

## **Vorläufiger Abschlussbericht über das Projekt**

**„Untersuchungen zum Gehalt von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) in**

- Materialproben,**
- laborexperimentell unter standardisierten Bedingungen erzeugten Emissionen sowie in**
- Emissionen im Rahmen von Feldversuchen bei Verarbeitung verschiedener Bitumensorten unterschiedlicher Rohöl-Provenienzen bzw. Hersteller / Lieferanten“.**

**zum Forschungsvertrag zwischen der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e. V. Hamburg; nachstehend Arbit genannt, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. G. Höltgen  
- als Besteller -**

**und**

**Herrn Prof. Dr. Hans-Joachim Weitowitz  
Leiter des Instituts und der Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin der  
Justus-Liebig-Universität Gießen  
- als Forschungsnehmer -**

Dieser vorläufige Abschlussbericht stützt sich zunächst auf die Ergebnisse der beiden Teilprojekte I und II. Danach werden im Rahmen des Teilprojekts I von der Arbit ausgewählte und dem Forschungsnehmer zur Verfügung gestellte Materialproben derzeit aktueller Bitumensorten unterschiedlicher Provenienzen auf ihren Gehalt an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) bzw. diversen heterocyclischen PAH-Verbindungen - S-PAH (schwefelhaltig), N-PAH (stickstoffhaltig) - quantitativ untersucht.

Im Teilprojekt II erfolgen standardisierte Emissionsversuche ausgesuchter Bitumensorten in einer geschlossenen Apparatur unter praxisorientierten Bearbeitungstemperaturen. Die

Intention war dabei, das Abdampfverhalten bez. der Aerosolbildung sowie der Emissionen gasförmiger Komponenten der einzelnen Bitumina zu dokumentieren.

### **Fragestellung**

Das vorliegende Forschungs-Gutachten soll dem Unterausschuss V -Grenzwerte- des Ausschusses für Gefahrstoffe des BMA, Bonn, und ferner dem Beraterkreis -Toxikologie- aktuelle Informationen als Entscheidungshilfe zur Einstufung von Bitumen liefern. Die verschiedenen Gremien, die über die Einstufung beraten oder zu entscheiden haben, stützen ihre Begründungen vorwiegend auf die Datenlage der früheren Jahre, die die heutigen Gegebenheiten nur unzureichend repräsentiert. Dies gilt sowohl für die Bitumenqualitäten als auch für die Untersuchungsmethoden und Versuchsbedingungen.

Ziel der Untersuchungen ist es daher, arbeitsmedizinisch-toxikologisch gutachterliche Aussagen zu den Analysenergebnissen der heutigen marktüblichen Bitumina zu erhalten, die das gesamte Anwendungsspektrum abdecken. Dazu hat die Arbit ein entsprechendes Sortiment von Destillations- und Oxid-Bitumenmustern beschafft und in codierter Weise für die Untersuchungen bereitgestellt.

### **Material und Methodik**

Für die Untersuchungen des Teilprojektes I und II wurden insgesamt n = 35 Materialproben ausgewählt. Die Bitumen-Chargen sowie die Codierungen der einzelnen Bitumina sind der **Tabelle 1** zu entnehmen. Im Teilprojekt I wurden sämtliche n = 35 Bitumina untersucht.

Tab. 1: In die Untersuchungen auf PAH- und Hetero-PAH-Komponenten einbezogenen n = 35 Bitumenproben unterschiedlicher Chargen.

<b>Bitumen-Sorte*</b>	<b>HB 90 / 100</b>	<b>B 45</b>	<b>B 80</b>	<b>B 200</b>	<b>85 / 25</b>	<b>95 / 35</b>	
Codierung	1 - 4	5 - 10; 32; 33	11 - 18; 34	19 - 24	25; 27; 29; 31	26; 28; 30; 35	∑
Anzahl [n]	4	8	9	6	4	4	35

\* Die Probenasservierung erfolgte jeweil im Juli/August 1996.

Die in den Proben analysierten polycyclischen Aromaten entsprachen der von der amerikanischen Umweltbehörde getroffenen Auswahl. Daneben wurde noch Benzo[e]pyren aufgenommen. Diese und die noch zusätzlich bestimmten schwefel- und stickstoffhaltigen Hetero-PAH-Verbindungen sind im Einzelnen in der **Tabelle 2** aufgelistet.

Tab. 2: Referenzsubstanzen der in den Teilprojekte I u. II untersuchten Polycyclen.

PAH- ; N-PAH- und S-PAH-Komponenten			
<b>2-Ringsysteme</b>	Acenaphthen Acenaphthylen 1-Benzothiophen 2-Naphthylamin	<b>5-Ringsysteme</b>	<i>Benzo[a]pyren</i> <i>Benzo[e]pyren</i> <i>Benzo[b + k]fluoranthren</i> <i>Dibenz[a,h]anthracen</i> Pyren
<b>3-Ringsysteme</b>	Acridin Anthracen Benzo[h]chinolin Benzo[c]chinolin Dibenzothiophen Fluoren Phenanthren	<b>6-Ringsysteme</b>	<i>Benzo[ghi]perylen</i> <i>Indeno[1,2,3-cd]pyren</i>
<b>4-Ringsysteme</b>	<i>Benz[a]anthracen</i> Benzo[b]naphtho[2,1-d]-thiophen Fluoranthren <i>Chrysen</i>		

Die in der **Tabelle 2** kursiv gekennzeichneten PAH sind Bestandteil der MAK-Werte-Liste von 1997.

Schwefelhaltig sind die Verbindungen

Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen  
Benzo[b]thiophen  
Dibenzothiophen.

Von den stickstoffhaltigen PAH wurden die Verbindungen

Acridin  
Benzo[h]chinolin  
Benzo[c]chinolin ≈ Phenanthridin  
2-Naphthylamin

analysiert.

Das Prinzip der Probenaufbereitung zur instrumentellen Analytik basierte in beiden Teilprojekten auf mehreren Verfahrensschritten. Zur Abtrennung der PAH-Verbindungen aus der Untersuchungsmatrix wurde die Soxhlet-Extraktion, die flüssig-flüssig Extraktion sowie die Säulenchromatographie durchgeführt [1, 2, 3].

Die quantitative Analyse wurde mittels der Gaschromatographie vorgenommen [4].

Gaschromatographische Arbeitsbedingungen:

Kapillarsäule:                   Material:                   Fused silica  
  Länge:                    25 m  
  i. Durchmesser:        0,2 mm  
stationäre Phase:           Ultra 2 (5% Phenyl-/Methyl-Silicone)  
Filmdicke:                   0,33 µm

Detektor:                        Massenspezifische Detektion (SIM-Modus)

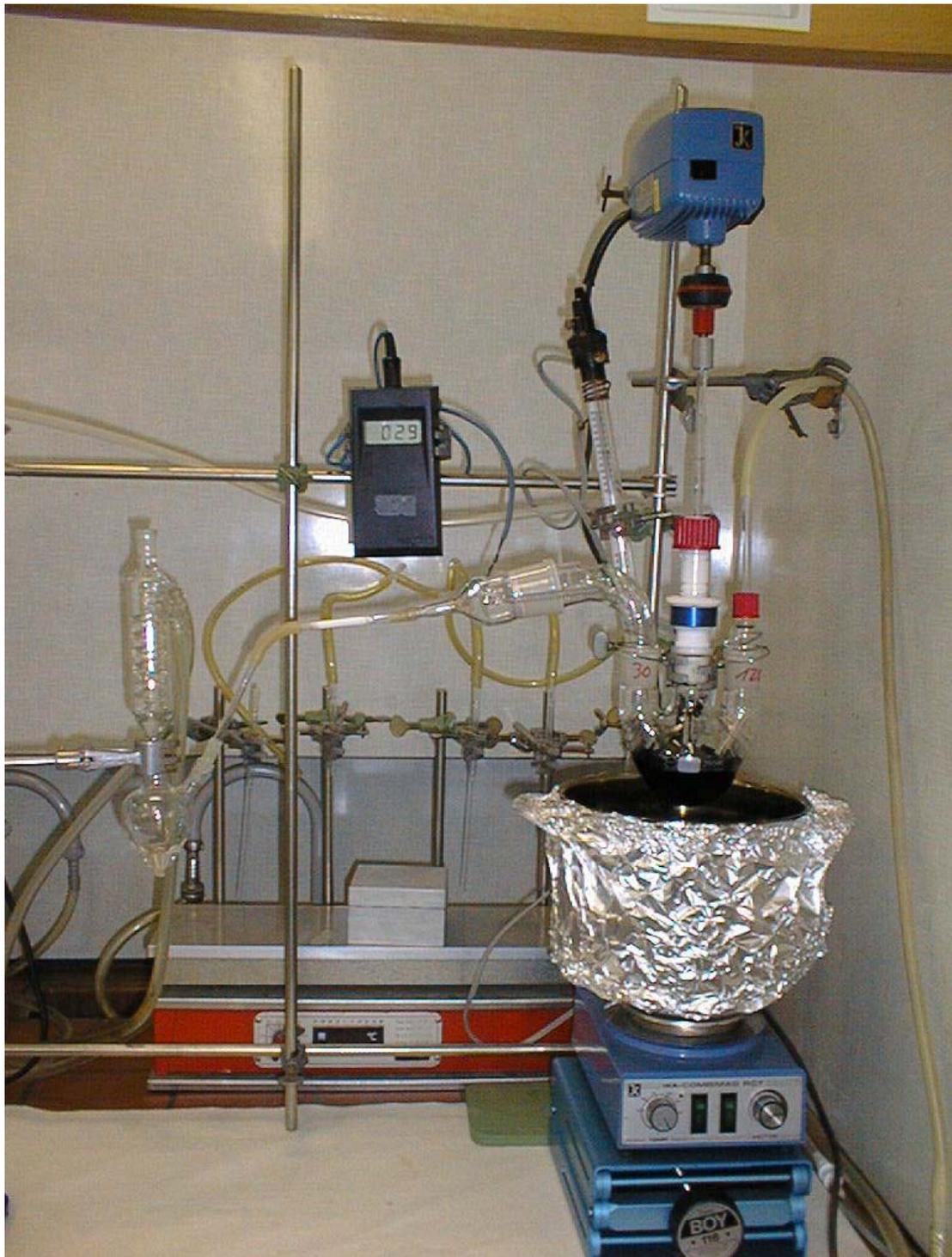
Temperatur:	Injection port:	off (on column injection)
	Ofen:	Programm: 80°C bis 300°C bei einer Totalzeit von 43,75 min.
	Transfer line:	320°C
Trägergas:	Helium:	145 kPa

### Teilprojekt I:

Das Teilprojekt I umfasste die Untersuchung sämtlicher n = 35 Bitumenproben. Es erfolgten zwei separate Untersuchungen, um produktionsbedingte Schwankungen beziehungsweise Inhomogenitäten im PAH Gehalt der Bitumina zu dokumentieren. Es wurde jeweils 1g des Probenmaterials eingewogen und den Aufarbeitungsschritten unterworfen.

### Teilprojekt II:

Über die Vorgehensweise dieses Projektteils ist von uns bereits an anderer Stelle berichtet worden [ 5 ]. Durch dieses Teilprojekt sollen PAH-Abdampfdaten unter definierten, reproduzierbaren Temperaturbedingungen erfaßt werden. Dazu werden unterschiedliche Bitumenproben jeweils gleichen Gewichts in einer geschlossenen Apparatur praxisorientierten Bearbeitungstemperaturen ausgesetzt. Die dabei emittierten PAH sowie die bei den verschiedenen Temperaturen emittierten Massenanteile der Dämpfe und Aerosole werden im Stickstoffstrom auf mit der Apparatur verbundenen Glasfaserfiltern sowie nachgeschalteten Adsorptionsröhrchen verlustfrei niedergeschlagen und meßtechnisch ausgewertet. PAH-dotierte Bitumina konnten zur entsprechenden Qualitätssicherung herangezogen werden. Auf diese Weise läßt sich das Emissionsverhalten der unterschiedlichen Bitumina standardisierbar und vergleichbar gestalten. Die **Abbildung 1** zeigt den Aufbau der Emissionsapparatur. Eingewogen wurden jeweils 100 g der ausgewählten Bitumenproben. Der Stickstoffstrom, mit dem die freigesetzten Aerosole auf den Filter überführt wurden, betrug 1 l/min. Die im Ölbad erhitzte Bitumenprobe wurde ständig mit einem luftdicht abgeschlossenen Rührer umgerührt, um eine Abreicherung der PAH-Komponenten aus den oberen Schichten der Bitumenprobe zu verhindern und somit einen homogenen Emissionsstrom zu erzeugen. Der verwendete Glasfaserfilter war mit einem Durchmesser von 37 mm den personenbezogenen Probenahmen in der Praxis angepasst. Durch die Verwendung des Thermoelementes konnte die Temperatur unmittelbar vor und nach dem Filter registriert werden. Das dem



**Abb. 1:** Apparatur zur Erzeugung der Bitumen-Aerosole und gasförmigen PAH unter standardisierten Bedingungen. Zur Adsorption gasförmiger bzw. vom Filter durch den Stickstoff-Strom desorbierter PAH ist dem Glasfaser-Filter ein mit Tenax gefülltes Adsorptionsröhrchen und zusätzlich eine mit Cyclohexan gefüllte Vorlage nachgeschaltet.

Filter nachgeschaltete Tenax-Röhrchen sowie die mit Cyclohexan gefüllte Vorlage dienten zur Adsorption ggf. gebildeter bzw. vom Sammelfilter wieder abdampfender PAH-Verbindungen.

Die jeweiligen Bearbeitungstemperaturen sind der **Tabelle 3** zu entnehmen.

**Tab. 3:** Bearbeitungstemperaturen für die im Teilprojekt II ausgewählten Bitumensorten

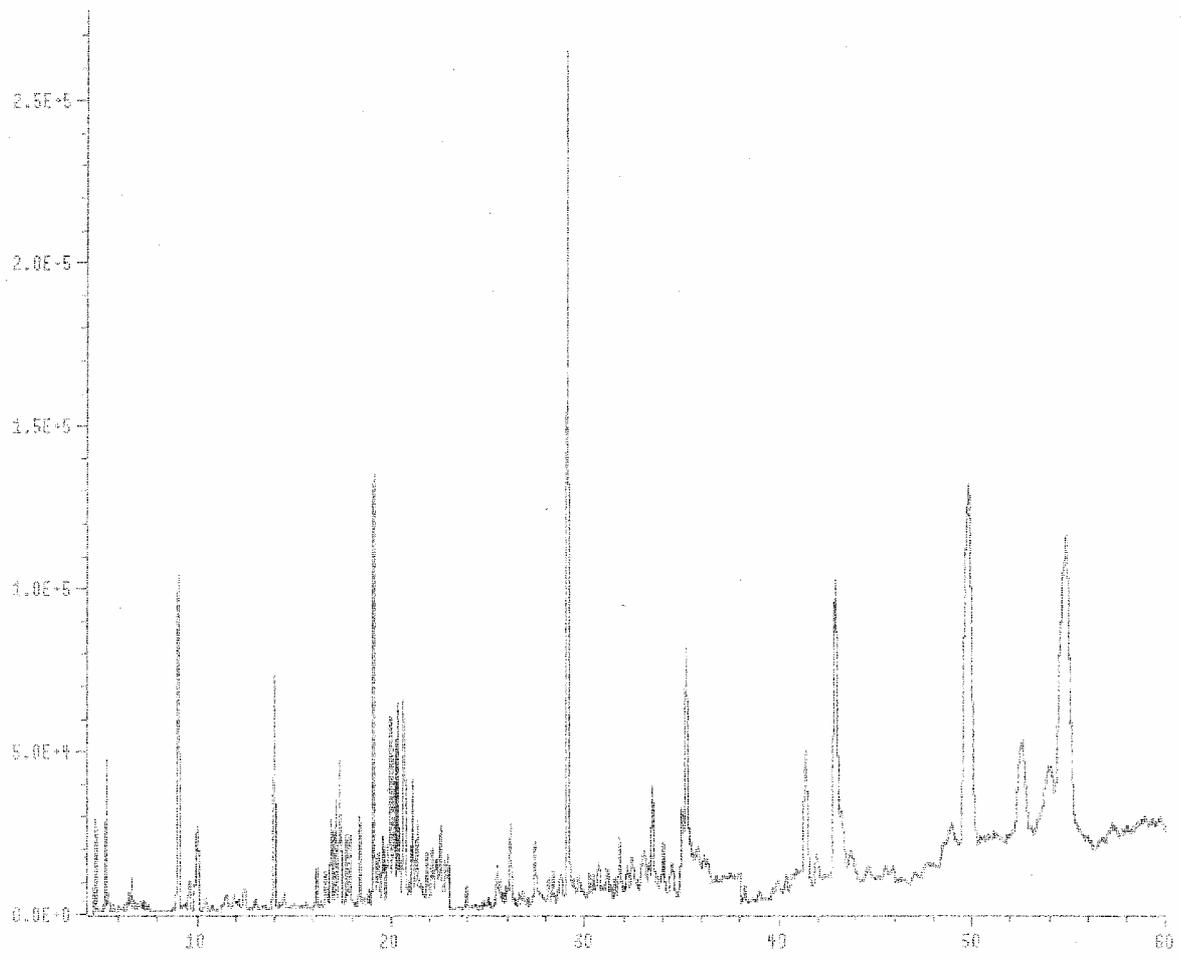
Bitumen-Sorte	HB 90 / 100	B 45	B 80	B 200	85 / 25	95 / 35
<b>Bearbeitungs-temperatur [°C]:</b>						
80	X	X	X	X	X	X
150			X	X		
180	X	X	X	X	X	X
220					X	X
250	X	X				

\* Im Verlauf des Projekts mussten allerdings in Absprache mit der Arbit Korrekturen der Bearbeitungstemperatur von 80 auf 120 °C bei den Bitumen-Sorten HB 90/100, B 85/25 sowie 95/35 vorgenommen werden.

Insgesamt wurden von jeder der sechs Bitumensorten drei Chargen in die Emissionsversuche einbezogen, so dass n = 54 Versuchsserien resultierten.

### **Ergebnisse**

In der **Abbildung 2** ist zunächst ein Totalionen-Chromatogramm der instrumentellen Analytik einer aufgearbeiteten Bitumenprobe dargestellt. Die Ergebnisse des Teilprojekts I zeigen die **Tabellen 4 bis 9**. In der **Abbildung 3** sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Summe der in den einzelnen Bitumina einer Sorte gemessenen PAH gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die durchschnittlichen PAH-Gehalte in den Bitumenproben der Sorte HB 90 / 100 und B 45, 80 sowie 200 in gleicher Größenordnungen liegen. Gleiches gilt in etwa auch für die Standardabweichungen. Demgegenüber liegen die Bitumina B 85 / 25 bzw. 95 / 35 in ihren PAH-Gehalten ca. um den Faktor 1,7 bzw. 3,1 höher. In diesen Bitumina sind jedoch im Gegensatz zu den anderen Sorten die PAH mit höherer Ringzahl deutlich unterrepräsentiert. Stellvertretend zu nennen sind Benzo[a]pyren und Dibenz[a,h]anthracen als Verbindungen ausgeprägten cancerogenen Potentials. Beide Verbindungen liegen in ihren Massengehalten in B 85/25 und B 95/35 zwischen 1 und 3%. In den übrigen Sorten rangieren sie bei ca. 5-8%. Auffällig ist im Falle der Bitumen-Sorte B 95 / 35 die hohe Standardabweichung von etwa 70% des Mittelwertes, die infolge der starken Schwankungen von Phenanthren, insbesondere aber durch die Streuungen der



**Abb. 2:** Totalionen-Chromatogramm einer aufbereiteten Bitumen-

**Tab. 4:** PAH-Gehalte [mg/kg], deren Summe sowie resultierende Mittelwerte und Standardabweichungen in den n = 4 Chargen der Bitumen-Sorte HB 90 / 100.

Bitumen-Sorte Codierungs-Nr.	Bitumen HB 90/100					
	1	2	3	4	$\bar{x}$	$\pm s$
	PAH [mg/kg]					
Naphthalin	0,78	0,44	0,28	0,38	0,47	0,19
1-Benzothiophen	0,09	0,28	0,10	0,08	0,14	0,08
Acenaphthylen	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,00
Acenaphthen	0,14	0,03	0,08	0,12	0,09	0,04
Fluoren	2,06	0,99	0,67	1,16	1,22	0,52
Dibenzothiophen	0,34	1,11	1,04	0,69	0,80	0,31
Phenanthren	1,67	1,29	0,89	1,34	1,30	0,28
Anthracen	0,23	0,14	0,09	0,11	0,14	0,05
Fluoranthren	0,34	0,33	0,24	0,77	0,42	0,21
Pyren	0,36	0,88	0,67	0,86	0,69	0,21
Benzo[b]naphtho[2,1-d]- thiophen	0,43	3,98	3,72	1,22	2,34	1,54
Benz[a]anthracen	0,62	9,36	10,13	4,48	6,15	3,86
Chrysen	0,71	0,59	0,60	0,22	0,53	0,18
Benzo[b+k]fluoranthren	0,72	2,39	3,51	1,52	2,04	1,04
Benzo[e]pyren	2,28	6,17	9,03	4,09	5,39	2,51
Benzo[a]pyren	0,36	1,41	1,73	1,29	1,20	0,51
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,35	0,60	0,77	0,94	0,67	0,22
Dibenz[a,h]anthracen	0,95	1,58	1,96	1,42	1,47	0,36
Benzo[g,h,i]perylen	3,30	2,86	3,53	9,83	4,88	2,87
$\Sigma$ PAH	15,76	34,43	39,07	30,55	29,95	14,97

**Tab. 5:** PAH-Gehalte [mg/kg], deren Summe sowie resultierende Mittelwerte und Standardabweichungen in den n = 8 Chargen der Bitumen-Sorte B 45

Bitumen-Sorte Codierungs-Nr.	B 45								-	± s
	5	6	7	8	9	10	32	33		
	PAH [mg/kg]								x	
Naphthalin	0,24	0,84	0,18	0,14	0,26	0,32	0,17	0,45	0,32	0,22
1-Benzothiophen	0,16	0,87	0,02	0,12	0,13	0,04	0,08	0,21	0,20	0,26
Acenaphthylen	0,01	0,03	0,01	0,01	0,04	0,03	0,08	0,04	0,03	0,02
Acenaphthen	0,03	0,24	0,01	0,05	0,43	0,18	0,11	0,16	0,15	0,13
Fluoren	0,19	0,37	0,35	0,09	0,16	0,67	1,08	0,70	0,45	0,32
Dibenzothiophen	0,34	0,72	0,50	0,09	0,37	0,70	2,31	2,81	0,98	0,94
Phenanthren	0,42	0,80	1,09	0,26	0,79	3,39	1,91	4,11	1,59	1,34
Anthracen	0,04	0,13	0,08	0,02	0,03	0,24	0,08	0,26	0,11	0,09
Fluoranthren	0,08	0,25	0,53	0,15	0,15	0,98	0,12	0,33	0,32	0,28
Pyren	0,23	1,01	2,00	0,47	0,30	2,44	0,22	1,20	0,98	0,80
Benzo[b]naphtho[2,1-d]- thiophen	1,55	3,01	9,71	3,09	0,98	1,63	3,59	5,48	3,63	2,65
Benz[a]anthracen	0,27	1,32	4,19	1,45	0,38	1,45	0,80	1,47	1,42	1,15
Chrysen	0,45	2,37	7,83	2,60	0,55	2,60	1,34	2,95	2,59	2,18
Benzo[b+k]fluoranthren	1,14	2,47	5,91	3,67	0,43	2,95	1,53	1,70	2,48	1,62
Benzo[e]pyren	5,08	6,73	13,34	8,71	1,74	10,58	5,18	5,09	7,06	3,43
Benzo[a]pyren	1,91	2,13	3,34	3,27	0,67	2,91	1,17	1,29	2,08	0,95
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,22	0,75	1,21	0,92	0,24	1,89	0,25	0,26	0,72	0,57
Dibenz[a,h]anthracen	0,44	1,97	2,64	1,98	0,65	2,02	0,25	1,08	1,38	0,83
Benzo[g,h,i]perylen	2,37	3,46	4,02	3,55	1,08	7,73	1,86	2,14	3,28	1,92
<b>Σ PAH</b>	<b>15,15</b>	<b>29,48</b>	<b>56,95</b>	<b>30,65</b>	<b>9,38</b>	<b>42,77</b>	<b>22,12</b>	<b>31,72</b>	<b>29,78</b>	<b>19,68</b>

**Tab. 6:** PAH-Gehalte [mg/kg], deren Summe sowie resultierende Mittelwerte und Standardabweichungen  
in den n = 9 Chargen der Bitumen-Sorte B 80

Bitumen-Sorte: Codierungs-Nr.	Bitumen B 80										-	± s
	11	12	13	14	15	16	17	18	34	x		
	PAH [mg/kg]											
Naphthalin	0,20	0,24	0,06	0,38	0,11	0,05	0,71	0,21	0,14	0,23	0,20	
1-Benzothiophen	0,29	0,25	n.n.	0,06	0,08	0,03	0,68	0,07	0,10	0,19	0,22	
Acenaphthylen	0,01	0,01	0,01	0,01	n.n.	0,01	0,03	0,10	0,03	0,03	0,03	
Acenaphthen	0,05	0,07	0,02	0,05	0,06	n.n.	0,22	0,13	0,07	0,08	0,06	
Fluoren	0,10	0,94	0,07	0,38	0,11	0,02	0,24	1,05	0,33	0,36	0,38	
Dibenzothiophen	0,34	0,15	0,26	0,19	0,14	0,12	0,30	2,03	1,49	0,55	0,70	
Phenanthren	0,47	0,25	0,84	0,56	0,30	0,15	0,39	0,98	1,20	0,57	0,36	
Anthracen	0,03	0,07	0,05	0,05	0,02	0,01	0,11	0,02	0,12	0,05	0,04	
Fluoranthen	0,11	0,25	0,57	0,32	0,18	0,05	0,21	0,08	0,16	0,21	0,16	
Pyren	0,23	0,65	2,29	1,02	0,28	0,10	0,30	0,16	0,59	0,63	0,69	
Benzo[b]naphtho[2,1-d]- thiophen	1,65	4,81	9,29	4,88	1,76	1,07	0,34	2,94	4,61	3,48	2,76	
Benz[a]anthracen	0,63	3,17	6,60	2,96	0,83	0,38	0,28	1,90	1,01	1,97	2,04	
Chrysen	0,73	4,09	8,61	3,81	1,00	0,40	0,27	2,40	1,22	2,50	2,69	
Benzo[b+k]fluoranthen	0,64	6,65	7,16	6,65	1,10	0,62	0,46	2,14	1,05	2,94	2,95	
Benzo[e]pyren	3,15	12,75	14,57	9,09	2,53	1,36	1,27	5,83	2,94	5,94	5,02	
Benzo[a]pyren	0,64	2,92	3,35	2,08	0,85	0,31	0,47	1,43	0,68	1,41	1,12	
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,23	1,01	1,12	1,07	0,29	0,28	0,26	0,46	0,28	0,56	0,39	
Dibenz[a,h]anthracen	1,00	3,14	3,20	2,98	0,58	0,53	0,44	1,26	0,67	1,53	1,21	
Benzo[g,h,i]perylen	1,39	4,14	3,98	3,98	1,19	1,16	1,11	1,89	1,97	2,31	1,33	
<b>Σ PAH</b>	<b>11,86</b>	<b>45,54</b>	<b>62,05</b>	<b>40,50</b>	<b>11,40</b>	<b>6,65</b>	<b>8,07</b>	<b>25,08</b>	<b>18,65</b>	<b>25,57</b>	<b>22,36</b>	

n.n. = nicht nachweisbar; Nachweisgrenze: 0,01 mg/kg

**Tab. 7: PAH-Gehalte [mg/kg], deren Summe sowie resultierende Mittelwerte und Standardabweichungen in den n = 6 Chargen der Bitumen Sorte B 200.**

Bitumen-Sorte Codierungs-Nr.	B 200						-	± s
	19	20	21	22	23	24		
	PAH [mg/kg]						x	
Naphthalin	0,18	0,07	n.n.	n.n.	0,25	0,74	0,31	0,26
1-Benzothiophen	0,23	n.n.	0,40	0,01	0,08	0,25	0,19	0,14
Acenaphthylen	0,02	n.n.	0,32	0,02	0,08	0,07	0,10	0,11
Acenaphthen	0,09	n.n.	n.n.	n.n.	0,01	0,33	0,14	0,14
Fluoren	0,19	0,06	0,02	0,13	0,03	0,86	0,21	0,29
Dibenzothiophen	0,80	0,16	0,16	0,15	0,08	3,13	0,75	1,09
Phenanthren	1,30	0,52	0,39	0,19	0,15	3,04	0,93	1,02
Anthracen	0,41	0,08	0,08	0,03	0,35	0,26	0,20	0,15
Fluoranthren	0,11	0,62	0,18	0,16	0,04	0,22	0,22	0,19
Pyren	1,28	2,55	1,10	0,65	0,60	0,67	1,14	0,68
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	1,92	8,53	4,65	1,72	1,85	6,39	4,18	2,60
Benz[a]anthracen	1,36	3,04	3,15	1,57	1,27	1,43	1,97	0,80
Chrysen	1,88	3,89	4,04	2,03	1,56	1,78	2,53	1,02
Benzo[b+k]fluoranthren	1,88	7,47	4,53	0,97	2,55	1,32	3,12	2,26
Benzo[e]pyren	7,77	8,28	10,89	2,89	10,37	3,59	7,30	3,07
Benzo[a]pyren	1,95	1,92	2,63	0,88	2,38	0,91	1,78	0,67
Indeno[1,2,3-d]pyren	0,47	0,92	0,69	0,10	1,95	0,33	0,74	0,60
Dibenz[a,h]anthracen	3,63	3,02	2,79	1,43	3,05	0,95	2,48	0,95
Benzo[g,h,i]perylen	3,34	3,66	4,16	1,94	7,83	2,10	3,84	1,95
Σ PAH	28,79	44,78	40,17	14,88	34,48	28,36	32,13	18,00

n. n. = nicht nachweisbar; Nachweisgrenze: 0,01 mg/kg

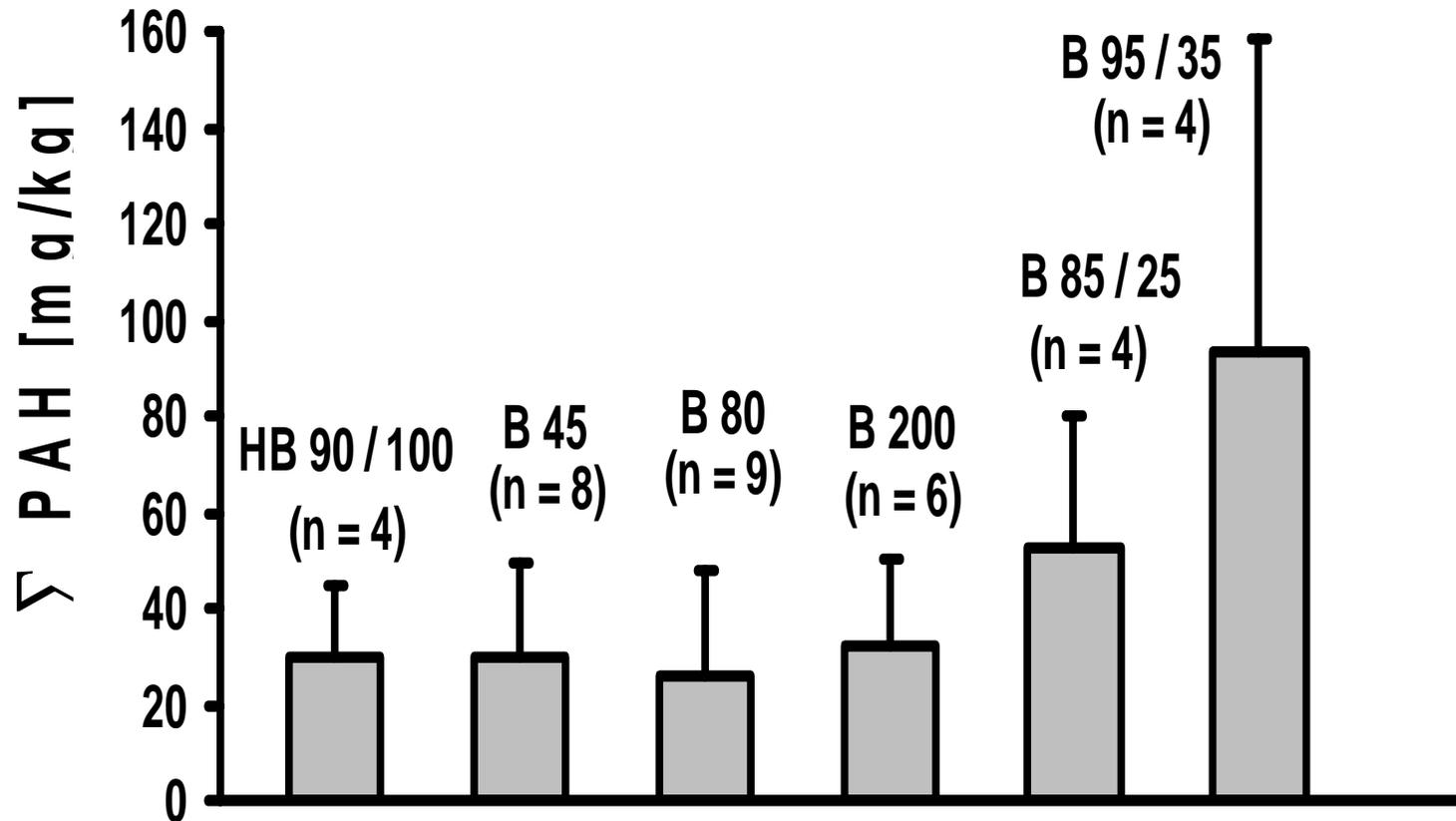
**Tab. 8:** PAH-Gehalte [mg/kg], deren Summe sowie resultierende Mittelwerte und Standardabweichungen in den n = 4 Chargen der Bitumen-Sorte 85 / 25.

Bitumen-Sorte	Bitumen B 85/25					
	25	27	29	31	x	± s
Codierungs-Nr.	PAH [mg/kg]					
Naphthalin	0,58	1,51	0,35	0,51	0,74	0,45
1-Benzothiophen	0,38	0,09	0,08	0,12	0,17	0,13
Acenaphthylen	0,05	0,21	0,02	0,04	0,08	0,08
Acenaphthen	n.n	0,33	0,07	0,17	0,19	0,11
Fluoren	1,86	3,03	0,78	1,38	1,76	0,82
Dibenzothiophen	3,17	2,39	0,97	1,73	2,06	0,81
Phenanthren	3,79	10,42	1,35	6,86	5,60	3,40
Anthracen	0,28	1,45	0,13	0,87	0,68	0,52
Fluoranthen	1,01	1,33	0,45	2,67	1,37	0,82
Pyren	3,07	2,49	0,84	6,32	3,18	1,99
Benzo[b]naphtho[2,1-d]- thiophen	14,19	3,73	3,35	2,99	6,07	4,70
Benz[a]anthracen	6,33	3,42	0,78	4,21	3,68	1,98
Chrysen	8,21	4,39	2,10	3,81	4,63	2,23
Benzo[b+k]fluoranthen	6,29	3,67	1,76	3,56	3,82	1,61
Benzo[e]pyren	14,52	6,26	4,96	10,18	8,98	3,73
Benzo[a]pyren	1,86	1,44	1,14	2,27	1,68	0,43
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,47	0,42	0,65	2,38	0,98	0,81
Dibenz[a,h]anthracen	2,31	2,39	1,44	2,54	2,17	0,43
Benzo[g,h,i]perylen	4,06	1,47	2,64	9,35	4,38	3,01
Σ PAH	72,43	50,43	23,87	61,97	52,22	28,06

n. n. = nicht nachweisbar; Nachweisgrenze: 0,01 mg/kg

**Tab. 9:** PAH-Gehalte [mg/kg], deren Summe sowie resultierende Mittelwerte und Standardabweichungen in den n = 4 Chargen der Bitumen-Sorte 95 / 35.

Bitumen-Sorte Codierungs-Nr.	Bitumen B 95/35					
	26	28	30	35	$\bar{x}$	$\pm s$
	PAH [mg/kg]					
Naphthalin	0,49	3,70	0,55	1,14	1,47	1,31
1-Benzothiophen	0,38	0,26	0,05	0,22	0,23	0,12
Acenaphthylen	0,04	0,10	0,03	0,43	0,15	0,16
Acenaphthen	0,01	0,74	0,14	0,26	0,29	0,27
Fluoren	1,57	3,39	0,93	2,52	2,10	0,93
Dibenzothiophen	3,24	3,20	1,03	45,70	13,29	18,73
Phenanthren	4,06	12,42	3,73	22,77	10,75	7,77
Anthracen	0,34	2,04	0,54	5,04	1,99	1,88
Fluoranthen	1,54	5,28	2,76	2,27	2,96	1,40
Pyren	2,77	10,95	3,83	2,76	5,08	3,42
Benzo[b]naphtho[2,1-d]- thiophen	21,50	2,72	2,55	33,48	15,06	13,13
Benz[a]anthracen	8,27	8,52	3,38	4,73	6,22	2,22
Chrysen	10,76	3,76	4,31	6,12	6,24	2,75
Benzo[b+k]fluoranthen	9,06	5,19	5,91	3,24	5,85	2,10
Benzo[e]pyren	18,26	6,44	9,19	8,63	10,63	4,52
Benzo[a]pyren	4,20	2,83	2,10	1,84	2,74	0,92
Indeno[1,2,3-cd]pyren	1,05	1,91	1,83	0,31	1,28	0,65
Dibenz[a,h]anthracen	3,30	1,73	1,97	1,14	2,04	0,79
Benzo[g,h,i]perylen	5,14	7,07	5,85	2,67	5,18	1,61
$\Sigma$ PAH	95,97	82,23	50,68	145,26	93,53	64,70



**Abb. 3:** Mittelwerte und Standardabweichungen der aufsummierten PAH-Massengehalte [mg/kg] der einzelnen Chargen der insgesamt untersuchten n=6 Bitumen-Sorten.

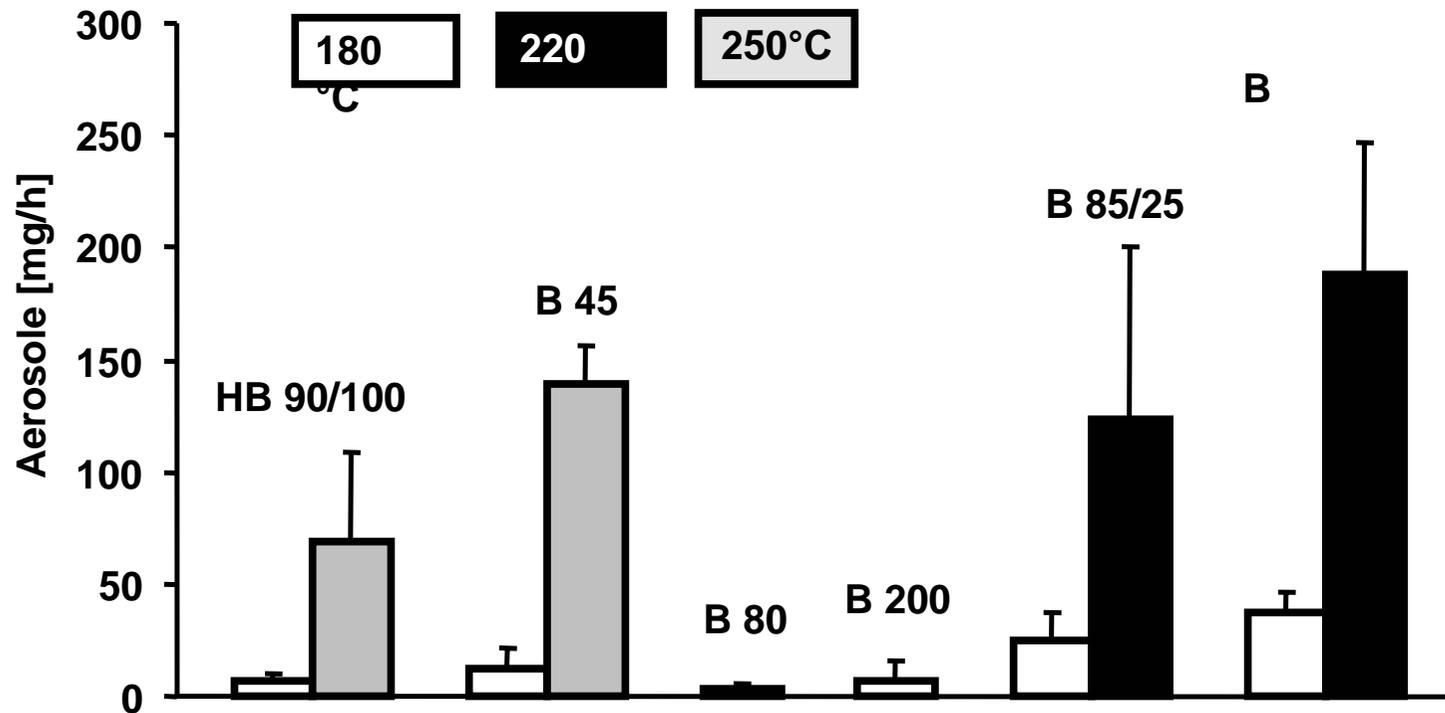
Schwefel-haltigen PAH-Verbindungen Dibenzothiophen und Benzo[b]-naphtho[2,1-d]-thiophen verursacht werden. Die in die Untersuchungen einbezogenen N-PAH konnten in keiner Probe nachgewiesen werden.

Die im Teilprojekt II vorgenommenen Emissionsversuche weisen in Abhängigkeit von der vorgegebenen Bearbeitungstemperatur sowie der einzelnen Bitumen-Sorten stark differierende Ergebnisse auf. Die Emissionsraten wurden wegen der Vergleichbarkeit der verschiedenen Bitumina stets auf eine Stunde normiert. In der **Tabelle 10** sind die resultierenden Filterbeaufschlagungen mit den Bitumen-Aerosolen aufgelistet. Die Untersuchungsergebnisse zeigen zunächst, dass bei Bearbeitungstemperaturen von 80°C - selbst bei einer Versuchsdauer von 4 Stunden - keine bzw. in nur unbedeutenden Massenanteilen nachweisbaren Aerosol-Emissionen erfolgen. Die bei 120 bzw. 150°C durchgeführten Emissionen liegen ebenfalls mit einigen vernachlässigbaren Ausnahmen unterhalb 1 mg/h. Deutlich messbare Ergebnisse treten bei Bearbeitungstemperaturen ab 180°C auf. Bei dieser Temperatur liegt die Emissionsrate an Aerosol etwa zwischen 0,3 und 45 mg/h. Wie aus der **Abbildung 4** ersichtlich ist, bewirkt eine weitere Temperaturerhöhung auf 220°C eine durchschnittliche Steigerung der Abdampftrate im Falle der Bitumina B 85/25 und B 95/35 um etwa den Faktor 5. Vergleichsweise dazu unterschreiten trotz einer Erhöhung der Bearbeitungstemperatur auf 250°C die mittleren Aerosol-Anteile der untersuchten Bitumina der Sorte HB 90/100 deutlich diese Abdampftraten. Die bei den B45-Chargen emittierten mittleren Abdampftraten der Aerosole sind in etwa vergleichbar mit denen des B 85/25, unterschreiten jedoch den mittleren Aerosol-Anteil des B 95/35.

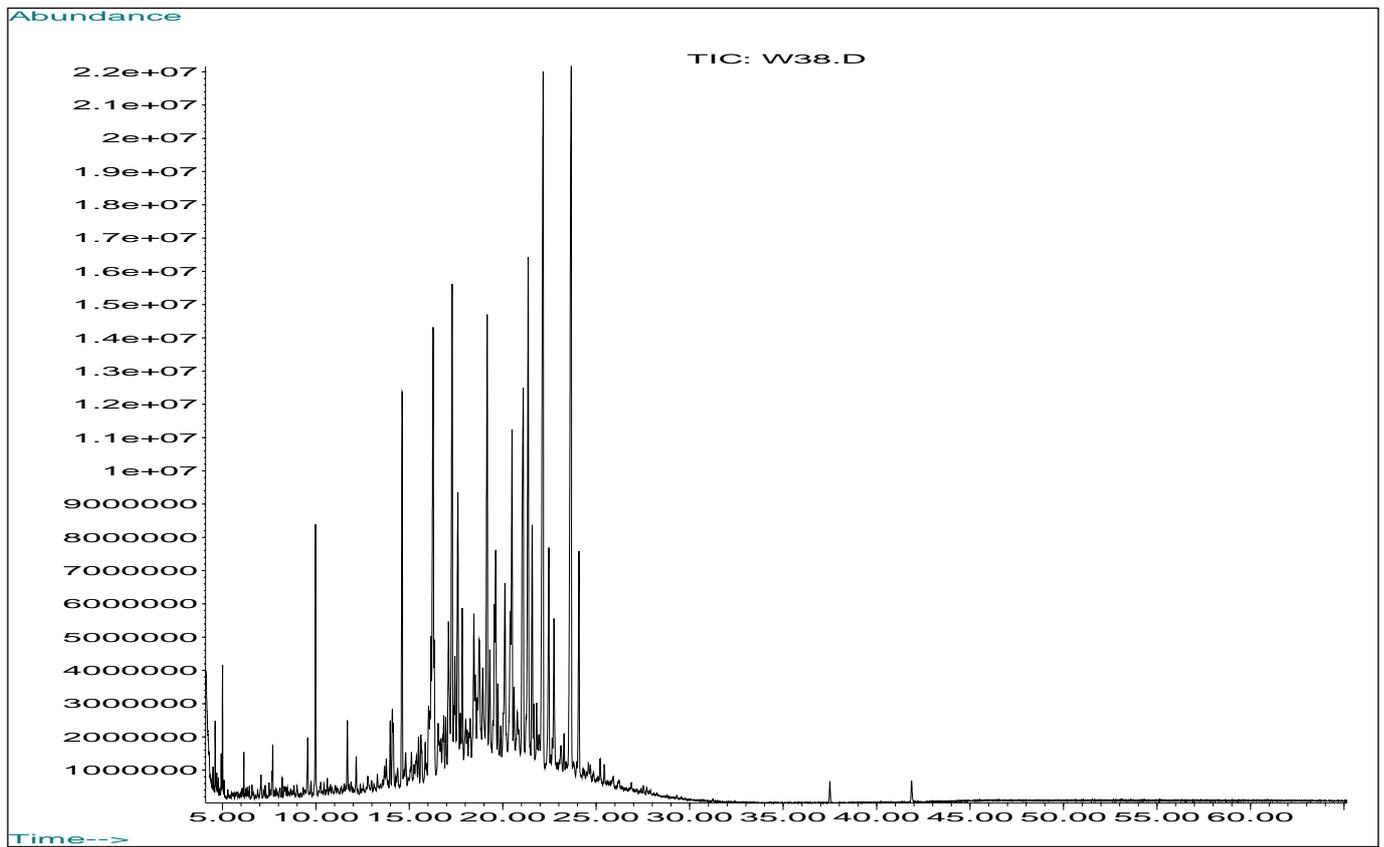
Die beispielhaft an einem Totalionen-Chromatogramm dargestellten PAH-Profile lassen die qualitativ und quantitativ unterschiedliche Verteilung dieser Komponenten an den beiden benutzten Sammelphasen Glasfaser-Filter und Tenax erkennen, s. **Abbildungen 5a** und **b**. Das Chromatogramm des aufgearbeiteten Filterextraktes unterscheidet sich von dem der Tenax-Sammelphase durch ein wesentlich komplexeres Spektrum ab der Retentionszeit von ca. 20 min. Insbesondere werden in diesem Abschnitt des Chromatogramms höher kondensierte Ringsysteme durch die peaks dargestellt, die infolge ihrer gering ausgeprägten Flüchtigkeit vorwiegend in den Aerosolen auf dem Filter niedergeschlagen werden und in nur sehr geringen Anteilen gasförmig den Filter passieren und anschließend an Tenax adsorptiv gebunden werden. Den **Tabellen 11-28** sind die in den Aerosolen emittierten sowie die gasförmig freigesetzten PAH-Verbindungen aller untersuchter Chargen der n = 6 Bitumen-Sorten bei den unterschiedlichen Bearbeitungstemperaturen auf eine Stunde normiert sowie differenziert nach Filter- und Tenax-Sammelphase zu entnehmen.

**Tab. 10:** Unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungs-Temperaturen emittierte Bitumen-Aerosole von jeweils n=3 Chargen der in die Untersuchungen insgesamt einbezogenen 6 Bitumen-Sorten.

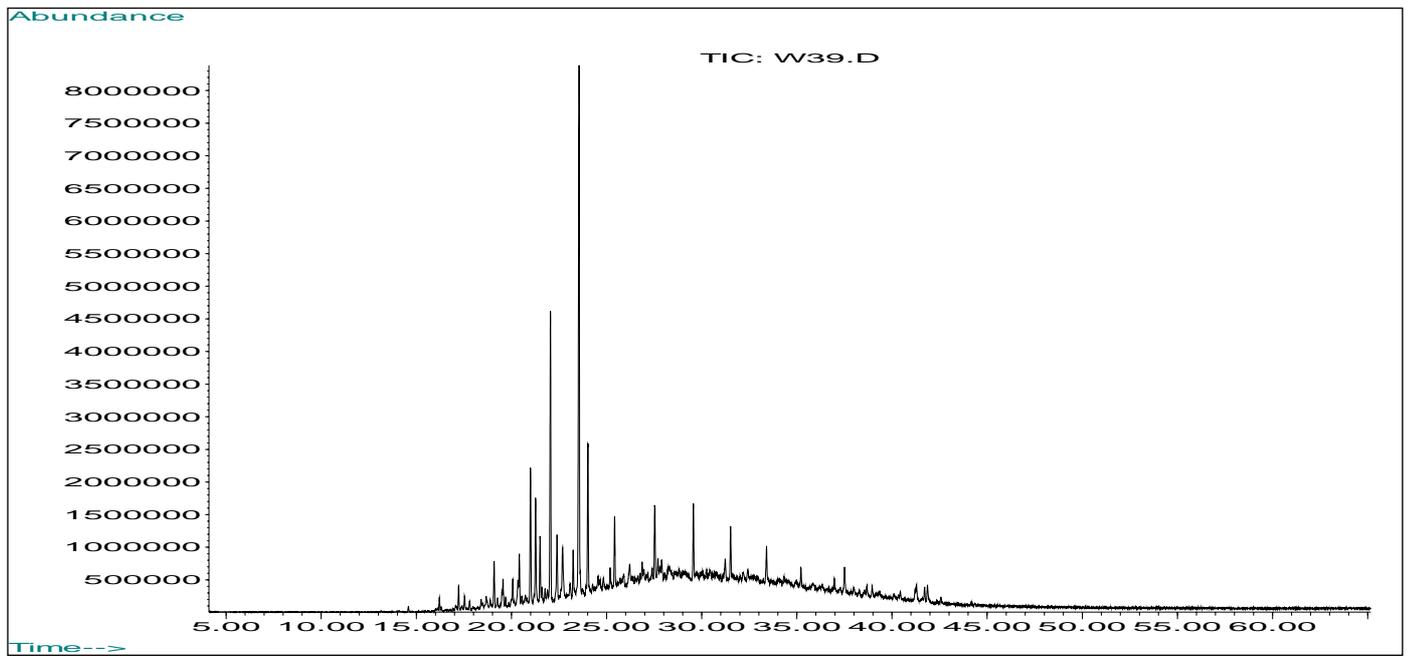
Bearbeitungstemperatur [C°]	Bitumen-Aerosole [mg/h]					
	80	120	150	180	220	250
<b>Bitumen-Sorte: HB 90/100</b>						
Chargen-Nr.:	1	0,09		2,15		34,29
	2	0,11		8,77		124,13
	4	0,07		8,98		47,97
	$\bar{x} \pm s$	0,09 ± 0,02		6,63 ± 3,17		68,80 ± 39,52
<b>Bitumen-Sorte: B 45</b>						
Chargen-Nr.:	6	0,03		24,64		154,58
	10	n. n.		8,76		148,11
	33	n. n.		5,73		114,35
	$\bar{x} \pm s$			13,04 ± 8,29		139,01 ± 17,64
<b>Bitumen-Sorte: B 80</b>						
Chargen-Nr.:	12	n. n.	0,38	6,10		
	16	n. n.	n. n.	0,86		
	18	n. n.	0,18	3,50		
	$\bar{x} \pm s$		0,28	3,49 ± 2,14		
<b>Bitumen-Sorte: B 200</b>						
Chargen-Nr.:	20	n. n.	1,36	19,16		
	22	n. n.	0,19	0,28		
	23	n. n.	n. n.	1,57		
	$\bar{x} \pm s$		0,52	7,00 ± 8,61		
<b>Bitumen-Sorte: B 85 / 25</b>						
Chargen-Nr.:	25	0,87		23,30	219,18	
	29	0,35		11,11	30,51	
	31	0,48		40,89	119,55	
	$\bar{x} \pm s$	0,57 ± 0,22		25,10 ± 12,22	123,08 ± 77,06	
<b>Bitumen-Sorte: B 95 / 35</b>						
Chargen-Nr.:	26	1,36		44,88	235,89	
	28	2,32		41,88	223,39	
	30	0,08		24,69	104,31	
	$\bar{x} \pm s$	1,25 ± 1,12		37,15 ± 8,90	187,86 ± 59,30	



**Abb. 4:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Filterbeaufschlagungen durch Aerosol-Emissionen [mg/h] unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen von 180, 220 und 250°C von jeweils 3 ausgewählten Chargen der insgesamt 6 untersuchten Bitumen-Sorten.



**Abb. 5a: Totalionen-Chromatogramm eine aufgearbeiteten Glasfaser-Filters**



**Abb. 5b:** Totalionen-Chromatogramm eine aufgearbeiteten aufgearbeiteten Tenax-  
Adorptions-  
phase

**Tab. 11:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierung: Nr. 1 Temperatur [°C]	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: HB 90/100					
	120°C		180°C		250°C	
	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,14	1,62	0,25	1,68	0,39	3,42
1-Benzothiophen	0,01	0,51	0,02	0,65	0,04	1,35
Acenaphthylen		0,10	0,03	0,16	0,10	0,50
Acenaphthen	0,03	0,54	0,05	0,68	0,30	1,64
Fluoren	0,05	2,46	0,76	15,29	10,49	13,95
Dibenzothiophen	0,03	0,19	0,33	0,99	3,87	1,21
Phenanthren	0,08	0,64	1,62	3,54	17,53	4,14
Anthracen	0,04	0,10	0,22	0,45	2,47	0,54
Fluoranthen	0,03	0,04	0,21	0,04	2,63	0,08
Pyren	0,01	0,01	0,19	0,01	1,91	0,04
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,08		1,19	
Benz[a]anthracen		0,03	0,09		1,59	
Chrysen			0,15		2,84	
Benzo[b+k]fluoranthen			0,07		0,82	
Benzo[e]pyren			0,07		1,08	
Benzo[a]pyren			0,05		0,34	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,03		0,10	
Dibenz[a,h]anthracen			0,05		0,27	
Benzo[g,h,i]perylen			0,04		0,68	
$\Sigma$ PAH	0,42	6,22	4,31	23,50	48,62	26,88

**Tab. 12:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungs-temperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 2	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: HB 90/100					
	120°C		180°C		250°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,16	0,70	0,17	0,91	0,39	1,16
1-Benzothiophen	0,02	0,71	0,03	1,38	0,20	1,73
Acenaphthylen		0,09	0,06	0,12	0,30	0,11
Acenaphthen		0,29	0,18	0,65	1,40	0,54
Fluoren	0,03	2,09	1,62	2,76	9,73	1,28
Dibenzothiophen	0,04	0,41	2,03	2,09	6,18	0,39
Phenanthren	0,04	0,42	1,90	1,61	5,35	0,29
Anthracen	0,02	0,10	0,51	0,44	0,87	0,08
Fluoranthren	0,03	0,03	0,16	0,04	0,52	0,03
Pyren	0,03	0,01	0,65	0,04	1,79	
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,03		0,69		5,00	
Benz[a]anthracen			0,24	0,05	1,54	
Chrysen	0,03		0,64		5,65	
Benzo[b+k]fluoranthren	0,05		0,16		1,70	
Benzo[e]pyren	0,04		0,17		2,09	
Benzo[a]pyren	0,03		0,09		0,84	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,04		0,04	
Dibenz[a,h]anthracen			0,05		0,21	
Benzo[g,h,i]perylen			0,05		0,45	
$\Sigma$ PAH	0,52	4,86	9,42	10,09	44,26	5,61

**Tab. 13:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 4	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: HB 90/100					
	120°C		180°C		250°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin		0,59	0,02	0,96	0,28	2,02
1-Benzothiophen	0,01	0,30	0,01	0,64	0,06	1,20
Acenaphthylen		0,06	0,08	0,10	0,08	0,23
Acenaphthen	0,03	0,37	0,38	0,68	0,34	1,41
Fluoren	0,03	1,08	6,05	3,70	6,64	7,91
Dibenzothiophen	0,03	0,36	4,66	0,68	7,34	2,19
Phenanthren	0,07	0,50	7,32	0,83	12,04	2,72
Anthracen	0,03	0,09	1,25	0,12	1,48	0,42
Fluoranthren	0,05	0,05	1,22	0,03	4,94	0,17
Pyren	0,03	0,02	1,03	0,01	4,36	0,15
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,03		0,43		4,06	0,08
Benz[a]anthracen	0,04	0,02	0,30	0,04	2,99	0,10
Chrysen	0,02		0,46		5,94	0,12
Benzo[b+k]fluoranthren	0,06		0,17		2,23	0,09
Benzo[e]pyren	0,05		0,17		2,65	0,08
Benzo[a]pyren			0,10		1,19	0,07
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,05		0,04		0,26	0,04
Dibenz[a,h]anthracen			0,05		0,40	0,06
Benzo[g,h,i]perylen			0,12		2,62	0,07
$\Sigma$ PAH	0,52	3,44	23,87	7,78	59,88	19,12

**Tab. 14:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 6	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 45					
	80°C		180°C		250°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,19	0,59	0,18	1,06	2,07	3,26
1-Benzothiophen	0,02	0,75	0,05	2,85	2,27	10,92
Acenaphthylen		0,05	0,05	0,10	0,82	0,23
Acenaphthen		0,11	0,14	0,51	4,50	1,19
Fluoren		0,09	0,37	0,62	7,23	0,83
Dibenzothiophen		0,06	1,36	0,86	13,48	0,58
Phenanthren		0,08	1,33	0,70	14,93	0,57
Anthracen		0,04	0,41	0,19	4,31	0,14
Fluoranthren		0,03	0,12	0,03	1,03	0,08
Pyren			0,44	0,01	6,99	0,02
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,45		8,01	
Benz[a]anthracen			0,17		3,95	
Chrysen			0,45		9,47	
Benzo[b+k]fluoranthren			0,12		3,10	
Benzo[e]pyren			0,14		4,20	
Benzo[a]pyren			0,08		1,74	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,04		0,35	
Dibenz[a,h]anthracen			0,05		0,69	
Benzo[g,h,i]perylen			0,05		1,01	
$\Sigma$ PAH	0,21	1,79	5,98	6,92	90,14	17,82

**Tab. 15:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 10	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 45					
	80°C		180°C		250°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,14	0,51	0,15	0,86	1,45	5,57
1-Benzothiophen	0,02	0,12	0,02	0,36	0,36	1,67
Acenaphthylen		0,04	0,05	0,11	0,58	0,61
Acenaphthen		0,11	0,16	0,62	2,71	2,45
Fluoren	0,05	0,17	1,12	2,73	12,75	4,17
Dibenzothiophen	0,03	0,08	1,66	1,26	15,11	0,99
Phenanthren	0,05	0,23	6,55	3,46	59,80	2,73
Anthracen	0,02	0,05	0,96	0,48	9,46	0,49
Fluoranthren	0,03	0,03	0,88	0,05	10,04	0,28
Pyren	0,01	0,01	1,57	0,05	16,11	0,18
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,02		0,39		6,69	0,16
Benz[a]anthracen			0,35		6,72	0,31
Chrysen			0,50		9,52	0,12
Benzo[b+k]fluoranthren			0,15		3,39	0,37
Benzo[e]pyren			0,18		4,72	0,32
Benzo[a]pyren			0,12		2,92	0,35
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,06		0,81	
Dibenz[a,h]anthracen			0,05		0,74	
Benzo[g,h,i]perylen			0,08		1,97	
$\Sigma$ PAH	0,36	1,36	15,01	9,97	165,85	20,75

**Tab. 16:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 33	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 45					
	80°C		180°C		250°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,21	0,56	0,18	1,12	0,78	3,62
1-Benzothiophen	0,02	0,28	0,03	1,07	0,37	4,58
Acenaphthylen	0,03	0,05	0,04	0,11	0,44	0,37
Acenaphthen	0,04	0,10	0,10	0,48	1,68	1,55
Fluoren	0,05	0,21	0,57	1,67	10,48	3,53
Dibenzothiophen	0,06	0,21	3,71	5,74	48,86	3,94
Phenanthren	0,07	0,28	5,22	6,11	64,85	3,85
Anthracen		0,05	0,37	0,44	12,25	0,32
Fluoranthren		0,03	0,21	0,04	1,76	0,06
Pyren		0,01	0,65	0,06	5,77	0,05
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		0,02	0,95	0,03	18,41	0,07
Benzo[a]anthracen		0,04	0,20	0,04	22,78	0,13
Chrysen			0,52	0,02	3,01	0,04
Benzo[b+k]fluoranthren			0,10		2,06	0,05
Benzo[e]pyren			0,12		2,97	0,04
Benzo[a]pyren			0,07		1,00	0,04
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,03		0,14	
Dibenz[a,h]anthracen			0,05		0,30	
Benzo[g,h,i]perylen			0,04		0,48	
$\Sigma$ PAH	0,48	1,83	13,17	16,93	198,37	22,21

**Tab. 17:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 12	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 80					
	80°C		150°C		180°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,24	0,56	0,33	0,74	0,31	0,88
1-Benzothiophen	0,01	0,64	0,01	1,53	0,02	2,55
Acenaphthylen		0,04		0,06	0,04	0,08
Acenaphthen		0,10		0,28	0,13	0,48
Fluoren		0,07		0,25	0,31	0,55
Dibenzothiophen		0,04	0,08	1,12	0,61	1,94
Phenanthren		0,06	0,10	1,32	0,72	1,69
Anthracen		0,03	0,04	0,33	0,21	0,39
Fluoranthren			0,04	0,04	0,08	0,03
Pyren			0,15	0,08	0,59	0,03
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,15		1,17	
Benz[a]anthracen			0,06		0,32	
Chrysen			0,17		1,48	
Benzo[b+k]fluoranthren			0,07		0,36	
Benzo[e]pyren			0,06		0,40	
Benzo[a]pyren					0,15	
Indeno[1,2,3-cd]pyren					0,04	
Dibenz[a,h]anthracen					0,06	
Benzo[g,h,i]perylen					0,06	
$\Sigma$ PAH	0,25	1,53	1,25	5,75	7,06	8,62

**Tab. 18:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 16	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 80					
	80°C		150°C		180°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,32	0,46	0,34	0,40	0,18	0,60
1-Benzothiophen		0,25		0,54	0,01	1,35
Acenaphthylen		0,03		0,04		0,05
Acenaphthen		0,04		0,08		0,10
Fluoren		0,04		0,09		0,12
Dibenzothiophen		0,03		0,59	0,15	1,53
Phenanthren		0,09		0,55	0,17	1,23
Anthracen		0,05		0,17	0,06	0,15
Fluoranthren				0,03	0,04	0,03
Pyren				0,05	0,27	0,02
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,03	0,05	0,27	
Benz[a]anthracen			0,04	0,04	0,06	
Chrysen			0,03	0,03	0,15	
Benzo[b+k]fluoranthren					0,07	
Benzo[e]pyren					0,06	
Benzo[a]pyren					0,05	
Indeno[1,2,3-cd]pyren						
Dibenz[a,h]anthracen						
Benzo[g,h,i]perylen						
$\Sigma$ PAH	0,32	0,99	0,44	2,66	1,54	5,19

**Tab. 19:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g/h}$ ].

Codierungs-Nr.: 18	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g/h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 80					
	80°C		150°C		180°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,22	0,38	0,14	0,44	0,16	0,67
1-Benzothiophen	0,01	0,23	0,01	0,59	0,01	1,07
Acenaphthylen		0,11		0,26	0,07	0,45
Acenaphthen		0,14		0,53	0,11	0,94
Fluoren		0,04	0,03	2,46	1,44	4,48
Dibenzothiophen		0,28	0,07	3,19	5,01	6,76
Phenanthren		0,11	0,05	1,44	2,67	2,71
Anthracen		0,03	0,03	0,09	0,15	0,12
Fluoranthen		0,02		0,03	0,05	
Pyren			0,01	0,03	0,22	
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,07	0,02	0,82	
Benz[a]anthracen			0,07		0,12	
Chrysen			0,04		0,48	
Benzo[b+k]fluoranthen			0,05		0,11	
Benzo[e]pyren			0,05		0,15	
Benzo[a]pyren			0,04		0,08	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,05		0,04	
Dibenz[a,h]anthracen					0,05	
Benzo[g,h,i]perylen			0,03		0,05	
$\Sigma$ PAH	0,23	1,34	0,74	9,08	11,78	17,19

**Tab. 20:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g/h}$ ].

Codierungs-Nr.: 20	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g/h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 200					
	80°C		150°C		180°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,09	0,18	0,08	0,25	0,28	0,35
1-Benzothiophen		0,03	0,01	0,09	0,01	0,13
Acenaphthylen		0,03		0,04	0,03	0,04
Acenaphthen		0,04	0,03	0,11	0,06	0,13
Fluoren		0,04	0,03	0,17	0,17	0,19
Dibenzothiophen		0,04	0,08	0,26	4,02	0,98
Phenanthren		0,08	0,24	0,70	13,58	2,47
Anthracen		0,03	0,05	0,07	0,67	0,19
Fluoranthren		0,03	0,04	0,03	0,40	0,04
Pyren		0,01	0,23	0,04	3,38	0,21
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,27	0,02	3,53	0,10
Benz[a]anthracen		0,04	0,10	0,04	1,36	0,05
Chrysen		0,01	0,29	0,02	3,31	0,11
Benzo[b+k]fluoranthren			0,08		0,66	0,03
Benzo[e]pyren			0,07		0,67	0,02
Benzo[a]pyren			0,05		0,28	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,03		0,04	
Dibenz[a,h]anthracen					0,05	
Benzo[g,h,i]perylen			0,03		0,06	
$\Sigma$ PAH	0,09	0,57	1,72	1,83	32,56	5,02

**Tab. 21:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g/h}$ ].

Codierungs-Nr.: 22	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g/h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 200					
	80°C		150°C		180°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,21	0,31	0,15	0,47	0,30	0,70
1-Benzothiophen	0,01	0,18		0,51	0,01	0,96
Acenaphthylen		0,03		0,08	0,03	0,07
Acenaphthen		0,08		0,78	0,07	0,73
Fluoren		0,05	0,03	0,56	0,11	0,68
Dibenzothiophen		0,06	0,12	0,75	0,09	8,60
Phenanthren		0,09	0,20	1,02	2,64	10,50
Anthracen		0,03	0,03	0,07	0,20	0,58
Fluoranthren			0,05	0,03	0,14	0,04
Pyren			0,11	0,03	0,53	0,05
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,07	0,02	0,79	
Benz[a]anthracen		0,03	0,06	0,03	0,20	
Chrysen			0,03		0,53	
Benzo[b+k]fluoranthren			0,03		0,10	
Benzo[e]pyren			0,02		0,14	
Benzo[a]pyren					0,08	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,04			
Dibenz[a,h]anthracen						
Benzo[g,h,i]perylen			0,04		0,04	
$\Sigma$ PAH	0,22	0,87	0,95	4,36	5,99	22,91

**Tab. 22:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g/h}$ ].

Codierungs-Nr.: 23	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g/h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 200					
	80°C		150°C		180°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,33	0,40	0,12	0,83	0,21	0,95
1-Benzothiophen	0,02	0,16	0,01	0,82	0,02	1,20
Acenaphthylen		0,03		0,06	0,03	0,07
Acenaphthen		0,04		0,22	0,04	0,29
Fluoren	0,03	0,05		0,18	0,15	0,30
Dibenzothiophen		0,03	0,03	0,26	0,17	0,93
Phenanthren	0,03	0,06	0,04	0,30	0,29	0,92
Anthracen	0,02	0,03	0,03	0,07	0,07	0,22
Fluoranthren		0,03	0,02	0,03	0,07	0,05
Pyren			0,03	0,08	0,48	0,11
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen			0,04	0,02	0,47	0,03
Benz[a]anthracen		0,03	0,05	0,04	0,24	0,06
Chrysen			0,05	0,02	0,46	0,01
Benzo[b+k]fluoranthren			0,05		0,15	0,05
Benzo[e]pyren			0,05		0,22	0,04
Benzo[a]pyren			0,05		0,14	0,04
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,04		0,05	
Dibenz[a,h]anthracen					0,05	
Benzo[g,h,i]perylen			0,03		0,08	
$\Sigma$ PAH	0,43	0,86	0,63	2,91	3,39	5,27

**Tab. 23:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 25	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 85/25					
	120°C		180°C		220°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,26	0,61	0,37	1,35	3,18	6,10
1-Benzothiophen	0,02	0,40	0,07	1,74	2,20	8,54
Acenaphthylen	0,03	0,06	0,09	0,17	1,10	0,40
Acenaphthen	0,04	0,08	0,06	0,83	3,18	1,47
Fluoren	0,30	0,31	4,30	5,35	34,76	3,48
Dibenzothiophen	0,69	0,28	7,67	3,95	45,05	1,21
Phenanthren	0,79	0,29	8,00	3,41	49,05	0,91
Anthracen	0,20	0,05	0,72	3,65	3,66	0,33
Fluoranthren	0,10	0,03	0,39	0,08	0,66	0,10
Pyren	0,23		1,31	0,24	7,00	0,01
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,22		2,10	0,26	18,42	
Benz[a]anthracen	0,20		0,54	0,05	29,51	
Chrysen	0,13		1,90	0,27	3,13	
Benzo[b+k]fluoranthren	0,06		0,28	0,05	114,00	
Benzo[e]pyren	0,06		0,28	0,05	124,70	
Benzo[a]pyren	0,05		0,13	0,04	41,39	
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,03		0,05		3,60	
Dibenz[a,h]anthracen			0,07		10,06	
Benzo[g,h,i]perylen			0,06		19,51	
$\Sigma$ PAH	3,41	2,09	28,38	21,48	514,15	22,53

**Tab. 24:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 29	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 85/25					
	120°C		180°C		220°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,30	0,88	0,29	1,23	0,65	3,32
1-Benzothiophen	0,01	0,42	0,02	0,88	0,08	2,68
Acenaphthylen		0,06	0,05	0,12	0,25	0,29
Acenaphthen		0,13	0,14	0,55	1,05	1,25
Fluoren		0,62	2,21	3,74	12,70	5,38
Dibenzothiophen		0,46	3,21	3,37	11,44	3,08
Phenanthren		0,52	3,87	2,73	13,65	2,53
Anthracen		0,07	0,49	0,33	1,26	0,29
Fluoranthren	0,03	0,04	0,38	0,04	1,42	0,06
Pyren	0,01	0,03	0,71	0,02	2,75	
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,03		0,94	0,02	5,29	
Benz[a]anthracen	0,03	0,02	0,29	0,02	1,65	
Chrysen	0,05	0,04	0,71	0,04	3,95	
Benzo[b+k]fluoranthren			0,19		1,33	
Benzo[e]pyren	0,04		0,22		1,63	
Benzo[a]pyren			0,11		0,68	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,04		0,13	
Dibenz[a,h]anthracen			0,06		0,16	
Benzo[g,h,i]perylen			0,07		0,42	
$\Sigma$ PAH	0,49	3,30	13,99	13,06	60,48	18,89

**Tab. 25:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

Codierungs-Nr.: 31	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 85/25					
	120°C		180°C		220°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,23	0,92	0,55	2,36	1,46	4,93
1-Benzothiophen	0,02	0,36	0,08	1,29	0,21	2,18
Acenaphthylen	0,03	0,07	0,21	0,23	0,42	0,35
Acenaphthen	0,03	0,37	0,85	1,35	1,61	2,14
Fluoren	0,06	1,02	7,52	4,78	13,16	5,24
Dibenzothiophen	0,06	0,64	8,76	2,03	14,52	2,22
Phenanthren	0,15	1,92	28,54	5,41	49,26	5,73
Anthracen	0,05	0,27	4,15	0,60	9,58	0,92
Fluoranthren	0,03	0,10	3,53	0,07	8,07	0,13
Pyren	0,15	0,12	4,29	0,04	10,51	0,08
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,03		1,01	0,03	3,57	
Benz[a]anthracen	0,04		1,18		4,57	
Chrysen	0,03		1,45		5,53	
Benzo[b+k]fluoranthren	0,05		0,41		1,72	
Benzo[e]pyren	0,04		0,44		1,83	
Benzo[a]pyren	0,04		0,27		1,09	
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,03		0,10		0,30	
Dibenz[a,h]anthracen			0,09		0,26	
Benzo[g,h,i]perylen			0,17		0,67	
$\Sigma$ PAH	1,06	5,78	63,59	18,20	128,34	23,92

**Tab. 26:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g/h}$ ].

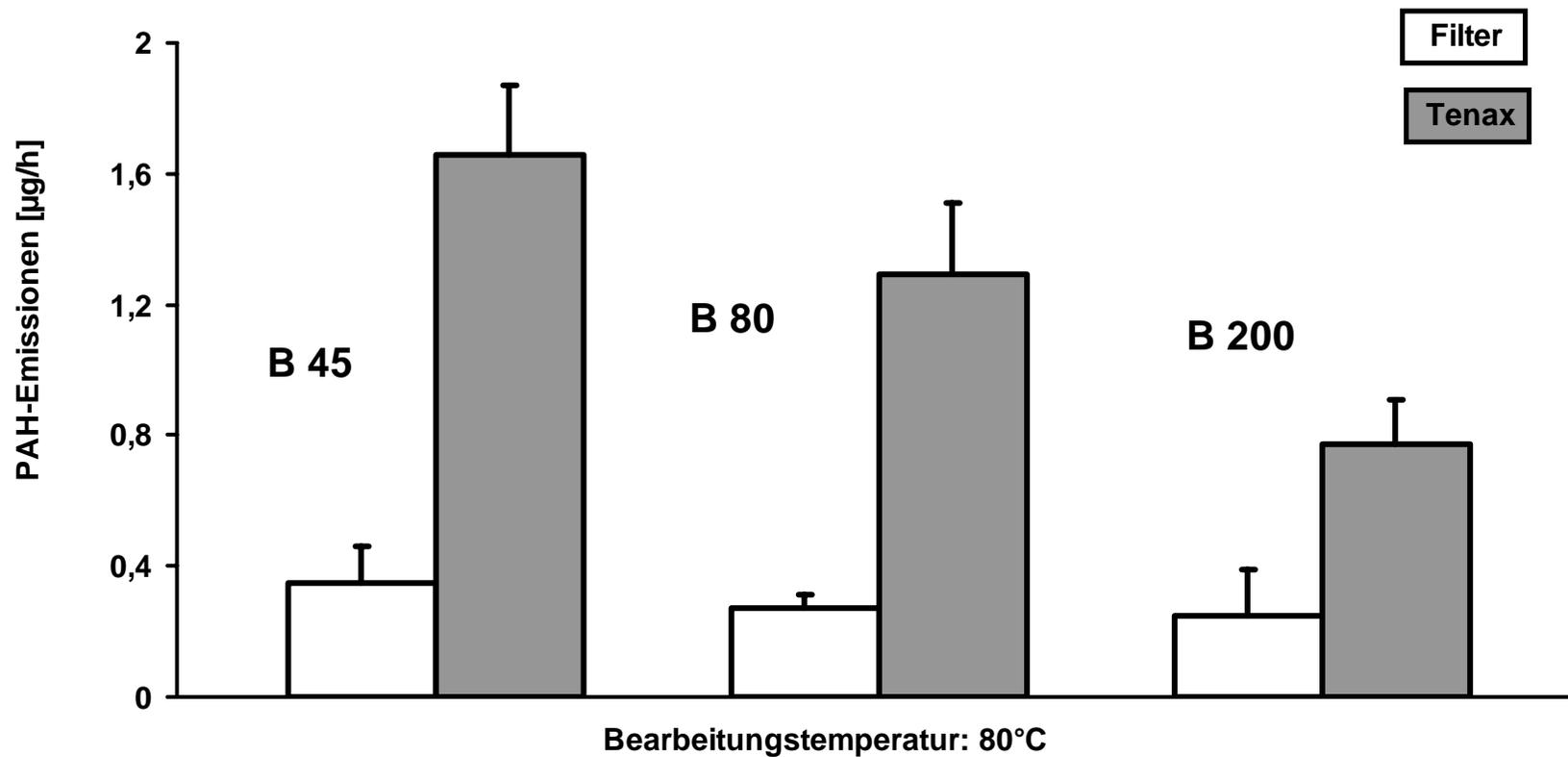
Codierungs-Nr.: 26	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g/h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 95/35					
	120°C		180°C		220°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,31	0,92	0,72	2,42	2,07	4,60
1-Benzothiophen	0,02	1,19	0,15	3,25	0,74	6,31
Acenaphthylen	0,04	0,08	0,16	0,29	0,54	0,39
Acenaphthen	0,06	0,17	0,35	1,08	0,91	1,42
Fluoren	0,37	0,73	6,31	6,46	25,45	5,39
Dibenzothiophen	0,54	1,54	14,52	3,19	45,90	3,39
Phenanthren	1,51	1,49	16,22	2,62	55,93	2,96
Anthracen	0,19	0,16	1,57	0,27	0,22	0,29
Fluoranthren	0,24	0,04	0,82	0,06	1,87	0,14
Pyren	0,53	0,03	3,04	0,03	8,86	0,22
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,17		4,81		25,11	0,35
Benz[a]anthracen	0,13		1,20		8,24	0,18
Chrysen	0,23		4,27		20,17	0,33
Benzo[b+k]fluoranthren	0,08		0,72		3,91	0,11
Benzo[e]pyren	0,08		0,72		3,92	0,09
Benzo[a]pyren	0,06		0,32		1,43	0,08
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,04		0,09		0,22	
Dibenz[a,h]anthracen	0,04		0,14		0,42	
Benzo[g,h,i]perylen	0,04		0,13		0,55	
$\Sigma$ PAH	4,68	6,34	56,24	19,68	206,47	26,26

**Tab. 27:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

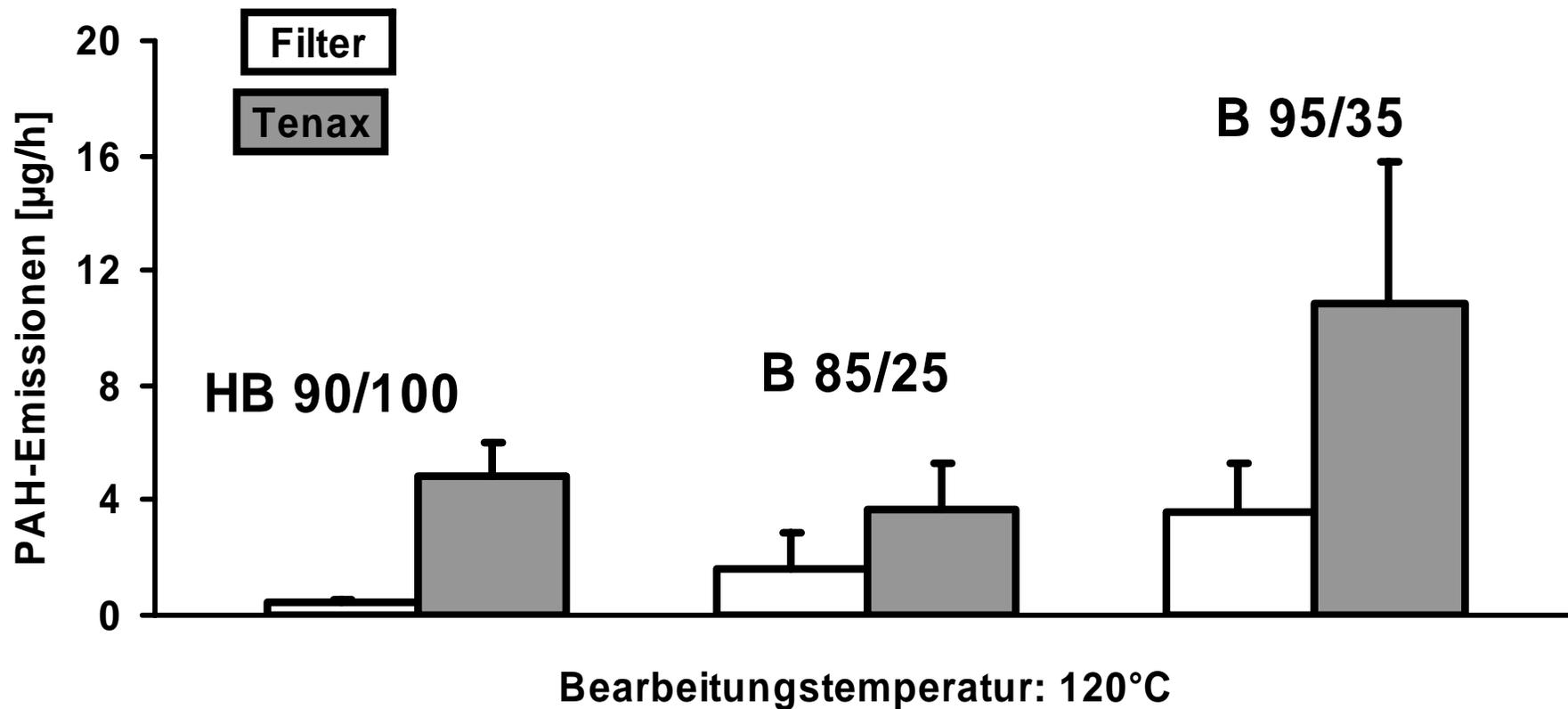
Codierungs-Nr.: 28	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 95/35					
	120°C		180°C		220°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,35	2,98	1,44	7,90	6,86	21,77
1-Benzothiophen	0,02	0,61	0,14	1,64	0,75	4,61
Acenaphthylen	0,03	0,15	0,25	0,36	1,03	0,62
Acenaphthen	0,08	1,15	1,50	2,63	7,13	4,38
Fluoren	0,41	4,27	10,52	6,70	40,00	6,13
Dibenzothiophen	0,48	1,68	7,78	1,40	24,17	1,28
Phenanthren	2,04	5,81	30,89	4,67	92,17	2,87
Anthracen	0,34	1,00	5,55	0,69	17,11	0,82
Fluoranthren	0,32	0,06	3,79	0,08	15,31	0,16
Pyren	0,52	0,04	4,93	0,04	17,44	0,02
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,03		0,43		2,35	
Benz[a]anthracen	0,06		1,16		6,40	
Chrysen	0,04		1,17		6,30	
Benzo[b+k]fluoranthren	0,05		0,44		2,64	
Benzo[e]pyren	0,04		0,28		1,60	
Benzo[a]pyren	0,04		0,21		1,07	
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,04		0,08		0,46	
Dibenz[a,h]anthracen					0,27	
Benzo[g,h,i]perylen	0,03		0,09		0,66	
$\Sigma$ PAH	4,92	17,75	70,64	26,11	243,73	42,65

**Tab. 28:** In unter standardisierten Bedingungen und praxisrelevanten Bearbeitungstemperaturen emittierten Bitumen-Aerosolen von jeweils n = 3 Chargen der insgesamt in die Untersuchung einbezogenen 6 Bitumen-Sorten nachgewiesene PAH [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ].

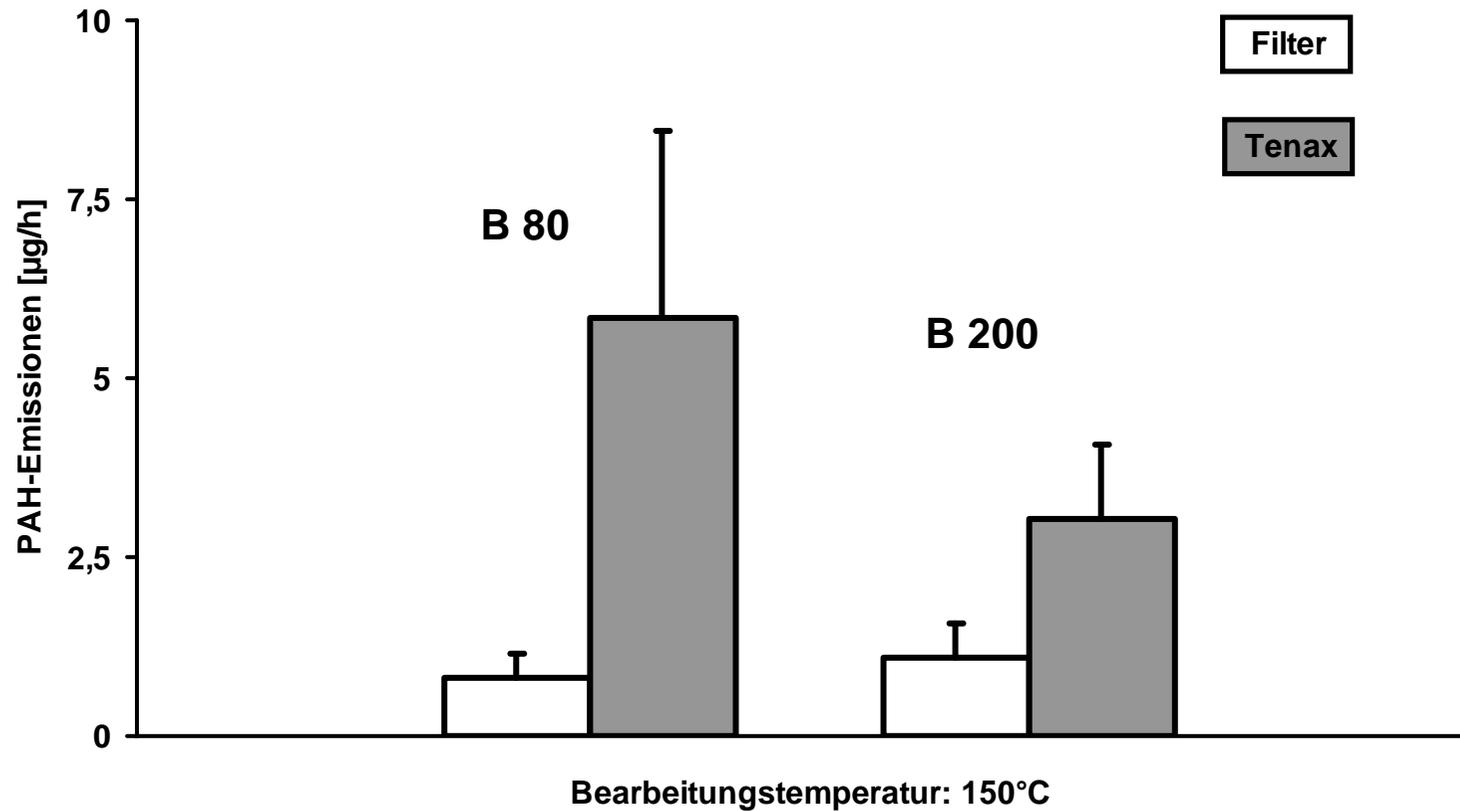
Codierungs-Nr.: 30	PAH-Emissionsrate [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]					
	Bitumen-Sorte: B 95/35					
	120°C		180°C		220°C	
Temperatur [°C]	Filter	Tenax	Filter	Tenax	Filter	Tenax
Naphthalin	0,43	1,44	0,93	5,32	2,03	7,05
1-Benzothiophen	0,02	0,34	0,10	1,56	0,22	1,68
Acenaphthylen		0,09	0,20	0,41	0,39	0,41
Acenaphthen		0,54	0,81	2,57	1,80	2,36
Fluoren		1,72	7,21	6,93	13,81	4,62
Dibenzothiophen	0,05	0,90	3,96	2,12	5,08	1,39
Phenanthren	0,17	2,66	12,55	5,37	16,43	3,27
Anthracen	0,05	0,40	1,95	0,78	2,88	0,87
Fluoranthren	0,15	0,16	2,52	0,48	5,31	0,16
Pyren	0,19	0,14	2,81	0,58	5,50	0,05
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0,04		0,63	0,14	1,96	
Benz[a]anthracen	0,04		0,85	0,18	2,95	
Chrysen			1,40	0,24	4,17	
Benzo[b+k]fluoranthren			0,55		3,55	
Benzo[e]pyren			0,36		2,13	
Benzo[a]pyren			0,25		1,30	
Indeno[1,2,3-cd]pyren			0,15		0,41	
Dibenz[a,h]anthracen			0,12		0,32	
Benzo[g,h,i]perylen			0,16		0,69	
$\Sigma$ PAH	1,14	8,38	37,52	26,68	70,93	21,86



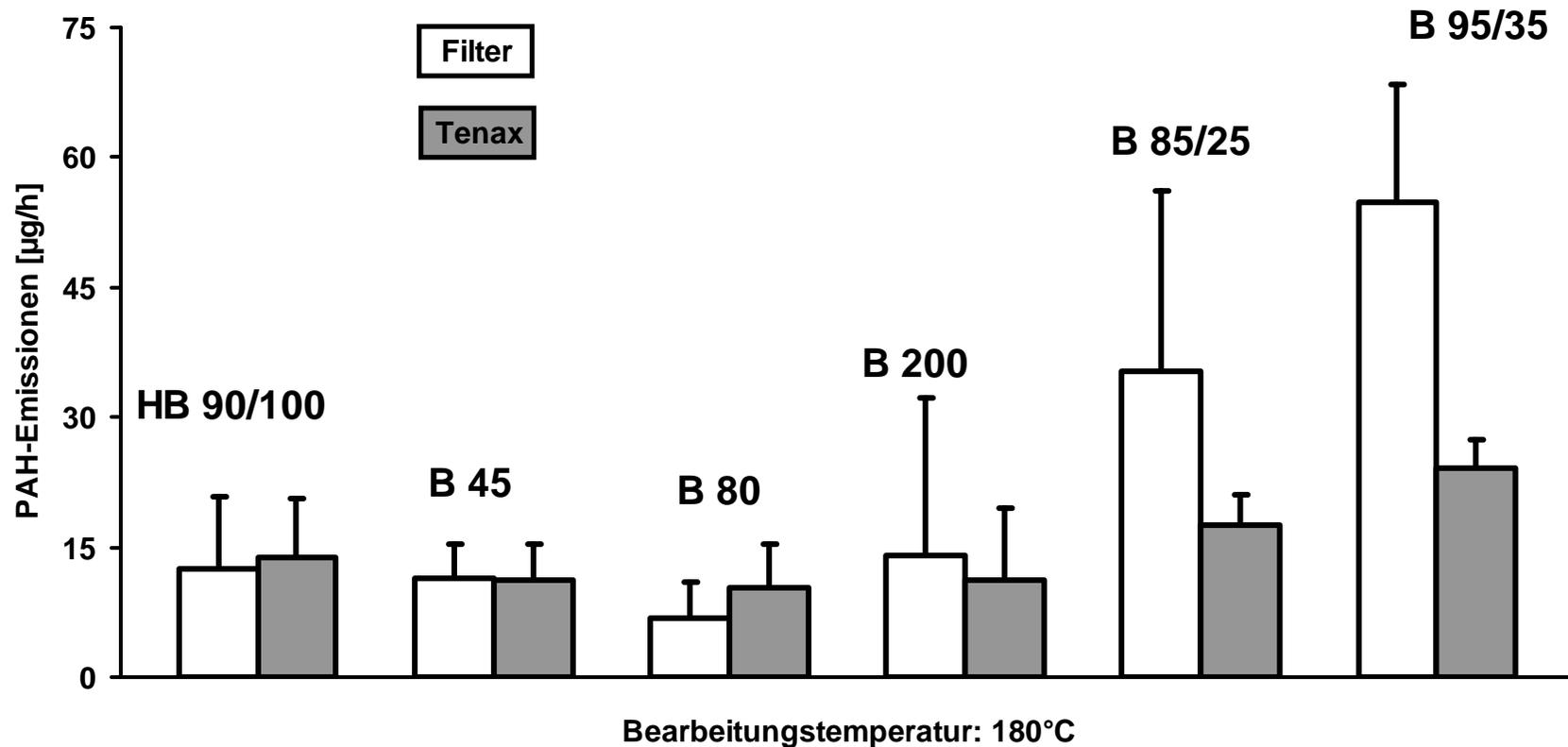
**Abb. 6:** Mittelwerte und Standardabweichungen der an Tenax adsorptiv gebundenen gasförmigen PAH sowie mit den Bitumen-Aerosolen beaufschlagten Glasfiltern nach standardisierten Emissionsversuchen mit jeweils 3 Chargen der Bitumen-Sorten B 45, 80 und 200 bei der Bearbeitungstemperatur von 80°C nachgewiesenen PAH [µg/h].



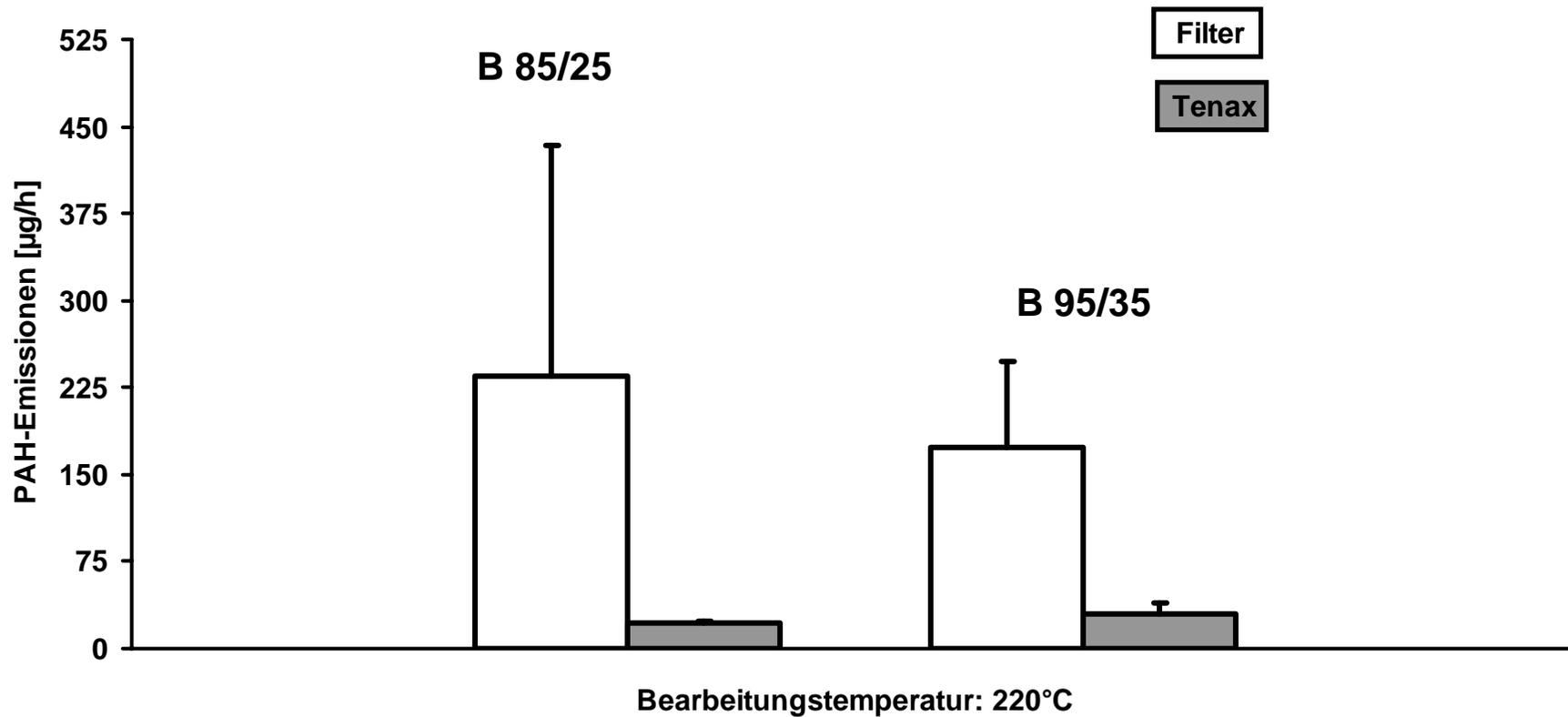
**Abb. 7:** Mittelwerte und Standardabweichungen der an Tenax adsorptiv gebundenen gasförmigen PAH sowie der in den mit den Bitumen-Aerosolen beaufschlagten Glasfiltern nach standardisierten Emissionsversuchen mit jeweils 3 Chargen der Bitumen-Sorten HB 90/100, B 85/25 sowie B 95/35 bei der Bearbeitungstemperatur von 120°C nachgewiesenen PAH [µg/h].



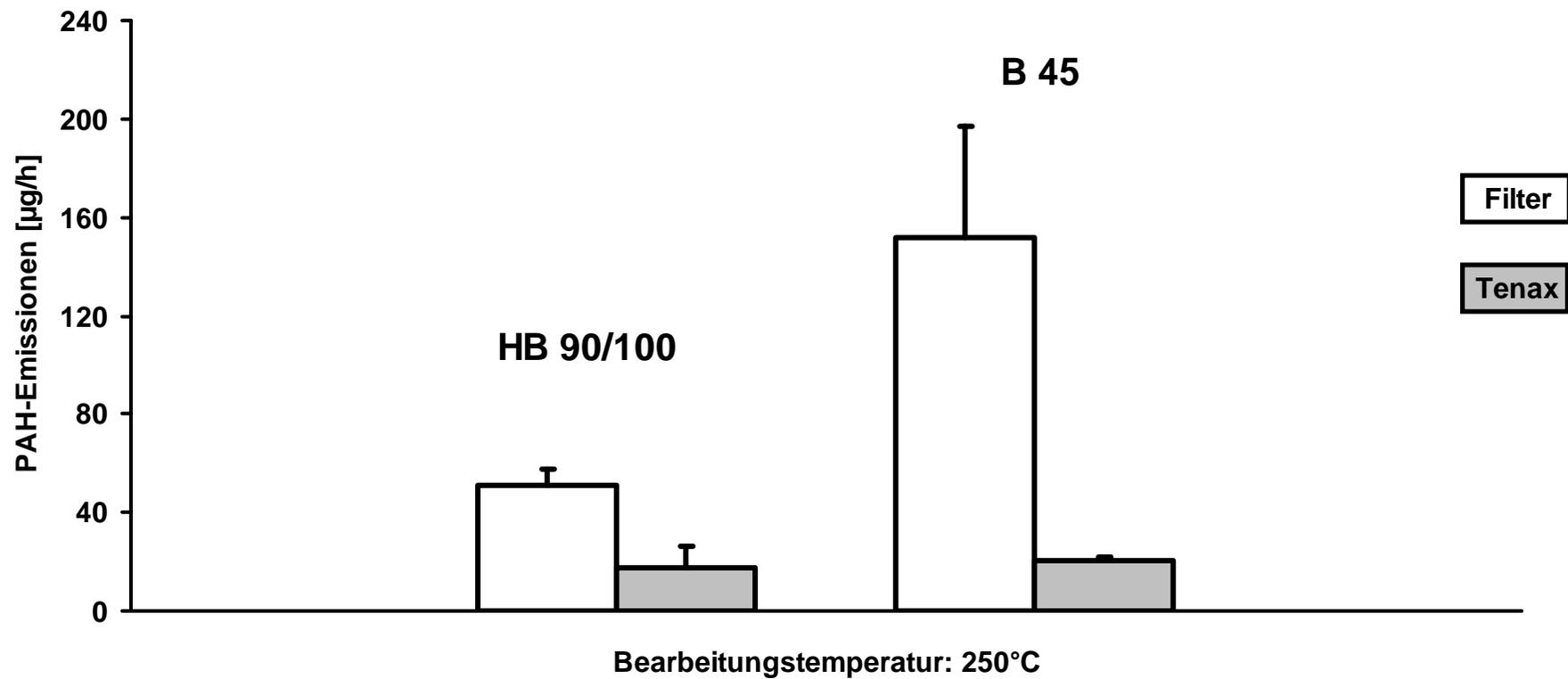
**Abb. 8:** Mittelwerte und Standardabweichungen der an Tenax adsorptiv gebundenen gasförmigen PAH sowie der in den mit den Bitumen-Aerosolen beaufschlagten Glasfiltern nach standardisierten Emissionsversuchen mit jeweils 3 Chargen der Bitumen-Sorten B 80 und B 200 bei der Bearbeitungstemperatur von 150°C nachgewiesenen PAH [µg/h].



**Abb. 9:** Mittelwerte und Standardabweichungen der an Tenax adsorptiv gebundenen gasförmigen PAH sowie der in den mit den Bitumen-Aerosolen beaufschlagten Glasfiltern nach standardisierten Emissionsversuchen mit jeweils 3 Chargen aller untersuchten Bitumen-Sorten bei der Bearbeitungstemperatur von 180°C nachgewiesenen PAH [µg/h].



**Abb. 10:** Mittelwerte und Standardabweichungen der an Tenax adsorptiv gebundenen gasförmigen PAH sowie der in den mit den Bitumen-Aerosolen beaufschlagten Glasfiltern nach standardisierten Emissionsversuchen mit jeweils 3 Chargen der Bitumen-Sorten B 85/25 und B 95/35 bei der Bearbeitungstemperatur Von 220°C nachgewiesenen PAH [µg/h].



**Abb. 11:** Mittelwerte und Standardabweichungen der an Tenax adsorptiv gebundenen gasförmigen PAH sowie der in den mit den Bitumen-Aerosolen beaufschlagten Glasfiltern nach standardisierten Emissionsversuchen mit jeweils 3 Chargen der Bitumen-Sorten HB 90/100 und B 45 bei der Bearbeitungstemperatur von 250°C nachgewiesenen PAH [ $\mu\text{g/h}$ ].

Die durchschnittlichen auf Emissionsraten der aufsummierten PAH-Verbindungen der jeweils gleichen Bearbeitungstemperaturen unterworfenen Bitumen-Chargen sind in den **Abbildungen 6-11** dargestellt. Wie diesen Tabellen und Abbildungen zu entnehmen ist, verändert sich das Verhältnis der an Tenax und Glasfaser nachgewiesenen PAH-Emissionen mit steigender Bearbeitungstemperatur drastisch. So resultieren deutlich höhere PAH-Beladungen an Tenax bei Bearbeitungstemperaturen von 80-150°C. Der Grund ist zum einen in der bei diesen Temperaturen sehr gering ausgeprägten Tendenz zur Aerosol-Bildung zu sehen, s. **Tabelle 10**. Andererseits werden die vergleichsweise hohen Tenax Adsorptionen vorwiegend durch die bei diesen Temperaturen bereits leicht verdampfenden und somit gasförmig vorliegenden, aus 2- bis 3-Ringsystemen bestehenden PAH hervorgerufen. Die Komponenten höheren Molekulargewichts sind an dieser Sammelphase nicht nachweisbar. Ab der Bearbeitungstemperatur von 180°C hat sich das Verhältnis egalisiert bzw. im Falle der Bitumen-Sorten B 85/25 bzw. B 95/35 bereits deutlich umgekehrt und ist insbesondere bei den Temperaturen von 220 und 250°C noch stärker ausgeprägt, s. **Abbildung 10** und **11**. Während bei diesen Temperaturen sämtliche PAH am Filtersystem nachweisbar sind, verläuft der Nachweis der höher kondensierten PAH ab Benzo[a]anthracen negativ. Die zu einer weiteren Sicherheit der Tenax-Phase nachgeschaltete Cyclohexan-Vorlage enthielt keine PAH-Verbindungen, so dass das System Glasfaser/Tenax zur quantitativen Abscheidung der PAH-Emissionen als ausreichend anzusehen ist.

### **Diskussion und Schlussfolgerungen**

Die in diesem Projekt durchgeführten Materialuntersuchungen und laborexperimentellen Emissionsversuche wurden unter dem Aspekt der Quantifizierung der bei thermischer Bearbeitung von Bitumina gebildeten Aerosole sowie der darin enthaltenen polycyclischen Aromaten -vorwiegend cancerogenen Potentials- vorgenommen. Die Analysen der derzeit als für ein breites Anwendungsgebiet repräsentativ anzusehenden n = 35 Materialproben unterschiedlicher Provenienzen ergaben in allen Fällen einen quantifizierbaren Massenanteil der ausgewählten PAH-Verbindungen. Die vier Stickstoff-haltigen Komponenten -und hier insbesondere das stark cancerogen wirkende 2-Naphthylamin- konnten in keiner Materialprobe nachgewiesen werden. Demzufolge verließ auch der Nachweis in den thermisch erzeugten Emissionen auf diese Verbindungen negativ. Durch den naturbedingten Schwefelgehalt des Erdöls konnten die Verbindungen Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen, Benzo[b]thiophen sowie Dibenzothiophen in sämtlichen Materialproben nachgewiesen

werden. Von den PAH-Verbindungen spielt das Benzo[a]pyren (BaP) insofern eine bedeutende Rolle, da es als Bezugssubstanz bzw. Leitkomponente zur Beurteilung eines krebserzeugendes Risikos basiert. Die in allen Materialproben gemessenen mittleren BaP-Gehalte rangieren im Bereich 1,20 bis 2,74 mg/kg Bitumen. Die Bitumen-Charge Nr. 26 weist mit 4,20 mg/kg den Maximalwert auf. Die Gefahrstoffverordnung gibt im § 35 des Sechsten Abschnitts folgende Stellung zu krebserzeugenden Gefahrstoffen und dem Massengehalt von BaP ab:

*(1) Krebserzeugende oder erbgutverändernde Gefahrstoffe im Sinne des Sechsten Abschnitts sind Stoffe und Zubereitungen, die krebserzeugend oder erbgutverändernd sind, sowie Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse, aus denen bei der Herstellung oder Verwendung krebserzeugende oder erbgutverändernde Stoffe oder Zubereitungen entstehen oder freigesetzt werden können.*

und weiter

*(3) Zubereitungen sind als krebserzeugend im Sinne des Absatzes 1 anzusehen, sofern sie den Massengehalt an einem krebserzeugenden Stoff gleich oder größer als 0,1 vom Hundert beträgt, soweit nicht in der Bekanntmachung nach § 4a Abs. 1 andere stoffspezifische Konzentrationsgrenzen festgelegt sind.*

*Abweichend von Satz 1 gelten für Benzo[a]pyren die zugeordneten besonderen Gehaltsgrenzen von 0,005 für den Massengehalt in der Zubereitung in Hundertteilen.*

Gemäß dieser Vorgabe zählen die untersuchten Bitumina nicht zu den krebserzeugenden Stoffen oder Zubereitungen, da ihr Massenanteil an BaP im ungünstigsten Fall diesen Grenzwert um etwa den Faktor 12 unterschreitet.

Aussagekräftige Informationen lassen sich anhand des Emissionsverhaltens der einzelnen Bitumen-Sorten gewinnen. Infolge des standardisierten Versuchsablaufs konnten die Bitumina diesbezüglich miteinander verglichen werden. Für den mit PAH-Messungen beauftragten Probenehmer ergeben sich aus den Versuchsergebnissen für die Praxis wertvolle Hinweise. So ist bereits schon bei Temperaturen von 80°C eine -wenn auch nur geringfügige Emission gasförmiger, nicht am Filtersystem zurückgehaltener PAH einzukalkulieren. Für eine umfassende Risikoabschätzung luftgetragener PAH ist ein Probenahmesystem bestehend aus Filter mit nachgeschaltetem Adsorbens wie Tenax unerlässlich. Da der Bearbeitungstemperatur von 180°C alle n = 6 Bitumen-Sorten ausgesetzt waren, ist ihr Emissionsverhalten bei dieser Temperatur besonders informativ. Während die Bitumen-Sorten HB 90/100 sowie B 45, 80 und 200 in ihren Aerosol-Emissionen im Mittel bei 7,5 mg/h liegen, weisen die Bitumen-Sorten B 85/25 bzw. B 95/35

mit mittleren 25,1 bzw. 35,2 mg/h stärker ausgeprägte Eigenschaften zur Aerosol-Bildung und somit zur PAH-Emission auf. Die Untersuchungen zeigen ferner, dass Temperaturerhöhungen -beispielsweise bei den beiden letztgenannten Bitumen-Sorten von 180 auf 220°C- etwa eine um den Faktor 5 erhöhte Abdampftrate mit vergleichbarer Verschiebung der PAH-Anteile bewirken. Demgegenüber resultieren bei einem weiteren Temperaturanstieg auf 250°C im Falle der Bitumen-Sorten HB 90/100 bzw. B 45 mit durchschnittlich 68,80 bzw. 139,01 wesentlich geringere Emissionsraten.

**Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:**

1. In ausgewählten derzeit verwendeten Bitumen-Chargen unterschiedlicher Sorten konnten in allen Fällen PAH sowie schwefelhaltige homologe Verbindungen nachgewiesen werden.
2. Die untersuchten Bitumenproben enthielten keine der ausgewählten stickstoffhaltigen Polycyclen.
3. Der Anteil der als carcinogen bekannten PAH ist im Vergleich zu den toxikologisch nicht bzw. wenig relevanten Komponenten unterrepräsentiert.
4. Gemäß der Gefahrstoffverordnung unterschreiten sämtliche Materialproben die Vorgaben der Gehaltsgrenze für Benzo[a]pyren von 0,005 Massengehalt in Hundertteilen und sind daher im Sinne der GefStoffV. nicht als krebserzeugend anzusehen.
5. Das Emissionsverhalten bez. der Aerosolbildung ist bei den untersuchten Bitumen-Sorten unterschiedlich stark ausgeprägt. Es hängt einerseits von der Bearbeitungstemperatur und zum anderen von der Beschaffenheit der Bitumen-Sorte ab.
6. Hinsichtlich der Aerosolbildungsrate sind Temperaturen ab 180°C relevant. Bei dieser Bearbeitungstemperatur weisen die Bitumen-Sorten B 85/25 und B 95/35 die höchsten Emissionsraten auf. Im Gegensatz dazu werden bereits ab Temperaturen von 80°C PAH emittiert, die an dem dem Filtersystem nachgeschalteten Adsorbens quantitativ erfasst werden können.
7. Eine quantifizierbare Übertragbarkeit der im Teilprojekt II gewonnenen Ergebnisse zur Abschätzung eines gesundheitlichen Risikos beschäftigter Arbeitnehmer kann nicht vorgenommen werden. Dazu sind die im Teilprojekt III geplanten Feldversuche unabdingbar.

Gießen, den 1. Okt. 1997

## Literatur

- 1] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften.  
Von den Berufsgenossenschaften anerkannte Analysenverfahren zur Feststellung der Konzentrationen krebserzeugender Arbeitsstoffe in der Luft in Arbeitsbereichen. Verfahren zur Bestimmung von Benzo[a]pyren und anderen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH).  
C. Heymanns Verlag, Köln; 1997.
- 2] Knecht, U., Lämmler, C., Tobias S.  
Evaluation of various collection phases for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH).  
Fresenius Z Anal Chem. 326; 25-32, 1987.
- 3] Natusch, DF., Tomkins, BA .  
Isolation of polycyclic organic compounds by solvent extraction with dimethyl sulfoxide.  
Anal Chem. 50; 1429-1434, 1978.
- 4] Josefsson, B.  
Mass spectrometric analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons.  
In: Bjorseth A.,ed. Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons.  
M. Dekker Inc., New York; 301-321, 1983.
- 5] Tobias, S., Knecht, U., Weitowitz, H.-J.  
Temperaturabhängigkeit experimentell emittierter polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAH) aus Straßenbaubindemitteln.  
Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin e. V.  
Gentner Verlag, Stuttgart; 279 - 282, 1986.