00 | 100,00 | 32,40 | 21,80 | 45,80 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 11,03 | 35,03 | 0,67 | | 15,21 | 27,46 | 1,87 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 46,72 | | | | 44,54 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 0,88 | | | | 1,14 | | | |

Tabelle 18 Technikum, Versuch V1.4, "trockene Beladung", Material I und J

| Material-Kennung | I | | | J | | | |
|---|----------------------------------|--------------|-------------|---|--------------|---------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE, am Obermaterial laminiert | | | ePTFE, an Aramid-Vlies laminiert, <i>innen</i> (Gore-Tex Fireblocker) | | | |
| Probenbezeichnung | V14I | V14Ia | V14Ib | V14J | V14Ja | V14Jb | V14Jc |
| Analysenkennung | U19.2630 | U19.2631 | U19.2632 | U19.2633 | U19.2634 | U19.2635 | U19.2636 |
| Bekleidungslage | gesamt | außen + M | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | |
| Naphthalin | 2,928 | 3,527 | 0,436 | 0,741 | 3,777 | 2,333 | 1,004 |
| Acenaphthylen | 12,458 | 26,392 | 0,331 | 6,343 | 2,005 | 22,135 | 0,371 |
| Acenaphthen | 0,659 | 1,427 | 0,037 | 0,871 | 0,456 | 2,375 | 0,016 |
| Fluoren | 4,586 | 8,410 | 0,163 | 5,559 | 1,354 | 12,083 | 0,029 |
| Phenanthren | 20,838 | 39,524 | 0,671 | 16,131 | 12,054 | 54,352 | 0,084 |
| Anthracen | 2,686 | 5,121 | 0,151 | 5,372 | 5,310 | 7,806 | 0,048 |
| Fluoranthren | 2,341 | 4,638 | 0,043 | 6,631 | 8,564 | 2,383 | 0,042 |
| Pyren | 1,874 | 3,425 | 0,031 | 4,886 | 7,860 | 1,734 | 0,033 |
| Benz(a)anthracen | 0,226 | 1,022 | 0,004 | 1,191 | 1,673 | 0,122 | < 0,002 |
| Chrysen | 0,558 | 1,215 | 0,005 | 1,487 | 1,947 | 0,161 | < 0,002 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,167 | 0,919 | 0,002 | 1,103 | 1,216 | 0,095 | < 0,002 |
| Benzo[j]fluoranthren | 0,104 | 0,206 | < 0,002 | 0,541 | 0,946 | 0,060 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,768 | 0,759 | 0,016 | 0,562 | 0,510 | 0,377 | 0,008 |
| Benzo[e]pyren | 0,099 | 0,169 | < 0,002 | 0,276 | 0,529 | 0,033 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,135 | 0,308 | < 0,002 | 0,769 | 1,554 | 0,056 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,003 | 0,024 | < 0,002 | 0,135 | 0,270 | 0,003 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,070 | 0,119 | 0,003 | 0,439 | 0,717 | 0,020 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,074 | 0,227 | 0,005 | 0,422 | 0,600 | 0,010 | < 0,002 |
| Summe: | 50,57 | 97,43 | 1,90 | 53,46 | 51,34 | 106,14 | 1,64 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 80,88 | 77,93 | 70,17 | 73,55 | 76,74 | 74,55 | 70,19 |
| D10-Anthracen | 90,31 | 83,50 | 81,55 | 85,46 | 90,68 | 84,62 | 90,57 |
| D12-Benzo(a)pyren | 90,19 | 80,47 | 92,27 | 92,67 | 97,38 | 95,36 | 92,22 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 39,80 | 60,20 | 100,00 | 32,10 | 26,70 | 41,20 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 38,78 | 1,14 | | 16,48 | 28,34 | 0,67 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 39,92 | | | 45,49 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,27 | | | 1,18 | | | |

Tabelle 19 Technikum, Versuch V1.4, "trockene Beladung", Material K und L

| Material-Kennung | K | | | | L | | | |
|---|---|--------------|--------------|-------------|--|--------------|---------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE, unter Aramid-Vlies mit Silicon-Dots laminiert (Gore) | | | | PE(S), auf hauchdünnem PES-Gestrick (Sympatex) | | | |
| Probenbezeichnung | V14K | V14Ka | V14Kb | V14Kc | V14L | V14La | V14Lb | V14Lc |
| Analysenkennung | U19.2637 | U19.2638 | U19.2639 | U19.2640 | U19.2641 | U19.2642 | U19.2643 | U19.2644 |
| Bekleidungslage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 0,813 | 1,271 | 2,819 | 0,944 | 3,020 | 3,773 | 3,793 | 1,435 |
| Acenaphthylen | 7,054 | 0,074 | 29,242 | 0,278 | 8,386 | 1,652 | 26,496 | 0,289 |
| Acenaphthen | 1,211 | 0,207 | 2,180 | 0,019 | 0,502 | 0,465 | 1,546 | 0,118 |
| Fluoren | 11,849 | 0,483 | 12,897 | 0,070 | 4,467 | 1,276 | 10,864 | 0,731 |
| Phenanthren | 18,104 | 13,960 | 37,044 | 0,221 | 11,148 | 8,060 | 41,856 | 1,273 |
| Anthracen | 2,792 | 2,519 | 5,818 | 0,038 | 2,840 | 1,442 | 6,082 | 0,227 |
| Fluoranthren | 4,845 | 13,273 | 2,909 | 0,012 | 4,154 | 7,264 | 4,877 | 0,020 |
| Pyren | 3,375 | 9,256 | 1,044 | 0,010 | 3,379 | 8,375 | 3,198 | 0,016 |
| Benz(a)anthracen | 0,534 | 1,305 | 0,162 | 0,003 | 0,804 | 1,604 | 0,180 | 0,002 |
| Chrysen | 0,811 | 1,779 | 0,101 | 0,004 | 0,903 | 2,238 | 0,100 | 0,003 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,471 | 1,516 | 0,131 | 0,002 | 0,460 | 2,050 | 0,211 | 0,002 |
| Benzo[j]fluoranthren | 0,496 | 1,307 | 0,109 | < 0,002 | 0,290 | 1,243 | 0,159 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,212 | 0,622 | 0,077 | 0,006 | 0,405 | 0,820 | 0,097 | < 0,002 |
| Benzo[e]pyren | 0,735 | 1,432 | 0,247 | < 0,002 | 0,595 | 1,313 | 0,271 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,984 | 1,458 | 0,154 | < 0,002 | 0,897 | 1,940 | 0,191 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,348 | 0,629 | 0,100 | < 0,002 | 0,041 | 0,949 | 0,114 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,336 | 0,885 | 0,351 | 0,003 | 0,485 | 0,896 | 0,311 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,418 | 0,783 | 0,138 | 0,003 | 0,358 | 1,005 | 0,327 | < 0,002 |
| Summe: | 55,39 | 52,75 | 95,52 | 1,61 | 43,13 | 46,36 | 100,67 | 4,11 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 73,66 | 79,62 | 81,23 | 74,21 | 80,22 | 74,23 | 82,50 | 82,00 |
| D10-Anthracen | 82,11 | 86,46 | 89,75 | 81,15 | 87,12 | 87,56 | 85,69 | 80,14 |
| D12-Benzo(a)pyren | 93,23 | 88,56 | 94,17 | 92,60 | 96,51 | 92,23 | 90,69 | 96,50 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 35,00 | 44,00 | 21,00 | 100,00 | 31,50 | 22,30 | 46,20 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 18,46 | 42,03 | 0,34 | | 14,60 | 22,45 | 1,90 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 60,83 | | | | 38,96 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 0,91 | | | | 1,11 | | | |

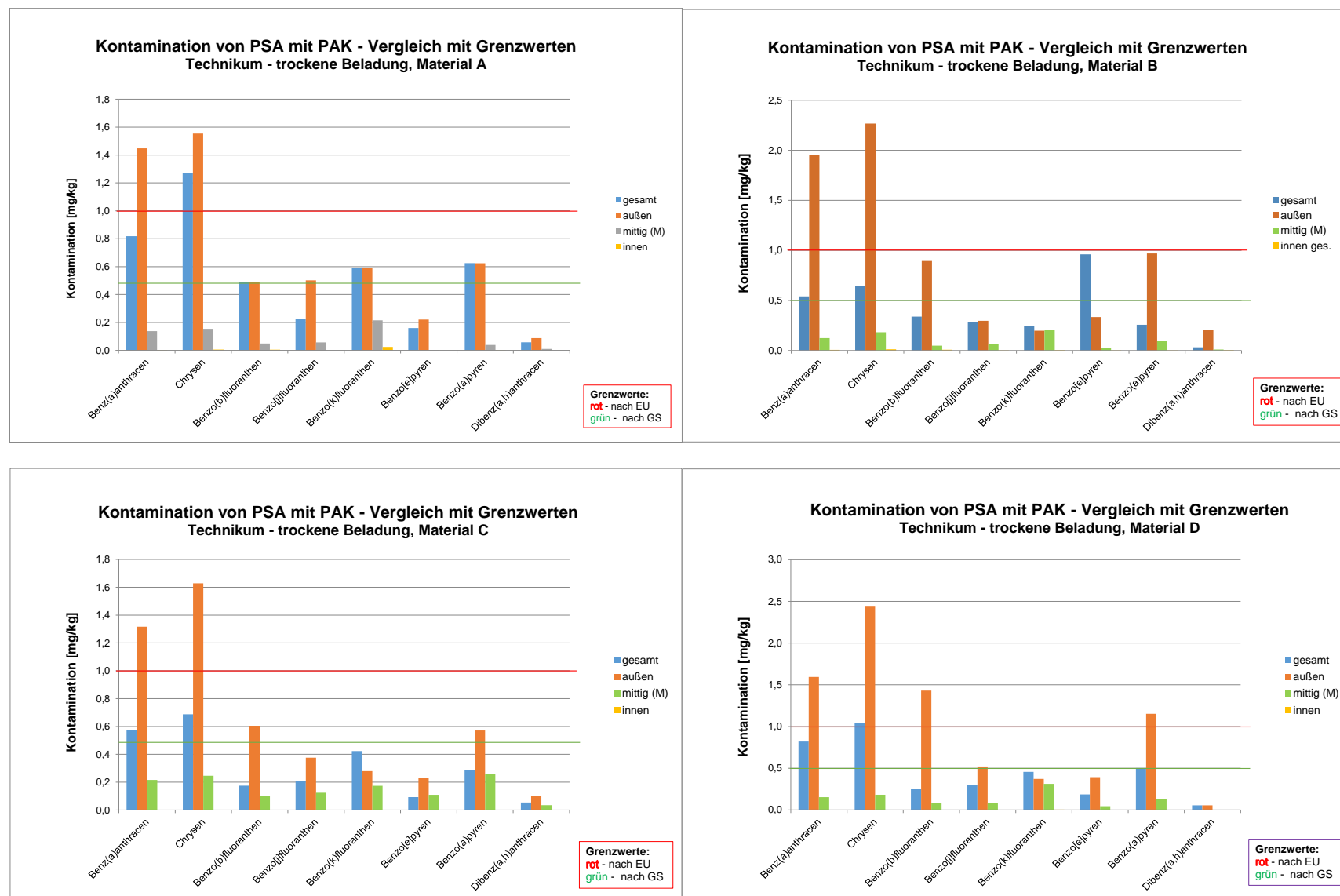


Abbildung 52 PAK-Kontamination nach Schichten, Technikum - trockene Beladung, Material A bis D

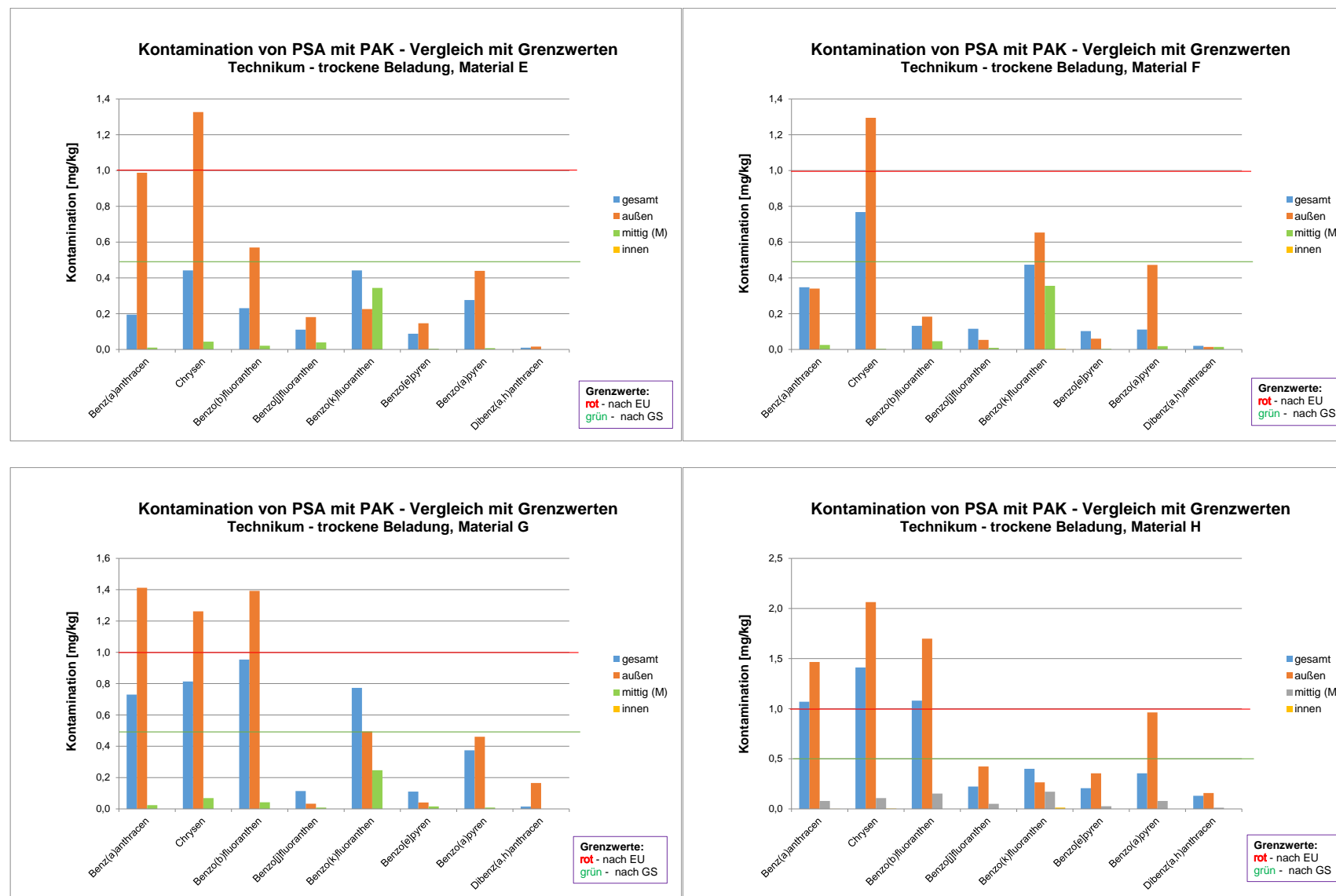


Abbildung 53 PAK-Kontamination nach Schichten, Technikum - trockene Beladung, Material E bis H

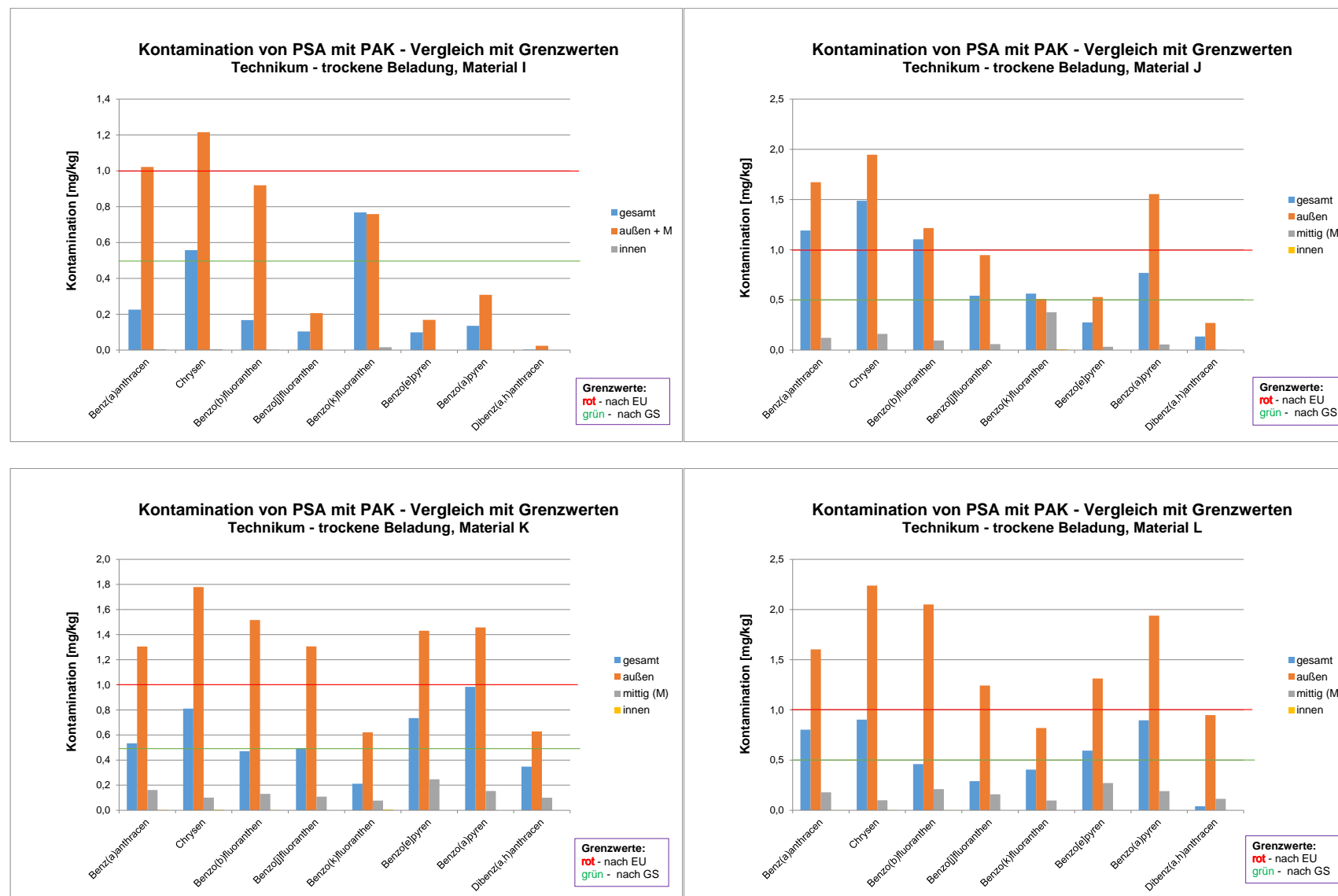


Abbildung 54 PAK-Kontamination nach Schichten, Technikum - trockene Beladung, Material I bis L

Tabelle 20 Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material A und B

| Material-Kennung | A | | | | B | | | | | |
|---|---|--------------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Membran-Typ | PUR, auf dünnem 3D-Aramid/Viskose-Vlies laminiert | | | | PE(S), auf hauchdünnem PES-Gewebe | | | | | |
| Probenbezeichnung | VL15A | VL15Aa | VL15Ab | VL15Ac | VL15B | VL15Ba | VL15Bb | VL15Bc | VL15Bd | |
| Analysenkennung | U19.2705 | U19.2706 | U19.2707 | U19.2708 | U19.2709 | U19.2710 | U19.2711 | U19.2712 | U19.2713 | Summe |
| Bekleidungslage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen 1 | innen 2 | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | | | |
| Naphthalin | 0,743 | 0,569 | 0,904 | 0,034 | 0,490 | 0,578 | 3,591 | 0,116 | 0,231 | 0,346 |
| Acenaphthylen | 8,490 | 4,312 | 22,372 | 0,050 | 4,445 | 0,584 | 27,735 | 0,293 | 0,094 | 0,387 |
| Acenaphthen | 2,145 | 0,534 | 4,800 | 0,003 | 0,742 | 0,078 | 8,832 | 0,022 | 0,002 | 0,024 |
| Fluoren | 6,218 | 1,356 | 20,972 | 0,019 | 5,246 | 0,884 | 26,866 | 0,114 | 0,025 | 0,139 |
| Phenanthren | 17,767 | 8,837 | 36,241 | 0,071 | 10,133 | 6,331 | 47,156 | 0,427 | 0,050 | 0,477 |
| Anthracen | 2,822 | 1,483 | 5,713 | 0,011 | 1,568 | 1,046 | 7,520 | 0,027 | 0,012 | 0,039 |
| Fluoranthren | 5,440 | 1,462 | 2,343 | 0,003 | 2,402 | 6,152 | 4,473 | 0,027 | < 0,002 | 0,027 |
| Pyren | 2,539 | 3,490 | 0,586 | 0,002 | 1,182 | 3,551 | 1,740 | 0,018 | < 0,002 | 0,018 |
| Benzo(a)anthracen | 0,468 | 0,695 | 0,034 | < 0,002 | 0,196 | 0,754 | 0,155 | 0,002 | < 0,002 | 0,002 |
| Chrysen | 0,291 | 0,430 | 0,020 | < 0,002 | 0,514 | 0,570 | 0,190 | < 0,002 | < 0,002 | 0,000 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,415 | 0,914 | 0,024 | < 0,002 | 0,213 | 0,701 | 0,102 | < 0,002 | < 0,002 | 0,000 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,412 | 0,621 | 0,080 | < 0,002 | 0,204 | 0,658 | 0,256 | < 0,002 | < 0,002 | 0,000 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,155 | 0,241 | 0,014 | < 0,002 | 0,076 | 0,267 | 0,055 | 0,006 | < 0,002 | 0,006 |
| Benzo[e]pyren | 0,681 | 0,957 | 0,047 | < 0,002 | 0,289 | 1,135 | 0,200 | < 0,002 | < 0,002 | 0,000 |
| Benzo(a)pyren | 0,391 | 0,600 | 0,030 | < 0,002 | 0,187 | 0,661 | 0,123 | 0,005 | < 0,002 | 0,005 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,145 | 0,243 | 0,060 | < 0,002 | 0,060 | 0,263 | 0,129 | < 0,002 | < 0,002 | 0,000 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,323 | 0,337 | 0,066 | < 0,002 | 0,139 | 0,442 | 0,139 | < 0,002 | < 0,002 | 0,000 |
| Benzo(g,h,i)perylen | 0,176 | 0,287 | 0,028 | < 0,002 | 0,092 | 0,356 | 0,094 | < 0,002 | < 0,002 | 0,000 |
| Summe: | 49,62 | 27,37 | 94,33 | 0,19 | 28,18 | 25,01 | 129,35 | 1,06 | 0,41 | 1,47 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 70,16 | 75,23 | 73,15 | 80,00 | 80,34 | 81,96 | 78,55 | 74,59 | 72,69 | |
| D10-Anthracen | 85,90 | 80,21 | 81,06 | 88,01 | 88,56 | 87,70 | 82,60 | 89,70 | 88,65 | |
| D12-Benzo(a)pyren | 95,67 | 91,23 | 90,33 | 98,04 | 94,00 | 93,37 | 95,96 | 90,00 | 97,03 | |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 51,40 | 28,20 | 20,40 | 100,00 | 29,50 | 17,90 | 12,40 | 40,20 | |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 14,07 | 26,60 | 0,04 | | 7,38 | 23,15 | 0,13 | 0,17 | |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 40,71 | | | | 30,83 | | | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,22 | | | | 0,91 | | | | | |

Tabelle 21 Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material C und D

| Material-Kennung | C | | | | D | | | |
|---|--------------------------------------|----------|------------|----------|------------------------------------|----------|------------|----------|
| Membran-Typ | ePTFE, auf 3D-Aramid-Vlies laminiert | | | | PUR, auf 3D-Aramid-Vlies laminiert | | | |
| Probenbezeichnung | VL15C | VL15Ca | VL15Cb | VL15Cc | VL15D | VL15Da | VL15Db | VL15Dc |
| Analysenkennung | U19.2714 | U19.2715 | U19.2716 | U19.2717 | U19.2718 | U19.2719 | U19.2720 | U19.2721 |
| Bekleidungs-lage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 6,052 | 1,437 | 11,217 | 0,666 | 1,859 | 0,760 | 9,033 | 0,111 |
| Acenaphthylen | 11,231 | 1,686 | 32,730 | 0,195 | 10,653 | 1,462 | 35,365 | 0,029 |
| Acenaphthen | 3,601 | 0,504 | 6,182 | 0,065 | 1,573 | 0,318 | 5,963 | 0,002 |
| Fluoren | 11,812 | 1,796 | 31,300 | 0,311 | 10,465 | 1,846 | 32,020 | 0,009 |
| Phenanthren | 11,272 | 9,893 | 37,433 | 0,213 | 13,598 | 8,162 | 33,136 | 0,018 |
| Anthracen | 3,520 | 1,665 | 5,840 | 0,031 | 2,092 | 1,446 | 5,125 | < 0,002 |
| Fluoranthren | 4,418 | 8,337 | 2,657 | 0,004 | 3,440 | 4,909 | 2,553 | < 0,002 |
| Pyren | 2,162 | 5,074 | 1,514 | 0,003 | 1,783 | 2,721 | 1,086 | < 0,002 |
| Benz(a)anthracen | 0,362 | 1,216 | 0,253 | < 0,002 | 0,362 | 0,595 | 0,126 | < 0,002 |
| Chrysen | 0,266 | 0,893 | 0,149 | < 0,002 | 0,280 | 0,463 | 0,093 | < 0,002 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,344 | 1,079 | 0,285 | < 0,002 | 0,362 | 0,438 | 0,155 | < 0,002 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,359 | 0,939 | 0,217 | < 0,002 | 0,296 | 0,515 | 0,125 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,129 | 0,446 | 0,120 | < 0,002 | 0,147 | 0,171 | 0,067 | < 0,002 |
| Benzo(e)pyren | 0,547 | 1,882 | 0,386 | < 0,002 | 0,590 | 0,729 | 0,213 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,298 | 1,058 | 0,256 | < 0,002 | 0,346 | 0,418 | 0,143 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,114 | 0,420 | 0,227 | < 0,002 | 0,121 | 0,173 | 0,044 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,209 | 0,661 | 0,490 | < 0,002 | 0,206 | 0,236 | 0,125 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,125 | 0,617 | 0,213 | < 0,002 | 0,176 | 0,183 | 0,083 | < 0,002 |
| Summe: | 56,82 | 39,61 | 131,47 | 1,49 | 48,35 | 25,54 | 125,45 | 0,17 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 73,12 | 77,67 | 78,86 | 78,22 | 72,45 | 72,69 | 76,46 | 70,24 |
| D10-Anthracen | 90,32 | 82,03 | 92,86 | 90,01 | 87,57 | 81,67 | 85,22 | 86,01 |
| D12-Benzo(a)pyren | 90,27 | 91,07 | 93,37 | 94,65 | 94,03 | 91,67 | 91,27 | 89,65 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 32,10 | 30,90 | 37,00 | 100,00 | 34,90 | 28,80 | 36,30 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 12,71 | 40,62 | 0,55 | | 8,91 | 36,13 | 0,06 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 53,89 | | | | 45,11 | | | |
| Verhältnis gemessen/berechnet | 1,05 | | | | 1,07 | | | |

Tabelle 22 Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material E und F

| Material-Kennung | E | | | | F | | | |
|---|---|--------------|--------------|-------------|--|--------------|--------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE auf 3D-Aramid-Vlies laminiert (Gore-Tex Fireblocker N 2L) | | | | ePTFE, unter Vlies m. Silicon-Dots laminiert (Gore Airlock 2L) | | | |
| Probenbezeichnung | VL15E | VL15Ea | VL15Eb | VL15Ec | VL15F | VL15Fa | VL15Fb | VL15Fc |
| Analysenkennung | U19.2722 | U19.2723 | U19.2724 | U19.2725 | U19.2726 | U19.2727 | U19.2728 | U19.2729 |
| Bekleidungs-lage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 1,790 | 1,582 | 0,554 | 0,660 | 3,218 | 3,087 | 1,678 | 0,136 |
| Acenaphthylen | 7,398 | 3,358 | 29,473 | 0,379 | 8,483 | 12,291 | 19,760 | 0,089 |
| Acenaphthen | 3,736 | 0,804 | 0,291 | 0,004 | 2,373 | 3,972 | 4,179 | 0,003 |
| Fluoren | 7,131 | 2,822 | 19,438 | 0,133 | 9,210 | 6,328 | 9,798 | 0,028 |
| Phenanthren | 16,630 | 10,089 | 35,384 | 0,576 | 19,003 | 9,322 | 33,213 | 0,187 |
| Anthracen | 3,894 | 5,009 | 3,045 | 0,019 | 5,026 | 2,747 | 4,857 | 0,025 |
| Fluoranthren | 2,384 | 9,763 | 1,399 | 0,031 | 2,050 | 3,696 | 3,360 | 0,002 |
| Pyren | 3,670 | 7,190 | 0,492 | 0,014 | 3,548 | 2,078 | 2,463 | < 0,002 |
| Benz(a)anthracen | 0,686 | 1,256 | 0,173 | < 0,002 | 0,395 | 0,455 | 0,406 | < 0,002 |
| Chrysen | 0,466 | 0,841 | 0,131 | 0,002 | 0,301 | 0,305 | 0,498 | < 0,002 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,573 | 0,895 | 0,202 | < 0,002 | 0,389 | 0,395 | 0,395 | < 0,002 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,819 | 1,303 | 0,298 | < 0,002 | 0,181 | 0,365 | 0,217 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,211 | 0,330 | 0,074 | < 0,002 | 0,147 | 0,165 | 0,239 | 0,004 |
| Benzo[e]pyren | 0,911 | 1,456 | 0,285 | < 0,002 | 0,365 | 0,648 | 0,358 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,530 | 0,812 | 0,174 | < 0,002 | 0,192 | 0,392 | 0,256 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,215 | 0,417 | 0,185 | < 0,002 | 0,105 | 0,159 | 0,255 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,285 | 0,536 | 0,135 | < 0,002 | 0,187 | 0,298 | 0,123 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,215 | 0,435 | 0,112 | < 0,002 | 0,081 | 0,157 | 0,157 | < 0,002 |
| Summe: | 51,54 | 48,90 | 91,84 | 1,82 | 55,25 | 46,86 | 82,21 | 0,47 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 70,02 | 71,37 | 78,65 | 80,12 | 79,47 | 77,57 | 74,24 | 77,46 |
| D10-Anthracen | 80,99 | 83,57 | 90,02 | 91,04 | 88,37 | 80,22 | 82,04 | 83,00 |
| D12-Benzo(a)pyren | 90,08 | 91,56 | 89,23 | 90,34 | 91,26 | 96,37 | 96,04 | 94,26 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 36,50 | 35,00 | 28,50 | 99,90 | 37,60 | 41,60 | 20,70 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 17,85 | 32,15 | 0,52 | | 17,62 | 34,20 | 0,10 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 50,51 | | | | 51,92 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,02 | | | | 1,06 | | | |

Tabelle 23 Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material G und H

| Material-Kennung | G | | | | H | | | |
|---|--|--------------|---------------|-------------|---|--------------|---------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE, innen an Vlies laminiert (Gore-Tex) | | | | PU, an dünnem PES-Gewirk laminiert, n. innen (Topas PU) | | | |
| Probenbezeichnung | VL15G | VL15Ga | VL15Gb | VL15Gc | VL15H | VL15Ha | VL15Hb | VL15Hc |
| Analysenkennung | U19.2730 | U19.2731 | U19.2732 | U19.2733 | U19.2734 | U19.2735 | U19.2736 | U19.2737 |
| Bekleidungs-lage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 0,502 | 0,819 | 1,234 | 0,233 | 2,320 | 2,500 | 5,756 | 0,548 |
| Acenaphthylen | 11,871 | 13,613 | 27,336 | 0,065 | 14,125 | 2,122 | 32,692 | 0,244 |
| Acenaphthen | 1,040 | 2,318 | 3,511 | 0,004 | 0,849 | 0,164 | 1,659 | 0,016 |
| Fluoren | 9,921 | 9,873 | 19,704 | 0,039 | 7,953 | 1,195 | 12,763 | 0,069 |
| Phenanthren | 13,068 | 11,826 | 43,941 | 0,184 | 20,371 | 9,850 | 64,529 | 0,340 |
| Anthracen | 2,256 | 3,836 | 6,869 | 0,013 | 2,652 | 4,925 | 7,410 | 0,021 |
| Fluoranthren | 3,930 | 2,759 | 2,910 | < 0,002 | 3,370 | 6,929 | 3,070 | 0,009 |
| Pyren | 1,021 | 1,261 | 1,160 | 0,002 | 1,316 | 4,344 | 2,021 | 0,017 |
| Benz(a)anthracen | 0,265 | 0,280 | 0,204 | < 0,002 | 2,130 | 4,233 | 0,304 | < 0,002 |
| Chrysen | 0,255 | 0,164 | 0,161 | < 0,002 | 2,457 | 4,444 | 0,338 | 0,004 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,372 | 0,243 | 0,262 | < 0,002 | 1,045 | 2,934 | 0,122 | < 0,002 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,397 | 0,267 | 0,148 | < 0,002 | 0,728 | 0,532 | 0,118 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,152 | 0,103 | 0,114 | 0,002 | 0,152 | 0,180 | 0,028 | < 0,002 |
| Benzo[e]pyren | 0,425 | 0,396 | 0,404 | < 0,002 | 0,219 | 0,599 | 0,051 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,347 | 0,225 | 0,253 | < 0,002 | 0,832 | 1,858 | 0,123 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,324 | 0,307 | 0,106 | < 0,002 | 0,210 | 0,306 | 0,024 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,275 | 0,280 | 0,359 | < 0,002 | 0,122 | 0,867 | 0,065 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,158 | 0,102 | 0,092 | < 0,002 | 0,142 | 1,049 | 0,096 | < 0,002 |
| Summe: | 46,58 | 48,67 | 108,77 | 0,54 | 60,99 | 49,03 | 131,17 | 1,27 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 72,01 | 73,46 | 76,60 | 78,10 | 74,76 | 75,99 | 73,56 | 73,00 |
| D10-Anthracen | 83,50 | 89,07 | 87,07 | 90,40 | 81,07 | 87,04 | 82,70 | 91,34 |
| D12-Benzo(a)pyren | 93,02 | 91,37 | 94,68 | 95,99 | 94,04 | 93,04 | 91,27 | 89,04 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 35,80 | 27,20 | 37,00 | 100,00 | 32,40 | 21,80 | 45,80 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 17,42 | 29,59 | 0,20 | | 15,89 | 28,60 | 0,58 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 47,21 | | | | 45,06 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 0,99 | | | | 1,35 | | | |

Tabelle 24 Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material I und J

| Material-Kennung | I | | | J | | | |
|---|----------------------------------|---------------|-------------|---|--------------|---------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE, am Obermaterial laminiert | | | ePTFE, an Aramid-Vlies laminiert, <i>innen</i> (Gore-Tex Fireblocker) | | | |
| Probenbezeichnung | VL15I | VL15Ia | VL15Ib | VL15J | VL15Ja | VL15Jb | VL15Jc |
| Analysenkennung | U19.2738 | U19.2739 | U19.2740 | U19.2741 | U19.2742 | U19.2743 | U19.2744 |
| Bekleidungs-lage | gesamt | außen + M | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | |
| Naphthalin | 1,091 | 2,390 | 0,090 | 0,934 | 0,570 | 1,351 | 0,304 |
| Acenaphthylen | 12,157 | 22,272 | 0,172 | 8,031 | 0,991 | 22,061 | 0,245 |
| Acenaphthen | 0,685 | 1,351 | 0,005 | 0,983 | 0,059 | 1,234 | 0,007 |
| Fluoren | 5,851 | 10,484 | 0,098 | 3,138 | 0,618 | 8,600 | 0,089 |
| Phenanthren | 22,401 | 69,011 | 0,419 | 14,673 | 11,030 | 62,625 | 0,402 |
| Anthracen | 5,068 | 17,719 | 0,037 | 4,073 | 5,431 | 11,088 | 0,041 |
| Fluoranthren | 7,556 | 13,118 | 0,020 | 3,675 | 7,604 | 3,288 | 0,022 |
| Pyren | 6,365 | 12,153 | 0,017 | 3,218 | 6,637 | 2,796 | 0,030 |
| Benz(a)anthracen | 2,288 | 3,151 | < 0,002 | 1,318 | 3,636 | 0,334 | 0,012 |
| Chrysen | 2,592 | 4,545 | 0,001 | 1,822 | 4,535 | 0,587 | 0,005 |
| Benzo(b)fluoranthren | 1,363 | 3,063 | < 0,002 | 1,089 | 1,503 | 0,215 | 0,007 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,764 | 1,138 | < 0,002 | 0,750 | 1,601 | 0,175 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 1,593 | 3,142 | < 0,002 | 1,251 | 2,872 | 0,296 | < 0,002 |
| Benzo(e)pyren | 0,394 | 0,650 | < 0,002 | 0,416 | 0,642 | 0,063 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 1,054 | 2,004 | < 0,002 | 0,914 | 1,958 | 0,161 | 0,004 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,509 | 0,335 | < 0,002 | 0,328 | 0,333 | 0,007 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,750 | 0,821 | < 0,002 | 0,699 | 0,900 | 0,042 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 1,122 | 1,199 | 0,003 | 0,867 | 1,174 | 0,073 | 0,004 |
| Summe: | 73,60 | 168,55 | 0,86 | 48,18 | 52,10 | 114,99 | 1,17 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 79,90 | 81,23 | 70,66 | 71,01 | 72,10 | 78,70 | 74,65 |
| D10-Anthracen | 86,12 | 86,98 | 84,07 | 83,37 | 80,79 | 93,17 | 90,34 |
| D12-Benzo(a)pyren | 87,64 | 88,26 | 93,00 | 93,61 | 90,00 | 89,61 | 91,37 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 39,80 | 60,20 | 100,00 | 32,10 | 26,70 | 41,20 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 67,08 | 0,52 | | 16,72 | 30,70 | 0,48 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 67,60 | | | 47,91 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,09 | | | 1,01 | | | |

Tabelle 25 Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“, Material K und L

| Material-Kennung | K | | | | L | | | |
|---|---|--------------|--------------|-------------|--|--------------|---------------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE unter Aramid-Vlies m. Silicon-Dots laminiert (Gore) | | | | PE(S), auf hauchdünnem PES-Gestrick (Sympatex) | | | |
| Probenbezeichnung | VL15K | VL15Ka | VL15Kb | VL15Kc | VL15L | VL15La | VL15Lb | VL15Lc |
| Analysenkennung | U19.2745 | U19.2746 | U19.2747 | U19.2748 | U19.2749 | U19.2750 | U19.2751 | U19.2752 |
| Bekleidungs-lage | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| PAK / Belastung [mg/kg] | | | | | | | | |
| Naphthalin | 3,854 | 1,370 | 6,777 | 0,280 | 2,805 | 1,708 | 2,505 | 0,219 |
| Acenaphthylen | 12,757 | 1,822 | 26,371 | 0,143 | 7,526 | 2,327 | 40,476 | 0,490 |
| Acenaphthen | 0,598 | 0,085 | 1,203 | 0,006 | 0,321 | 0,091 | 1,193 | 0,007 |
| Fluoren | 3,457 | 0,791 | 7,142 | 0,053 | 7,930 | 1,026 | 13,547 | 0,384 |
| Phenanthren | 21,013 | 7,420 | 33,394 | 0,210 | 19,256 | 14,746 | 54,342 | 0,538 |
| Anthracen | 3,494 | 2,735 | 4,398 | 0,023 | 5,467 | 2,372 | 13,774 | 0,019 |
| Fluoranthren | 6,995 | 8,847 | 1,884 | 0,009 | 7,317 | 12,699 | 7,925 | 0,020 |
| Pyren | 6,881 | 6,558 | 1,555 | 0,002 | 5,430 | 7,883 | 4,247 | 0,002 |
| Benz(a)anthracen | 1,630 | 3,125 | 0,368 | 0,003 | 1,257 | 2,636 | 0,363 | 0,004 |
| Chrysen | 2,401 | 4,867 | 0,416 | 0,002 | 1,895 | 4,026 | 0,631 | 0,004 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,628 | 2,119 | 0,152 | < 0,002 | 0,772 | 0,994 | 0,287 | < 0,002 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,573 | 1,524 | 0,252 | < 0,002 | 0,693 | 1,953 | 0,206 | < 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 1,333 | 5,661 | 0,273 | < 0,002 | 1,435 | 2,097 | 0,081 | < 0,002 |
| Benzo(e)pyren | 0,267 | 0,755 | 0,077 | < 0,002 | 0,279 | 0,445 | 0,100 | < 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,830 | 2,521 | 0,198 | < 0,002 | 0,930 | 1,409 | 0,251 | < 0,002 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,251 | 0,451 | 0,012 | < 0,002 | 0,217 | 0,350 | 0,039 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,796 | 1,455 | 0,088 | < 0,002 | 0,672 | 1,100 | 0,110 | < 0,002 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,398 | 1,541 | 0,084 | < 0,002 | 0,581 | 0,949 | 0,105 | < 0,002 |
| Summe: | 68,15 | 53,65 | 84,64 | 0,73 | 64,78 | 58,81 | 140,18 | 1,69 |
| Wiederfindung [%] | | | | | | | | |
| D8-Naphthalin | 74,02 | 78,79 | 77,02 | 70,07 | 71,99 | 74,06 | 78,54 | 77,66 |
| D10-Anthracen | 88,67 | 87,67 | 82,56 | 83,04 | 82,03 | 86,69 | 86,03 | 87,01 |
| D12-Benzo(a)pyren | 91,89 | 92,67 | 93,37 | 91,31 | 92,01 | 98,65 | 89,30 | 95,37 |
| FG-Anteil [%] | | | | | | | | |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg-Mischprobe [mg] | 100,00 | 35,00 | 44,00 | 21,00 | 100,00 | 31,50 | 22,30 | 46,20 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 18,78 | 37,24 | 0,15 | | 18,53 | 31,26 | 0,78 |
| Summe der Kontamination der Teilflächen, gemessen | 56,17 | | | | 50,57 | | | |
| Verhältnis gemessen/berechnet | 1,21 | | | | 1,28 | | | |

Tabelle 26 Schutzfaktoren (SF) bei erhöhter Temperatur, Technikum, Versuch V1.4, „trockene Beladung“

| Material-Kennung | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|---|--|-----------------|--|--|--|---|---|--|--|---|--|---|
| Position auf Probenständer | oben | oben | unten | unten | oben | oben | unten | unten | oben | oben | unten | unten |
| Membran-Typ/Aufbau | PUR, <u>auf</u> dünnem 3D- Aramid/ Viskose- Vlies laminiert* | PE(S), lose* | ePTFE, <u>auf</u> 3D- Aramid- Vlies laminiert * | PUR, <u>auf</u> 3D- Aramid- Vlies laminiert* | ePTFE, <u>auf</u> 3D- Aramid- Vlies laminiert (Gore-Tex Fireblocker N 2L) | ePTFE, <u>innen</u> laminiert an Vlies m. Silicon- Dots nach außen (Gore Airlock 2L) | ePTFE, <u>innen</u> an Vlies laminiert (Gore- Tex) | PUR, <u>innen</u> an dünnem PES- Gewirk laminiert (Topas PU) | ePTFE, direkt am Ober- material laminiert* | ePTFE, <u>innen</u> an Aramid- Vlies laminiert (Gore- Tex Fire- blocker) | ePTFE, <u>innen</u> an Aramid- Vlies mit Silicon- Dots nach außen laminiert (Gore- Tex) | PE(S), <u>auf</u> dünnem PES- Gestrick (Sympatex) |
| Schutzfaktor (SF) Naphthalin | 15 | 4 | 8 | 14 | 12 | 58 | 5 | 9 | 8 | 9 | 42 | 5 |
| Schutzfaktor (SF) Nichtkarzinogene PAK | 91 | 23 | 34 | 76 | 39 | 396 | 66 | 42 | 39 | 89 | 356 | 27 |
| Schutzfaktor (SF) karzinogene PAK | 417 | 228 | 465 | 493 | 631 | 889 | 592 | 453 | 133 | 647 | 952 | 493 |
| FG-Anteil <i>innen</i> zu <i>gesamt</i> | 20 % | 53 % | 37 % | 36 % | 29 % | 21 % | 37 % | 46 % | 60 % | 41 % | 21 % | 46 % |

* Membran-Hersteller nicht bekannt

Tabelle 27 Schutzfaktoren bei geringerer Temperatur, Technikum, Versuch V1.5, „nasse Beladung“

| Material-Kennung | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | L | K |
|--|--|-----------------|--|--|--|--|---|--|--|---|---|---|
| Position auf Probenständer | oben | oben | unten | unten | oben | oben | unten | unten | oben | oben | unten | unten |
| Membran-Typ/Aufbau | PUR, <u>auf</u> dünnem 3D- Aramid/ Viskose- Vlies laminiert* | PE(S), lose* | ePTFE, <u>auf</u> 3D- Aramid- Vlies laminiert * | PUR, <u>auf</u> 3D- Aramid- Vlies laminiert* | ePTFE, <u>auf</u> 3D- Aramid- Vlies laminiert (Gore-Tex Fireblocker N 2L) | ePTFE, <u>innen</u> laminiert an Vlies m. Silicon- Dots (Gore Airlock 2L) | ePTFE, <u>innen</u> an Vlies laminiert (Gore- Tex) | PUR, <u>innen</u> an dünnem PES- Gewirk laminiert (Topas PU) | ePTFE, direkt am Ober- material laminiert* | ePTFE, <u>innen</u> an Aramid- Vlies laminiert (Gore- Tex Fire- blocker) | PE(S), <u>auf</u> dünnem PES- Gestrick (Sympatex) | ePTFE, <u>innen</u> an Aramid- Vlies mit Silicon- Dots n. außen laminiert (Gore- Tex) |
| Schutzfaktor (SF) Naphthalin | 18 | 8 | 18 | 24 | 24 | 68 | 10 | 15 | 12 | 14 | 14 | 65 |
| Schutzfaktor (SF) nicht karzinogene PAK | 163 | 64 | 75 | 198 | 115 | 453 | 104 | 95 | 108 | 90 | 58 | 307 |
| Schutzfaktor (SF) karzinogene PAK | 789 | 458 | 664 | 722 | 1207 | 1412 | 657 | 1008 | 569 | 644 | 704 | 1773 |
| FG-Anteil <i>innen</i> zu <i>gesamt</i> | 20 % | 53 % | 37 % | 36 % | 29 % | 21 % | 37 % | 46 % | 60 % | 41 % | 46 % | 21 % |

* Membran-Hersteller nicht bekannt

Anlagen Teil 2 - Praxisproben

Protokoll

zur Gewinnung von Realproben kontaminierter Feuerwehrsutzhleidung aus der Innenbrandbekämpfung

Einsatz

Kurzbezeichnung: ...

Datum: ...

Kurzbeschreibung (Brandzustand, Innen/Außen, Brandstoffzusammensetzung):

- ☐ ollbrand/voll entwickelter Brand, unterventilierte Phase (*favoriertes Szenario*)
- ☐ innenbrandbekämpfung (*favoriertes Szenario*)
- ☐ ohnungseinrichtung
- ☐ nderes, bitte erläutern: ...

Tätigkeit / Funktion im Einsatz: ...

Aufenthalts- und Einsatzzeit: ca. Minuten

Anm.: Bei mehreren Einsätzen zur BBK in gleicher/ähnlicher Funktion am selben Tag bzw. mit derselben, noch ungewaschenen PSA bitte die Gesamtzeit eintragen.

Dauer bis zur Verpackung

Zeit zwischen Einsatz und Verpackung: ca. Minuten

Probenart ☐ehler! AutoText-Eintrag nicht definiert ☐ Einsatzjacke (gewünscht)

Weiteres:

Anm.: Es werden gern auch zwei Jacken aus einem Einsatz, wie insb. des ersten Angriffstrupps bzw. bei größeren Brandeinsätzen auch weiterer Trupps angenommen.

PSA-Vorgeschichte (soweit bekannt bzw. aus allgemeinen Regularien abschätzbar)

- Nutzungsbeginn:
- letzte Wäsche:
- letzte Imprägnierung: ...
- Brandeinsätze seit letzter Wäsche: ...
- Brandeinsätze seit Beschaffung: ...
- Wäschen seit Anschaffung: ...

Versandadresse für Proben:

IBK Heyrothsberge

Abt. Forschung - Institut der Feuerwehr –

z.H. Herr Schuppe / Dr. Neske

Biederitzer Str. 5

39175 Heyrothsberge

Tel. 039292 61-600/ -622/ -632

E-Mail: frank.schuppe@ibk.sachsen-anhalt.de, michael.neske@ibk.sachsen-anhalt.de

Hinweise zur Probengewinnung und -verpackung

Probenauswahl

Aus Gründen der Vergleichbarkeit sowie zur Vermeidung des Vorwurfs von Worst Case-Betrachtungen wurden für die Beprobung Jacken aus der Brandbekämpfung bei Wohnungsbränden im Innenangriff ausgewählt. Als Szenario wurde der Vollbrand im Einsatzraum mit starker Verrauchung, d.h. unterventilierter Brand, zu Grunde gelegt.

Andere Brandereignisse sind für die eigentliche Untersuchung zwar nicht relevant, können bei nach Rücksprache jedoch im Einzelfall zu Vergleichszwecken einbezogen werden. Solche Ereignisse können Kleingewerbebrände, Lagerbrände oder auch Deponiebrände sein, bei der die Einsatzkraft dem Brandrauch in erheblichem Maße ausgesetzt war.

Verpackung

Damit es während des Transportes nicht zur Veränderung der Belastung kommt, sind die Jacken einzeln in möglichst gasdichte Beutel zu verpacken. Hierzu werden Aluminium-kaschierte Beutel zur Verfügung gestellt. Die Beutel sind erst zur Nutzung zu öffnen. Ergänzend wird eine Rolle Alu-Klebeband zum Wiederverschluss ausgeliefert.

Optimal wäre eine Verpackung direkt nach dem Einsatz. Im Projektverlauf hat sich die Vorhaltung der Aluminium-kaschierten Beutel auf Einsatzfahrzeugen – zur direkten Verpackung nach dem Einsatz - allerdings als schwer umsetzbar erwiesen. Daher wird eine Verpackung nach Rückkehr auf die Wache (ggf. auch vorläufig in PE-Beutel und später etwa in der Atemschutzwerkstatt in Alu-kaschierte Säcke) favorisiert.

Die vergleichsweise späte Verpackung beschränkt die Analysen auf hochsiedende Schadstoffe, was kein Problem ist, da im Rahmen des Projektes PAK (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) im Zentrum des Interesses stehen. Diese sind so hochsiedend, dass bei kürzerer offener Lagerung nicht mit relevanten Verlusten zu rechnen ist.

Jackenfaltung

Die Einsatzjacken sind einzeln in Probenbeutel zu verpacken. Beim Zusammenlegen ist darauf zu achten, dass Innen- und Außenseite nicht in Kontakt kommen, da es hierdurch zur Kontaminationsverschleppung käme, Innen- und Außenbelastung jedoch gesondert untersucht werden sollen. Daher sind die **Jacken vor dem Zusammenlegen zu verschließen**.

Fragebogen

Um die Umstände des Einsatzes sowie den zeitlichen Abstand des Verpackungstermins zum Einsatz zu charakterisieren ist ergänzend ein Fragebogen auszufüllen und dem Paket beizufügen oder per e-Mail zuzusenden. Im Fragebogen (vgl. Anlage) wird auch ein Ansprechpartner mit Kontaktdaten abgefragt.

Tabelle 28 Übersicht untersuchter Realproben, hier: ungewaschene PSA

| Probe | Proben- eingang | Feuer- wehr | Innen- BBK | Funktion | Szenario | Anmerkungen |
|--|--------------------|----------------|---------------|----------------------------|--|--|
| P1-Jacke | 02/19 | BF | + | 1. A-Trupp | Vollbrand, Altbauwohnung. | Verpackung ca. 2 h nach BBK; PSA stärker rauchig riechend; Wäschehistorie unklar |
| P2-Jacke | 02/19 | BF | + | 1. A-Trupp | dito | Verpackung ca. 2 h nach BBK; PSA extrem nass; Wäschehistorie unklar |
| P3-Jacke | 11/19 | BF | + | A-Trupp | Löscharbeiten in Malerwerkstatt im Altbau (viel Holz), 30 min Aufenthalts-/ Einsatzzeit | Verpackung 5 min nach Einsatz, PSA rel. sauber/leichter Brandgeruch; ca. 10 Brandeinsätze in 2,5 Jahren bei 7 Wäschen – zuletzt vor 2 Monaten (Wäsche + Reimprägnerung) |
| P4-Jacke | 12/19 | BF | + | A-Trupp | Vollbrand, Wohnung, 20 min Aufenthalts-/ Einsatzzeit | Verpackung 15 min nach Einsatz; PSA rel. sauber/ geringer Brandgeruch; Wäschehistorie unklar |
| P5J-Jacke, P5H-Hose, P5KP, P5HS, P5HeS | 10/19 | FF | (+) | A-Trupp | Vollbrand; gewerblich - Garage/Caddies/Lager/ Umkleide v. Golfclub; Löschangriff v. außen (Tor/Dach), teilw. im Rauch stehend, Nachlöschen auch Innen; leichter Brandgeruch/ rel. sauber | Probenerhalt ca. acht Wochen nach Einsatz – zwischenzeitliche Verpackung in Müllbeuteln; Wäschehistorie unklar; besondere Brandstoffzusammensetzung: sehr viel Plastik (Cart-Karossen, Caddies, Schränke, Bekleidung, Dämmung), Li-Akkus |
| P6J-Jacke, P6H-Hose, P6HS | 10/19 | FF | (+) | A-Trupp | dito – kein Brandgeruch/ sauber/neuwertig | dito |
| P7 – Jacke | 01/20 | BF | + | A-Trupp | Vollbrand, Altbau-Whg.; 25 min Aufenthalts-/ Einsatzzeit | Verpackung 35 min nach Einsatz, stärkerer Brandgeruch, letzte Wäsche Sept. 2019, Nutzungsbeginn 2 Jahre zuvor; Wäschehistorie unklar, doch regelmäßige Wäschen wahrscheinlich |
| P8 – Jacke | 03/20 | BF | + | A-Trupp, Strahlrohr-führer | Vollbrand, ausgedehnter Wohnungsbrand in ausgebautem Dachgeschoss eines Mehrfamilienhauses | Verpackung 35 min nach Einsatz; stärkerer Brandgeruch; letzte Wäsche Dez. 2019, Nutzungsbeginn 2,5 Jahre zuvor, seit dem 5 Brandeinsätze und 10 Wäschen |
| P9J-Jacke, P9H-Hose, P9KP, P9NS, P9HeF, P9HS | 05/18 | BF | + | A-Trupp | Vollbrand, unfallbedingt längerer Aufenthalt im Brandraum | Probenerhalt nach ca. 1,5 Jahren bei Lagerung in Müllbeuteln; Untersuchung nach ca. 2,5 Jahren; Wäschehistorie unklar |
| XJ-Jacke, XH-Hose | 05/20 | FF | (+) | - | Heißausbildung in Holz-befuerter BUA | Wäschehistorie unklar, Probenerhalt am Folgetag |

Tabelle 29 Übersicht untersuchter Realproben, hier: gewaschene PSA

| Probe/ Kennz. | PSA-Teil | Proben- eingang | Anmerkungen zur Nutzung | Wäsche-Historie |
|------------------|------------------------|--------------------|--|--|
| W1 | Überjacke | 02/19 | <i>leichter Brandgeruch</i> , Einsatzhistorie unbekannt, letzter Einsatz länger zurückliegend, ausgemustert | 6-8 Jahre alt, stärkere Nutzungsspuren, regelmäßige einsatzbezogene Aufbereitung durch Nasswäsche etc. |
| W2 | Überjacke | 02/19 | dito | 6-8 Jahre in Nutzung (Beschaffung), geringe Nutzungsspuren, regelmäßige einsatzbezogene Aufbereitung durch Nasswäsche etc. |
| W3 | Überhose | 06/19 | <i>extreme Wasch- und Einsatzhistorie</i> : 2 Jahre zuvor Realbrand-Ausbildung bei BUILD GmbH, Boxmeer/NL (Safety Centre Boxmeer) danach professionelle Nasswäsche; anschließend über 1,5 Jahre 7-faches Training in gasbefeuerter BÜA mit einmaliger abschließender professioneller Nasswäsche und Reimprägnierung; <i>leichter Brandgeruch</i> | stärkere Nutzungsspuren, vergraute Membran, <u>unregelmäßige</u> Aufbereitung durch Nasswäsche etc. |
| W4 | Überjacke Fw Antwerpen | | einsatzbezogene Nasswäsche mit anschließender analytischer Überprüfung des Reinigungserfolges, Beprobungsschema unbekannt | unbekannt, regelmäßige Einsatz-bezogene Aufbereitung durch Nasswäsche etc. |

Tabelle 30 Praxisproben, ungewaschen – Analyseergebnisse P1 und P2

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | Einsatzjacke | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|----------|---|-----------|-----------|----------|
| Membran-Typ | ePTFE, direkt am Obermaterial | | | | ePTFE, direkt am Obermaterial laminiert | | | |
| Probenbezeichnung | P1 | P1a | P1a | P1b | P2 | P2a | P2a | P2b |
| Analysenkennung | U19.2665 | U19.2666 | U19.2666 | U19.2667 | U19.2668 | U19.2669 | U19.2669 | U19.2670 |
| Probenahme | Mischprobe von 10 Stellen | | | | Mischprobe von 10 Stellen | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen (M) | außen (M) | innen | gesamt | außen (M) | außen (M) | innen |
| Naphthalin | 0,113 | 0,105 | 0,200 | 0,060 | 0,191 | 0,185 | 0,490 | 0,020 |
| Acenaphthylen | 1,962 | 2,847 | 4,173 | 0,311 | 2,184 | 3,654 | 4,654 | 0,124 |
| Acenaphthen | 0,233 | 0,357 | 0,557 | 0,083 | 0,356 | 0,587 | 0,787 | 0,017 |
| Fluoren | 0,328 | 0,450 | 0,650 | 0,044 | 0,364 | 0,541 | 0,712 | 0,020 |
| Phenanthren | 1,054 | 1,269 | 1,869 | 0,217 | 1,232 | 2,367 | 2,967 | 0,153 |
| Anthracen | 0,148 | 0,237 | 0,337 | 0,033 | 0,157 | 0,330 | 0,430 | 0,017 |
| Fluoranthren | 1,187 | 1,576 | 2,576 | 0,184 | 1,402 | 2,022 | 3,022 | 0,044 |
| Pyren | 0,290 | 0,275 | 0,675 | 0,085 | 0,309 | 0,468 | 0,678 | 0,055 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 5,315 | 7,116 | 11,038 | 1,017 | 6,196 | 10,154 | 13,740 | 0,449 |
| Benz(a)anthracen | 0,113 | 0,092 | 0,292 | 0,070 | 0,085 | 0,118 | 0,188 | 0,025 |
| Chrysen | 0,143 | 0,156 | 0,356 | 0,081 | 0,137 | 0,174 | 0,274 | 0,034 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,139 | 0,161 | 0,361 | 0,093 | 0,129 | 0,165 | 0,265 | 0,037 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,047 | 0,053 | 0,153 | 0,034 | 0,055 | 0,073 | 0,134 | 0,010 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,060 | 0,046 | 0,146 | 0,044 | 0,063 | 0,070 | 0,130 | 0,023 |
| Benzo[e]pyren | 0,211 | 0,287 | 0,287 | 0,125 | 0,197 | 0,246 | 0,457 | 0,056 |
| Benzo(a)pyren | 0,098 | 0,135 | 0,225 | 0,065 | 0,071 | 0,097 | 0,197 | 0,022 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,033 | 0,049 | 0,069 | 0,016 | 0,054 | 0,067 | 0,167 | 0,012 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,045 | 0,095 | 0,095 | 0,049 | 0,076 | 0,086 | 0,186 | 0,019 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,049 | 0,068 | 0,088 | 0,021 | 0,058 | 0,054 | 0,154 | 0,025 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 6,25 | 8,26 | 13,11 | 1,61 | 7,12 | 11,30 | 15,89 | 0,71 |

| | | | | | | | | |
|--|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| FG-Anteil [%] | 100,00 | 39,80 | 39,80 | 60,20 | 100,00 | 39,80 | 39,80 | 60,20 |
| PAK-Anteil bez. auf 1 kg Mischprobe [mg] | | 3,29 | 5,22 | 0,97 | | 4,50 | 6,32 | 0,43 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 4,26 | 6,19 | | | 4,93 | 6,75 | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | | 1,47 | 1,01 | | | 1,45 | 1,05 | |

Tabelle 31 Praxisproben, ungewaschen - Analyseenergebnisse

| PSA-Teil | Einsatzjacke, Hotspotanalysen | | | | |
|-----------------------------|---|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Membran-Typ | ePTFE, direkt am Obermaterial laminiert | | | | |
| Probenbezeichnung | P2.1 | P2.2 | P2.3 | P2.4 | P2.5 |
| Analysenkennung | U20.185 | U20.186 | U20.187 | U20.188 | U20.189 |
| Probenahme | Stanzproben | | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | Jackentasche unten rechts | Funkgeräte- tasche | Ärmel, Unterseite rechts | Jackensaum vorn links | Schulter, unter PA-Träger |
| Naphthalin | 0,163 | 0,351 | 0,217 | 1,835 | 0,250 |
| Acenaphthylen | 0,628 | 0,171 | 0,520 | 2,207 | 0,851 |
| Acenaphthen | 0,287 | 0,310 | 0,237 | 0,587 | 0,124 |
| Fluoren | 0,185 | 0,039 | 0,192 | 0,517 | 0,284 |
| Phenanthren | 0,605 | 0,134 | 1,082 | 1,979 | 1,167 |
| Anthracen | 0,079 | 0,196 | 1,147 | 1,012 | 0,797 |
| Fluoranthren | 0,547 | 0,148 | 1,320 | 0,767 | 0,812 |
| Pyren | 0,138 | 0,100 | 0,450 | 0,651 | 0,352 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 2,632 | 1,449 | 5,164 | 9,555 | 4,637 |
| Benz(a)anthracen | 0,034 | 0,014 | 0,446 | 0,619 | 0,248 |
| Chrysen | 0,049 | 0,016 | 0,748 | 0,848 | 0,205 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,043 | 0,297 | 0,569 | 0,453 | 0,335 |
| Benzo[j]fluoranthren | 0,021 | 0,034 | 0,281 | 0,312 | 0,261 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,007 | 0,006 | 0,052 | 0,102 | 0,280 |
| Benzo[e]pyren | 0,067 | 0,027 | 0,337 | 0,052 | 0,192 |
| Benzo(a)pyren | 0,024 | 0,005 | 0,462 | 0,146 | 0,109 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,005 | 0,002 | 0,385 | 0,297 | 0,298 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,021 | 0,021 | 0,721 | 0,182 | 0,043 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,013 | 0,004 | 0,529 | 0,242 | 0,170 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 2,92 | 1,87 | 9,70 | 12,81 | 6,78 |

Tabelle 32 Praxisproben, ungewaschen - Analyseenergebnisse P3

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | |
|------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Membran-Typ | ePTFE, innen Aramid-Vlies | | | | |
| Probenbezeichnung | P3 | P3a | P3b | P3c | P3d |
| Analysenkennung | U20.1044 | U20.1045 | U20.1046 | U20.1047 | U20.1048 |
| Probenahme | Mischprobe von 10 Stellen | | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen (O) | außen (Th) | mittig (M) | innen |
| Naphthalin | 0,060 | 0,076 | 0,032 | 0,120 | 0,111 |
| Acenaphthylen | 0,063 | 0,066 | 0,048 | 0,086 | 0,081 |
| Acenaphthen | 0,095 | 0,065 | 0,042 | 0,096 | 0,070 |
| Fluoren | 0,046 | 0,047 | 0,042 | 0,048 | 0,043 |
| Phenanthren | 0,316 | 0,208 | 0,107 | 0,225 | 0,138 |
| Anthracen | 0,075 | 0,092 | 0,052 | 0,902 | 0,072 |
| Fluoranthren | 0,144 | 0,122 | 0,076 | 0,101 | 0,079 |
| Pyren | 0,244 | 0,168 | 0,089 | 0,243 | 0,058 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 1,043 | 0,844 | 0,489 | 1,820 | 0,651 |
| Benz(a)anthracen | 0,077 | 0,081 | 0,072 | 0,069 | 0,012 |
| Chrysen | 0,071 | 0,091 | 0,052 | 0,055 | 0,006 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,070 | 0,067 | 0,056 | 0,060 | 0,012 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,094 | 0,086 | 0,088 | 0,108 | 0,023 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,055 | 0,056 | 0,057 | 0,048 | 0,009 |
| Benzo[e]pyren | 0,053 | 0,047 | 0,034 | 0,038 | 0,005 |
| Benzo(a)pyren | 0,069 | 0,065 | 0,043 | 0,062 | 0,006 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,043 | 0,045 | 0,056 | 0,042 | 0,005 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,075 | 0,051 | 0,051 | 0,052 | 0,008 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,125 | 0,069 | 0,054 | 0,052 | 0,012 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 1,78 | 1,50 | 1,05 | 2,41 | 0,75 |

| | | | | | |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| FG-Anteil [%] | 100,00 | 35,73 | 20,90 | 23,78 | 19,32 |
| PAK-Anteil bez. auf 1 kg Mischprobe [mg] | | 0,54 | 0,22 | 0,57 | 0,14 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | 1,47 | | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,21 | | | | |

Tabelle 33 Praxisproben, ungewaschen - Analyseergebnisse P4

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | | Einsatzjacke, Hotspotanalysen | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------|------------|------------|----------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| Membran-Typ | ePTFE, innen Aramid-Vlies | | | | | ePTFE, innen Aramid-Vlies | | | | |
| Probenbezeichnung | P4 | P4a | P4b | P4c | P4d | P4.1 | P4.2 | P4.3 | P4.4 | P4.5 |
| Analysenkennung | U20.1049 | U20.1050 | U20.1051 | U20.1052 | U20.1053 | U20.207 | U20.208 | U20.209 | U20.210 | U20.211 |
| Probenahme | Mischprobe von 10 Stellen | | | | | Stanzproben | | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen (O) | außen (Th) | mittig (M) | innen | Jackentasche unten rechts | Funkgerä-tasche | Ärmel, Unterseite, rechts | Jacken-saum vorn links | Schulter, unter PA-Träger |
| Naphthalin | 0,063 | 0,075 | 0,053 | 0,080 | 0,016 | 0,082 | 0,072 | 0,052 | 0,062 | 0,037 |
| Acenaphthylen | 0,038 | 0,042 | 0,036 | 0,052 | 0,014 | 0,064 | 0,045 | 0,032 | 0,052 | 0,031 |
| Acenaphthen | 0,050 | 0,053 | 0,043 | 0,085 | 0,015 | 0,089 | 0,049 | 0,037 | 0,031 | 0,025 |
| Fluoren | 0,044 | 0,040 | 0,028 | 0,064 | 0,019 | 0,052 | 0,041 | 0,023 | 0,026 | 0,020 |
| Phenanthren | 0,560 | 0,537 | 0,347 | 0,561 | 0,039 | 0,096 | 0,605 | 0,035 | 0,052 | 0,015 |
| Anthracen | 0,081 | 0,064 | 0,091 | 0,069 | 0,015 | 0,254 | 0,707 | 0,173 | 0,016 | 0,036 |
| Fluoranthen | 0,270 | 0,317 | 0,125 | 0,326 | 0,024 | 0,313 | 0,717 | 0,173 | 0,236 | 0,092 |
| Pyren | 0,330 | 0,322 | 0,056 | 0,373 | 0,048 | 0,326 | 1,143 | 0,199 | 0,197 | 0,074 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 1,435 | 1,450 | 0,779 | 1,611 | 0,190 | 1,276 | 3,379 | 0,724 | 0,673 | 0,330 |
| Benz(a)anthracen | 0,104 | 0,184 | 0,058 | 0,074 | 0,005 | 0,045 | 0,023 | 0,022 | 0,120 | 0,017 |
| Chrysen | 0,089 | 0,099 | 0,027 | 0,100 | 0,008 | 0,191 | 0,193 | 0,038 | 0,142 | 0,028 |
| Benzo(b)fluoranthen | 0,033 | 0,043 | 0,015 | 0,042 | 0,004 | 0,316 | 0,308 | 0,052 | 0,313 | 0,012 |
| Benzo(j)fluoranthen | 0,037 | 0,028 | 0,014 | 0,044 | 0,003 | 0,260 | 0,255 | 0,022 | 0,257 | 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthen | 0,030 | 0,036 | 0,018 | 0,034 | 0,004 | 0,032 | 0,052 | 0,014 | 0,289 | 0,008 |
| Benzo[e]pyren | 0,031 | 0,028 | 0,015 | 0,023 | 0,003 | 0,206 | 0,221 | 0,010 | 0,198 | 0,002 |
| Benzo(a)pyren | 0,029 | 0,036 | 0,013 | 0,035 | 0,005 | 0,055 | 0,150 | 0,002 | 0,026 | 0,013 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,014 | 0,012 | 0,005 | 0,009 | 0,004 | 0,032 | 0,032 | 0,002 | 0,276 | 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,082 | 0,086 | 0,016 | 0,064 | 0,012 | 0,099 | 0,063 | 0,017 | 0,042 | 0,018 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,062 | 0,050 | 0,006 | 0,044 | 0,011 | 0,221 | 0,268 | 0,047 | 0,187 | 0,009 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 1,95 | 2,05 | 0,97 | 2,08 | 0,25 | 2,73 | 4,94 | 0,95 | 2,52 | 0,44 |

| | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|
| FG-Anteil [%] | 35,73 | 20,90 | 23,78 | 19,32 |
| PAK-Anteil bez. auf 1 kg Mischprobe [mg] | 0,73 | 0,20 | 0,49 | 0,05 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | 1,48 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,32 | | | |

Tabelle 34 Praxisproben, ungewaschen - Analyseergebnisse P5J und P6J

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | Einsatzjacke | | | |
|---|---------------------------|----------|------------|----------|---------------------------|----------|------------|----------|
| Membran-Typ | PES (Sympatex) | | | | PES (Sympatex) | | | |
| Probenbezeichnung | P5J | P5Ja | P5Jb | P5Jc | P6J | P6Ja | P6Jb | P6Jc |
| Analysenkennung | U20.0520 | U20.1065 | U20.0522 | U20.0523 | U20.1073 | U20.1074 | U20.1075 | U20.1076 |
| Probenahme- bzw. - charakter | Mischprobe von 10 Stellen | | | | Mischprobe von 10 Stellen | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| Naphthalin | 0,072 | 0,070 | 0,278 | 0,082 | 0,047 | 0,013 | 0,119 | 0,012 |
| Acenaphthylen | 0,655 | 0,313 | 1,763 | 0,090 | 0,175 | 0,104 | 0,330 | 0,020 |
| Acenaphthen | 0,035 | 0,021 | 0,142 | 0,006 | 0,093 | 0,048 | 0,159 | 0,013 |
| Fluoren | 0,303 | 0,250 | 0,705 | 0,059 | 0,106 | 0,141 | 0,157 | 0,039 |
| Phenanthren | 2,961 | 1,973 | 6,198 | 0,591 | 2,190 | 0,979 | 4,420 | 0,261 |
| Anthracen | 1,030 | 0,559 | 0,789 | 0,084 | 0,545 | 0,334 | 0,703 | 0,091 |
| Fluoranthren | 1,334 | 0,831 | 2,859 | 0,235 | 0,751 | 0,832 | 0,944 | 0,168 |
| Pyren | 1,363 | 0,634 | 3,110 | 0,293 | 0,720 | 1,130 | 0,810 | 0,159 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 7,753 | 4,652 | 15,843 | 1,440 | 4,627 | 3,582 | 7,642 | 0,764 |
| Benz(a)anthracen | 0,395 | 0,417 | 0,342 | 0,065 | 0,197 | 0,173 | 0,279 | 0,038 |
| Chrysen | 0,555 | 0,539 | 0,734 | 0,096 | 0,160 | 0,130 | 0,282 | 0,033 |
| Benzo(b)fluoranthren | 1,038 | 0,822 | 0,423 | 0,104 | 0,077 | 0,066 | 0,165 | 0,018 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,708 | 0,974 | 0,342 | 0,039 | 0,050 | 0,026 | 0,129 | 0,008 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,304 | 0,621 | 0,233 | 0,042 | 0,076 | 0,158 | 0,102 | 0,016 |
| Benzo[e]pyren | 0,325 | 0,747 | 0,234 | 0,075 | 0,061 | 0,094 | 0,085 | 0,013 |
| Benzo(a)pyren | 0,320 | 0,633 | 0,210 | 0,027 | 0,112 | 0,139 | 0,098 | 0,036 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,080 | 0,153 | 0,103 | 0,014 | 0,024 | 0,052 | 0,031 | 0,005 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,317 | 0,815 | 0,294 | 0,065 | 0,149 | 0,291 | 0,177 | 0,025 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,410 | 0,934 | 0,342 | 0,095 | 0,152 | 0,293 | 0,153 | 0,026 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 19,96 | 15,96 | 34,95 | 3,50 | 10,31 | 8,59 | 16,78 | 1,74 |
| FG-Anteil [%] | 100,00 | 33,53 | 21,01 | 45,66 | 100,00 | 33,53 | 21,01 | 45,66 |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg Mischprobe [mg] | | 5,35 | 7,34 | 1,60 | | 2,88 | 3,53 | 0,80 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | 14,29 | | | | 7,20 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,40 | | | | 1,43 | | | |

Tabelle 35 Praxisproben, ungewaschen - Analyseenergebnisse P5H und P6H

| PSA-Teil | Einsatzhose | | | | Einsatzhose | | | |
|------------------------------------|--------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Membran-Typ | PES (Sympatex) | | | | PES (Sympatex) | | | |
| Probenbezeichnung | P5H | P5Ha | P5Hb | P5Hc | P6H | P6Ha | P6Hb | P6Hc |
| Analysenkennung | U20.1069 | U20.1070 | U20.1071 | U20.1072 | U20.1078 | U20.1079 | U20.1080 | U20.1081 |
| Probenahme- bzw. - charakter | Mischprobe von 5 Stellen | | | | Mischprobe von 10 Stellen | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen |
| Naphthalin | 0,016 | 0,004 | 0,036 | 0,004 | 0,036 | 0,087 | 0,214 | 0,019 |
| Acenaphthylen | 0,219 | 0,132 | 0,518 | 0,038 | 0,114 | 0,134 | 0,116 | 0,043 |
| Acenaphthen | 0,012 | 0,013 | 0,028 | 0,004 | 0,329 | 0,150 | 0,616 | 0,018 |
| Fluoren | 0,259 | 0,121 | 0,594 | 0,042 | 0,509 | 0,268 | 0,911 | 0,054 |
| Phenanthren | 2,203 | 2,136 | 4,220 | 0,310 | 1,814 | 2,120 | 3,330 | 0,383 |
| Anthracen | 0,814 | 0,953 | 1,707 | 0,094 | 0,498 | 0,366 | 1,026 | 0,098 |
| Fluoranthren | 1,365 | 1,228 | 1,980 | 0,225 | 1,640 | 1,295 | 2,427 | 0,366 |
| Pyren | 1,267 | 1,388 | 2,110 | 0,235 | 1,350 | 1,573 | 1,310 | 0,416 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 6,155 | 5,976 | 11,192 | 0,951 | 6,290 | 5,993 | 9,950 | 1,398 |
| Benz(a)anthracen | 0,380 | 0,276 | 0,755 | 0,083 | 0,910 | 0,820 | 0,490 | 0,170 |
| Chrysen | 0,550 | 0,316 | 0,851 | 0,065 | 1,180 | 0,827 | 0,492 | 0,167 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,204 | 0,312 | 0,153 | 0,047 | 0,523 | 0,643 | 0,388 | 0,106 |
| Benzo[j]fluoranthren | 0,170 | 0,248 | 0,089 | 0,018 | 0,720 | 0,622 | 0,230 | 0,064 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,126 | 0,257 | 0,103 | 0,022 | 0,390 | 0,714 | 0,291 | 0,100 |
| Benzo[e]pyren | 0,230 | 0,382 | 0,119 | 0,030 | 0,416 | 0,833 | 0,341 | 0,086 |
| Benzo(a)pyren | 0,189 | 0,312 | 0,186 | 0,062 | 0,603 | 1,209 | 0,650 | 0,126 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,087 | 0,232 | 0,038 | 0,017 | 0,349 | 0,694 | 0,198 | 0,021 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,364 | 0,726 | 0,268 | 0,091 | 0,585 | 0,975 | 0,203 | 0,158 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,697 | 0,926 | 0,534 | 0,097 | 0,607 | 0,911 | 0,308 | 0,234 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 9,15 | 9,96 | 14,29 | 1,48 | 12,57 | 14,24 | 13,54 | 2,63 |

| | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| FG-Anteil [%], angenommen | 100 | 35 | 30 | 35 | 100 | 30 | 35 | 35 |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg Mischprobe [mg] | | 3,49 | 4,29 | 0,52 | | 4,27 | 4,74 | 0,92 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | 8,29 | | | | 9,93 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,10 | | | | 1,27 | | | |

Tabelle 36 Praxisproben, ungewaschen - Analyseergebnisse P5 und P6

| PSA-Teil | Sonstiges P5 | | | | Sonstiges P6 | |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Membran-Typ | mit ePTFE-Membran | | | | mit ePTFE-Membran | |
| Probenbezeichnung | P5HSa | P5HSb | P5KP | P5HeS | P6HSa | P6HSb |
| Analysenkennung | U20.0529 | U20.1068 | U20.0528 | U20.213 | U20.0534 | U20.1077 |
| Probenahme- bzw. - charakter | Handfläche/ Daumen, rechts | Handfläche, rechts | Vlies | Wischprobe außen, gesamt | Handfläche/ Daumen, rechts | Handfläche, rechts |
| PAK / Belastung [mg/kg] | Handschuh | Handschuh | Kniepolster | Helmschale | Handschuh | Handschuh |
| Naphthalin | 0,771 | 0,006 | 0,261 | 0,022 | 0,583 | 3,400 |
| Acenaphthylen | 0,744 | 0,339 | 0,152 | 0,559 | 1,513 | 2,360 |
| Acenaphthen | 0,023 | 0,012 | 0,021 | 0,012 | 0,032 | 0,772 |
| Fluoren | 0,665 | 0,243 | 0,077 | 0,959 | 1,056 | 2,510 |
| Phenanthren | 6,146 | 3,440 | 0,503 | 39,304 | 9,982 | 51,103 |
| Anthracen | 1,275 | 0,522 | 0,138 | 10,773 | 2,963 | 6,564 |
| Fluoranthren | 2,392 | 0,868 | 0,517 | 31,249 | 2,654 | 7,565 |
| Pyren | 2,010 | 0,809 | 0,462 | 33,020 | 2,323 | 6,823 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 14,025 | 6,240 | 2,131 | 115,898 | 21,106 | 81,097 |
| Benz(a)anthracen | 0,233 | 0,106 | 0,110 | 6,552 | 0,366 | 1,467 |
| Chrysen | 0,563 | 0,116 | 0,131 | 7,674 | 0,518 | 1,702 |
| Benzo(b)fluoranthren | 1,369 | 0,036 | 0,175 | 2,610 | 0,775 | 0,477 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,991 | 0,025 | 0,153 | 3,504 | 0,500 | 0,565 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,016 | 0,030 | 0,013 | 4,492 | 0,014 | 0,772 |
| Benzo(e)pyren | 0,368 | 0,025 | 0,198 | 2,360 | 0,194 | 0,396 |
| Benzo(a)pyren | 0,273 | 0,063 | 0,197 | 5,324 | 0,237 | 0,602 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,538 | 0,008 | 0,288 | 1,132 | 0,274 | 0,270 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 1,003 | 0,042 | 0,626 | 5,367 | 0,558 | 0,361 |
| Benzo(g,h,i)perylen | 1,279 | 0,024 | 0,751 | 4,952 | 0,679 | 0,578 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 20,66 | 6,71 | 4,77 | 159,87 | 25,22 | 88,29 |

Tabelle 37 Praxisproben, ungewaschen - Analyseergebnisse P7

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | | Einsatzjacke, Hotspotanalysen | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------|------------|------------|----------|-------------------------------|--------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|
| Membran-Typ | ePTFE, innen Aramid-Vlies | | | | | ePTFE, innen Aramid-Vlies | | | | |
| Probenbezeichnung | P7 | P7a | P7b | P7c | P7d | P7.1 | P7.2 | P7.3 | P7.4 | P7.5 |
| Analysenkennung | U20.1054 | U20.1055 | U20.1056 | U20.1057 | U20.1058 | U20.220 | U20.221 | U20.222 | U20.223 | U20.224 |
| Probenahme | Mischprobe von 10 Stellen | | | | | Stanzproben | | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen (O) | außen (Th) | mittig (M) | innen | Jackentasche unten rechts | FuG - Tasche | Ärmel rechts, Innenseite | Jackensaum, vorn links | Schulter, unter PA-Träger |
| Naphthalin | 0,048 | 0,025 | 0,086 | 0,082 | 0,014 | 0,029 | 4,610 | 0,363 | 0,802 | 0,028 |
| Acenaphthylen | 0,150 | 0,083 | 0,078 | 0,288 | 0,014 | 0,092 | 1,900 | 0,104 | 1,175 | 0,102 |
| Acenaphthen | 0,026 | 0,010 | 0,015 | 0,062 | 0,010 | 0,017 | 0,247 | 0,053 | 0,320 | 0,189 |
| Fluoren | 0,115 | 0,106 | 0,041 | 0,340 | 0,016 | 0,029 | 0,588 | 0,044 | 0,884 | 0,078 |
| Phenanthren | 0,608 | 0,586 | 0,416 | 1,139 | 0,113 | 0,098 | 2,140 | 0,041 | 4,482 | 0,480 |
| Anthracen | 0,196 | 0,191 | 0,051 | 0,308 | 0,031 | 0,016 | 1,202 | 0,019 | 1,200 | 0,215 |
| Fluoranthren | 0,209 | 0,178 | 0,087 | 0,747 | 0,085 | 0,054 | 0,740 | 0,026 | 3,122 | 0,376 |
| Pyren | 0,207 | 0,175 | 0,090 | 0,629 | 0,080 | 0,053 | 1,473 | 0,151 | 3,374 | 0,382 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 1,559 | 1,354 | 0,864 | 3,595 | 0,362 | 0,388 | 12,901 | 0,801 | 15,361 | 1,850 |
| Benz(a)anthracen | 0,062 | 0,036 | 0,052 | 0,094 | 0,031 | 0,032 | 0,099 | 0,055 | 0,595 | 0,110 |
| Chrysen | 0,067 | 0,042 | 0,073 | 0,097 | 0,039 | 0,042 | 0,185 | 0,061 | 0,752 | 0,246 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,030 | 0,025 | 0,060 | 0,018 | 0,020 | 0,033 | 0,296 | 0,030 | 0,301 | 0,339 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,023 | 0,022 | 0,105 | 0,017 | 0,017 | 0,023 | 0,240 | 0,240 | 0,341 | 0,287 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,026 | 0,017 | 0,046 | 0,018 | 0,018 | 0,031 | 0,029 | 0,023 | 0,444 | 0,177 |
| Benzo(e)pyren | 0,018 | 0,012 | 0,042 | 0,011 | 0,013 | 0,002 | 0,206 | 0,004 | 0,226 | 0,225 |
| Benzo(a)pyren | 0,044 | 0,029 | 0,065 | 0,013 | 0,026 | 0,012 | 0,119 | 0,039 | 0,537 | 0,206 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,011 | 0,010 | 0,015 | 0,007 | 0,013 | 0,007 | 0,062 | 0,006 | 0,104 | 0,308 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,055 | 0,048 | 0,067 | 0,025 | 0,018 | 0,018 | 0,044 | 0,043 | 0,499 | 0,085 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,044 | 0,030 | 0,051 | 0,021 | 0,015 | 0,020 | 0,225 | 0,023 | 0,427 | 0,323 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 1,94 | 1,63 | 1,44 | 3,92 | 0,57 | 0,61 | 14,40 | 1,33 | 19,59 | 4,16 |

| | | | | | |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| FG-Anteil [%] | 100,00 | 35,73 | 20,90 | 23,78 | 19,32 |
| PAK-Anteil bez. auf 1 kg Mischprobe [mg] | | 0,58 | 0,30 | 0,93 | 0,11 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | 1,92 | | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,01 | | | | |

Tabelle 38 Praxisproben, ungewaschen - Analyseergebnisse P8

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------|------------|------------|----------|
| Membran-Typ | ePTFE, innen Aramid-Vlies | | | | |
| Probenbezeichnung | P8 | P8a | P8b | P8c | P8d |
| Analysenkennung | U20.1059 | U20.1060 | U20.1061 | U20.1062 | U20.1063 |
| Probenahme | Mischprobe von 10 Stellen | | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen (O) | außen (Th) | mittig (M) | innen |
| Naphthalin | 0,016 | 0,016 | 0,024 | 0,081 | 0,012 |
| Acenaphthylen | 0,160 | 0,131 | 0,016 | 0,460 | 0,022 |
| Acenaphthen | 0,008 | 0,008 | 0,003 | 0,023 | 0,009 |
| Fluoren | 0,287 | 0,352 | 0,123 | 0,374 | 0,014 |
| Phenanthren | 1,450 | 1,657 | 0,450 | 2,390 | 0,123 |
| Anthracen | 0,282 | 0,279 | 0,082 | 0,280 | 0,021 |
| Fluoranthren | 0,859 | 0,960 | 0,243 | 0,910 | 0,028 |
| Pyren | 0,705 | 0,830 | 0,227 | 0,630 | 0,012 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 3,767 | 4,234 | 1,168 | 5,148 | 0,240 |
| Benz(a)anthracen | 0,256 | 0,150 | 0,061 | 0,040 | 0,005 |
| Chrysen | 0,317 | 0,476 | 0,065 | 0,051 | 0,008 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,146 | 0,194 | 0,033 | 0,021 | 0,004 |
| Benzo[j]fluoranthren | 0,095 | 0,188 | 0,023 | 0,015 | 0,005 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,124 | 0,197 | 0,032 | 0,014 | 0,004 |
| Benzo[e]pyren | 0,081 | 0,149 | 0,022 | 0,013 | 0,004 |
| Benzo(a)pyren | 0,163 | 0,311 | 0,058 | 0,032 | 0,009 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,051 | 0,090 | 0,016 | 0,005 | < 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,146 | 0,286 | 0,052 | 0,037 | 0,005 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,103 | 0,216 | 0,044 | 0,015 | < 0,002 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 5,25 | 6,49 | 1,57 | 5,39 | 0,28 |

| | | | | | |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| FG-Anteil [%] | 100,00 | 35,73 | 20,90 | 23,78 | 19,32 |
| PAK-Anteil bez. auf 1 kg Mischprobe [mg] | | 2,32 | 0,33 | 1,28 | 0,05 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | 3,98 | | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,32 | | | | |

Tabelle 39 Praxisproben, ungewaschen - Analyseenergebnisse P9J und P9H

| PSA-Teil | Einsatzjacke | Einsatzhose | Sonstiges P9 | | | | |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|--------------|
| Membran-Typ | ePTFE (Gore-tex Airlock Spacer) | | | | | | |
| Probenbezeichnung | P9J | P9H | P9KP | P9NS | P9HeF | P9HS | P9St |
| Analysenkennung | U20.0514 | U20.0515 | U20.0519 | U20.0516 | U20.179 | U20.0517 | U20.0518 |
| Probenahme- bzw. - charakter | Mischprobe von 10 Stellen | Mischprobe von 5 Stellen | Moosgummi | | | Handfläche und Daumen rechts | Zunge |
| PAK / Belastung [mg/kg] | Jacke, gesamt | Hose, gesamt | Kniepolster | Helmtuch | Helmfutter | Handschuh | Stiefel |
| Naphthalin | 0,530 | 0,890 | 0,357 | 0,202 | 1,09 | 1,383 | 1,126 |
| Acenaphthylen | 0,244 | 0,096 | 0,150 | 0,099 | 0,046 | 0,333 | 0,402 |
| Acenaphthen | 0,029 | 0,013 | 0,020 | 0,027 | 0,51 | 0,052 | 0,102 |
| Fluoren | 0,623 | 0,196 | 0,602 | 0,131 | 0,49 | 0,482 | 2,712 |
| Phenanthren | 2,605 | 0,701 | 1,383 | 0,330 | 2,73 | 3,648 | 2,960 |
| Anthracen | 0,386 | 0,138 | 0,542 | 0,331 | 0,86 | 0,750 | 0,841 |
| Fluoranthren | 0,806 | 0,338 | 0,717 | 0,994 | 1,35 | 0,917 | 0,484 |
| Pyren | 1,755 | 0,376 | 0,809 | 1,097 | 1,63 | 0,866 | 0,744 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 6,979 | 2,748 | 4,582 | 3,211 | 8,706 | 8,430 | 9,372 |
| Benz(a)anthracen | 0,462 | 0,071 | 0,133 | 0,830 | 0,17 | 0,131 | 0,239 |
| Chrysen | 0,382 | 0,099 | 0,543 | 1,254 | 0,24 | 0,592 | 0,057 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,336 | 0,039 | 0,957 | 1,394 | 0,32 | 0,968 | 0,076 |
| Benzo[j]fluoranthren | 0,256 | 0,006 | 0,707 | 0,754 | 0,25 | 0,701 | 0,062 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,063 | 0,031 | 0,024 | 0,038 | 0,26 | 0,034 | 0,023 |
| Benzo[e]pyren | 0,147 | 0,004 | 0,442 | 0,468 | 0,17 | 0,441 | 0,010 |
| Benzo(a)pyren | 0,123 | 0,029 | 0,286 | 0,597 | 0,15 | 0,320 | 0,046 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,109 | 0,006 | 0,129 | 0,560 | < 0,002 | 0,479 | 0,032 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,619 | 0,014 | 0,603 | 0,649 | 0,048 | 0,572 | 0,033 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,741 | 0,018 | 1,047 | 1,178 | 0,20 | 1,053 | 0,012 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 10,22 | 3,07 | 9,45 | 10,93 | 10,51 | 13,72 | 9,96 |

Tabelle 40 Praxisproben, ungewaschen - Analyseenergebnisse XJ und XH (Brandübungsanlage)

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | Einsatzhose | | | | |
|------------------------------|--------------------------|----------|------------|----------|----------------------------------|----------|------------|----------|-------------|
| Membran-Typ | ePTFE (Gore-tex Airlock) | | | | PES mit PES beschichtet (Airtex) | | | | |
| Probenbezeichnung | XJ | XJa | XJb | XJc | XH | XHa | XHb | XHc | XKP |
| Analysenkennung | U20.0535 | U20.0536 | U20.0537 | U20.0538 | U20.1086 | U20.1087 | U20.1088 | U20.1089 | U20.0544 |
| Probenahme- bzw. - charakter | Mischprobe v. 10 Stellen | | | | Mischprobe v. 5 Stellen | | | | Vlies |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt | außen | mittig (M) | innen | Kniepolster |
| Naphthalin | 0,459 | 0,343 | 0,813 | 0,025 | 0,036 | 0,018 | 0,032 | 0,028 | 0,065 |
| Acenaphthylen | 0,980 | 0,610 | 0,886 | 0,023 | 0,067 | 0,032 | 0,075 | 0,022 | 0,102 |
| Acenaphthen | 0,102 | 0,990 | 0,209 | 0,012 | 0,024 | 0,011 | 0,033 | 0,002 | 0,042 |
| Fluoren | 0,623 | 0,350 | 0,872 | 0,042 | 0,139 | 0,044 | 0,231 | 0,059 | 0,089 |
| Phenanthren | 3,490 | 2,180 | 6,185 | 0,176 | 1,540 | 0,594 | 4,070 | 0,130 | 0,423 |
| Anthracen | 0,802 | 0,427 | 0,935 | 0,074 | 0,418 | 0,288 | 0,860 | 0,122 | 0,045 |
| Fluoranthren | 0,390 | 0,296 | 0,951 | 0,094 | 0,490 | 0,264 | 1,510 | 0,058 | 0,102 |
| Pyren | 0,266 | 0,238 | 0,915 | 0,079 | 0,490 | 0,272 | 1,370 | 0,053 | 0,118 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 7,112 | 5,435 | 11,766 | 0,525 | 3,204 | 1,523 | 8,181 | 0,474 | 0,985 |
| Benz(a)anthracen | 0,099 | 0,121 | 0,154 | 0,020 | 0,061 | 0,116 | 0,190 | 0,061 | 0,002 |
| Chrysen | 0,348 | 0,317 | 0,589 | 0,027 | 0,060 | 0,118 | 0,173 | 0,052 | 0,002 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,752 | 0,765 | 1,432 | 0,059 | 0,040 | 0,077 | 0,076 | 0,040 | 0,061 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,570 | 0,579 | 0,484 | 0,024 | 0,015 | 0,026 | 0,006 | 0,018 | 0,002 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,005 | 0,071 | 0,820 | 0,043 | 0,031 | 0,065 | 0,067 | 0,034 | 0,002 |
| Benzo[e]pyren | 0,364 | 0,355 | 0,595 | 0,017 | 0,027 | 0,056 | 0,055 | 0,027 | 0,022 |
| Benzo(a)pyren | 0,197 | 0,233 | 0,701 | 0,032 | 0,036 | 0,068 | 0,061 | 0,038 | 0,037 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,457 | 0,560 | 1,068 | 0,094 | 0,013 | 0,016 | 0,014 | 0,015 | 0,002 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,599 | 0,635 | 0,353 | 0,052 | 0,042 | 0,087 | 0,061 | 0,046 | 0,020 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 1,034 | 1,033 | 1,711 | 0,179 | 0,056 | 0,109 | 0,108 | 0,073 | 0,156 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 11,54 | 10,10 | 19,67 | 1,07 | 3,58 | 2,26 | 8,99 | 0,88 | 1,29 |

FG-Anteil [%], angenommen
PAK-Anteil bezogen auf 1 kg Mischprobe [mg]
PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg]
Verhältnis gemessen/berechnet

| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 100 | 35 | 30 | 35 | 100 | 35 | 30 | 35 |
| | 3,54 | 5,90 | 0,38 | | 0,79 | 2,70 | 0,31 |
| 9,81 | | | | 3,80 | | | |
| 1,18 | | | | 0,94 | | | |

Tabelle 41 Praxisproben, gewaschen - Analyseenergebnisse W1 und W2 sowie Hotspot Jackentasche

| PSA-Teil | Einsatzjacke | | | | Einsatzjacke | | | | |
|-----------------------------|---|-----------|----------|----------------------------|---|-----------|-----------|----------|----------------------------|
| Membran-Typ | ePTFE, direkt am Obermaterial laminiert | | | | ePTFE, direkt am Obermaterial laminiert | | | | |
| Probenbezeichnung | W1 | W1a | W1b | W1.1 | W2 | W2a | W2a | W2b | W2.1 |
| Analysenkennung | U19.2659 | U19.2660 | U19.2661 | U19.2671 | U19.2662 | U19.2663 | U19.2663 | U19.2664 | U19.2672 |
| Probenahme | Mischprobe von 10 Stellen | | | | Mischprobe von 10 Stellen | | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen (M) | innen | Jackentasche, unten rechts | gesamt | außen (M) | außen (M) | innen | Jackentasche, unten rechts |
| Naphthalin | 0,124 | 0,184 | 0,061 | 0,159 | 0,066 | 0,095 | 0,095 | 0,013 | 0,159 |
| Acenaphthylen | 1,585 | 1,792 | 0,392 | 3,550 | 1,149 | 1,449 | 2,449 | 0,075 | 3,110 |
| Acenaphthen | 0,073 | 0,097 | 0,022 | 0,070 | 0,033 | < 0,002 | 0,069 | 0,009 | 0,070 |
| Fluoren | 0,151 | 0,166 | 0,034 | 0,577 | 0,028 | 0,056 | 0,056 | 0,005 | 0,093 |
| Phenanthren | 0,451 | 0,669 | 0,147 | 0,841 | 0,191 | 0,286 | 0,459 | 0,034 | 0,694 |
| Anthracen | 0,070 | 0,094 | 0,020 | 0,109 | 0,015 | 0,032 | 0,032 | 0,004 | 0,057 |
| Fluoranthren | 0,471 | 0,581 | 0,028 | 0,152 | 0,153 | 0,228 | 0,228 | 0,015 | 0,176 |
| Pyren | 0,265 | 0,339 | 0,037 | 0,334 | 0,050 | 0,058 | 0,098 | 0,013 | 0,115 |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 3,189 | 3,922 | 0,742 | 5,793 | 1,685 | 2,205 | 3,487 | 0,167 | 4,474 |
| Benz(a)anthracen | 0,059 | 0,081 | 0,014 | 0,088 | 0,009 | 0,013 | 0,013 | 0,004 | 0,009 |
| Chrysen | 0,099 | 0,110 | 0,025 | 0,086 | 0,018 | 0,028 | 0,038 | 0,004 | 0,023 |
| Benzo(b)fluoranthren | 0,062 | 0,115 | 0,016 | 0,083 | 0,011 | 0,014 | 0,024 | 0,002 | 0,018 |
| Benzo(j)fluoranthren | 0,017 | 0,024 | 0,004 | 0,024 | 0,005 | 0,007 | 0,009 | 0,002 | 0,014 |
| Benzo(k)fluoranthren | 0,037 | 0,045 | 0,017 | 0,043 | 0,012 | 0,011 | 0,026 | 0,010 | 0,014 |
| Benzo[e]pyren | 0,090 | 0,137 | 0,018 | 0,129 | 0,013 | 0,016 | 0,029 | < 0,002 | 0,028 |
| Benzo(a)pyren | 0,036 | 0,047 | 0,009 | 0,062 | 0,012 | 0,003 | 0,027 | < 0,002 | 0,005 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,011 | 0,016 | 0,006 | 0,012 | 0,032 | 0,054 | 0,084 | < 0,002 | 0,101 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 0,299 | 0,275 | 0,030 | 0,277 | 0,112 | 0,121 | 0,208 | 0,003 | 0,052 |
| Benzo(g,h,i)perylene | 0,030 | 0,038 | 0,012 | 0,033 | 0,006 | 0,010 | 0,013 | 0,002 | 0,240 |
| Summe 18 PAK nach GS: | 3,93 | 4,81 | 0,89 | 6,63 | 1,92 | 2,48 | 3,96 | 0,20 | 4,98 |

| | | | | | | | |
|--|--------|-------|--|--------|-------|-------|-------|
| FG-Anteil [%] | 100,00 | 39,80 | | 100,00 | 39,80 | 39,80 | 60,20 |
| PAK-Anteil bez. auf 1 kg Mischprobe [mg] | | 1,91 | | | 0,99 | 1,58 | 0,12 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 2,45 | | | 1,11 | 1,69 | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | | 1,60 | | | 1,73 | 1,13 | |

Tabelle 42 Praxisproben, gewaschen – W3 Analysenergebnisse und W4 Literaturwerte

| PSA-Teil | Einsatzhose | | | | Einsatzjacke Fw Antwerpen (Ergebnisse der Fa. Decontext, veröffentlicht von: Pfeuffer, 2018) | | | | |
|-----------------------------|--|----------|------------|----------|--|-------|------------|---------|---------|
| Membran-Typ | ePTFE, auf 3D-Aramid-Vlies lamin. (Gore-Tex Fireblocker) | | | | ePTFE (Gore-TEX Fireblocker) | | | | |
| Probenbezeichnung | W3 | W3a | W3b | W3c | W4 | W4a | W4b | W4c1 | W4c2 |
| Analysenkennung | U19.1407 | U19.1403 | U19.1404 | U19.1405 | CTB 16.03807.01 (Analyse für Decontext GmbH, Belgien) | | | | |
| Probenahme | Mischprobe von 10 Stellen | | | | Art der Beprobung unbekannt | | | | |
| PAK / Belastung [mg/kg] | gesamt | außen | mittig (M) | innen | gesamt, berechnet | außen | mittig (M) | innen 1 | innen 2 |
| Naphthalin | 0,068 | 0,033 | 0,143 | 0,017 | | | | | |
| Acenaphthylen | 0,229 | 0,041 | 0,751 | 0,030 | | | | | |
| Acenaphthen | 0,039 | 0,025 | 0,138 | 0,006 | | | | | |
| Fluoren | 0,196 | 0,039 | 0,610 | 0,023 | | | | | |
| Phenanthren | 3,378 | 0,474 | 9,981 | 0,316 | | | | | |
| Anthracen | 0,568 | 0,088 | 2,146 | 0,102 | | | | | |
| Fluoranthen | 0,897 | 0,106 | 2,346 | 0,067 | | | | | |
| Pyren | 0,902 | 0,100 | 2,238 | 0,058 | | | | | |
| Summe nichtkarzinogene PAK: | 6,275 | 0,906 | 18,353 | 0,619 | | | | | |
| Benz(a)anthracen | 0,633 | 0,048 | 1,152 | 0,021 | 2,319 | 2,000 | 5,450 | 0,221 | 0,200 |
| Chrysen | 0,573 | 0,058 | 1,101 | 0,011 | 2,475 | 2,240 | 5,720 | 0,234 | 0,200 |
| Benzo(b)fluoranthen | 1,088 | 0,101 | 1,649 | 0,035 | 1,156 | 1,817 | 1,923 | 0,100 | 0,070 |
| Benzo(j)fluoranthen | 0,909 | 0,059 | 1,513 | 0,015 | 1,156 | 1,817 | 1,923 | 0,100 | 0,070 |
| Benzo(k)fluoranthen | 0,689 | 0,112 | 1,272 | 0,052 | 1,156 | 1,817 | 1,923 | 0,100 | 0,070 |
| Benzo[e]pyren | 0,571 | 0,062 | 0,820 | 0,032 | 0,863 | 1,250 | 1,360 | 0,200 | 0,200 |
| Benzo(a)pyren | 1,432 | 0,133 | 1,982 | 0,017 | 1,007 | 1,360 | 1,730 | 0,200 | 0,200 |
| Dibenz(a,h)anthracen | 0,457 | 0,052 | 0,389 | 0,006 | 0,243 | 0,260 | 0,283 | 0,200 | 0,200 |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyren | 1,607 | 0,251 | 1,460 | 0,054 | | | | | |
| Benzo(g,h,i)perylene | 1,844 | 0,348 | 2,084 | 0,147 | | | | | |
| Summe 18 PAK nach GS: | 16,08 | 2,13 | 31,78 | 1,01 | 10,375 | 12,56 | 20,31 | 1,36 | 1,21 |

| | | | | | | | | | |
|--|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| FG-Anteil [%], angenommen | 100 | 30 | 30 | 40 | 100 | 30 | 30 | 20 | 20 |
| PAK-Anteil bezogen auf 1 kg Probe [mg] | | 0,64 | 9,53 | 0,40 | | 3,77 | 6,09 | 0,27 | 0,24 |
| PAK berechnet über FG-Anteile [mg/kg] | | 10,58 | | | | 10,37 | | | |
| Verhältnis gemessen/ berechnet | 1,52 | | | | 1,00 | | | | |

Tabelle 43 Legende zu Tabellen 30 bis 42

[illegible]

Analytik: in Anlehnung an GS-Zeichen-Vergabe nach ProdSG (AfPS GS 2014:01 PAK): 1 h Soxhlet-Extraktion mit n-Hexan, GC-MS-Analytik mit Int Std, BG 0,002 mg/kg

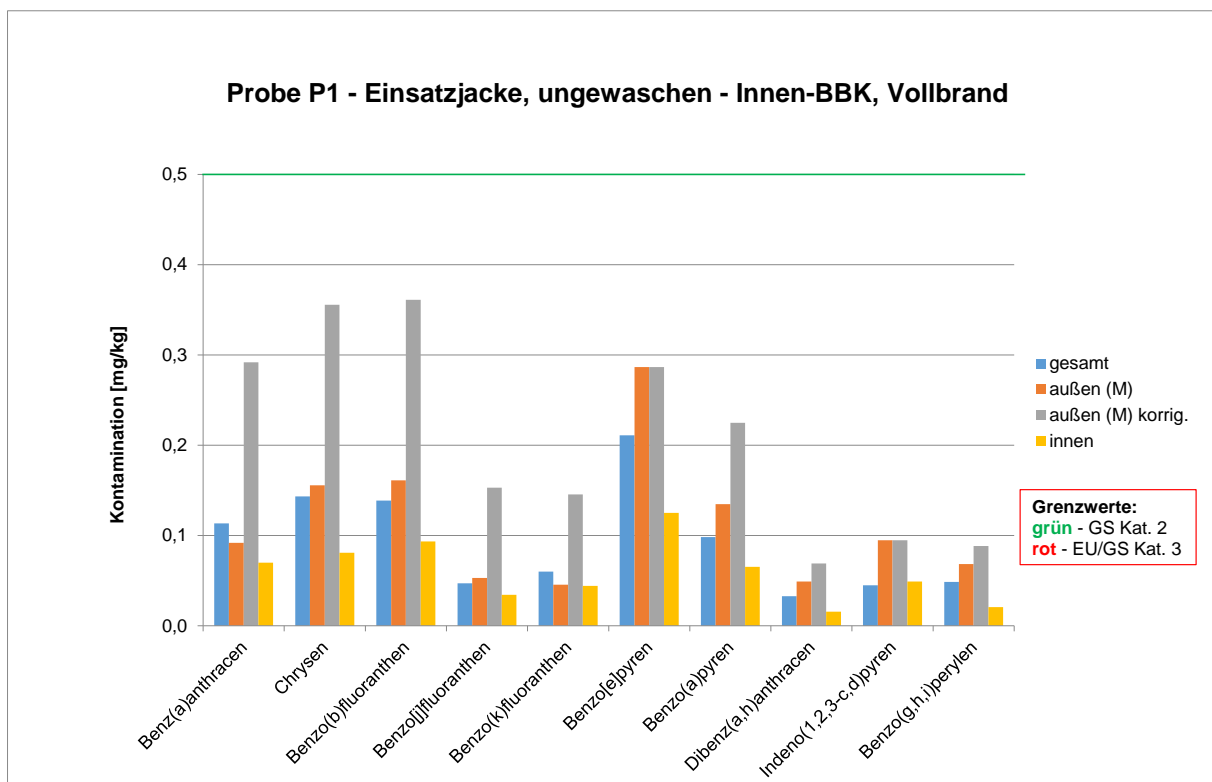
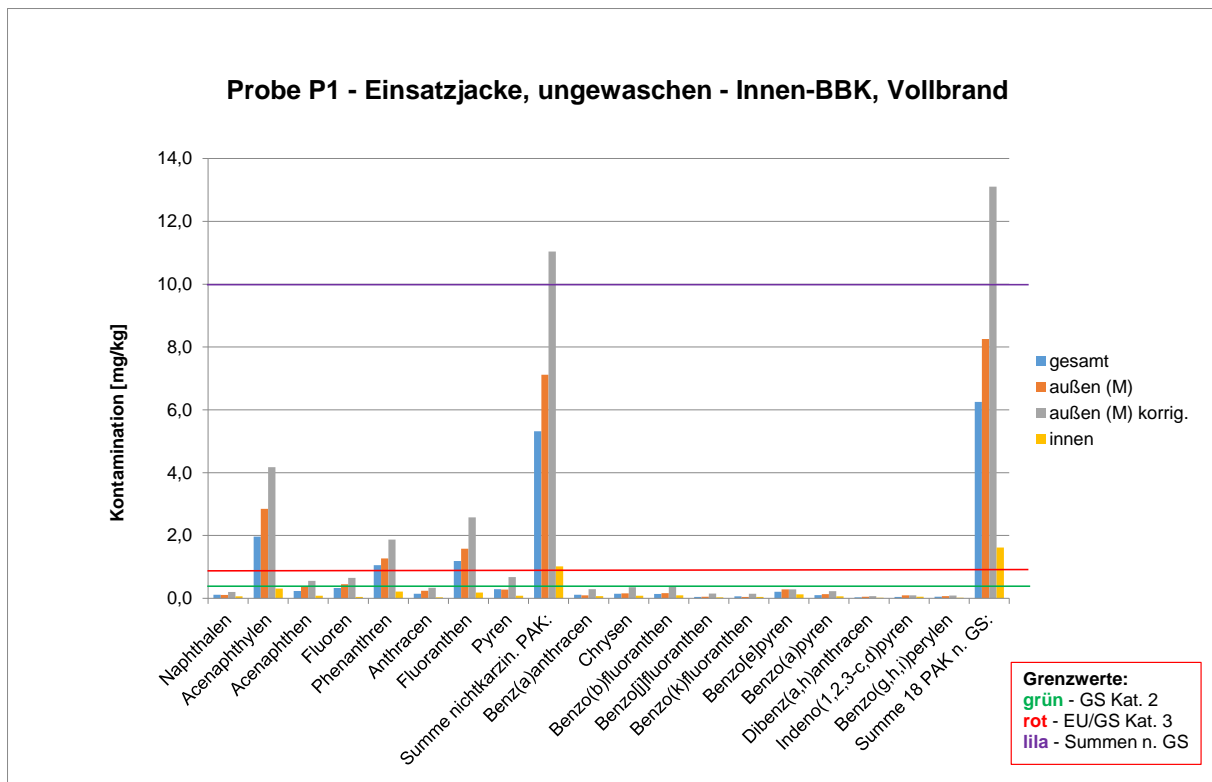


Abbildung 55 Praxisproben, ungewaschen – P1, oben gesamt / unten reduziert

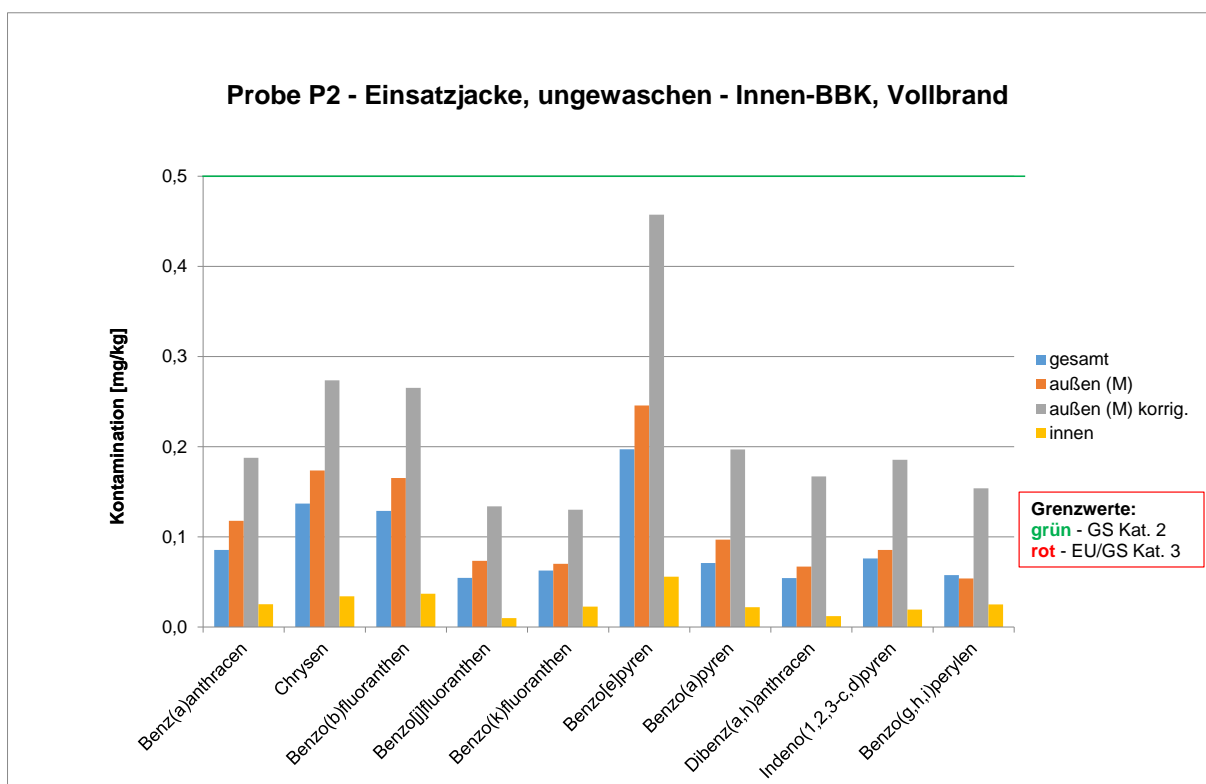
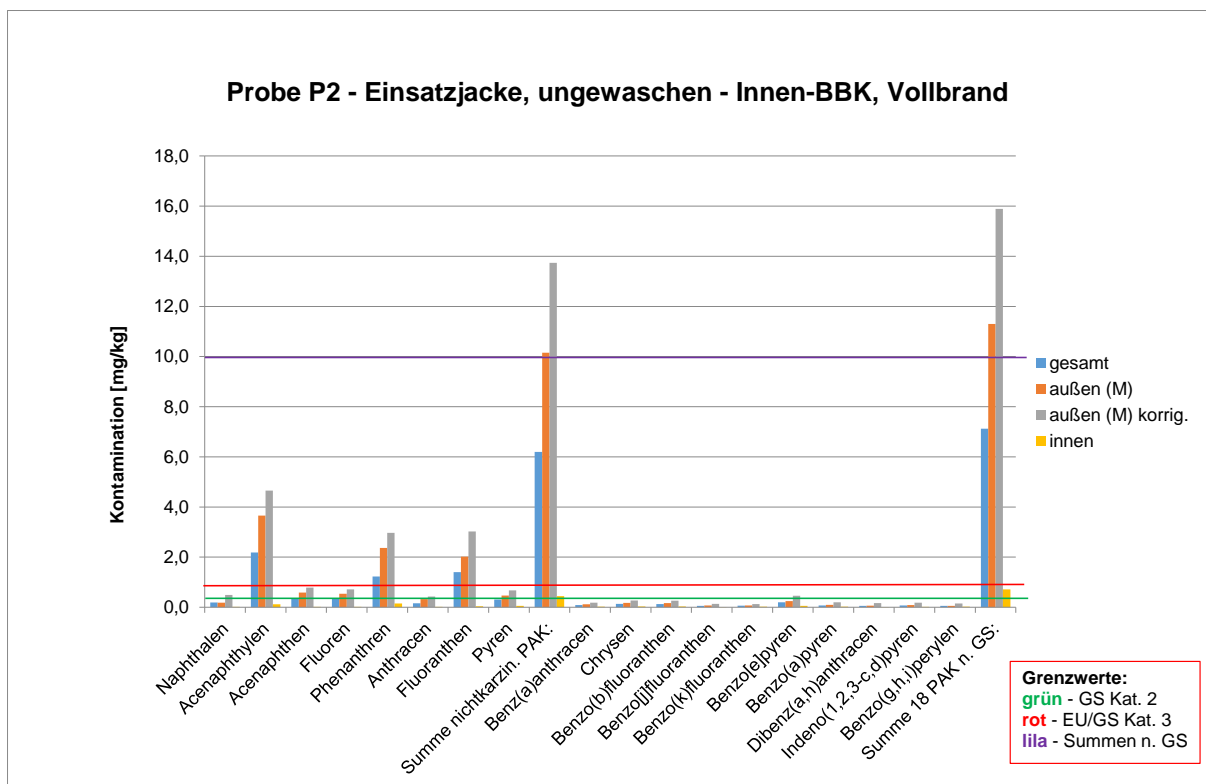


Abbildung 56 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P2, oben gesamt / unten reduziert

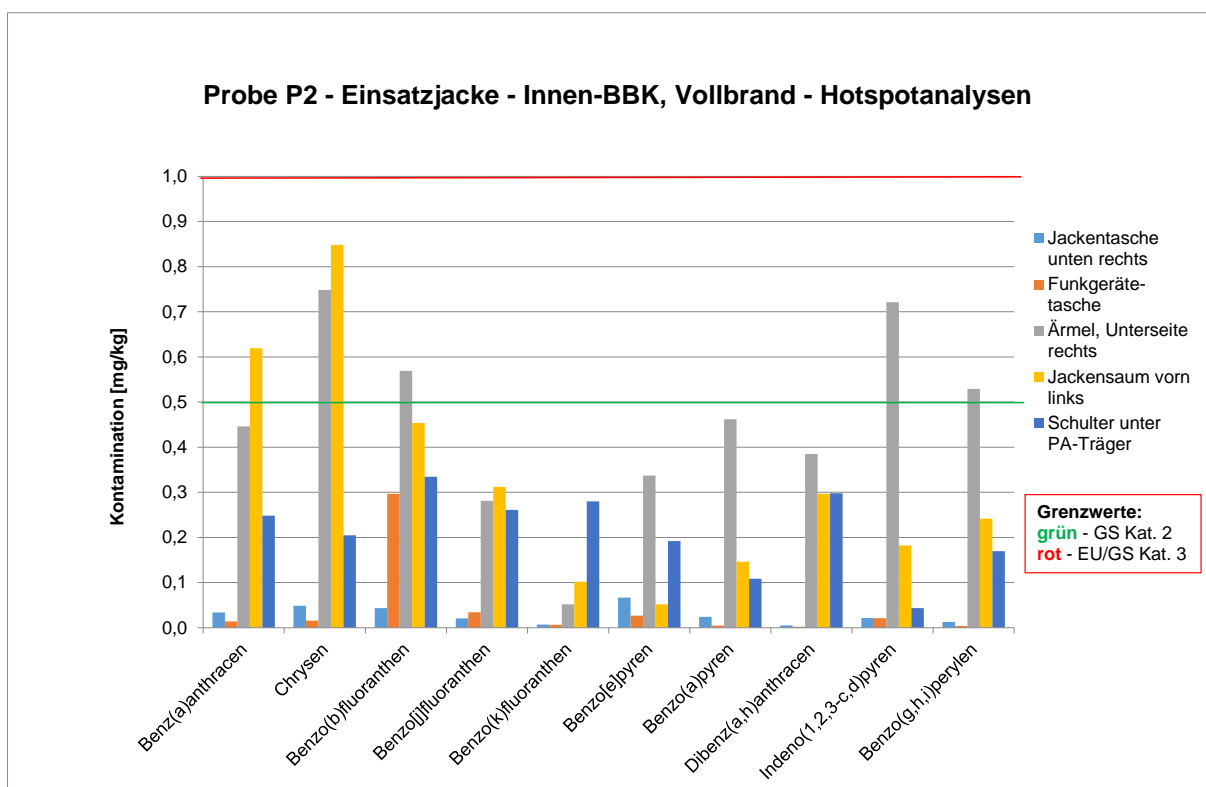
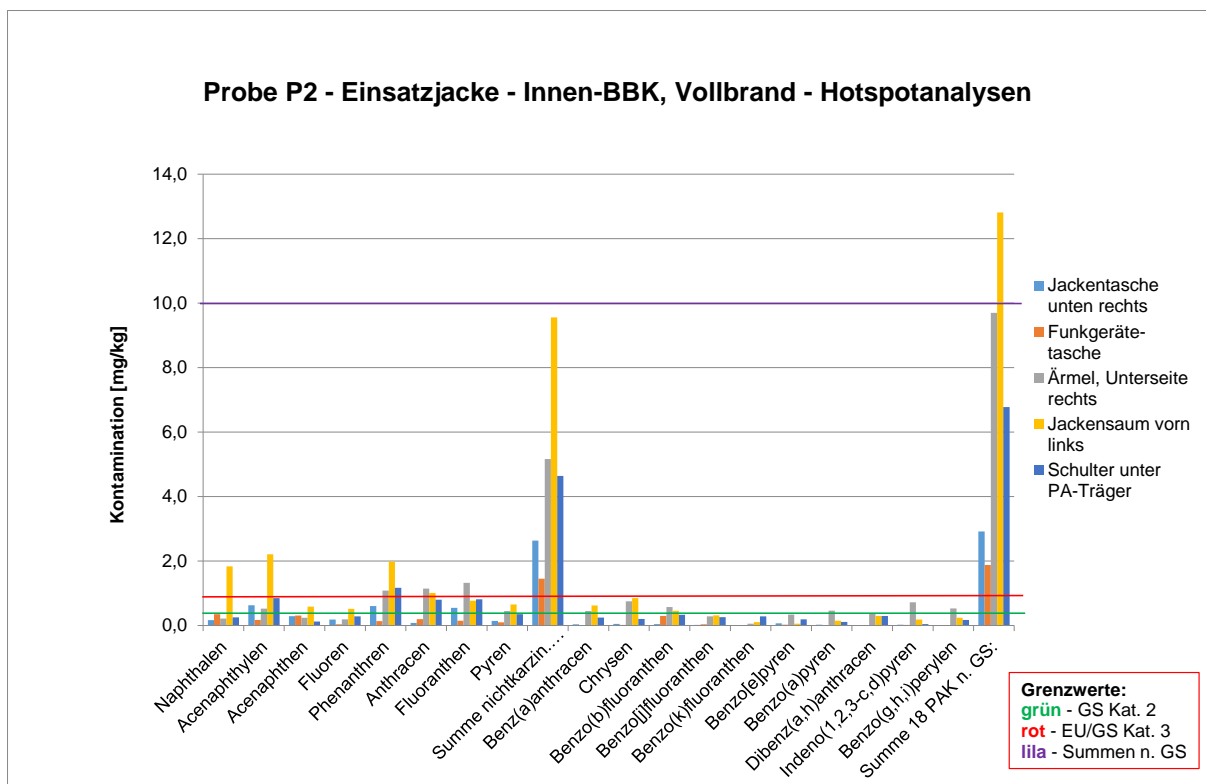


Abbildung 57 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P2 - Hotspots, oben gesamt / unten reduziert

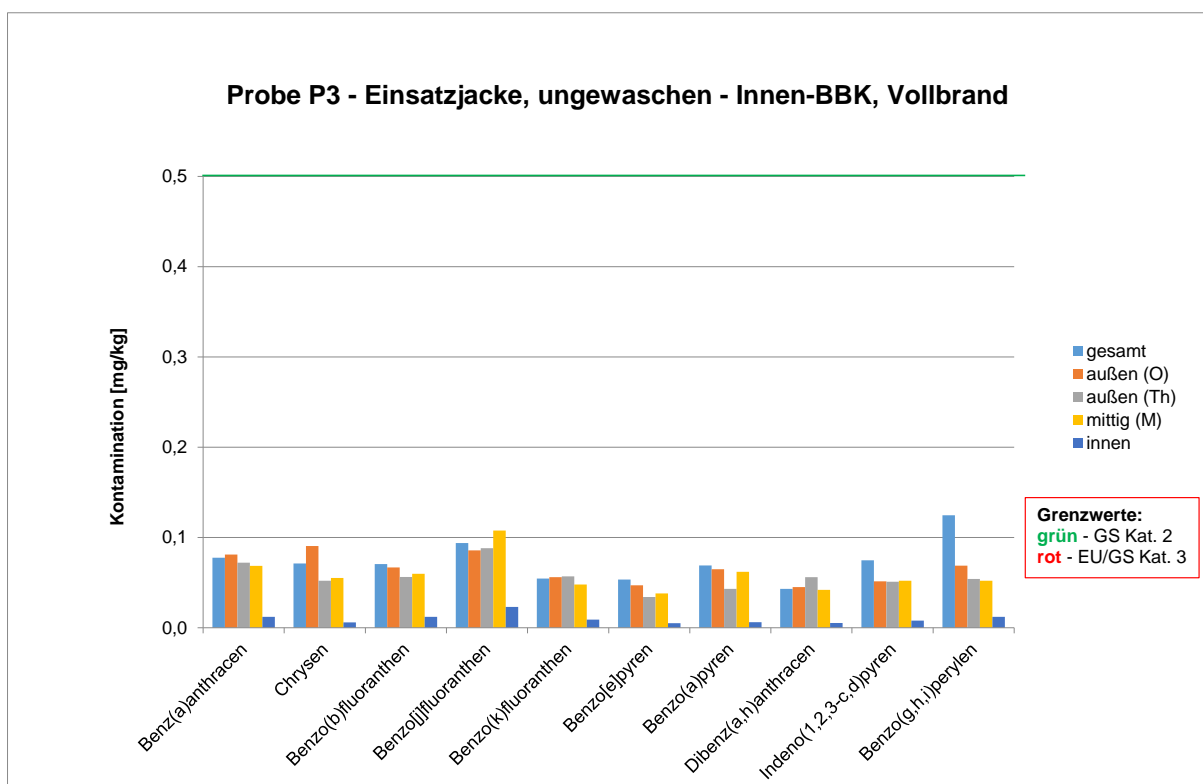
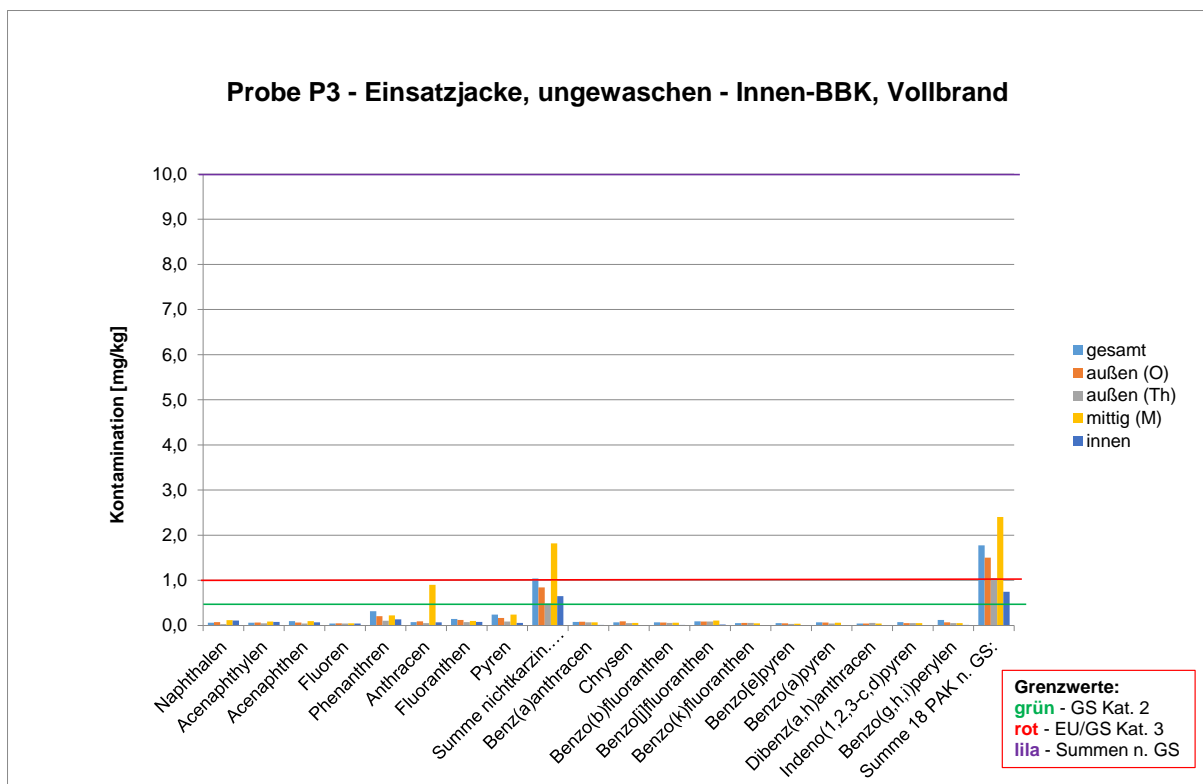


Abbildung 58 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P3, oben gesamt / unten reduziert

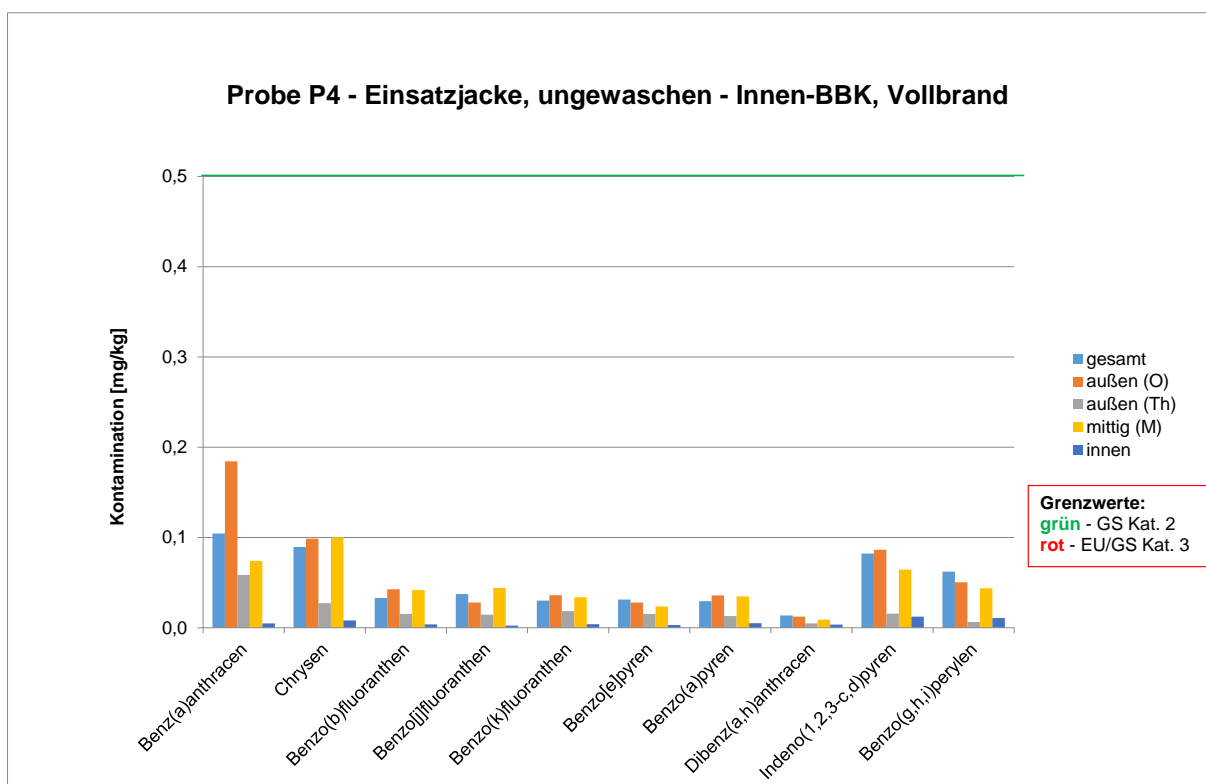
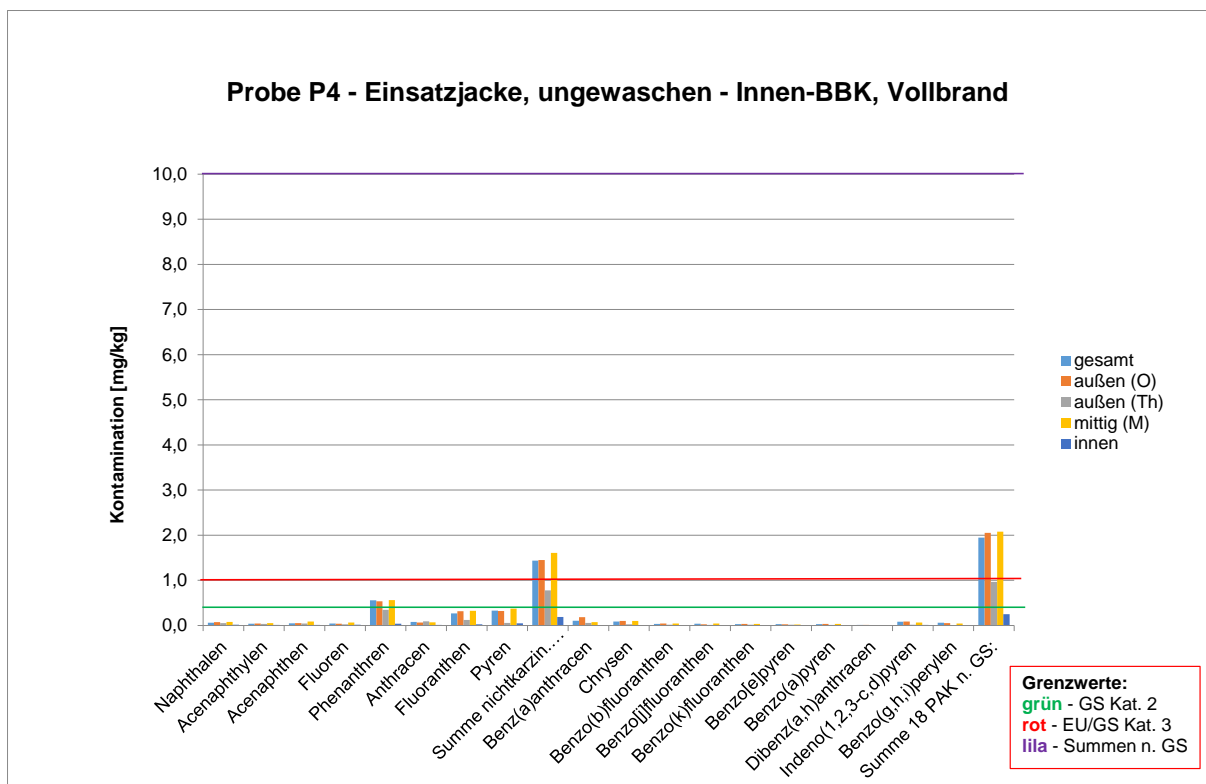


Abbildung 59 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P4, oben gesamt / unten reduziert

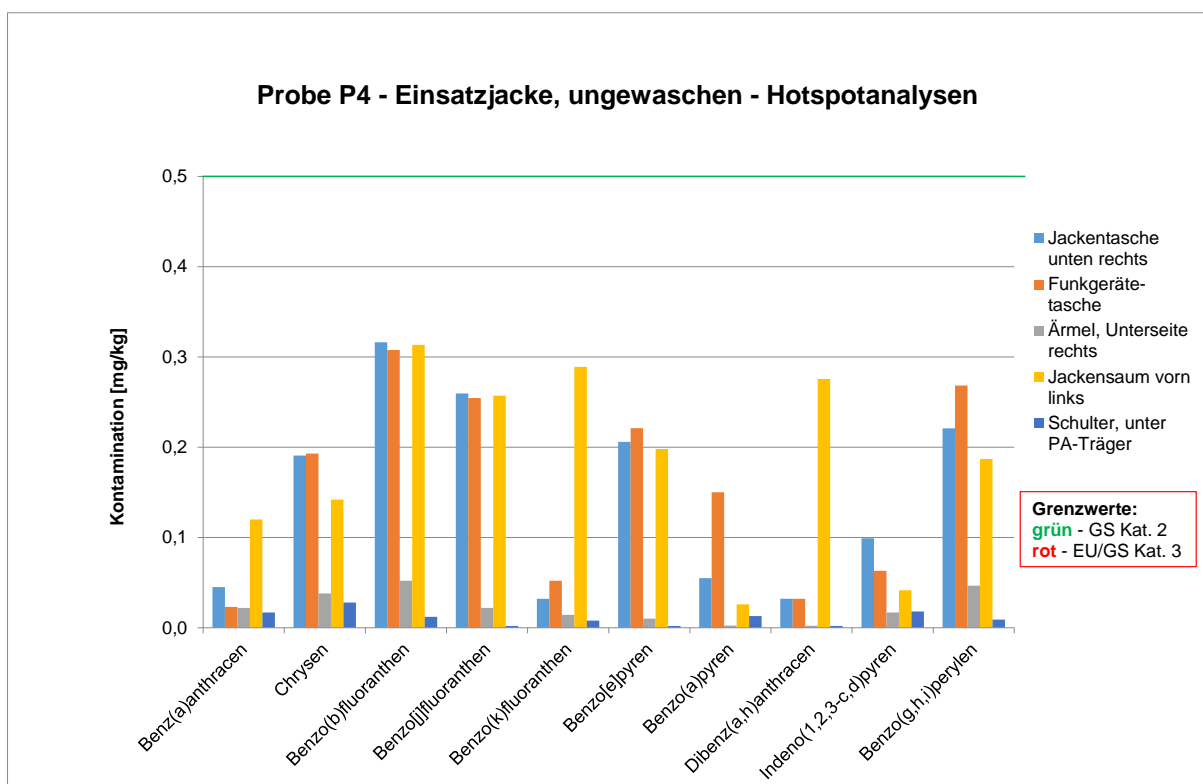
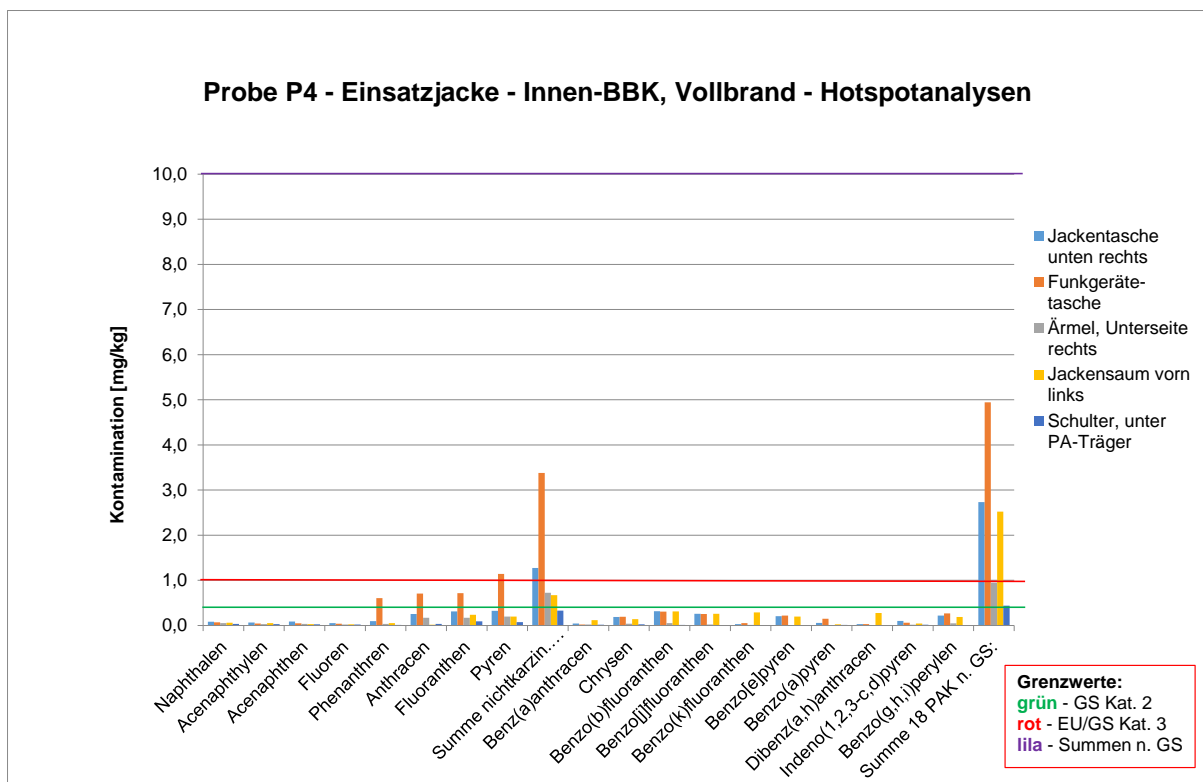


Abbildung 60 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P4 - Hotspots, oben gesamt / unten reduziert

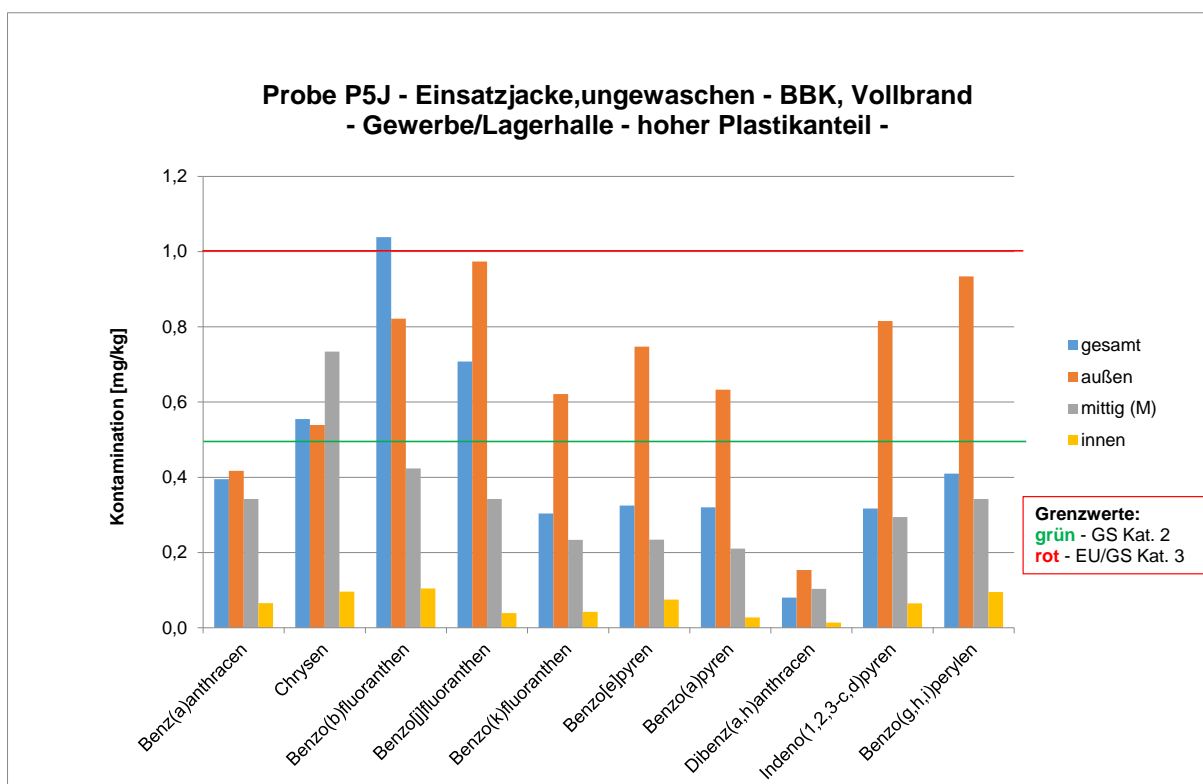
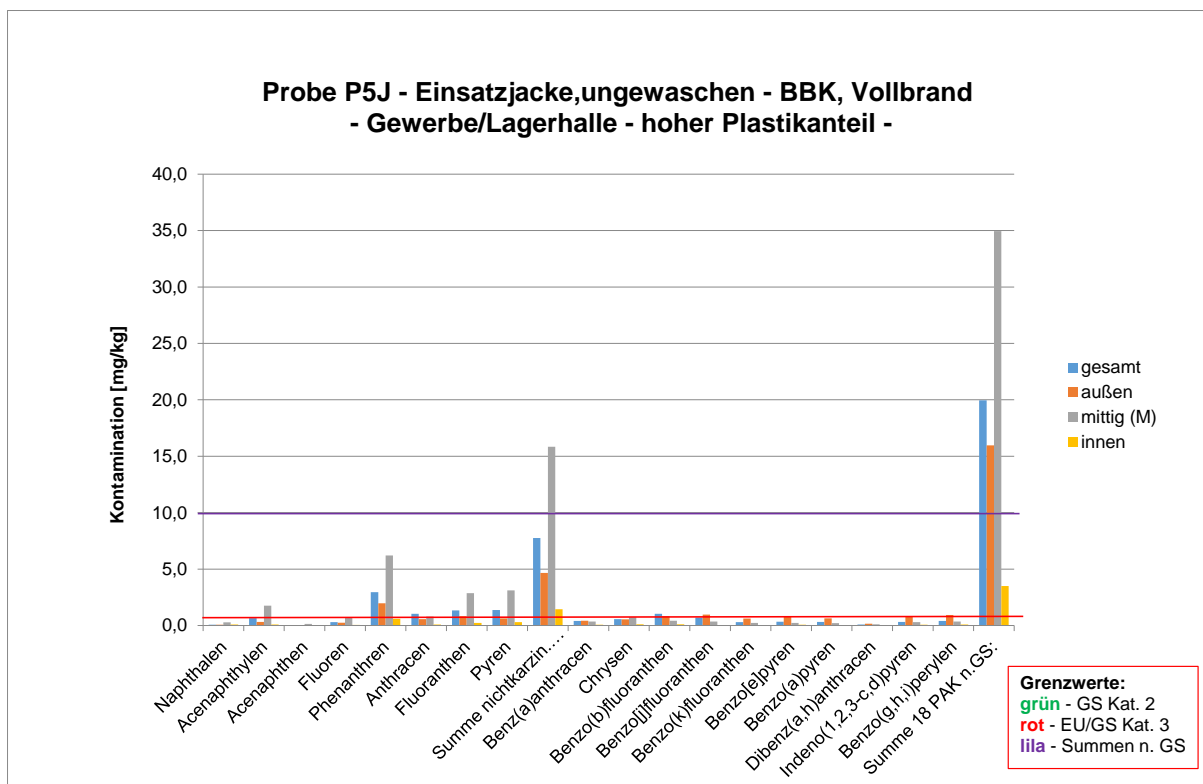


Abbildung 61 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P5J, oben gesamt / unten reduziert

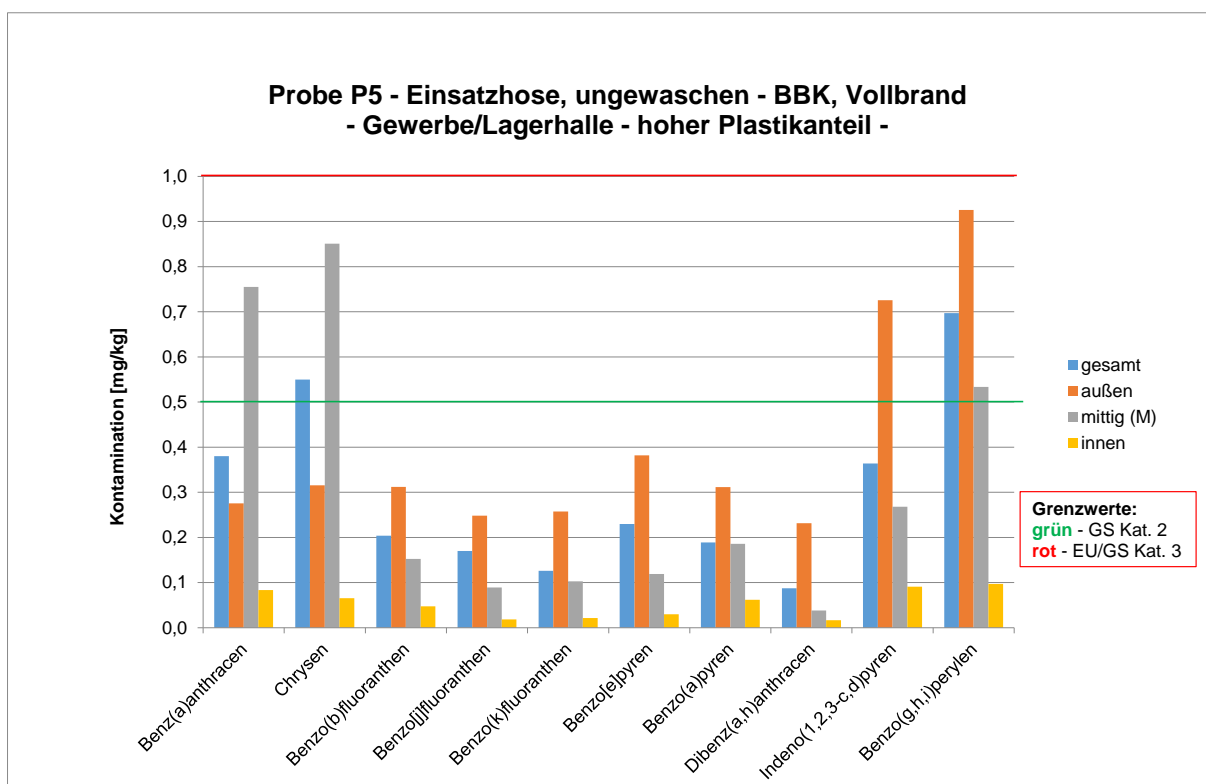
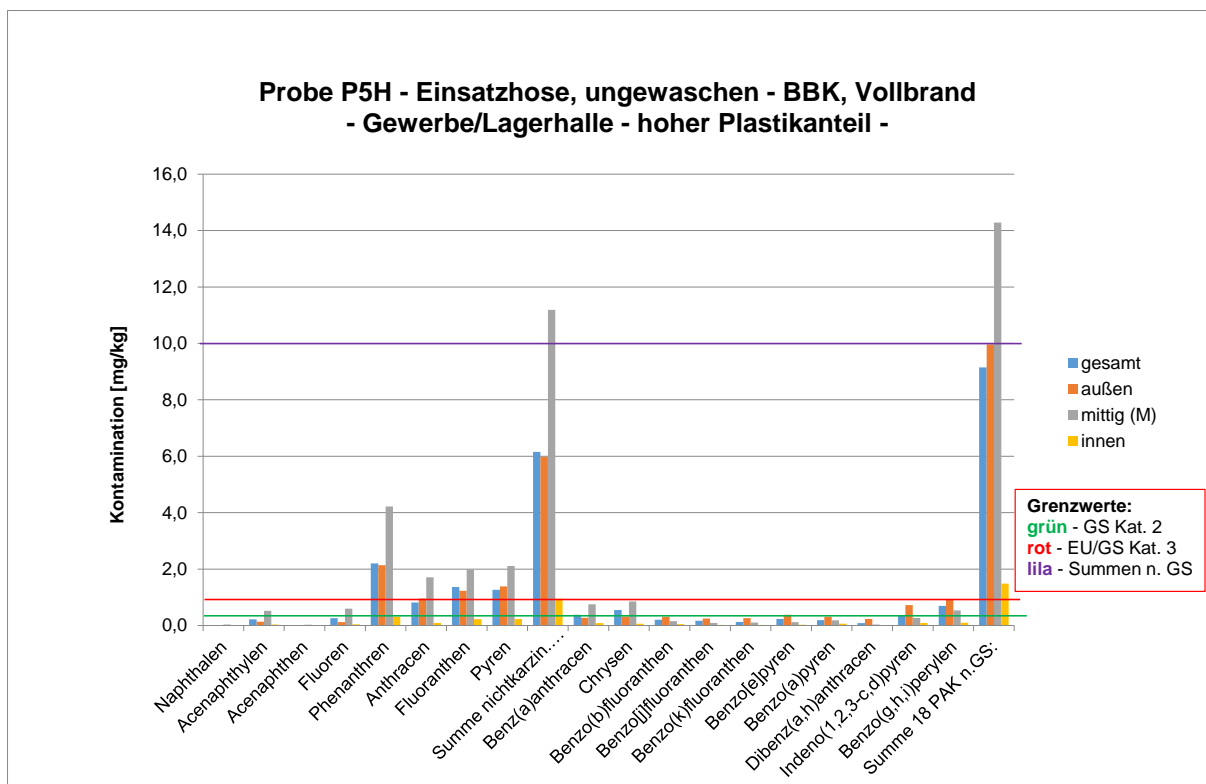


Abbildung 62 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P5H, oben gesamt / unten reduziert

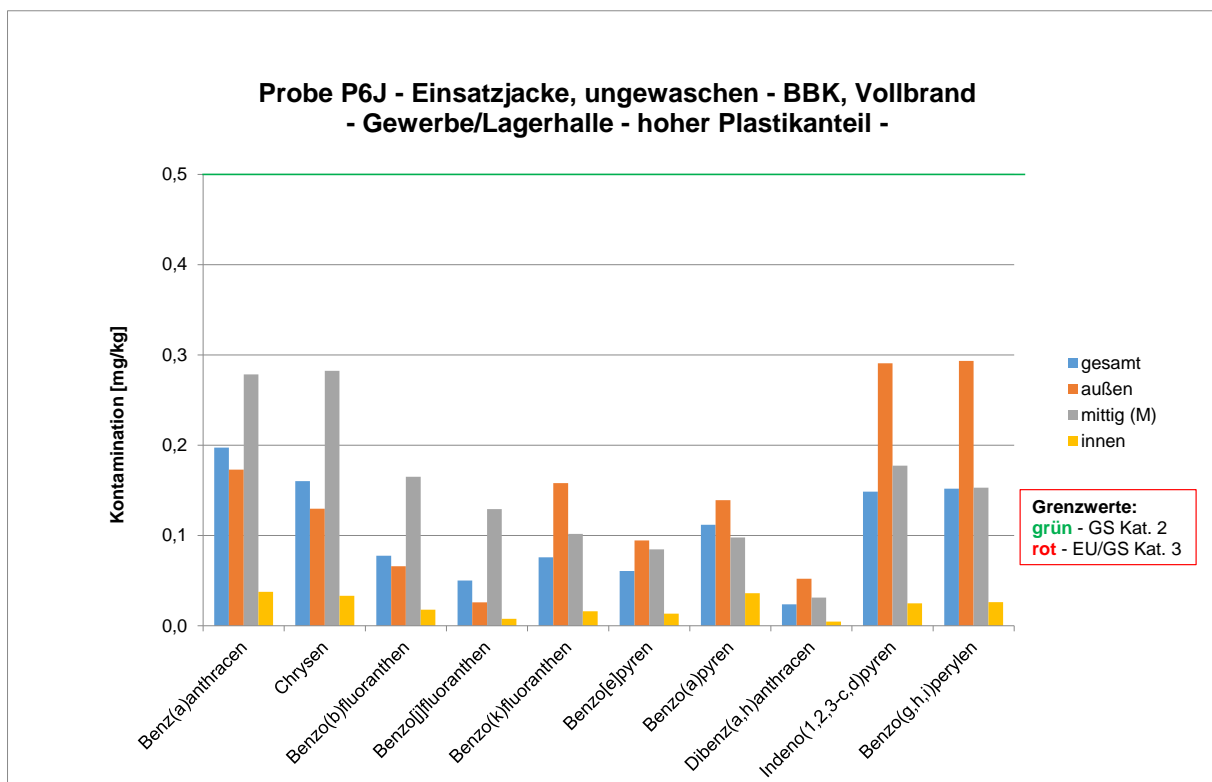
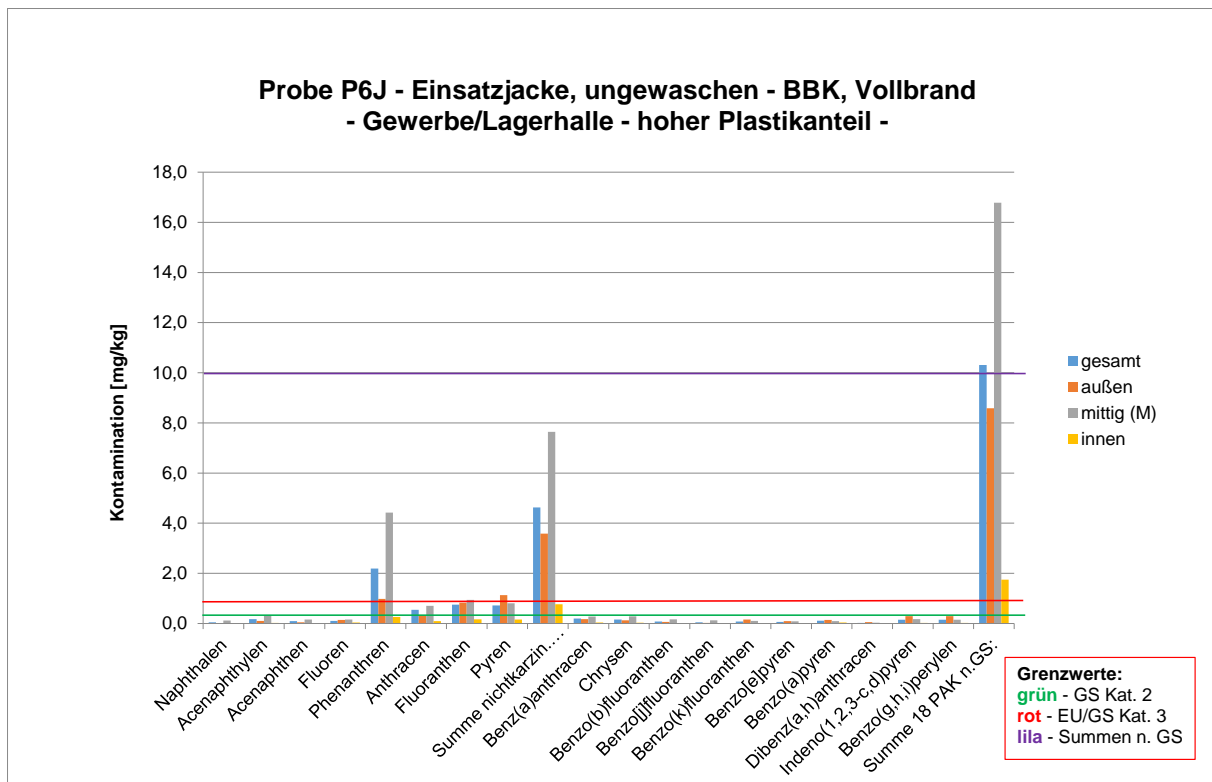


Abbildung 63 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P6J, oben gesamt / unten reduziert

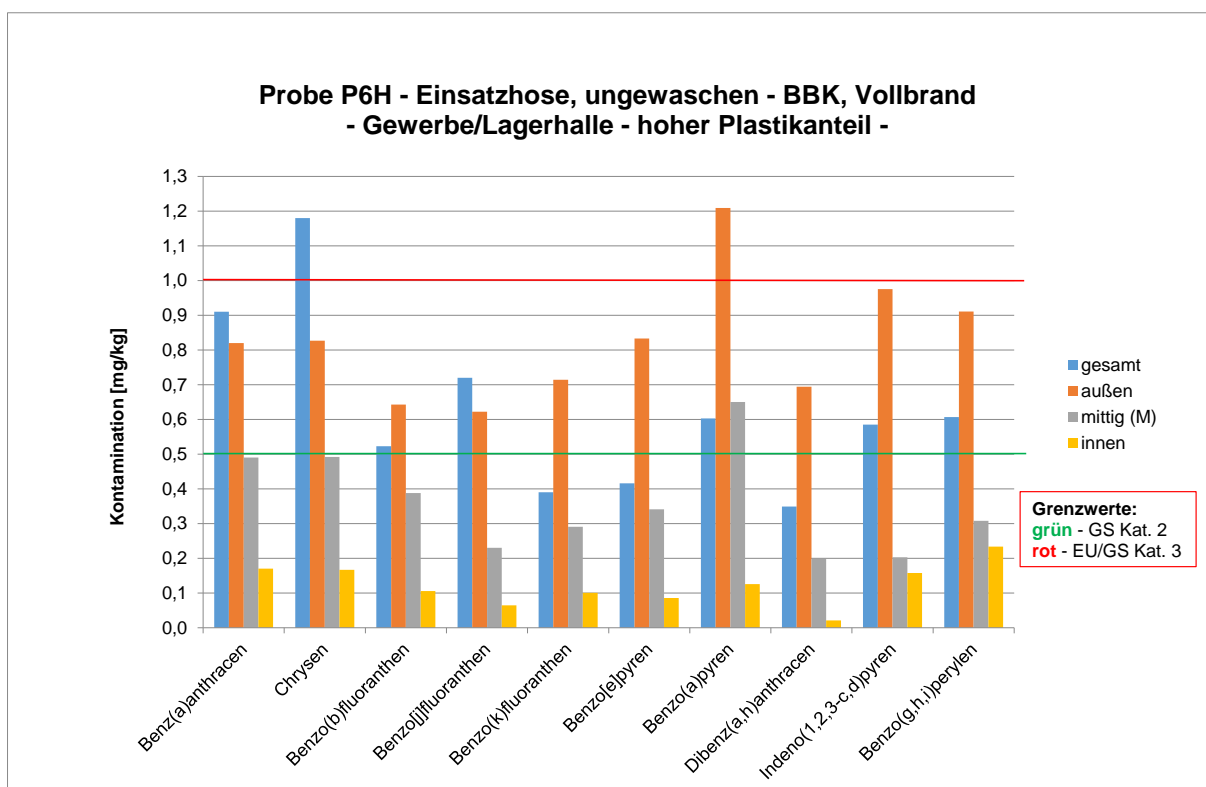
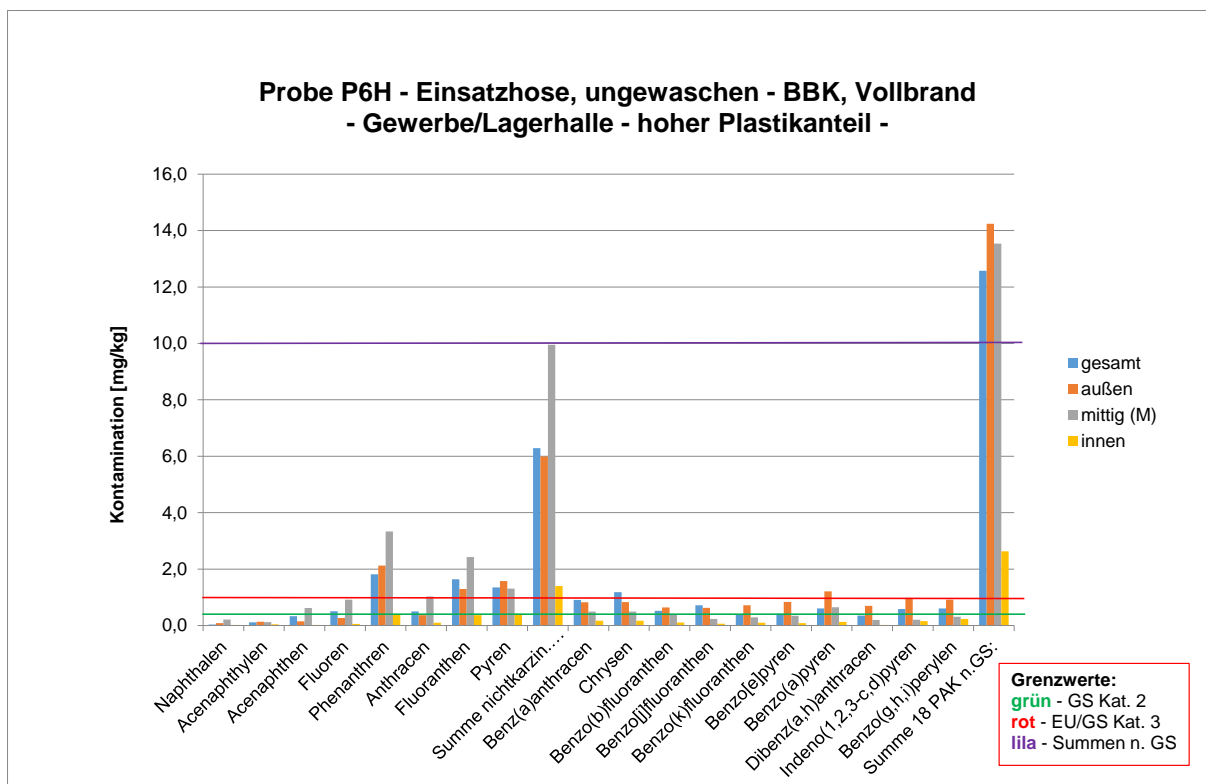
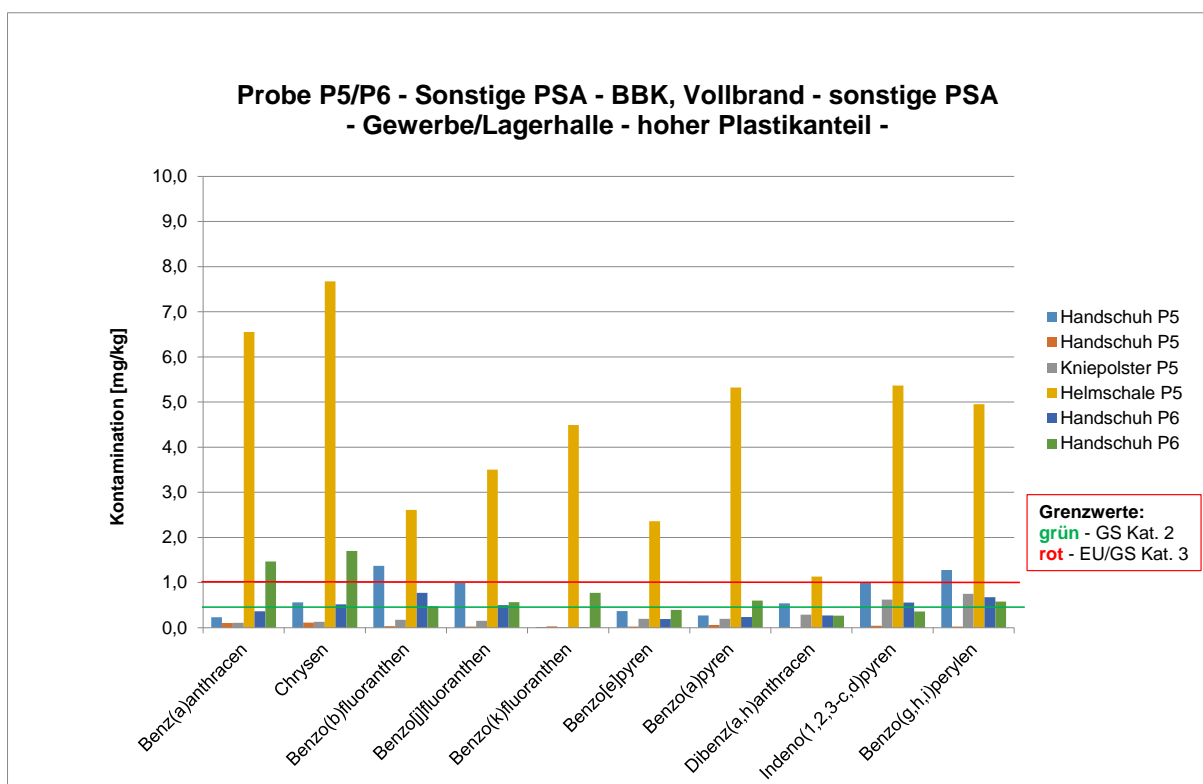
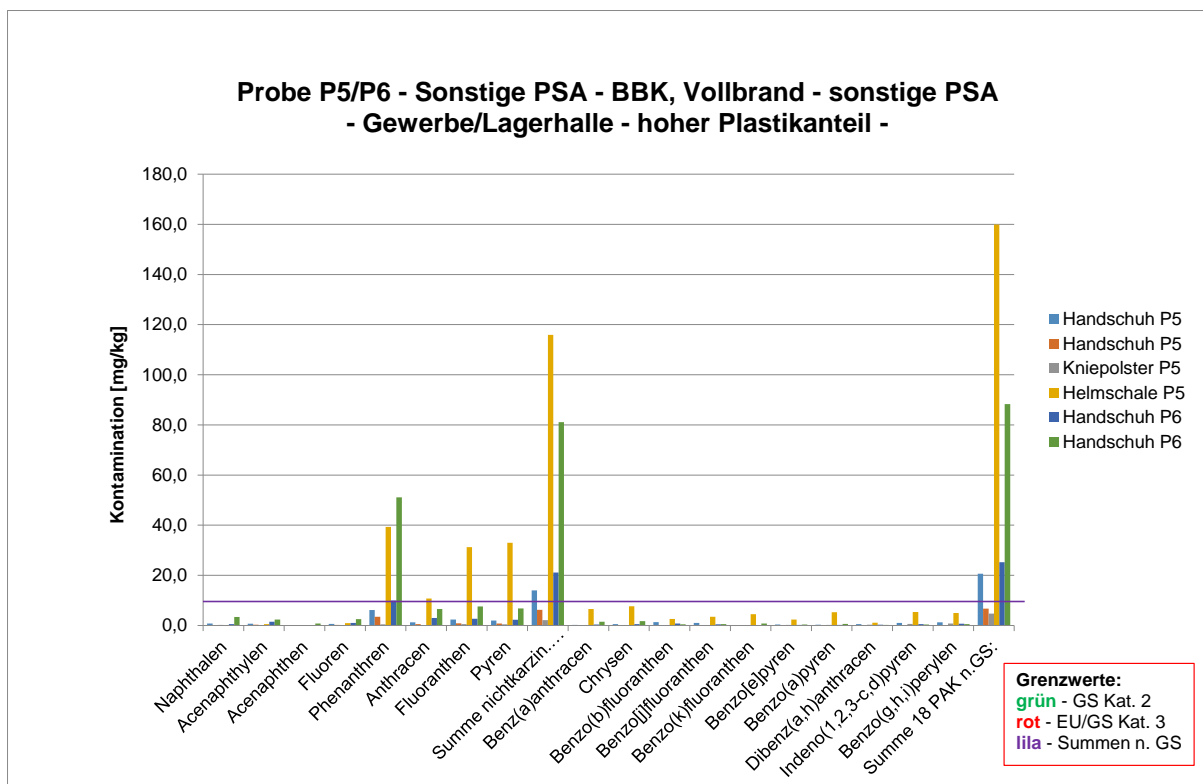


Abbildung 64 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P6H, oben gesamt / unten reduziert



**Abbildung 65 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination P5/P6 – sonstige PSA-Teile, oben
gesamt / unten reduziert**

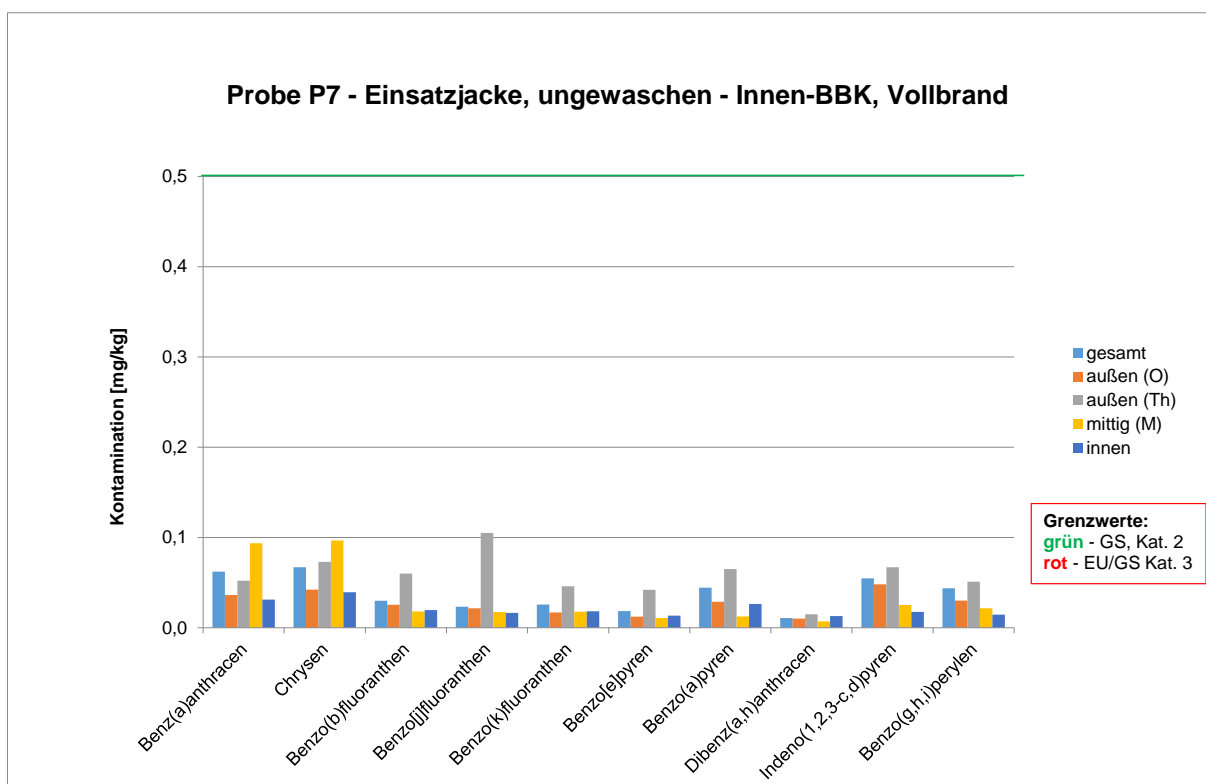
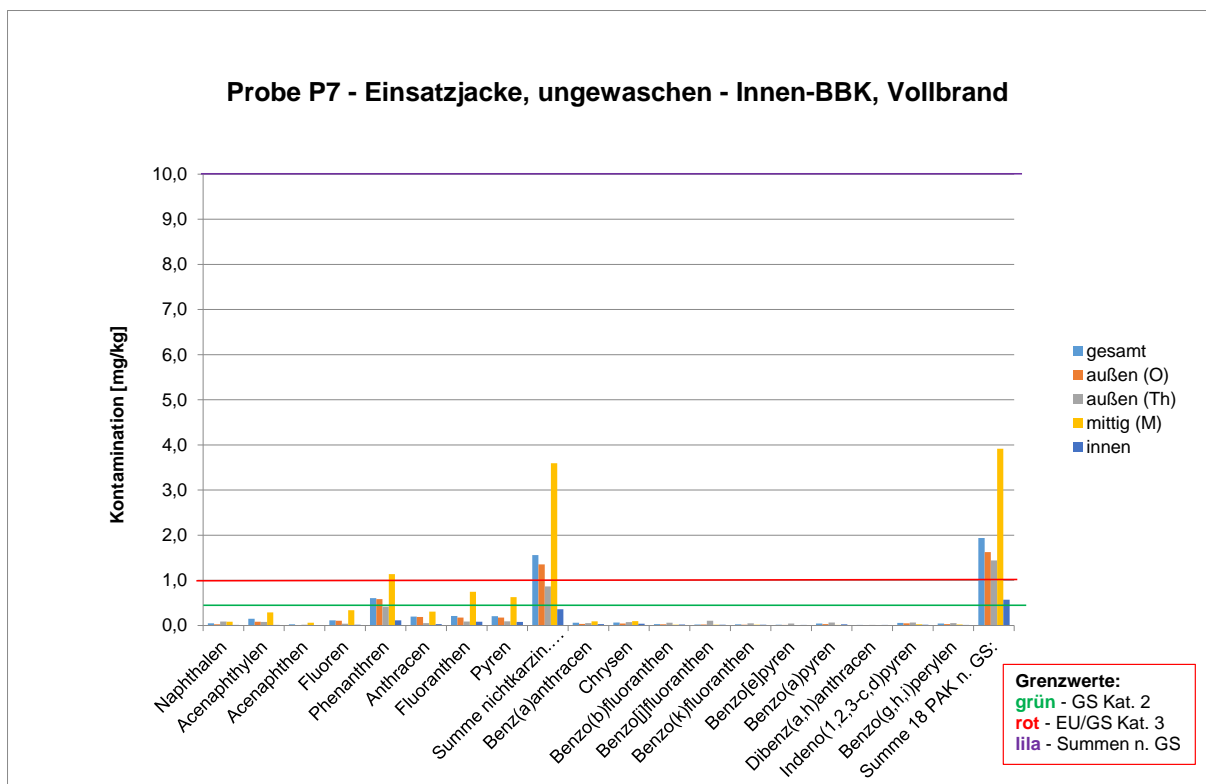


Abbildung 66 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P7, oben gesamt / unten reduziert

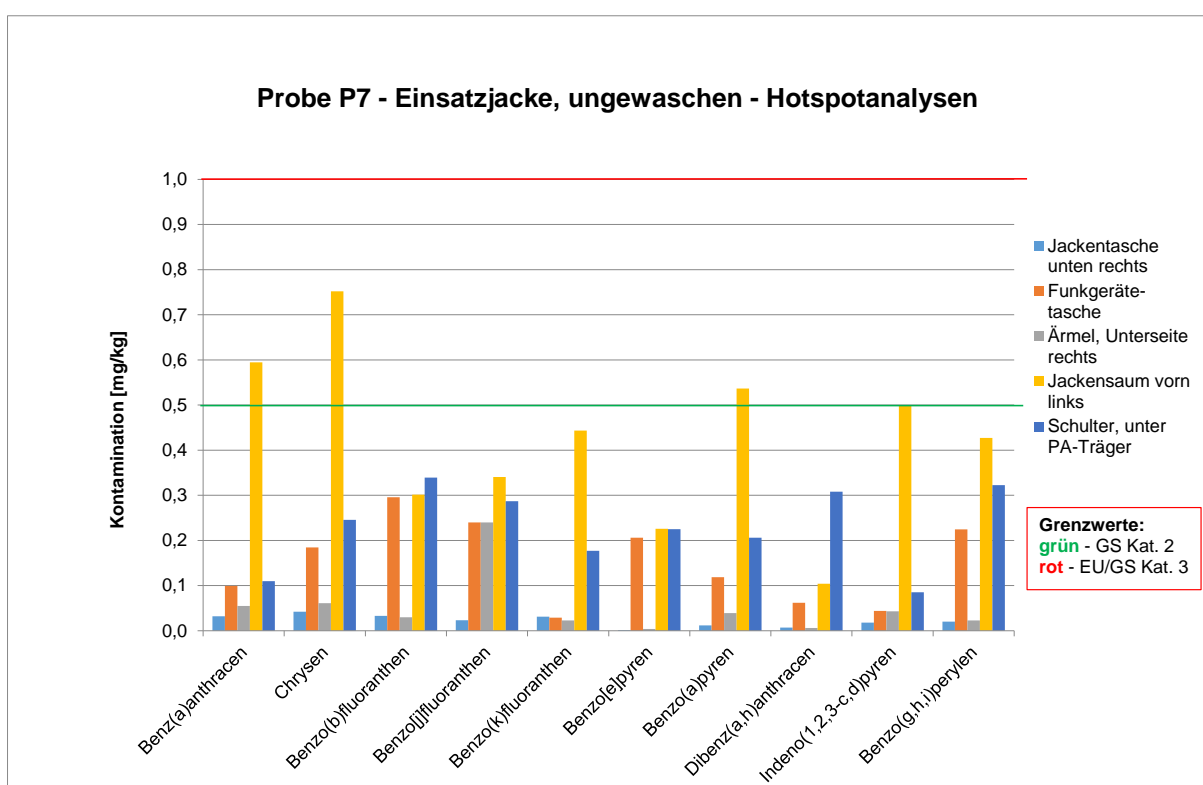
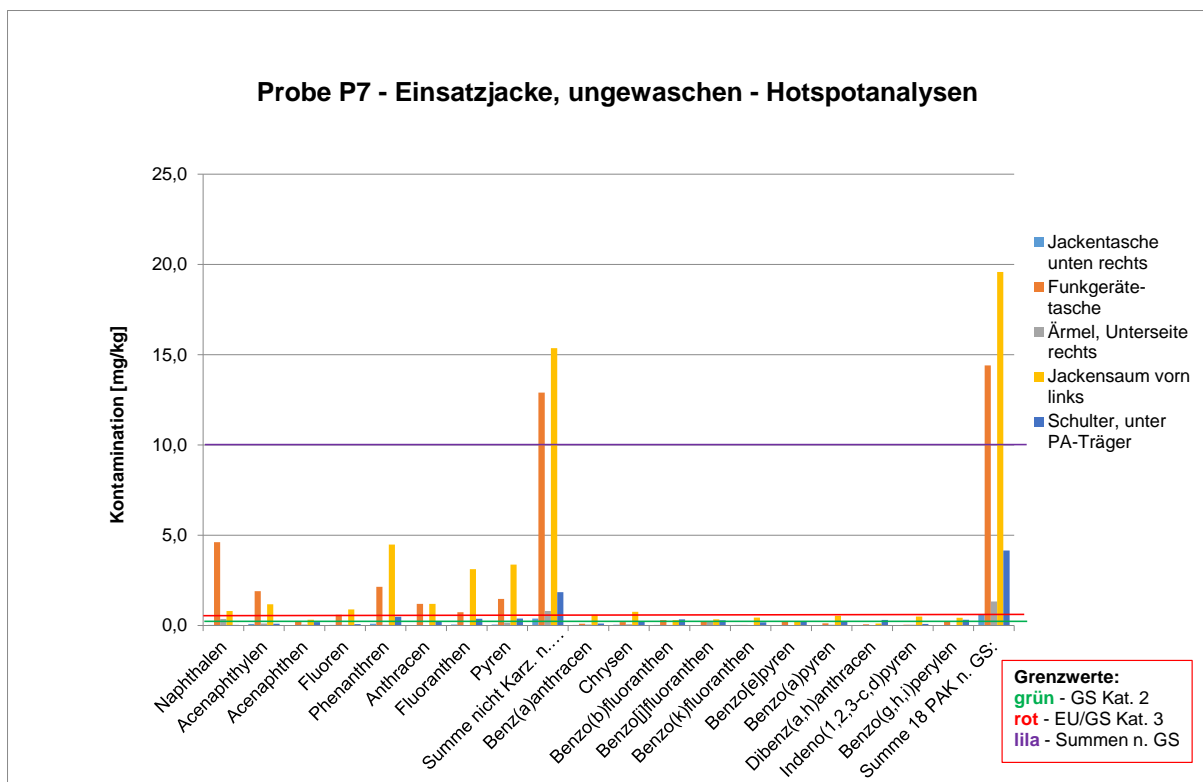


Abbildung 67 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P7 - Hotspots, oben gesamt / unten reduziert

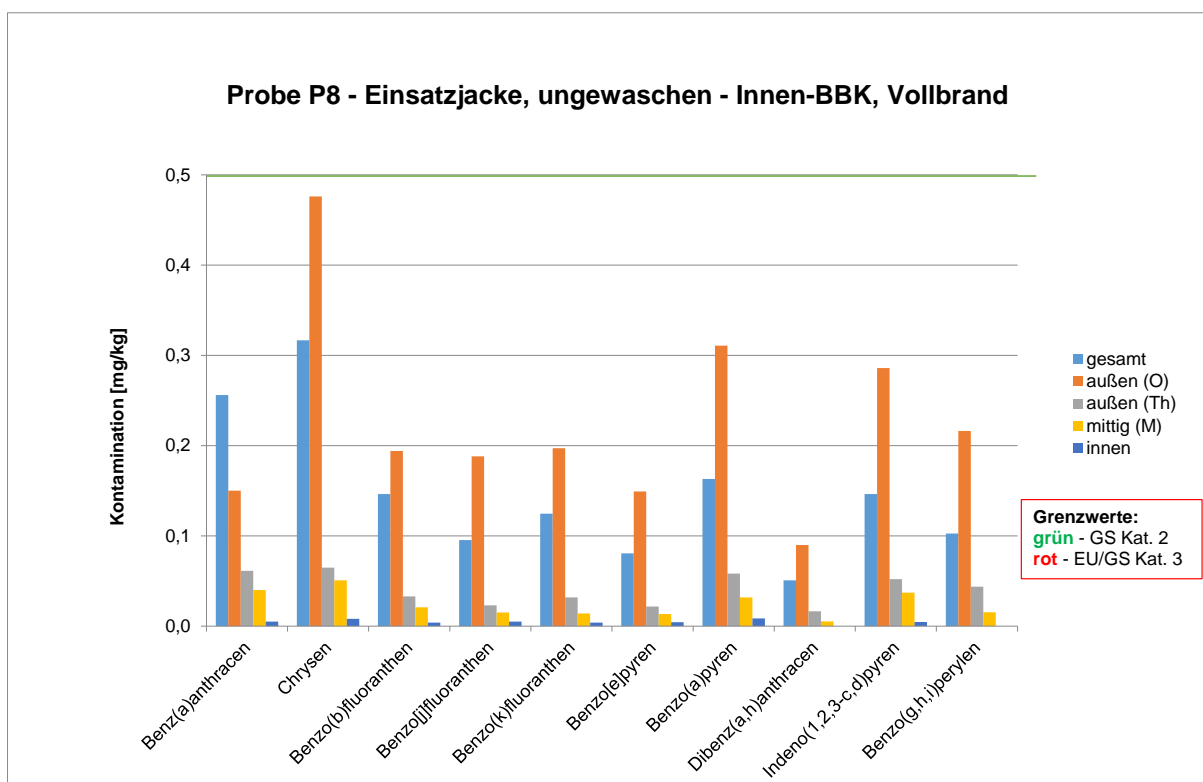
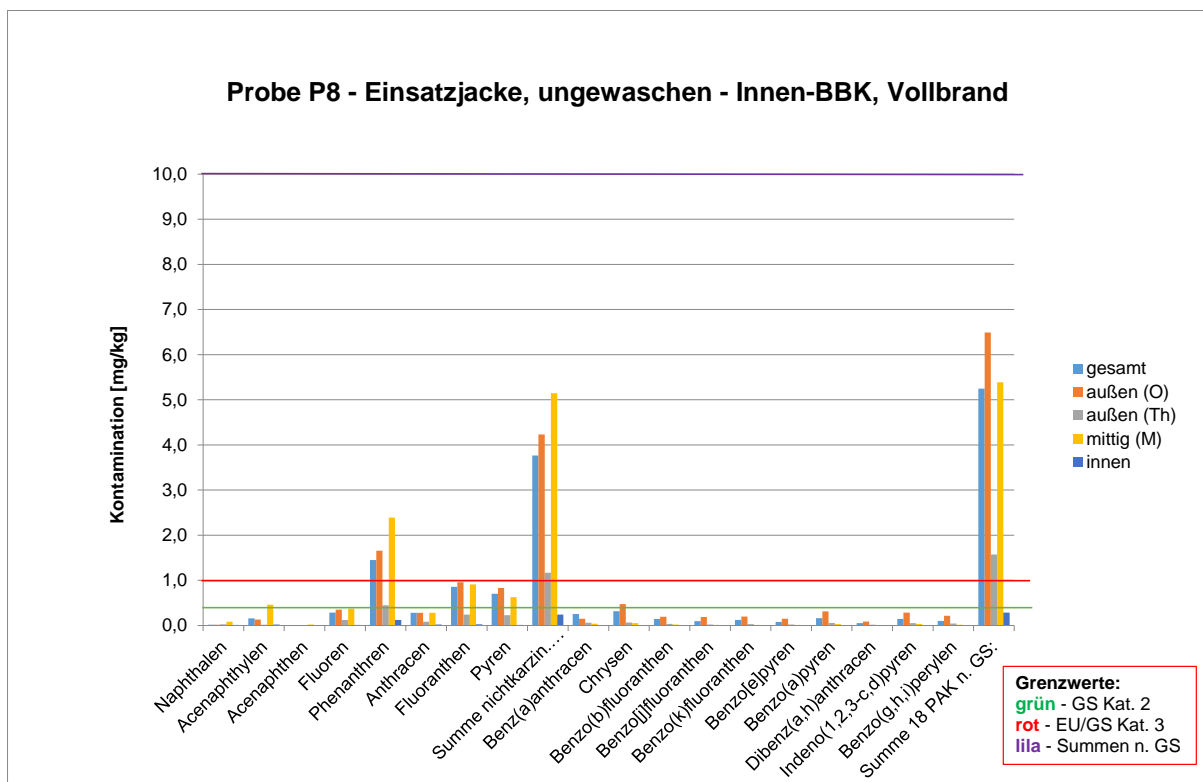


Abbildung 68 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P8, oben gesamt / unten reduziert

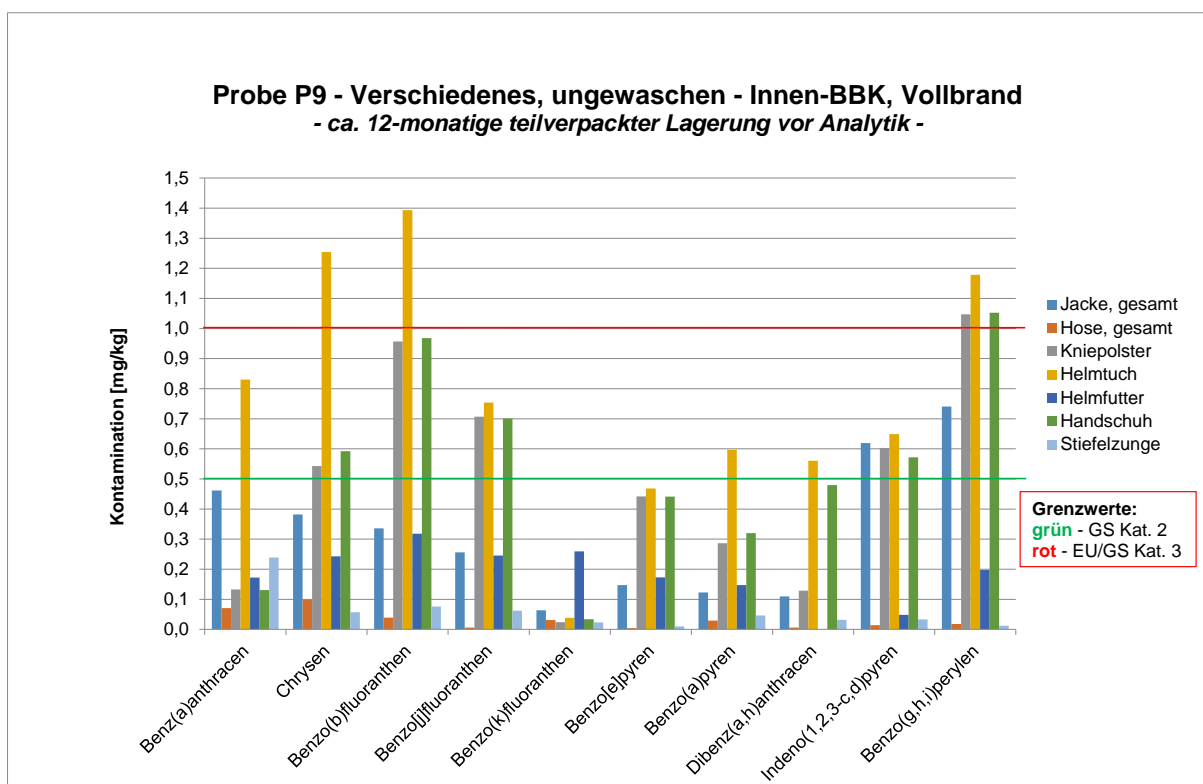
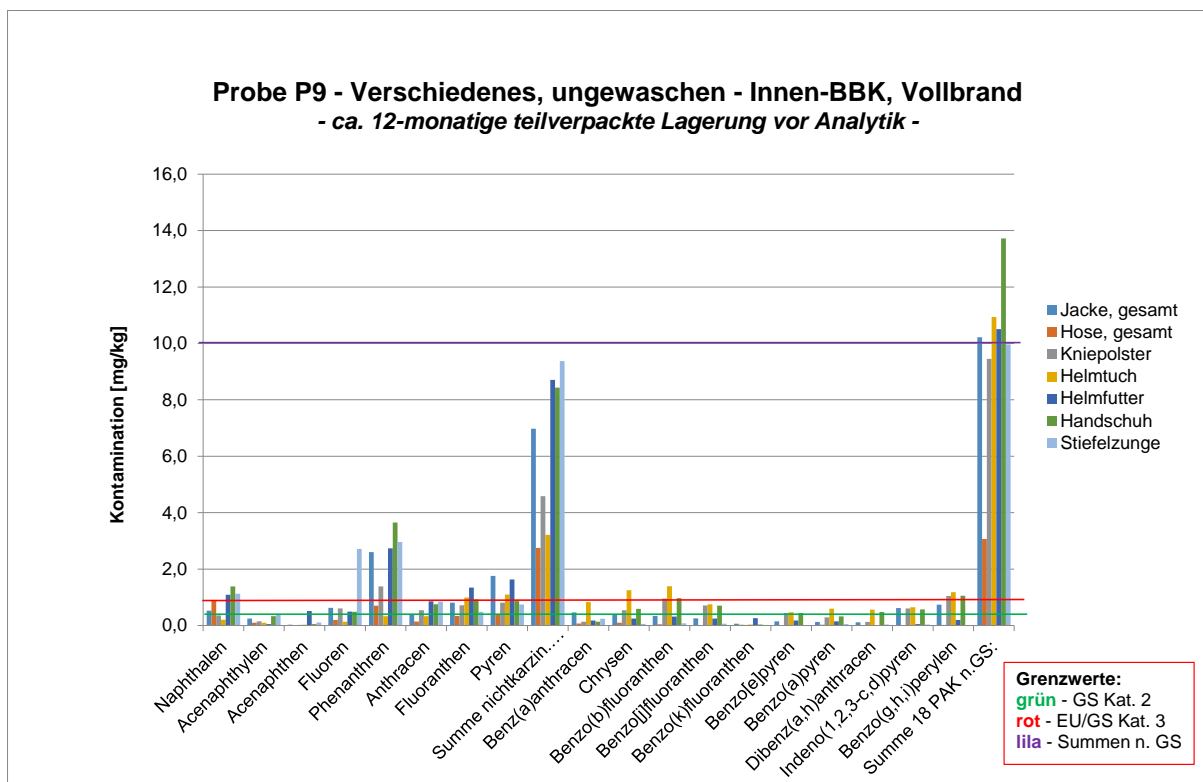


Abbildung 69 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von P9J/P9H sowie weitere PSA-Teile, oben gesamt / unten reduziert

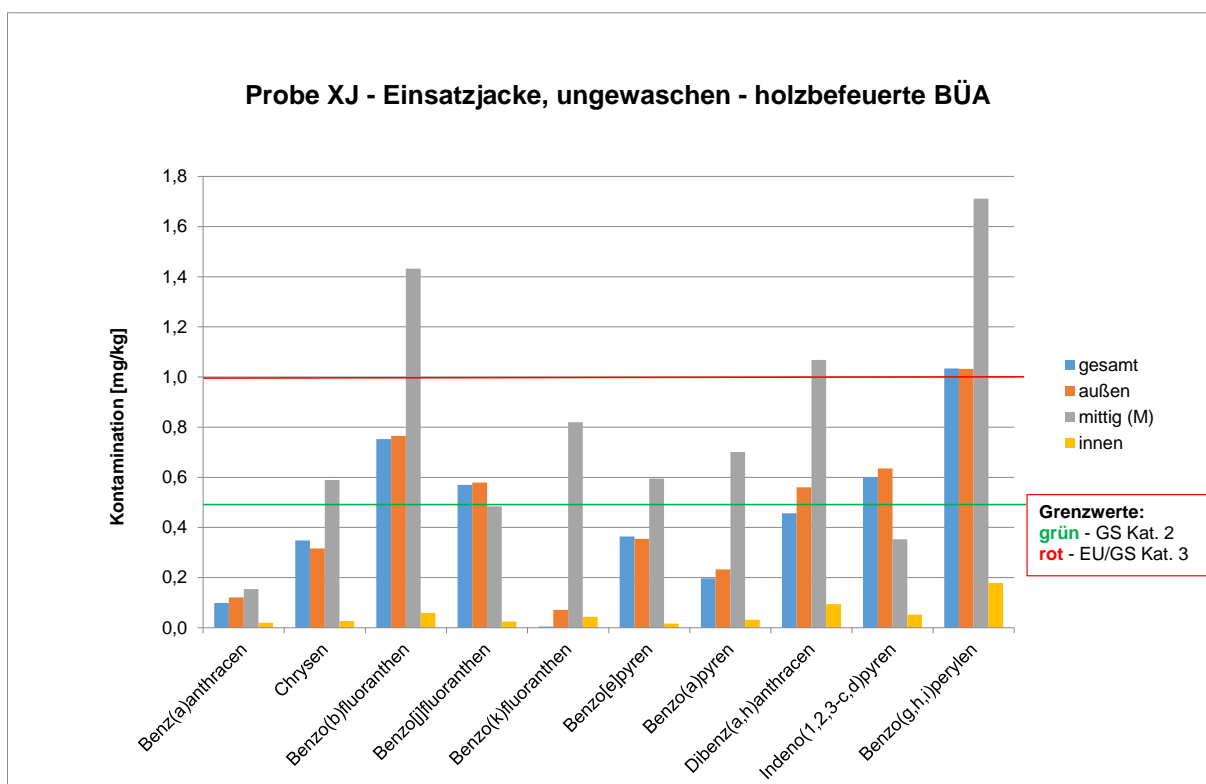
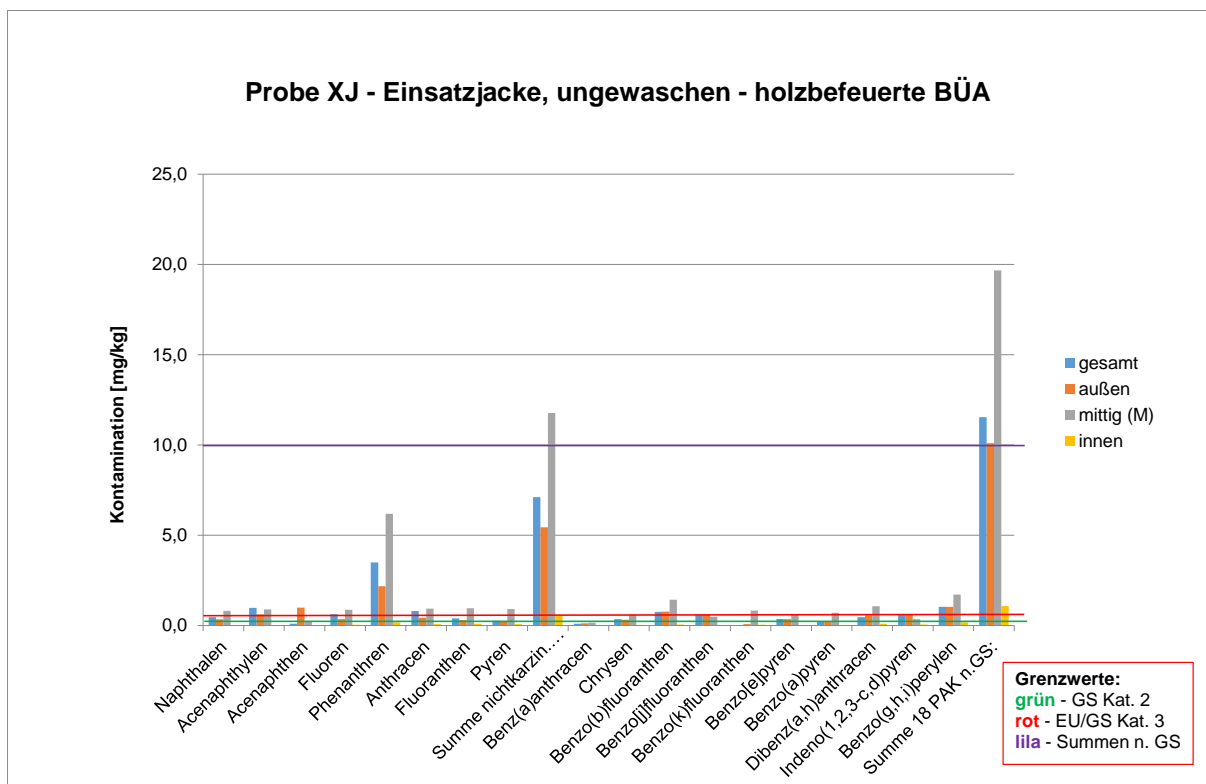


Abbildung 70 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von XJ, oben gesamt / unten reduziert

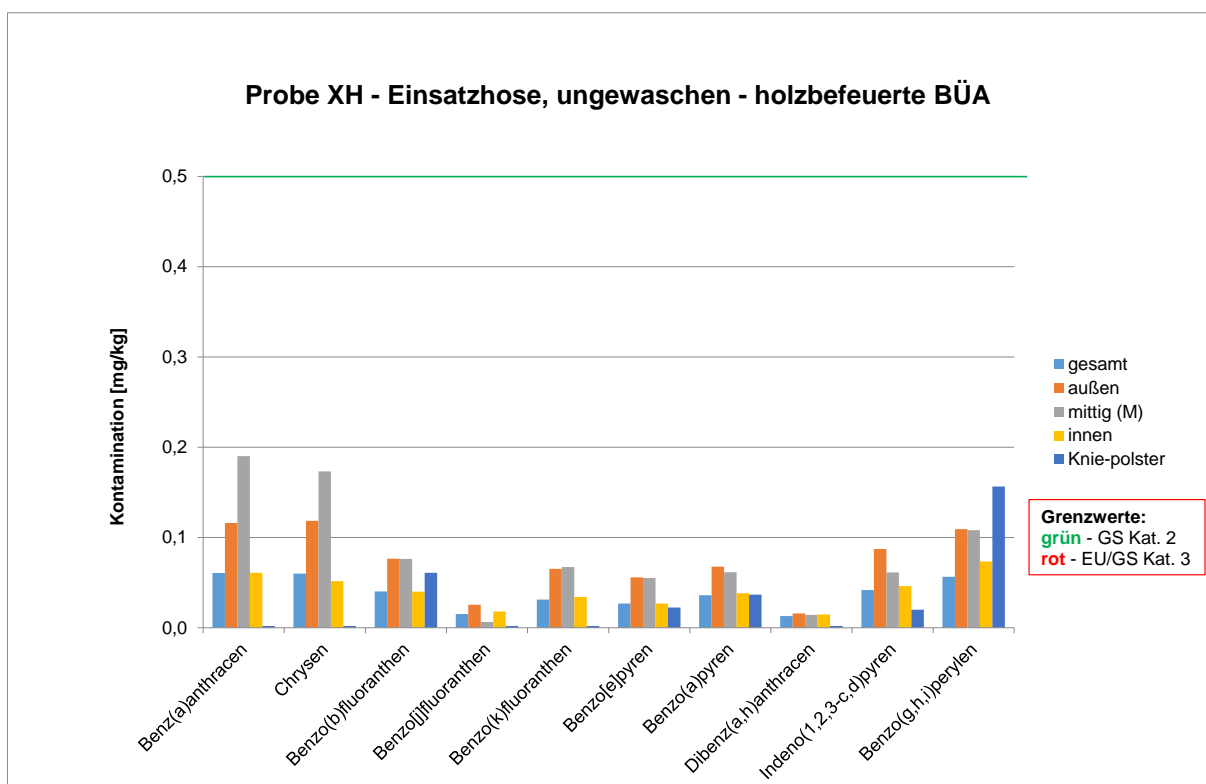
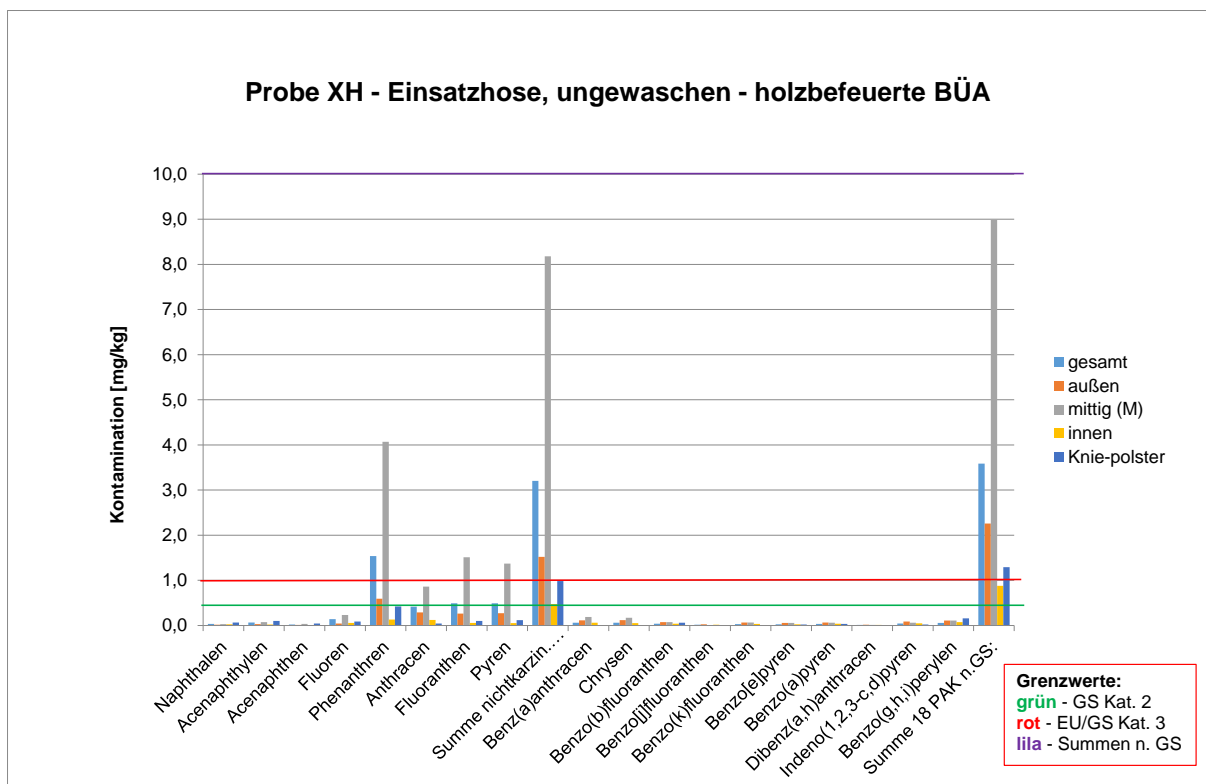


Abbildung 71 Praxisproben, ungewaschen – Kontamination von XH, oben gesamt / unten reduziert

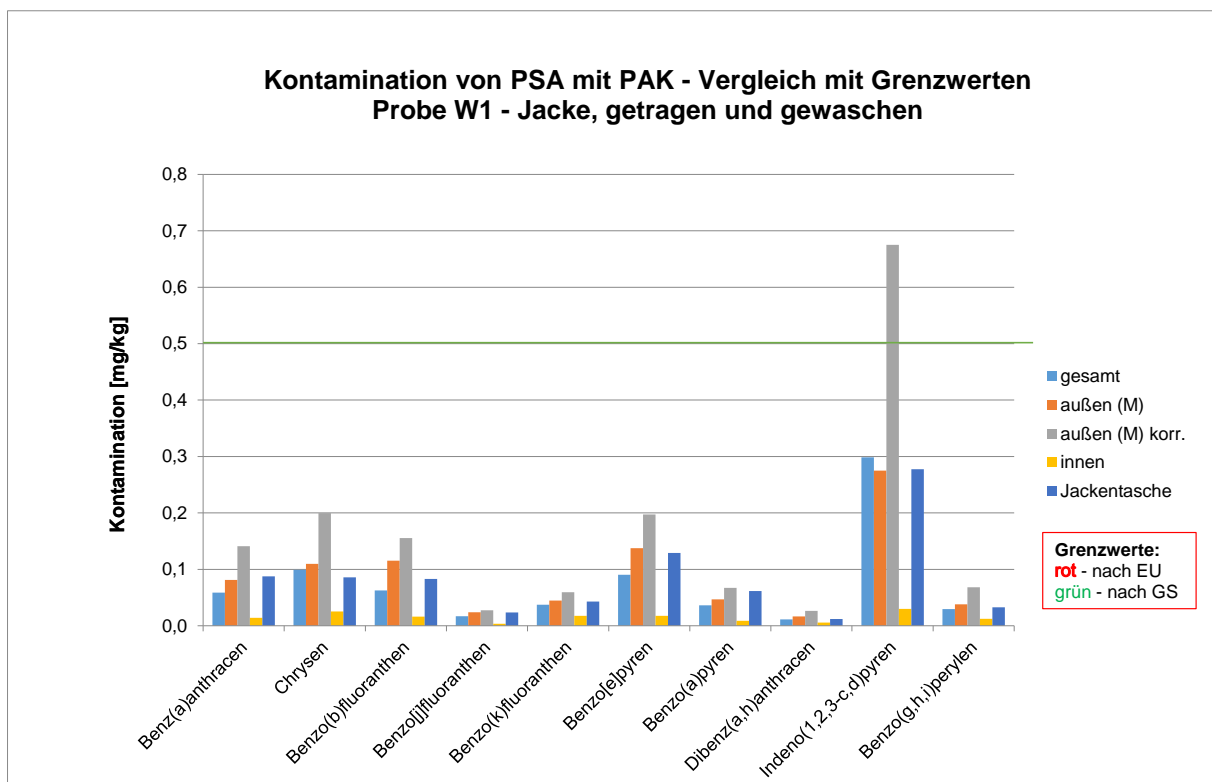
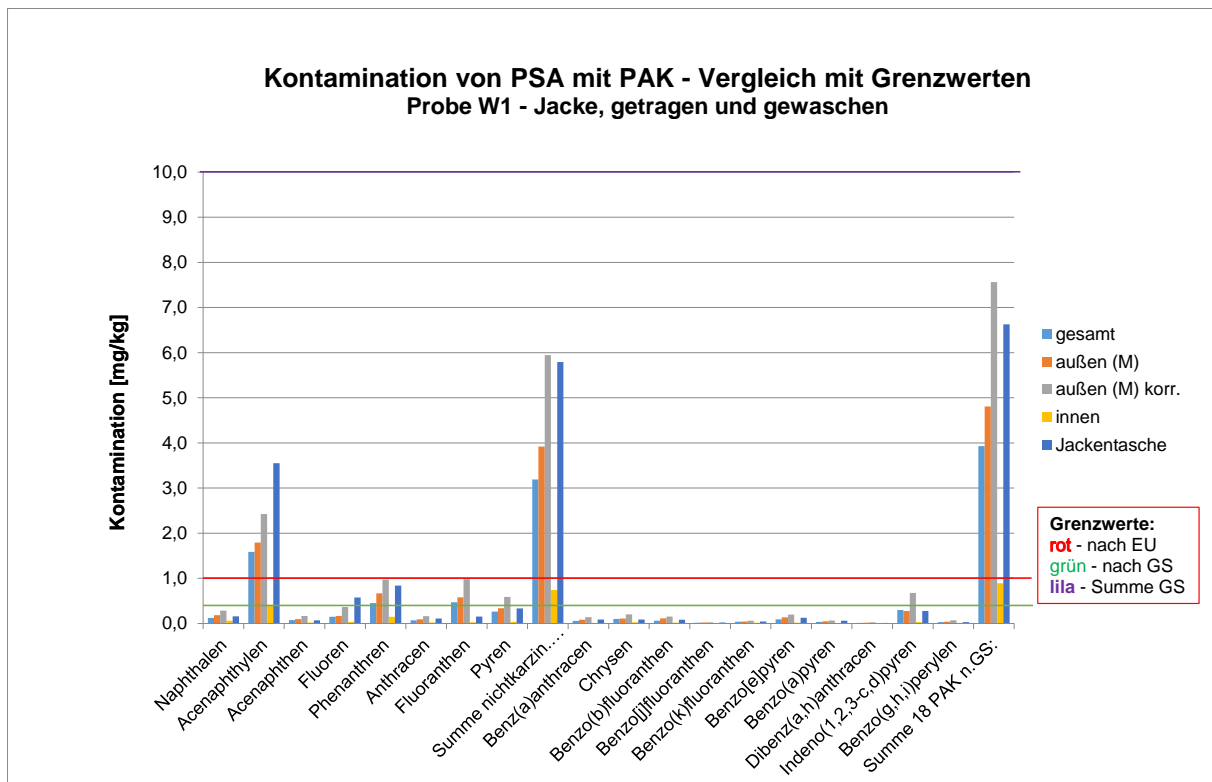


Abbildung 72 Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W1, oben gesamt / unten reduziert

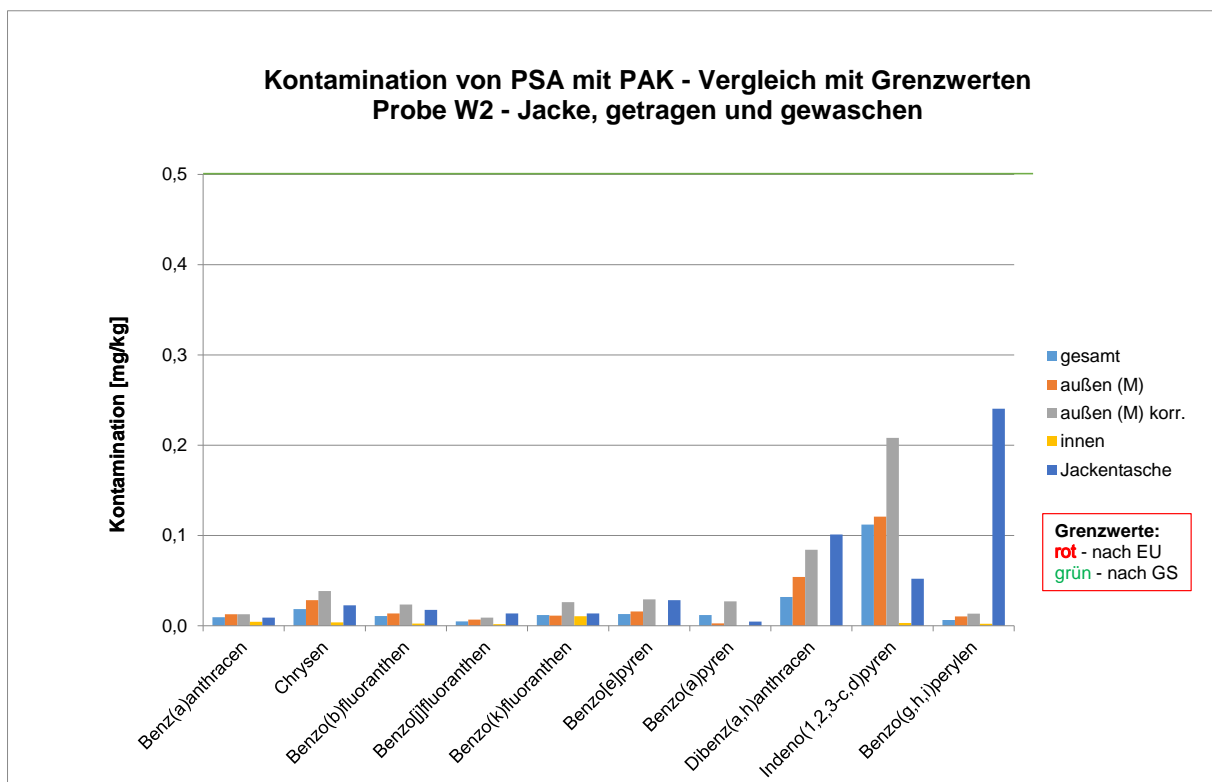
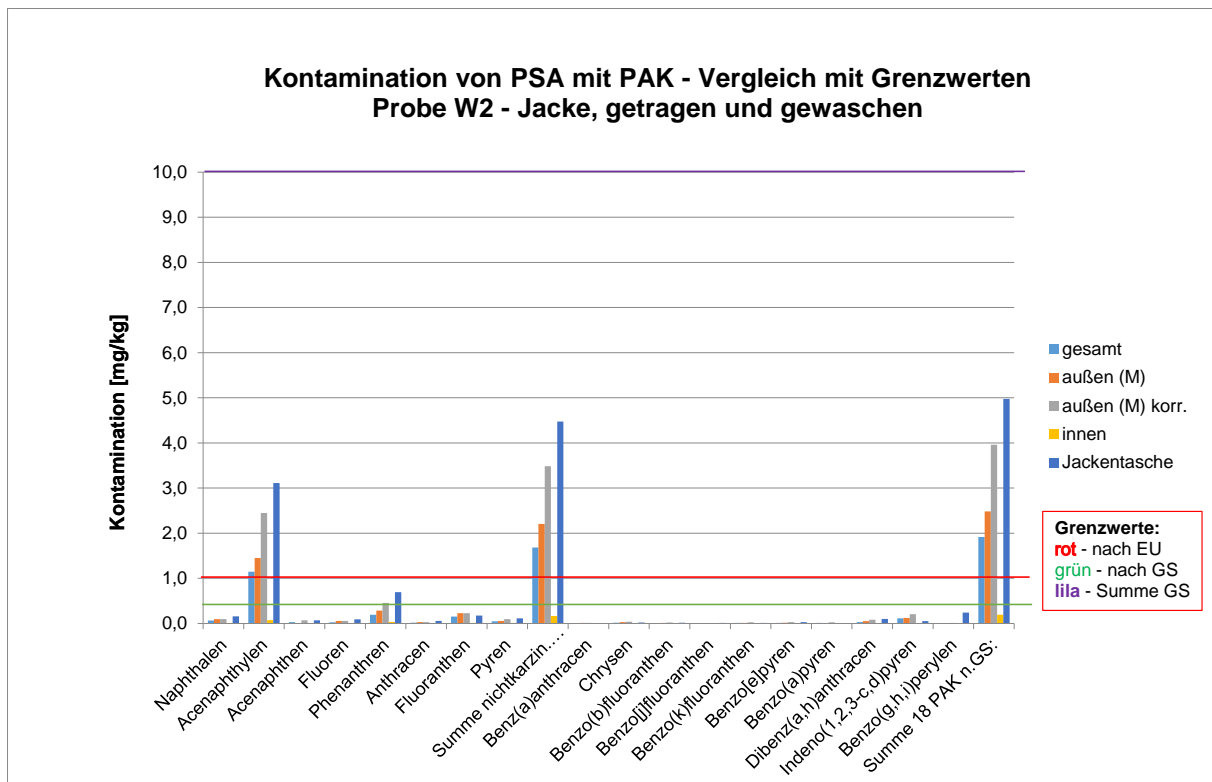


Abbildung 73 Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W2, oben gesamt / unten reduziert

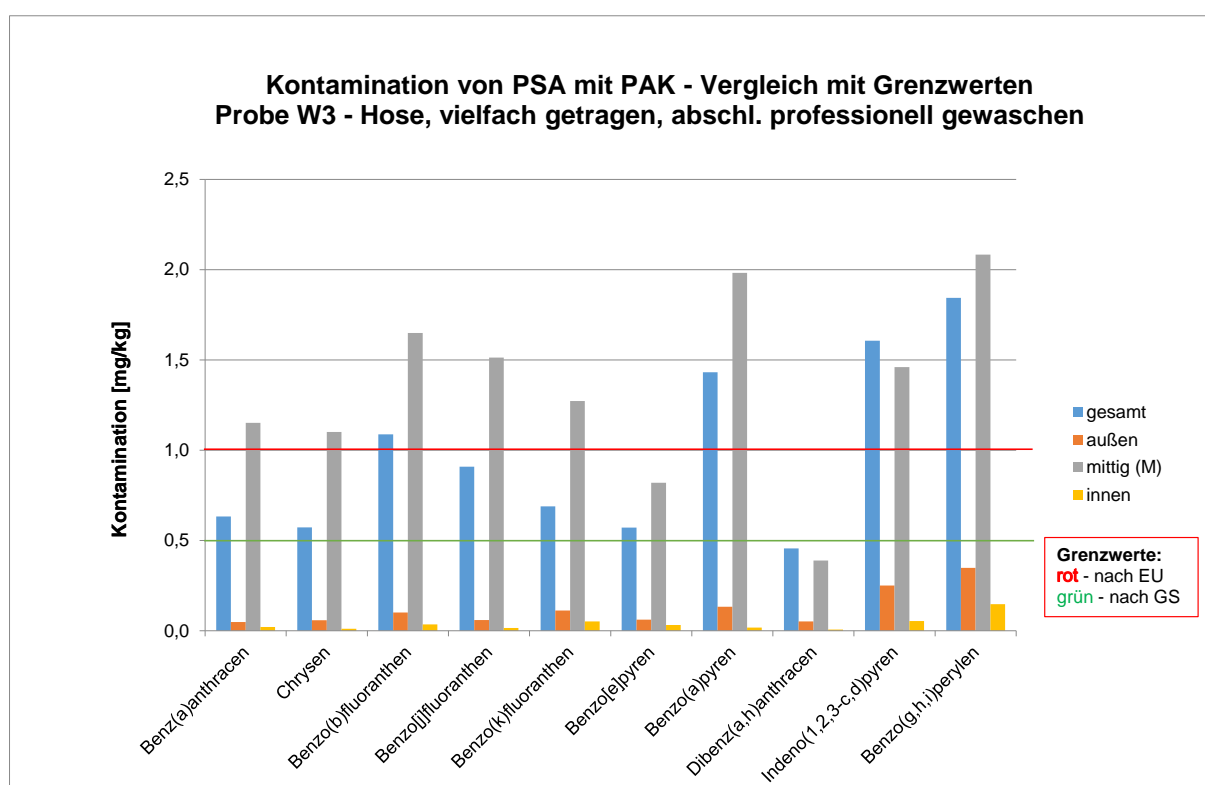
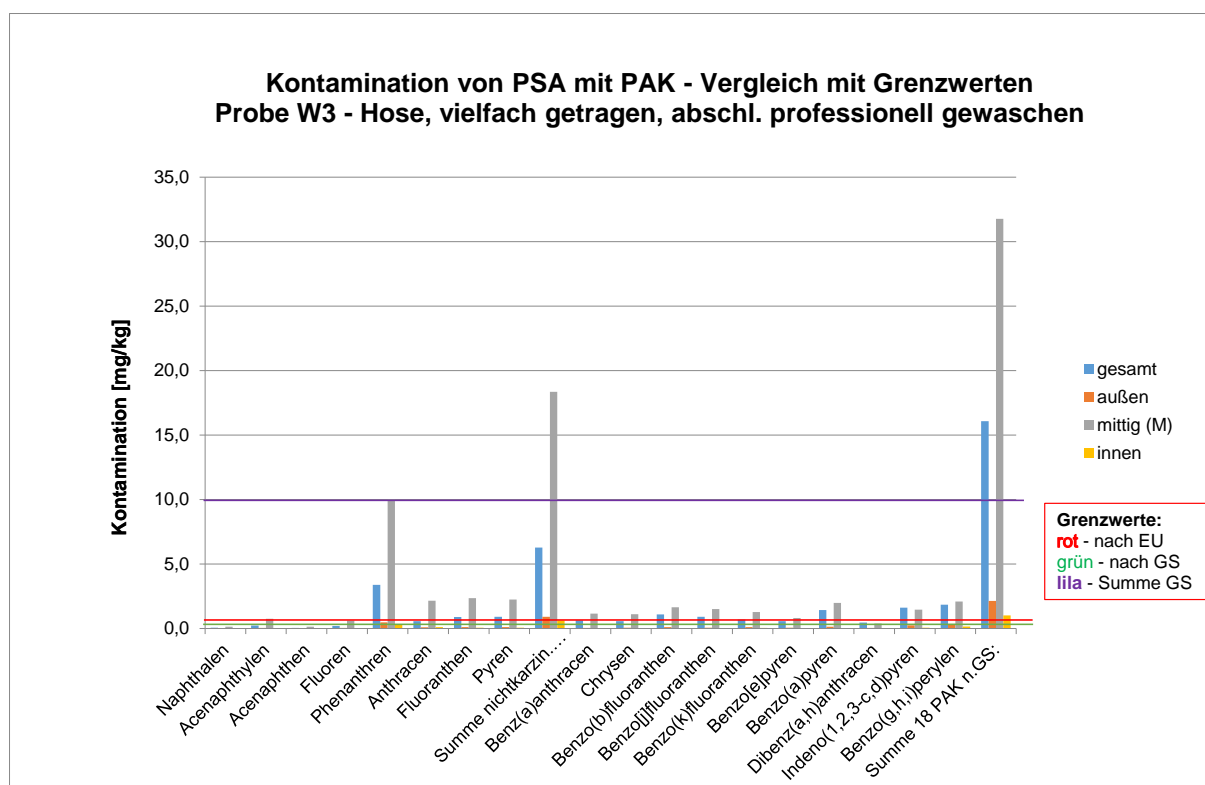


Abbildung 74 Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W3, oben gesamt / unten reduziert

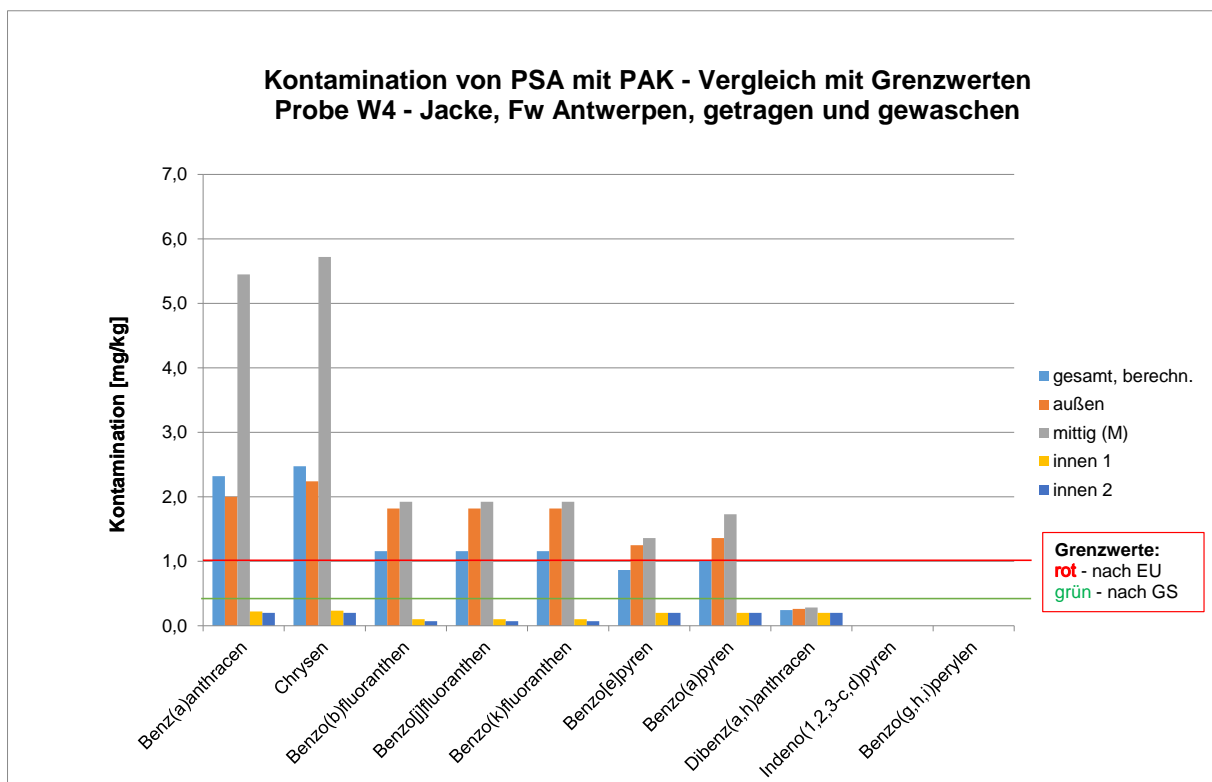
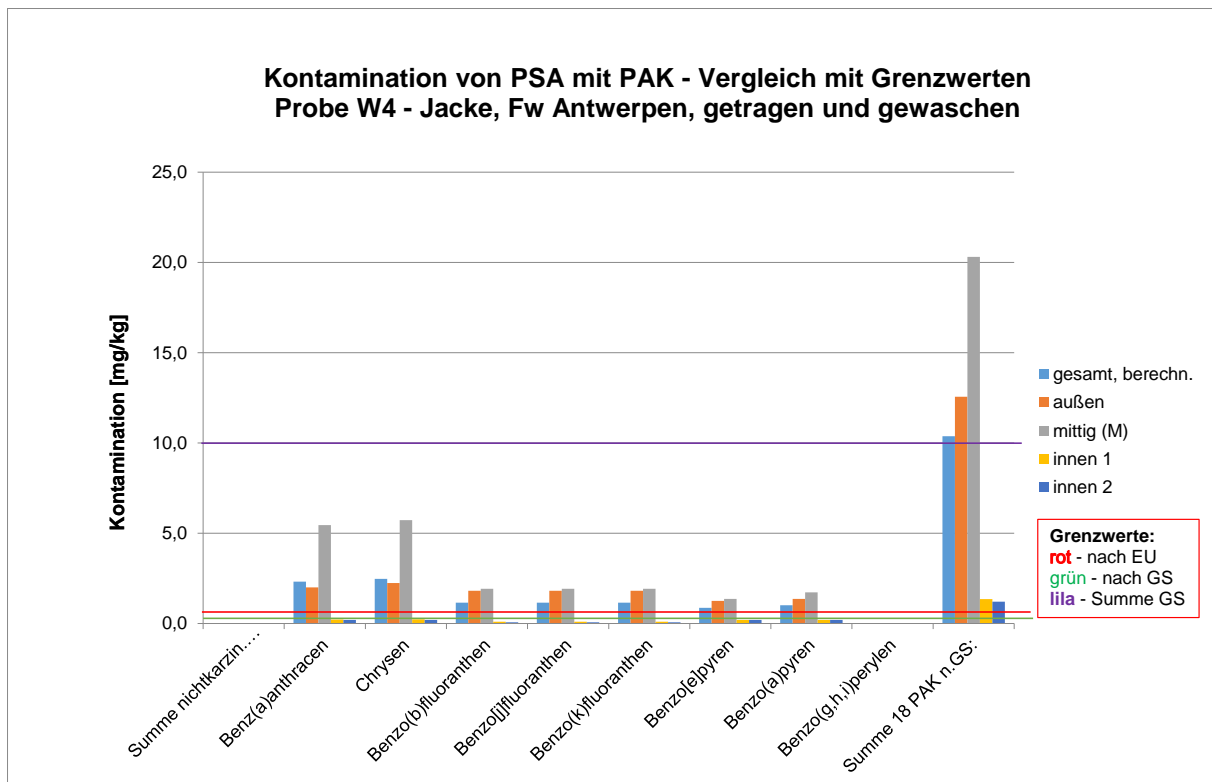


Abbildung 75 Praxisproben, gewaschen – Kontamination von W4, oben gesamt / unten reduziert [Decontex GmbH, aus: Pfeuffer, 2018],