

*The MAK Collection for Occupational Health and Safety*

# Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), schwerer flüchtige – Methode zur Bestimmung schwerer flüchtiger PAH in der Luft am Arbeitsplatz mittels Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC)

## Luftanalysen-Methode

H. Assenmacher-Maiworm<sup>1</sup>, J.-U. Hahn<sup>1</sup>, B. Heinrich<sup>1</sup>, C. Schuh<sup>2</sup>, R. Hebisch<sup>3,\*</sup>, A. Hartwig<sup>4,\*</sup>,  
MAK Commission<sup>5,\*</sup>

<sup>1</sup> *Methodenentwicklung, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Alte Heerstraße 111, 53757 Sankt Augustin*

<sup>2</sup> *Methodenprüfung, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Dynamostraße 7–11, 68165 Mannheim*

<sup>3</sup> *Leitung der Arbeitsgruppe „Luftanalysen“ der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Friedrich-Henkel-Weg 1–25, 44149 Dortmund*

<sup>4</sup> *Vorsitz der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Institut für Angewandte Biowissenschaften, Abteilung Lebensmittelchemie und Toxikologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Adenauerring 20a, Geb. 50.41, 76131 Karlsruhe*

<sup>5</sup> *Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Kennedyallee 40, 53175 Bonn*

\* *E-Mail: R. Hebisch ([luftanalysen-dfg@baua.bund.de](mailto:luftanalysen-dfg@baua.bund.de)), A. Hartwig ([andrea.hartwig@kit.edu](mailto:andrea.hartwig@kit.edu)), MAK Commission ([arbeitsstoffkommission@dfg.de](mailto:arbeitsstoffkommission@dfg.de))*

**Keywords:** polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe; PAH; Luftanalysen; Analysenmethode; Arbeitsplatzmessung; Gefahrstoff; Hochleistungsflüssigkeitschromatographie; Fluoreszenzdetektion; HPLC-FLD; PTFE-Filter

**Citation Note:** Assenmacher-Maiworm H, Hahn J-U, Heinrich B, Schuh C, Hebisch R, Hartwig A, MAK Commission. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), schwerer flüchtige – Methode zur Bestimmung schwerer flüchtiger PAH in der Luft am Arbeitsplatz mittels Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC). Luftanalysen-Methode. MAK Collect Occup Health Saf [Original-Ausgabe. Weinheim: Wiley-VCH; 2017 Okt;2(4):1673-1689]. Korrigierte Neuveröffentlichung ohne inhaltliche Bearbeitung. Düsseldorf: German Medical Science; 2026. [https://doi.org/10.34865/am0pahsd0019\\_w](https://doi.org/10.34865/am0pahsd0019_w)

**Neuveröffentlichung (Online):** 08 Mai 2026

Vormals erschienen bei Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; <https://doi.org/10.1002/3527600418.am0pahsd0019>

**Manuskript abgeschlossen:** 01 Mai 2017

**Erstveröffentlichung (Online):** 27 Okt 2017

*Zur Vermeidung von Interessenkonflikten hat die Kommission Regelungen und Maßnahmen etabliert.*



Dieses Werk ist lizenziert unter einer  
Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

# Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) – Method for the determination of semi-volatile PAH in workplace air using high performance liquid chromatography (HPLC)

## [Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), schwerer flüchtige – Methode zur Bestimmung schwerer flüchtiger PAH in der Luft am Arbeitsplatz mittels Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC)]

### Air Monitoring Methods in German language

H. Assenmacher-Maiworm<sup>1</sup>, J.-U. Hahn<sup>1</sup>, B. Heinrich<sup>1</sup>, C. Schuh<sup>2</sup>, R. Hebisch<sup>3,\*</sup>, A. Hartwig<sup>4,\*</sup>, MAK Commission<sup>5,\*</sup>

DOI: 10.1002/3527600418.am0pahsd0019

### Abstract

This analytical method is a validated measurement procedure for the determination of six semi-volatile polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) from the EPA list (US Environmental Protection Agency) such as benzo[*b*]fluoranthene, benzo[*k*]fluoranthene, benzo[*a*]pyrene, dibenzo[*a,h*]anthracene, benzo[*ghi*]perylene, indeno[1,2,3-*cd*]pyrene and also benzo[*e*]pyren in workplace air averaged over the sampling period after personal or stationary sampling. Sampling is performed by drawing a defined volume of air through a Teflon filter, which is inserted in a GSP sampling system. The collected PAH components are extracted with a mixture of acetonitrile/methanol and analysed by means of high performance liquid chromatography (HPLC) with fluorescence detection. The quantitative determination of the PAHs is based on calibration functions obtained by means of multiple-point calibrations. The limit of quantification for an individual PAH is in the range from 0.0012 to 0.0043 µg/m<sup>3</sup>.

### Keywords

Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe; PAH; Benzo[*b*]fluoranthen; Benzo[*k*]fluoranthen; Benzo[*a*]pyren; Dibenzo[*a,h*]anthracen; Benzo[*ghi*]perylene; Indeno[1,2,3-*cd*]pyren; Benzo[*e*]pyren; Arbeitsplatzmessung; Gefahrstoffe; Luftanalysen; Teflonfilter; Hochleistungsflüssigchromatographie; HPLC; Fluoreszenzdetektion

### Author Information

<sup>1</sup> Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Alte Heerstr. 111, 53757 Sankt Augustin

<sup>2</sup> Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Dynamostr. 7–11, 68165 Mannheim

<sup>3</sup> Leiter der Arbeitsgruppe „Luftanalysen“ der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Friedrich-Henkel-Weg 1–25, 44149 Dortmund

<sup>4</sup> Vorsitzende der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Institut für angewandte Biowissenschaften, Abteilung Lebensmittelchemie und Toxikologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Adenauerring 20a, Geb. 50.41, 76131 Karlsruhe

<sup>5</sup> Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Kennedyallee 40, 53175 Bonn

\* Email: R. Hebisch (luftanalysen-dfg@baua.bund.de), A. Hartwig (andrea.hartwig@kit.edu), MAK Commission (arbeitsstoffkommission@dfg.de)

# Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), schwerer flüchtige – Methode zur Bestimmung schwerer flüchtiger PAH in der Luft am Arbeitsplatz mittels Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC)

---

<b>Methodennummer</b>	1
<b>Anwendbarkeit</b>	Luftanalyse
<b>Analyt. Messprinzip</b>	Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC)
<b>Abgeschlossen im</b>	Mai 2017

---

## Zusammenfassung

Mit diesem Messverfahren können sechs schwerer flüchtige Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) aus der Liste der EPA (US Environmental Protection Agency) wie z. B. Benzo[*b*]fluoranthen, Benzo[*k*]fluoranthen, Benzo[*a*]pyren, Dibenzo[*a,h*]anthracen, Benzo[*ghi*]perylene und Indeno[1,2,3-*cd*]pyren sowie Benzo[*e*]pyren in der Luft am Arbeitsplatz bestimmt werden. Das Verfahren ist geeignet, um die derzeit gültige Akzeptanzkonzentration von 70 ng/m<sup>3</sup> bzw. Toleranzkonzentration von 700 ng/m<sup>3</sup> für Benzo[*a*]pyren zu überwachen.

Zur Probenahme wird ein definiertes Luftvolumen mit einer durchflusstabilisierten Pumpe durch einen Teflonfilter gesaugt, der in einem GSP-Probenahmesystem lokalisiert ist. Der mit PAH-Komponenten beaufschlagte Teflonfilter wird anschließend mit Acetonitril/Methanol extrahiert und mittels Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC) und Fluoreszenzdetektion analysiert. Die quantitative Bestimmung erfolgt anhand von Mehrpunkt-Kalibrierungen mit externen Standards.

## Kenndaten des Verfahrens

Vergleichspräzision:	Standardabweichung (rel.):	$s = 2,4$ bis $6,3$ %
Erweiterte Messunsicherheit:	Für alle genannten PAH:	$U = 22,1$ bis $24,7$ %

im Konzentrationsbereich von 0,0083 bis 2,8 µg/m<sup>3</sup> in Abhängigkeit der einzelnen PAH-Komponente und n = mindestens 6 Bestimmungen (gilt sowohl für die Vergleichspräzision als auch für die erweiterte Messunsicherheit).

Bestimmungsgrenze:	Benzo[e]pyren [192-97-2]:	0,0039 µg/m <sup>3</sup>
	Benzo[b]fluoranthen [205-99-2]:	0,0014 µg/m <sup>3</sup>
	Benzo[k]fluoranthen [207-08-9]:	0,0012 µg/m <sup>3</sup>
	Benzo[a]pyren [50-32-8]:	0,0016 µg/m <sup>3</sup>
	Dibenzo[a,h]anthracen [189-64-0]:	0,0043 µg/m <sup>3</sup>
	Benzo[ghi]perylen [191-24-2]:	0,0020 µg/m <sup>3</sup>
	Indeno[1,2,3-cd]pyren [193-39-5]:	0,0023 µg/m <sup>3</sup>
		für ein Probeluftvolumen von 1200 L (1,2 m <sup>3</sup> )
Mittlere Wiederfindung:	Benzo[e]pyren:	97,8 %
	Benzo[b]fluoranthen:	98,8 %
	Benzo[k]fluoranthen:	99,3 %
	Benzo[a]pyren:	98,6 %
	Dibenzo[a,h]anthracen:	100,0 %
	Benzo[ghi]perylen:	100,2 %
Probenahmeempfehlung:	Indeno[1,2,3-cd]pyren:	98,6 %
	Probenahmedauer:	mind. 2 h
	Probeluftvolumen:	1,2 m <sup>3</sup> (1200 L)
	Volumenstrom:	600 L/h (10 L/min)

## Stoffbeschreibung

### Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)

Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) werden vorwiegend durch unvollständige Verbrennung organischen Materials in die Umgebung freigesetzt. In der Natur stellen Waldbrände die Hauptemissionsquelle dar; anthropogene Quellen sind insbesondere Verbrennungsmotoren, Kraftwerke und Verbrennungsanlagen. In der Atmosphäre liegen PAH je nach ihrem Dampfdruck gasförmig oder an Partikel gebunden vor. Des Weiteren sind PAH in erheblichen Anteilen auch in Teeren und Pechen enthalten und werden bei deren Verarbeitung gasförmig, adsorbiert an Partikel oder in Form von Staub in die Umgebungsluft freigesetzt.

Viele PAH wirken mutagen oder kanzerogen, wobei die Toxizität teilweise erst durch die Metabolisierung entsprechender PAH-Komponenten im menschlichen Körper aktiviert wird. Zur Toxizität von PAH siehe toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [1, 2]. In der MAK- und BAT-Werte-Liste sind PAH dem Abschnitt III „Krebserzeugende Arbeitsstoffe“ (Pyrolyseprodukte aus organischem Material) zugeordnet. Die PAH-Komponenten Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Dibenzo[a,h]anthracen und Indeno[1,2,3-cd]pyren sind zudem in die Kategorie 2 für krebserzeugende Arbeitsstoffe eingestuft [3].

Benzo[*a*]pyren dient als Leitkomponente für eine PAH-Belastung am Arbeitsplatz. Bis 2005 galt für Benzo[*a*]pyren eine TRK (Technische Richtkonzentration) von 2 µg/m<sup>3</sup> bzw. von 5 µg/m<sup>3</sup> für die Strangpechherstellung und -verladung sowie im Ofenbereich von Kokereien [4, 5]. Im Jahre 2011 wurde eine ERB (Exposition-Risiko-Beziehung) für den Umgang mit Benzo[*a*]pyren festgelegt [6]. Die Toleranzkonzentration beträgt derzeit 700 ng/m<sup>3</sup> und die Akzeptanzkonzentration 70 ng/m<sup>3</sup>. Die Ableitung der ERB erfolgte auf der Basis vorhandener Daten von Tätigkeiten in Industriebereichen wie z. B. der Kokerei, der Kohlevergasung und -verflüssigung, der Aluminiumproduktion, der Herstellung von Graphit- und Kohleelektroden, der Teerdestillation und -verarbeitung sowie Schornsteinfegen [7]. Weitere Informationen über PAH sind der IARC Monographie [8] zu entnehmen.

### Inhaltsverzeichnis

1	Grundlage des Verfahrens	1676
2	Geräte, Chemikalien und Lösungen	1677
2.1	Geräte	1677
2.2	Chemikalien	1678
2.3	Lösungen	1678
3	Probenahme und Probenaufbereitung	1679
4	HPLC-Arbeitsbedingungen	1680
5	Analytische Bestimmung	1681
6	Kalibrierung	1681
7	Berechnung des Analyseergebnisses	1681
8	Beurteilung des Verfahrens	1683
8.1	Vergleichspräzision und erweiterte Messunsicherheit	1683
8.2	Wiederfindung	1683
8.3	Bestimmungsgrenze	1685
8.4	Lagerfähigkeit	1685
8.5	Blindwerte	1685
8.6	Störeinflüsse	1686
9	Diskussion	1686
10	Anhang: Präzision und Richtigkeit mittels Vergleichsmessung	1687
	Literatur	1688

## 1 Grundlage des Verfahrens

Mit diesem Messverfahren können sechs schwerer flüchtige Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) aus der Liste der EPA (US Environmental Protection Agency), wie z. B. Benzo[*b*]fluoranthen, Benzo[*k*]fluoranthen, Benzo[*a*]pyren, Dibenzo[*a,h*]anthracen, Benzo[*ghi*]perylen und Indeno[1,2,3-*cd*]pyren sowie außer-

dem Benzo[e]pyren in der Luft am Arbeitsplatz bestimmt werden. Das Verfahren ist geeignet, um die derzeit gültige Akzeptanzkonzentration von 70 ng/m<sup>3</sup> bzw. Toleranzkonzentration von 700 ng/m<sup>3</sup> für Benzo[a]pyren zu überwachen.

Zur Probenahme wird ein definiertes Luftvolumen mit einer durchflussstabilisierten Pumpe durch einen Teflonfilter gesaugt, der in einem GSP-Probenahmesystem mit einem Ansaugkegel von 10 L/min lokalisiert ist. Bei einem Volumenstrom von 10 L/min beträgt die Mindestprobenahmedauer 2 Stunden, wobei ein Probeluftvolumen von 1,2 m<sup>3</sup> gesammelt wird. Zur Probenaufbereitung wird der mit PAH-Komponenten beaufschlagte Teflonfilter in ein Probengläschen überführt, mit Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) überschichtet und im Ultraschallbad extrahiert. Die Analytik erfolgt mittels Hochleistungsflüssigchromatographie und Fluoreszenzdetektion. Die quantitative Bestimmung wird anhand von Mehrpunkt-Kalibrierungen mit externen Standards durchgeführt.

## 2 Geräte, Chemikalien und Lösungen

### 2.1 Geräte

- Pumpe für die personengetragene Probenahme mit einem Volumenstrom-Nennbereich von 10 L/min, Typ GSM/SG10, z. B. Leschke Messtechnik GmbH, 15230 Frankfurt (Oder)
- Personengetragenes Gefahrstoff-Probenahmesystem: Probenahmekopf für die einatembare Fraktion (GSP) mit Ansaugkegel für 10 L/min, bezogen über Analyt-MTC GmbH, 79379 Müllheim
- Filterkassetten für Probenahmesystem GSP
- Hochleistungsflüssigchromatograph (HPLC) mit Säulenofen und Fluoreszenzdetektor (FLD), z. B. Agilent 1100/1200 FLD
- Trennsäule, z. B. MZ PAH C18, MZ-Analysentechnik GmbH, Wöhlerstraße 2-6, 55120 Mainz
- Reinstwasseranlage
- Ultraschallbad
- Laborschüttler
- Messkolben, 1, 2 und 5 mL
- Messzylinder
- gasdichte Mikroliterspritzen, 10–500 µL
- 7-mL-Braunglas-Fläschchen mit Schraubverschluss und Kautschuk/PTFE-Dichtung
- 1,5-mL-Autosamplervials aus Glas mit Rollrand und Kautschuk/PTFE-Septen
- Einmalfilter, Porengröße 0,45 µm, z. B. Chromafil Xtra PTFE 45/25
- Teflonfilter, z. B. Gelman Zefluor Ø 37 mm, 2 µm

### 2.2 Chemikalien

- PAH-Stammlösung 1, 20–200 µg/mL, z. B. Supelco 49156 in Acetonitril/Methanol (9 : 1)
- PAH-Stammlösung 2, 100–200 µg/mL, z. B. Dr. Ehrenstorfer PAH Mix 61 in Aceton/Methanol (1 : 1), Bezug über LGC Standards, 46485 Wesel
- Benzo[e]pyren-Stammlösung 1, 100 µg/mL, z. B. Sigma-Aldrich 36962 in Cyclohexan
- Benzo[e]pyren-Stammlösung 2, 100 µg/mL, z. B. Dr. Ehrenstorfer XA20645000AL, Bezug über LGC Standards
- Acetonitril, geeignet für die HPLC, z. B. Baker, Best.-Nr. 9017
- Methanol, geeignet für die HPLC, z. B. Baker, Best.-Nr. 8402

### 2.3 Lösungen

Lösemittel zum Ansetzen von Messlösungen sowie Desorptionsmittel zur Probenaufbereitung:

Acetonitril/Wasser (60/40 Vol.-%) (Spezifischer Widerstand des Wassers  $\geq 18,2 \text{ M}\Omega \times \text{cm}$  bei 25 °C). *Das Löse- bzw. Desorptionsmittel ist arbeitstäglich frisch anzusetzen.*

#### Standardlösungen

PAH-Summenstandardlosung 1:

50 µL von PAH-Stammlösung 1 und 40 µL der Benzo[e]pyren-Stammlösung 1 werden jeweils mit einer Mikroliterspritze in einen 2-mL-Messkolben pipettiert. Danach wird der Messkolben mit Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) bis zur Marke aufgefüllt. Die Konzentration der einzelnen PAH-Komponenten liegt im Bereich von 0,50 bis 5,0 µg/mL. Für Benzo[a]pyren beträgt die Konzentration 1,25 µg/mL.

PAH-Summenstandardlosung 2:

25 µL von PAH-Stammlösung 2 und 50 µL der Benzo[e]pyren-Stammlösung 2 werden jeweils mit einer Mikroliterspritze in einen 5-mL-Messkolben pipettiert. Danach wird der Messkolben mit Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) bis zur Marke aufgefüllt. Die Konzentration der einzelnen PAH-Komponenten liegt im Bereich von 0,5 bis 1 µg/mL. Für Benzo[a]pyren beträgt die Konzentration 0,5 µg/mL.

*Die PAH-Summenstandardlosungen sind bei -18 °C mindestens drei Monate haltbar.*

PAH-Kalibrierlösungen:

Ausgehend von der Summenstandardlosung 1 werden – abhängig von der jeweiligen PAH-Komponente – mittels Mikroliterspritze weitere Zwischenverdunnungen hergestellt und daraus dann die Kalibrierlösungen mit Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) in 1-mL-Messkolben angesetzt. In Tabelle 1 ist das Dosierschema zur Herstellung der zehn Kalibrierlösungen von Benzo[a]pyren aufgeführt. Dazu wird zunächst eine Zwischenverdunnung mit der Summenstandardlosung 1 im Verhältnis 1 : 10 angesetzt.

**Tab. 1** Dosierschema zur Herstellung der Kalibrierlösungen von Benzo[*a*]pyren

Kalibrierlösung Nr.	Zwischenverdünnung PAH-Summenstan- dardlösung 1	Volumen Zwischenver- dünnung/1 mL [ $\mu$ L]	Konzentration [ $\mu$ g/mL]
1	1 : 10	10	0,00125
2	1 : 10	20	0,00250
3	1 : 10	30	0,00375
4	1 : 10	40	0,00500
5	1 : 10	50	0,00625
6	1 : 10	60	0,00750
7	1 : 10	70	0,00875
8	1 : 10	80	0,0100
9	1 : 10	90	0,0113
10	1 : 10	100	0,0125

### Kontrolllösungen

PAH-Kontrolllösung für die Präzision:

Als Kontrolllösung für die Präzision dient eine Probe, deren Konzentration für alle PAH-Komponenten im mittleren Bereich ihrer Kalibrierung liegt. Die Konzentration von Benzo[*a*]pyren beträgt 0,00750  $\mu$ g/mL.

PAH Kontrolllösung für die Richtigkeit:

120  $\mu$ L von PAH-Summenstandardlösung 2 werden mit einer Mikroliterspritze in einen 10-mL-Messkolben pipettiert. Danach wird der Messkolben mit Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) bis zur Marke aufgefüllt. Dies entspricht einer Konzentration an Benzo[*a*]pyren von 0,006  $\mu$ g/mL.

*Die Kalibrier- und Kontrolllösungen für die Präzision und Richtigkeit sind bei -18 °C mindestens 1 Monat haltbar.*

Eluenten für die Chromatographie

Eluent A: Acetonitril/Wasser (65/35 Vol.-%) (Spezifischer Widerstand des Wassers  $\geq 18,2 \text{ M}\Omega \times \text{cm}$  bei 25 °C).

*Der Eluent A ist arbeitstäglich frisch anzusetzen.*

Eluent B: Acetonitril

### 3 Probenahme und Probenaufbereitung

Zu Beginn der Probenahme wird ein Teflonfilter in das GSP-Probenahmesystem eingelegt und mit einer durchflusstabilisierten Pumpe verbunden. Das GSP-System ist mit einem – dem Volumenstrom entsprechenden – Erfassungskegel von

## 1680 Air Monitoring Methods

10 L/min ausgestattet. Bei einer empfohlenen Mindestprobenahmedauer von 2 Stunden entspricht dies einem Probeluftvolumen von ca. 1200 Litern (1,2 m<sup>3</sup>). Die für die Bestimmung der Konzentration der einzelnen PAH-Komponenten in der Luft wichtigen Parameter werden im Probenahmeprotokoll dokumentiert. Nach Beendigung der Probenahme ist der Volumenstrom auf Konstanz zu überprüfen. Ist die Abweichung vom eingestellten Volumenstrom größer  $\pm 5\%$ , wird empfohlen, die Messung zu verwerfen [9]. Die Filterkassette mit dem beaufschlagten Teflonfilter wird mit den dafür vorgesehenen Deckeln verschlossen.

Zur Probenaufbereitung wird der Teflonfilter in ein 7-mL-Braunglasfläschchen überführt und mit 2 mL Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) überschichtet. Das Probengefäß wird verschlossen, für 60 Minuten im Ultraschallbad behandelt und danach für 60 Minuten auf einem Laborschüttler geschüttelt. Von der überstehenden Lösung wird mittels einer Einmalspritze Probenflüssigkeit entnommen, durch einen Einmalfilter in ein Autosamplervial filtriert und analysiert.

### 4 HPLC-Arbeitsbedingungen

Die analytischen Messungen erfolgen an einer Gerätekombination, bestehend aus einem HPLC-System mit binärer Pumpe, Säulenofen, Entgaser und automatischem Probengeber sowie einem Fluoreszenzdetektor (FLD).

Gerät:	Hochleistungsflüssigchromatograph (HPLC), z. B. Agilent 1100			
Trennsäule:	Material:	Edelstahl		
	Länge:	250 mm		
	Innendurchmesser (ID):	2,1 mm		
	Säulenfüllung:	MZ PAH C18		
	Partikelgröße:	5 $\mu\text{m}$		
Säulentemperatur:	25 °C			
Eluent:	A: Acetonitril in Reinstwasser (65/35 Vol.-%)			
	B: Acetonitril			
Gradient:	0 – 7 min:	100 % A		
	7 – 19 min: →	100 % B		
	19 – 37 min:	100 % B		
	<i>Neukonditionierung:</i>	> 37 min: → 100 % A		
Flussrate:	0,3 mL/min			
Injektionsvolumen:	12 $\mu\text{L}$			
Detektor:	Fluoreszenzdetektor (FLD):			
	Ex:	260 nm		
	Em:	FLD A:	502 nm	
		FLD B:	400 nm	
		FLD C:	430 nm	
		FLD D:	452 nm	
PMT:	11	nach 27,0 min: 13		

## 5 Analytische Bestimmung

Mit Hilfe eines Autosamplers werden jeweils 12 µL der aufbereiteten Probelösungen in den Flüssigkeitschromatographen injiziert und unter den in Abschnitt 4 angegebenen Bedingungen in einer Doppelbestimmung analysiert. Liegen die ermittelten Konzentrationen oberhalb des Kalibrierbereiches, so wird von der Messprobe eine geeignete Verdünnung mit Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) hergestellt und diese nochmals analysiert.

In Abbildung 1 sind beispielhaft vier unter den angegebenen Bedingungen erhaltene Chromatogramme einer Standardlösung dargestellt. Zudem sind die zur Auswertung herangezogenen Wellenlängen der Signale mit aufgeführt.

## 6 Kalibrierung

Zur Erstellung der Kalibrierfunktionen werden die unter Abschnitt 2.3 beschriebenen Kalibrierlösungen verwendet. Von den Kalibrierlösungen werden jeweils 12 µL in den Flüssigkeitschromatographen injiziert und wie die Probelösungen analysiert. Die ermittelten Peakflächen einer PAH-Komponente werden gegen die jeweiligen Konzentrationen aufgetragen. Die Kalibrierfunktionen sind im untersuchten Konzentrationsbereich linear.

Zur Überprüfung der Richtigkeit werden direkt im Anschluss an jede Kalibrierung zwei Kontrolllösungen (Parallelbestimmung) analysiert. Die Richtigkeit der Kalibrierung gilt als gegeben, wenn der mittlere Gehalt einer PAH-Komponente in den Kontrolllösungen um maximal  $\pm 5\%$  von der jeweiligen Sollkonzentration abweicht.

Zur Überprüfung der Kalibrierfunktionen werden arbeitstäglich zwei Kontrolllösungen für die Präzision (Parallelbestimmung) analysiert. Die Präzision der Kalibrierung gilt als gegeben, wenn der mittlere Gehalt einer PAH-Komponente in den Kontrolllösungen um maximal  $\pm 5\%$  von der jeweiligen Sollkonzentration abweicht.

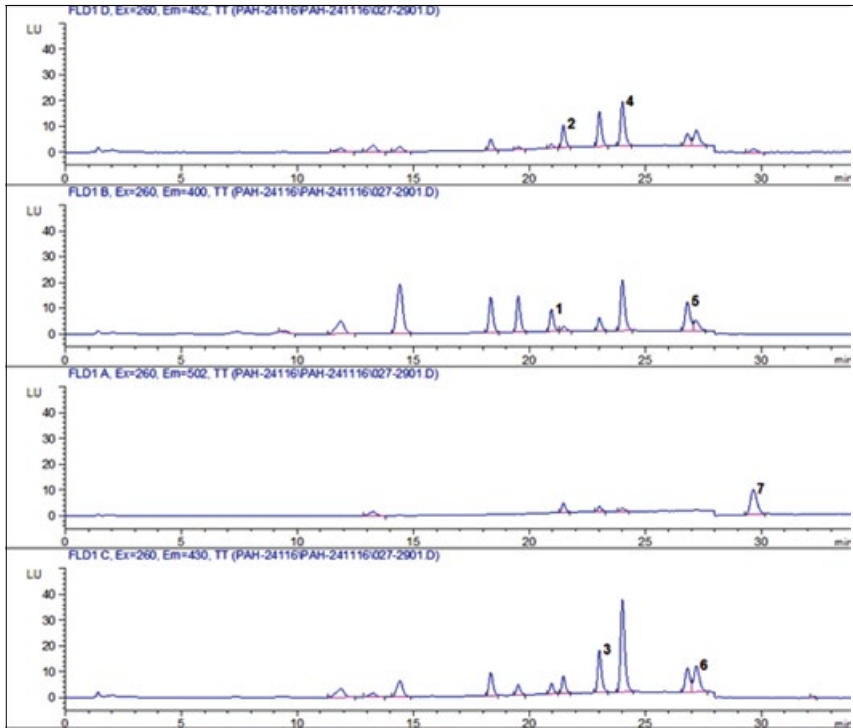
Die Kalibrierung ist neu zu erstellen, wenn die analytischen Bedingungen sich ändern oder die Qualitätskontrolle dazu Anlass gibt.

## 7 Berechnung des Analyseergebnisses

Die Berechnung der Konzentrationen der PAH in der Luft in Arbeitsbereichen erfolgt mit Hilfe der von der Datenauswerteeinheit berechneten Konzentrationen der einzelnen PAH-Komponenten in den Messlösungen. Die Datenauswerteeinheit verwendet dazu die im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Kalibrierfunktionen.

Aus den Konzentrationen der PAH werden unter Berücksichtigung von Verdünnungen und des Probeluftvolumens die Konzentrationen in der Luft im Arbeitsbe-

## 1682 Air Monitoring Methods



1	Benzo[e]pyren	FLD B: Ex 260 nm, Em 400 nm
2	Benzo[b]fluoranthen	FLD D: Ex 260 nm, Em 452 nm
3	Benzo[k]fluoranthen	FLD C: Ex 260 nm, Em 430 nm
4	Benzo[a]pyren	FLD D: Ex 260 nm, Em 452 nm
5	Dibenzo[a,h]anthracen	FLD B: Ex 260 nm, Em 400 nm
6	Benzo[ghi]perylen	FLD C: Ex 260 nm, Em 430 nm
7	Indeno[1,2,3-cd]pyren	FLD A: Ex 260 nm, Em 502 nm

**Abb. 1** Beispielchromatogramme für die flüssigchromatographische Trennung der PAH-Komponenten im Konzentrationsbereich von 0,003 bis 0,03 µg/mL; die Konzentration an Benzo[a]pyren beträgt 0,00750 µg/mL (chromatographische Bedingungen siehe Abschnitt 4)

reich berechnet. Die in der Luft am Arbeitsplatz vorhandenen Massenkonzentrationen  $\rho$  ( $\mu\text{g PAH pro m}^3$  Luft) ergeben sich aus Gleichung (1) wie folgt:

$$\rho = \frac{(F - a) \cdot 2}{b \cdot V_{\text{Luft}}} \quad (1)$$

Es bedeuten:

$\rho$	Massenkonzentration einer PAH-Komponente in der Raumluft in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
F	Peakfläche
a	Ordinatenabschnitt der Kalibrierfunktion
b	Steigung der Kalibriergeraden [ $F \times \text{mL}/\mu\text{g}$ ]
2	Umrechnungsfaktor auf das Desorptionsvolumen in mL
$V_{\text{Luft}}$	Probeluftvolumen in $\text{m}^3$

## 8 Beurteilung des Verfahrens

Die Kenndaten der Methode wurden nach Maßgabe der DIN EN 482 [10] und DIN EN 1076 [11] bzw. DIN EN 13890 [13] ermittelt. Die Bestimmungsgrenzen der PAH-Komponenten wurden nach DIN 32645 [12] aus 10-Punkt-Kalibrierungen berechnet.

### 8.1 Vergleichspräzision und erweiterte Messunsicherheit

Zur Ermittlung der Vergleichspräzision wurden jeweils sechs bzw. zehn Teflonfilter mit definierten Massen an PAH mittels Mikroliterspritzen dotiert. Anschließend wurden 1200 L Raumluft durch die Filter gesaugt und diese entsprechend den Abschnitten 3, 4 und 5 aufbereitet und analysiert. Für Benzo[a]pyren wurde ein Konzentrationsbereich von der 0,3-fachen Akzeptanz- bis zur 2-fachen Toleranzkonzentration untersucht. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die erweiterte Messunsicherheit wurde unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen nach DIN EN 13890 [13] ermittelt und mithilfe der IFA Software zur Berechnung der Messunsicherheit [14] berechnet. Die Ergebnisse für die einzelnen PAH-Komponenten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

### 8.2 Wiederfindung

Die Wiederfindungen wurden für vier Konzentrationen aus den bei der Ermittlung der Vergleichspräzision im Mindestmessbereich erhaltenen Daten ermittelt (Tabelle 6 im Anhang). Sie liegen für alle PAH-Komponenten im Bereich  $95\% \leq \text{WFR} \leq 105\%$ . Aufgrund der ermittelten Daten müssen die in Tabelle 3 aufgelisteten mittleren Wiederfindungen bei der Berechnung der Analyseergebnisse nicht berücksichtigt werden.

## 1684 Air Monitoring Methods

**Tab. 2** Relative Standardabweichungen  $s$  und erweiterte Messunsicherheiten  $U$

PAH-Komponente	Konzentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Anzahl der Bestimmungen	Rel. Standard- abweichung [%]	Erweiterte Mess- unsicherheit $U$ [%]
Benzo[e]pyren	0,033	10	6,3	24,7
	0,33	10	4,3	24,3
	0,67	10	5,5	24,0
	2,8	6	2,7	24,6
Benzo[b]fluoranthen	0,0083	10	6,0	23,6
	0,083	10	5,1	23,2
	0,17	10	5,1	23,2
	2,8	6	2,5	23,6
Benzo[k]fluoranthen	0,0083	10	6,0	23,0
	0,083	10	5,3	22,8
	0,17	10	4,2	22,9
	1,4	6	2,4	23,1
Benzo[a]pyren	0,021	10	5,2	22,9
	0,21	10	4,0	22,2
	0,42	10	3,2	22,1
	1,4	6	3,2	22,4
Dibenzo[a,h]anthracen	0,083	10	4,5	22,5
	0,83	10	3,6	22,4
	1,7	10	3,1	22,3
	2,8	6	4,7	22,6
Benzo[ghi]perylen	0,033	10	6,3	23,5
	0,33	10	5,1	23,1
	0,67	10	5,0	23,1
	2,8	6	4,5	23,4
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,021	10	3,3	22,4
	0,21	10	4,5	22,3
	0,42	10	3,2	24,1
	1,4	6	3,7	22,9

**Tab. 3** Mittlere Wiederfindungen über den gesamten Konzentrationsbereich

PAH-Komponente	Konzentrationsbereich [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Mittlere Wiederfindung [%]
Benzo[e]pyren	0,033 – 2,8	97,8
Benzo[b]fluoranthen	0,0083 – 2,8	98,8
Benzo[k]fluoranthen	0,0083 – 1,4	99,3
Benzo[a]pyren	0,021 – 1,4	98,6
Dibenzo[a,h]anthracen	0,083 – 2,8	100,0
Benzo[ghi]perylen	0,033 – 2,8	100,2
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,021 – 1,4	98,6

**Tab. 4** Bestimmungsgrenzen ermittelt aus 10-Punkt-Kalibrierungen

PAH-Komponente	Konzentrationsbereich [ $\mu\text{g}/\text{mL}$ ]	Bestimmungsgrenze	
		[ $\mu\text{g}/\text{mL}$ ]	[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]*
Benzo[ <i>e</i> ]pyren	0,006 – 0,06	0,0023	0,0039
Benzo[ <i>b</i> ]fluoranthren	0,0015 – 0,015	0,00084	0,0014
Benzo[ <i>k</i> ]fluoranthren	0,001 – 0,01	0,00072	0,0012
Benzo[ <i>a</i> ]pyren	0,00125 – 0,0125	0,00098	0,0016
Dibenz[ <i>a,h</i> ]anthracen	0,0045 – 0,045	0,0026	0,0043
Benzo[ <i>ghi</i> ]perylen	0,002 – 0,02	0,0012	0,0020
Indeno[1,2,3- <i>cd</i> ]pyren	0,0025 – 0,025	0,0014	0,0023

\* für ein Probeluftvolumen von 1,2 m<sup>3</sup>

### 8.3 Bestimmungsgrenze

Die Ermittlung der Bestimmungsgrenzen für die einzelnen PAH-Komponenten erfolgte gemäß DIN 32645 [12] aus 10-Punkt-Kalibrierungen für die in Tabelle 4 aufgeführten substanzspezifischen Konzentrationsbereiche mit einem Signifikanzniveau von  $P = 99,5\%$  und  $k = 3$ . Bezogen auf ein Probeluftvolumen von 1200 Liter (1,2 m<sup>3</sup>) wurden die in Tabelle 4 aufgeführten Bestimmungsgrenzen ermittelt.

### 8.4 Lagerfähigkeit

Zur Ermittlung der Lagerfähigkeit wurden für drei Konzentrationen jeweils sechs bzw. zehn Teflonfilter mit definierten Massen an PAH mittels Mikroliterspritzen dotiert. Anschließend wurden 1200 Liter Raumluft durch die Filter gesaugt und diese entsprechend den Abschnitten 3, 4 und 5 aufbereitet und analysiert. Für Benzo[*a*]pyren wurde ein Konzentrationsbereich von der 0,3-fachen Akzeptanzkonzentration bis zur 2-fachen Toleranzkonzentration überprüft.

Die Lagerung erfolgte unter Lichtausschluss zunächst für 7 Tage bei Raumtemperatur und danach für weitere 7 Tage im Kühlschrank bei 4 °C. Nach einer Lagerdauer von 14 Tagen konnten keine signifikanten Verluste festgestellt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

### 8.5 Blindwerte

Zur Überprüfung der Blindwerte von unbenutzten Teflonfiltern wurden zehn Filter aus vier verschiedenen Herstellungsladungen entsprechend den Abschnitten 3, 4 und 5 aufbereitet und analysiert. Die Teflonfilter wiesen keine Blindwerte auf.

**Tab. 5** Wiederfindungen (konzentrationsbezogen) und Ergebnisse zur Lagerfähigkeit

PAH-Komponente	Konzentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Anzahl Bestimmungen n	Mittlere Wiederfindung [%]	Mittlere Wieder- findung nach Lagerung [%]
Benzo[e]pyren	0,033	10	97,1	96,7
	0,33	10	97,9	–
	0,67	10	98,8	96,6
	2,8	6	97,3	95,7
Benzo[b]fluoranthen	0,0083	10	98,2	98,7
	0,083	10	99,0	–
	0,17	10	99,4	96,7
	2,8	6	98,6	98,4
Benzo[k]fluoranthen	0,0083	10	99,0	96,3
	0,083	10	99,6	–
	0,17	10	99,0	97,7
	1,4	6	99,4	100,3
Benzo[a]pyren	0,021	10	97,2	97,6
	0,21	10	98,9	–
	0,42	10	99,4	98,3
	1,4	6	99,1	98,7
Dibenzo[a,h]anthracen	0,083	10	101,0	96,3
	0,83	10	98,9	–
	1,7	10	99,4	96,2
	2,8	6	100,9	99,8
Benzo[ghi]perylen	0,033	10	102,0	96,7
	0,33	10	100,9	–
	0,67	10	99,4	97,0
	2,8	6	98,8	97,2
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,021	10	98,9	96,1
	0,21	10	98,5	–
	0,42	10	99,5	97,2
	1,4	6	97,6	96,2

## 8.6 Störeinflüsse

Das Analysenverfahren mittels Hochleistungsflüssigchromatographie und Fluoreszenzdetektion ist unter den angegebenen Arbeitsbedingungen spezifisch und robust. Es wurden keine Störungen festgestellt.

## 9 Diskussion

Mit dem hier beschriebenen Analysenverfahren lassen sich die Konzentrationen von sechs schwerer flüchtigen PAH-Komponenten aus der Liste der EPA (Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Dibenzo[a,h]anthracen, Ben-

zo[ghi]perylen, Indeno[1,2,3-cd]pyren) sowie Benzo[e]pyren in der Luft am Arbeitsplatz mit Bestimmungsgrenzen im Bereich von 0,0012 bis 0,0043 µg/m<sup>3</sup> selektiv und ausreichend empfindlich bestimmen.

An Arbeitsplätzen, an denen PAH-Komponenten gebunden an komplexen Matrices vorliegen, empfiehlt es sich, bei der Probenaufbereitung (vgl. Abschnitt 3) entweder die Dauer der Extraktion mit Acetonitril/Methanol (60/40 Vol.-%) auf einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden zu verlängern oder alternativ eine Extraktion mit Toluol durchzuführen, um auf diese Weise eine vollständige Erfassung aller PAH-Komponenten zu gewährleisten.

Mit dem hier beschriebenen Analysenverfahren lassen sich ggf. weitere schwerer flüchtige PAH-Komponenten bestimmen. In diesem Fall sind die analytischen Kenndaten sowie die chromatographischen Bedingungen zu überprüfen und entsprechend anzupassen.

## 10 Anhang: Präzision und Richtigkeit mittels Vergleichsmessung

Die Präzision und die Richtigkeit des Messverfahrens wurden im Rahmen von Vergleichsmessungen geprüft. Hierzu wurde eine PAH-Standardlösung verdünnt und jeweils 50 µL dieser Lösung auf insgesamt 12 Teflonfilter dotiert. Anschließend wurden jeweils sechs Filter im Labor des Entwicklers (IFA – *Institut für Arbeitsschutz der DGUV*) und sechs Filter im Labor des Prüfers (BGN – *Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe*) aufbereitet und nach deren Hausmethode analysiert. Zusätzlich zum Vergleich der Kalibrierung wurde die verwendete Dotierlösung von beiden Labors analysiert. Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen für die Dotierlösung mit Angaben der relativen Standardabweichungen (rel. STD) sind in Tabelle 6 und die für die Filter in Tabelle 7 dargestellt.

**Tab. 6** Ergebnisse der Vergleichsmessungen für die Dotierlösung

PAH	Konzentration Soll [ng/mL]	Labor 1 (IFA)*		Prüflabor (BGN)**	
		Konzentration gefunden [ng/mL]	Wiederfindung [%]	Konzentration gefunden [ng/mL]	Wiederfindung [%]
Benzo[b]fluoranthren	12	11,9	99,5	11,9	99,0
Benzo[k]fluoranthren	6	6,0	100,2	6,0	100,7
Benzo[a]pyren	6	5,9	98,7	5,9	98,7
Dibenzo[a,h]anthracen	12	11,9	99,5	11,6	96,6
Benzo[ghi]perylen	12	11,8	98,3	11,8	98,4
Indeno[1,2,3-cd]pyren	6	5,9	98,8	6,0	99,3

\* Institut für Arbeitsschutz der DGUV; \*\* Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe

**Tab. 7** Ergebnisse der Vergleichsmessungen für die dotierten Filter

PAH	Dotierte Masse [ng/Filter]	Labor 1 (IFA)*			Prüflabor (BGN)**		
		Gefundene Masse [ng/Filter]	Wiederfindung [%]	STD (rel.) [%]	Gefundene Masse [ng/Filter]	Wiederfindung [%]	STD (rel.) [%]
Benzo[ <i>b</i> ]fluoranthen	24	23,5	97,8	1,0	23,2	96,9	1,3
Benzo[ <i>k</i> ]fluoranthen	12	12,2	101,7	0,9	11,9	99,4	0,7
Benzo[ <i>a</i> ]pyren	12	11,6	96,7	1,0	11,6	96,3	1,0
Dibenzo[ <i>a,h</i> ]anthracen	24	23,2	96,8	1,5	24,2	100,8	0,5
Benzo[ <i>ghi</i> ]perylene	24	23,6	98,2	2,9	24,3	101,1	1,4
Indeno[1,2,3- <i>cd</i> ]pyren	12	11,8	98,3	2,6	11,7	97,7	0,2

\* Institut für Arbeitsschutz der DGUV; \*\* Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe

Die Präzisionen beider Labors wiesen Abweichungen < 3 % auf. Die Wiederfindungen lagen für alle PAH-Komponenten im Bereich von 96 bis 102 %. Die maximale Abweichung der Messergebnisse zwischen den beiden Prüflaboren betrug ca. 4 %.

## Literatur

- Greim H (Hrsg.) (2008) Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH). Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 45. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/3527600418.mb0223orgd0045>
- Henschler D (Hrsg.) (1984) Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe, krebserregende (PAH). Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 10. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/3527600418.mb0pahsd0010>
- DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft (2016) MAK- und BAT-Werte-Liste 2016: Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Mitteilung 52, Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/9783527805976>
- TRGS 900 (2006) Arbeitsplatzgrenzwerte, BArBl Heft 1/2006 S. 41-55, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2016 S. 886-889 [Nr. 45] v. 4.11.2016, <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-900.html>
- TRGS 551 (2015) Teer und andere Pyrolyseprodukte aus organischem Material, GMBI 2015 S. 1066-1083 [Nr. 54] (v. 6.10.2015) Geändert und ergänzt: GMBI 2016 S. 8-10 [Nr. 1] (v. 27.1.2016), <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-551.html>

- 6 TRGS 910 (2014) Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen, GMBI 2014 S. 258-270 v. 2.4.2014 [Nr. 12]. Zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2016 S. 606-609 v. 29.7.2016 [Nr. 31]. Berichtigt: GMBI 2016 S. 791 v. 7.10.2016 [Nr. 40],  
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-910.html>
- 7 Begründung zur ERB zu Benzo[a]pyren in BekGS 910,  
[https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/910/910-benzo-a-pyren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/910/910-benzo-a-pyren.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- 8 World Health Organisation (WHO) (2010) International agency for research on cancer, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 92 Some Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures,  
<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol92/mono92.pdf>
- 9 DIN EN ISO 13137 (2014) Arbeitsplatzatmosphäre - Pumpen für die personenbezogene Probenahme von chemischen und biologischen Arbeitsstoffen - Anforderungen und Prüfverfahren (ISO 13137:2013); Deutsche Fassung EN ISO 13137:2013. Beuth Verlag, Berlin
- 10 DIN EN 482 (2015) Exposition am Arbeitsplatz – Allgemeine Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Verfahren zur Messung chemischer Arbeitsstoffe; Deutsche Fassung EN 482:2012+A1:2015. Beuth Verlag, Berlin
- 11 DIN EN 1076 (2010) Exposition am Arbeitsplatz – Messung von Gasen und Dämpfen mit pumpenbetriebenen Probenahmeeinrichtungen – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1076:2009. Beuth Verlag, Berlin
- 12 DIN 32645 (2008) Chemische Analytik – Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen. Beuth Verlag, Berlin
- 13 DIN EN 13890 (2010) Exposition am Arbeitsplatz – Messung von Metallen und Metalloiden in luftgetragenen Partikeln – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 13890:2009. Beuth Verlag, Berlin
- 14 Heckmann P, Breuer D (2017) Berechnung der erweiterten Messunsicherheit nach IFA,  
<http://www.dguv.de/ifa/Praxishilfen/index.jsp>