

**Standardisierte Versuche zum temperatur- und zeitabhängigen
Emissionsverhalten von polycyclischen aromatischen
Kohlenwasserstoffen (PAH) aus Bitumen-Schmelzfolien**

**Institut für Arbeit und Sozialmedizin
des Klinikums Gießen Marburg
Privatdozent Dr. Dr. Udo Knecht**

Ziel der Untersuchungen

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden gemäß Vorgabe des Auftragsgebers der Daimler Chrysler AG mit der Fragestellung durchgeführt, ob und in welchen Konzentrationen PAH beim Erhitzen von Bitumen-Schmelzfolien freigesetzt und nachgewiesen werden können. Hintergrund der Untersuchungen war die Einstufung durch die Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft von Bitumen sowie seinen Inhaltsstoffen Naphthalin und Benzo[a]pyren als krebserzeugende Arbeitsstoffe, d. h., als Stoffe, die als krebserzeugend für den Menschen anzusehen sind, weil durch hinreichende Ergebnisse aus Langzeit-Tierversuchen oder Hinweise aus Tierversuchen und epidemiologischen Untersuchungen davon auszugehen ist, dass sie einen nennenswerten Beitrag zum Krebsrisiko leisten. Durch die Versuchsanordnung sollten die Emissions-Verhältnisse im Rohbau- und KTL-Ofen messtechnisch erfasst werden. Ein weiteres Ziel war es, Fragen zum linearen oder exponentiellen Emissionsverlauf zu klären. In den Versuchsreihen wurden die Temperatur- und Zeitvorgaben zugrunde gelegt, die auch werksintern praktiziert werden. Untersucht werden sollten ferner die Schmelzfolien auf ihren PAH-Massenanteil.

Im Einzelnen wurden die Emissionsversuche in drei Prüfreihe unterteilt, deren Abläufe im Anhang 1 detailliert beschrieben sind.

Versuchsablauf

Die Emissionsversuche wurden in einem Wärmetrockenschrank der Fa. Heraeus der Serie 6000 mit einem Rauminhalt von 196 L vorgenommen s. Abb. 1. Durch in den Innenraum des Ofens eingeführte Kupferrohre konnten mittels geeichter Pumpen definierte Luftvolumina mit einem Volumenstrom von 2 L/min durch ein mit dem Kunstharz XAD als Adsorbens gefülltes Glasröhrchen gesaugt werden. Das komplette Probenahmesystem bestehend aus dem Probenahmekopf mit Ansaugstutzen und Adsorptionsröhrchen ist in Abb. 2a dargestellt und vom berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitsschutz (BIA) konzipiert. Es ist Standard für die Messung luftgetragener PAH. Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass dieses System nur dann effektiv und reproduzierbar arbeitet, wenn die angesaugte Luft einen bestimmten Temperaturbereich nicht überschreitet. Da die Generierung der PAH-Emissionen im Wärmeschrank größtenteils jedoch bei Temperaturen bis 190°C erfolgte (s. Prüfablauf 1 und 3), traten durch die Aufheizung des Adsorptionsmaterials

XAD und des metallischen Probenahmesystems durch die angesaugte heiße Luft PAH-Desorptionsvorgänge auf, die zu teilweise deutlichen Verlusten einzelner Messkomponenten führten. Das Probenahmeverfahren -im Folgenden als BIA bezeichnet- wurde daher insofern modifiziert, dass die Adsorptionsphase XAD mittels eines Kühlers auf Raumtemperatur gehalten und somit eine nachfolgende PAH-Desorption ausgeschlossen werden konnte, s. Abb. 2b. Bis auf die Emissionsprobenahmen 10 und 11 wurden jedoch beide Probenahmeverfahren parallel eingesetzt. Dadurch konnten die auftretenden Differenzen der PAH-Konzentrationen nachvollziehbar belegt werden.

Nach Ablauf der einzelnen Emissionsprobenahmen wurden die PAH von dem Adsorbens XAD desorbiert und nach einem komplexen Aufarbeitungsschema gaschromatographisch- massenspektroskopisch quantifiziert.

Nach jeder Versuchsreihe wurde der nicht-befüllte Ofen über ca. 3 h ausgeheizt, um ggf. im Innern an den Ofenwänden kondensierte PAH zu entfernen.

Eingesetztes Material

Das zu untersuchende Material wird als Dämpfungsfolien in die Fahrzeuge der Baureihe 221/C216 eingebaut. Es handelt sich dabei um eine Hotmelt-Leichtfolie mit der Spezifikation 115.1. Dieses Material wurde von der Firma AKsys zur Verfügung gestellt. Pro Messung wurden 1,6 m² dieser Folien in den Wärmeofen auf 8 Schichten verteilt eingebracht.

Untersuchte PAH

In die Untersuchung einbezogen wurden insgesamt folgende 20 PAH:

Naphthalin
1-Benzothiophen
Accenaphthylen
Acenaphthen
Fluoren
Dibenzothiophen
Phenanthren
Anthracen
Fluoranthen
Pyren
Benzo[b]naphthol[2,1-d]thiophen
Benz[a]anthracen
Chrysen

Benzo[b]fluoranthen
Benzo[k]fluoranthen
Benzo[e]pyren
Benzo[a]pyren
Indenol[1,2,3-cd]pyren
Dibenz[a,h]anthracen
Benzo[g,h,i]perylen

Davon sind Naphthalin und Benzo[a]pyren in der MAK-Werte Liste als krebserzeugend der kategorie 2 eingestuft. Der TRK-Wert von Naphthalin beträgt derzeit 50 mg/m³ und der des Benzo[a]pyrens 2 µg/m³.

Ergebnisse der Emissionsmessungen und Materialuntersuchungen

Prüfablauf 1

In den Emissionsprobenahmen 1 - 4 sollte der simulierte Ablauf im Rohbau- und KTL-Ofen nachgestellt werden. In der Abb. 3 sind zunächst die Mittelwerte der Konzentrationen sowohl der mit dem BIA-Sammelsystem als auch der bei Kühlung des Systems erfassten PAH dargestellt. Auffällig ist zunächst, dass in diesem, aber auch in den anderen Prüfabläufen die Komponenten Dibenzothiophen, Phenanthren sowie Anthracen nicht nachweisbar waren, da möglicherweise nicht auf Bitumenbasis emittierte Störkomponenten aus den Schmelzfolien eine eindeutige Auswertung besagter Komponenten nicht zuließen. Deutliche Unterschiede in den PAH-Emissionen resultieren im Prüfablauf 1 bei dem Temperatursprung von 125°C auf 190°C. Ein vergleichbares Emissionsprofil liegt bei Naphthalin vor, s. Abb. 3a. Infolge des wesentlich höheren Schmelzpunktes von Benzo[a]pyren treten bei dieser Komponente keine signifikanten Abweichungen an den beiden Sammelphasen auf, s. Abb. 3b. Den Tab. 1 - 4 (entsprechend den Emissionsprobenahmen 1 - 4) sind die Einzelwerte der gemessenen PAH-Konzentrationen dieser 4 Versuchsreihen zu entnehmen. Angegeben sind weiterhin die an den beiden Sammelsystemen resultierenden Mittelwerte. Erwartungsgemäß lagen die PAH Dibenz[a,h]anthracen und Benzo[g,h,i]perylen infolge ihrer vergleichsweise wenig ausgeprägten Flüchtigkeit in allen Messreihen unter der Nachweisgrenze des Analysenverfahrens. Indeno[1,2,3-cd]pyren konnte nur bei den beiden bei max. 190°C durchgeführten Messreihen nachgewiesen werden.

Prüfablauf 2

Der Prüfablauf 2 sollte Hinweise zum Verlauf der Emissionen im Rohbauofen erbringen. Dabei war die Frage zu beantworten, ob es bei gleichbleibender Temperatur von 125°C zeitabhängig zu einem exponentiellen oder linearen Anstieg der PAH-Emissionen kommt. Die Emissionsprobenahmen 5 – 8 sollten hierüber Auskunft geben. Zur Komplettierung dieser Messreihen wurde zusätzlich die 1. Emissionsprobenahme als Ausgangsbasis hinzugenommen. Die Abb. 4 sowie 4a u. 4b zeigen die Emissionsprofile der PAH-Gesamtkonzentration und ferner die von Naphthalin und Benzo[a]pyren. Die einzelnen Messergebnisse der PAH-Konzentrationen der Emissionsprobenahmen 1 bzw. 5 – 8 sind den Tab. 1 bzw. 5 – 8 aufgelistet.

Prüfablauf 3

Der Prüfablauf 3 sollte Hinweise zum Verlauf der Emissionen im KTL-Ofen erbringen. Analog dem Prüfablauf 2 stand hier ebenfalls die Frage eines linearen oder exponentiellen Emissionsverlaufs im Vordergrund. Ausgehend von der in der 3. Emissionsprobenahme vorgegebenen Versuchsanordnung wurden die PAH-Emissionen bei gleichbleibender Temperatur von 190°C über Zeitspannen von max. 240 min messtechnisch erfasst. In den Abb. 5, 5a und 5b ist jeweils die in den einzelnen Emissionsprobenahmen 3, 9, 10 und 11 gemessene mittlere PAH-Gesamtkonzentration, die von Naphthalin sowie von Benzo[a]pyren einander gegenübergestellt. Die entsprechenden PAH-Einzelwerte sind den Tab. 3, 9, 10 und 11 zu entnehmen. Das hinsichtlich der Kanzerogenität dem Benz[a]pyren vergleichbare wenn nicht sogar noch stärkere wirksame Dibenz[a,h]anthracen sowie das Benzo[g,h,i]perylen konnten in keiner Emissionsprobenahme nachgewiesen werden. Da die während der 100- bzw. 240-minütigen Probenahmedauer gemessenen PAH-Verluste mittels des BIA-Systems gravierend waren, wurden in diesen beiden Fällen nur die mit dem Kühlsystem erhaltenen Ergebnisse berücksichtigt.

Materialuntersuchung

Tab. 12 enthält die Massenanteile der in den Hotmelt-Leichtfolien 115.1 der Fa. Aksys bestimmten PAH. Bei einem durchschnittlichen Gesamtgewicht von 3,95 kg/m² enthält

danach 1 m² Folie ca. 68 mg der analysierten PAH. Davon entfallen auf Naphthalin ca. 7,7 mg und auf Benzo[a]pyren 0,72 mg.

Schlussfolgerungen

Aus messtechnisch-analytischer Sicht war das Probenahmeverfahren für PAH den hier vorgegebenen Bedingungen der Versuchsdurchführung anzupassen, da anderenfalls mit dem herkömmlichen Sammelsystemen (BIA) deutlich geringere PAH-Konzentrationen gemessen werden. Die Interpretation der Werte orientiert sich daher ausnahmslos an den Resultaten, die an dem mit Kühlung versehenen Sammelsystem erhalten wurden.

Die Ergebnisse lassen folgende Rückschlüsse zu:

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei den vorgegebenen Temperaturprofilen bereits ab 125°C PAH emittiert werden. Nachgewiesen werden konnte u. a. das in der MAK-Werte-Liste als im Tierexperiment krebserzeugend eingestufte Naphthalin und Benzo[a]pyren. Dabei haben Temperierungszeiten von 25 bis 100 min keinen wesentlichen Einfluss auf die Höhe dieser Konzentrationen. Demgegenüber können gesteigerte PAH-Emissionen bei 240 min festgestellt werden, die vorwiegend durch die vergleichsweise leichter flüchtigen PAH –insbesondere Naphthalin- hervorgerufen werden. Bedingt durch die wenig ausgeprägte Flüchtigkeit der mehrkernigen polycyclischen Aromaten, so auch Benzo[a]pyren, lassen sich diese nicht oder nur im Bereich der Nachweisgrenze bestimmen.

Wie erwartet ändert der Temperatursprung von 125°C auf 190°C und einer Temperierungszeit von nur 25 min das PAH-Emissionsverhalten deutlich. So resultiert beispielsweise eine um ca. 170% gesteigerte Konzentration der aufsummierten PAH. Der in der anschließenden Abkühlphase auf 40°C beobachtete weitere Konzentrationsanstieg ist auf die relativ langsame Abkühlzeit des Ofens mit einer weiteren, abklingenden PAH-Emission zurückzuführen.

Die zur Überprüfung des zeitabhängigen Emissions-Verlaufs bei konstanter Temperatur von 125°C durchgeführten Messungen zeigen im Fall der PAH-Gesamtemission bzw. des Naphthalins eine lineare Abhängigkeit mit einem Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,9937 bzw. 0,9968, s. Abb. 6. Die Benzo[a]pyren-Emissionen folgen dieser Linearität insofern nicht, da bei der o. g. Temperatur die Verdampfungstendenz dieser Komponente unbedeutend ist, und die gemessenen Konzentrationen starken Schwankungen unterworfen und eher dem oberen Bereich der Nachweisgrenze zuzuordnen sind.

Einen vergleichbaren linearen Verlauf mit jedoch wesentlich höheren Emissionen zeigen die konstant bei max. 190°C vorgenommenen Emissionsversuche, s. Prüfablauf 3. Auch in diesem Prüfablauf ist eine strenge Linearität der emittierten PAH-Komponenten von der Temperierungszeit festzustellen, die in diesem Fall auch Benzo[a]pyren einschließt, s. Abb. 7.

Die ermittelten Linearitäten erlauben es daher, die -bei von beiden Prüfabläufen abweichenden Probenahmezeiten- resultierenden PAH-Emissionen bzw. Konzentrationen durch Extrapolation zu bestimmen.

Zur Abschätzung eines krebserzeugenden Risikos durch die in den Emissionen auftretenden PAH, namentlich Naphthalin und Benzo[a]pyren, wird die Emissionsprobenahme mit dem höchsten PAH-Konzentrationen zugrunde gelegt. Dies trifft zu für die Emissionsprobenahme 11 des Prüfablaufs 3. Danach beträgt die über eine bei 190°C und einer Probenahmezeit von 240 min gemittelte Naphthalin-Konzentration ca. 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Praxisorientiert unterschreitet dieser Wert den TRK-Wert von Naphthalin von 50 mg/m^3 um etwa den Faktor 925. Die entsprechende Benzo[a]pyren-Konzentration liegt bei 164 ng/m^3 und unterschreitet den TRK-Wert von 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ um etwa den Faktor 12. Zum Vergleich werden ubiquitäre Hintergrundbelastungen je nach Region und Jahreszeit im Bereich von 0,1 – 333 ng/m^3 angegeben. In Zigarettenrauch belasteter Umwelt wurden Benzo[a]pyren-Konzentrationen zwischen 2,8 und 760 ng/m^3 ermittelt.

Prüfablauf 1 (Simulierter Ablauf im Rohbau- und KTL-Ofen):

1. Emissionsprobenahme

Matte A wird bei Raumtemperatur (RT) in den Ofen gelegt und mit einer maximalen Temperaturrate auf 125°C aufgeheizt (Zeit W Minuten). Anschließend wird 25 Minuten die Matte A bei 125 °C temperiert.

Die Emissionsprobenahme dauert $W + 25$ Minuten.

2. Emissionsprobenahme

Matte B wird bei RT in den Ofen gelegt und weiter wie mit Matte A verfahren. Anschließend wird auf 70 °C abgekühlt (Zeit X Minuten) und 10 Minuten bei 70 °C belassen.

Die Emissionsprobenahme dauert daher $W + 25$ Minuten + X + 10 Minuten.

3. Emissionsprobenahme

Matte C wird bei RT in den Ofen gelegt und weiter wie mit Matte B verfahren. Anschließend wird auf 190°C aufgeheizt (Zeit Y Minuten) und 25 Minuten bei 190°C belassen.

Die Emissionsprobenahme dauert daher $W + 25$ Minuten + X + 10 Minuten + Y + 25 Minuten.

4. Emissionsprobenahme

Matte D wird bei RT in den Ofen gelegt und weiter wie mit Matte C verfahren. Anschließend wird auf 40°C abgekühlt (Zeit Z Minuten) und 10 Minuten bei 40°C belassen.

Die Emissionsprobenahme dauert daher $W + 25$ Minuten + X + 10 Minuten + Y + 25 Minuten + Z + 10 Minuten.

Prüfablauf 2 (Verlauf der Emissionen im Rohbau-Ofen):

5. Emissionsprobenahme

Matte E wird bei RT in den Ofen gelegt und mit einer maximalen Temperaturrate auf 125°C aufgeheizt (Zeit W Minuten). Anschließend wird 50 Minuten die Matte E bei 125 °C temperiert.

Die Emissionsprobenahme dauert $W + 50$ Minuten.

6. Emissionsprobenahme

Matte F wird bei RT in den Ofen gelegt und mit einer maximalen Temperaturrate auf 125°C aufgeheizt (Zeit W Minuten). Anschließend wird 75 Minuten die Matte F bei 125 °C temperiert.

Die Emissionsprobenahme dauert $W + 75$ Minuten.

7. Emissionsprobenahme

Matte G wird bei RT in den Ofen gelegt und mit einer maximalen Temperaturrate auf 125°C aufgeheizt (Zeit W Minuten). Anschließend wird 100 Minuten die Matte G bei 125 °C temperiert.

Die Emissionsprobenahme dauert $W + 100$ Minuten.

8. Emissionsprobenahme

Matte H wird bei RT in den Ofen gelegt und mit einer maximalen Temperaturrate auf 125°C aufgeheizt (Zeit W Minuten). Anschließend wird 240 Minuten die Matte H bei 125 °C temperiert.

Die Emissionsprobenahme dauert $W + 240$ Minuten.

Prüfablauf 3 (Verlauf der Emissionen im KTL-Ofen):

9. Emissionsprobenahme

Matte I wird bei RT in den Ofen gelegt und weiter wie mit Matte B verfahren (hochheizen auf 125°C, 25 Minuten bei 125°C, abkühlen auf 70°C, 10 Minuten bei 70°C). Anschließend wird auf 190°C aufgeheizt (Zeit Y Minuten) und 50 Minuten bei 190°C belassen.

Die Emissionsprobenahme dauert daher $W + 25$ Minuten + $X + 10$ Minuten + $Y + 50$ Minuten.

10. Emissionsprobenahme

Matte J wird bei RT in den Ofen gelegt und weiter wie mit Matte B verfahren (hochheizen auf 125°C, 25 Minuten bei 125°C, abkühlen auf 70°C, 10 Minuten bei 70°C). Anschließend wird auf 190°C aufgeheizt (Zeit Y Minuten) und 100 Minuten bei 190°C belassen.

Die Emissionsprobenahme dauert daher $W + 25$ Minuten + $X + 10$ Minuten + $Y + 100$ Minuten.

11. Emissionsprobenahme

Matte K wird bei RT in den Ofen gelegt und weiter wie mit Matte B verfahren (hochheizen auf 125°C, 25 Minuten bei 125°C, abkühlen auf 70°C, 10 Minuten bei 70°C). Anschließend wird auf 190°C aufgeheizt (Zeit Y Minuten) und 240 Minuten bei 190°C belassen.

Die Emissionsprobenahme dauert daher $W + 25$ Minuten + $X + 10$ Minuten + $Y + 240$ Minuten.



Abb. 1: Wärmetrockschrank mit schichtweise eingelegten Dämpfungsfolien.

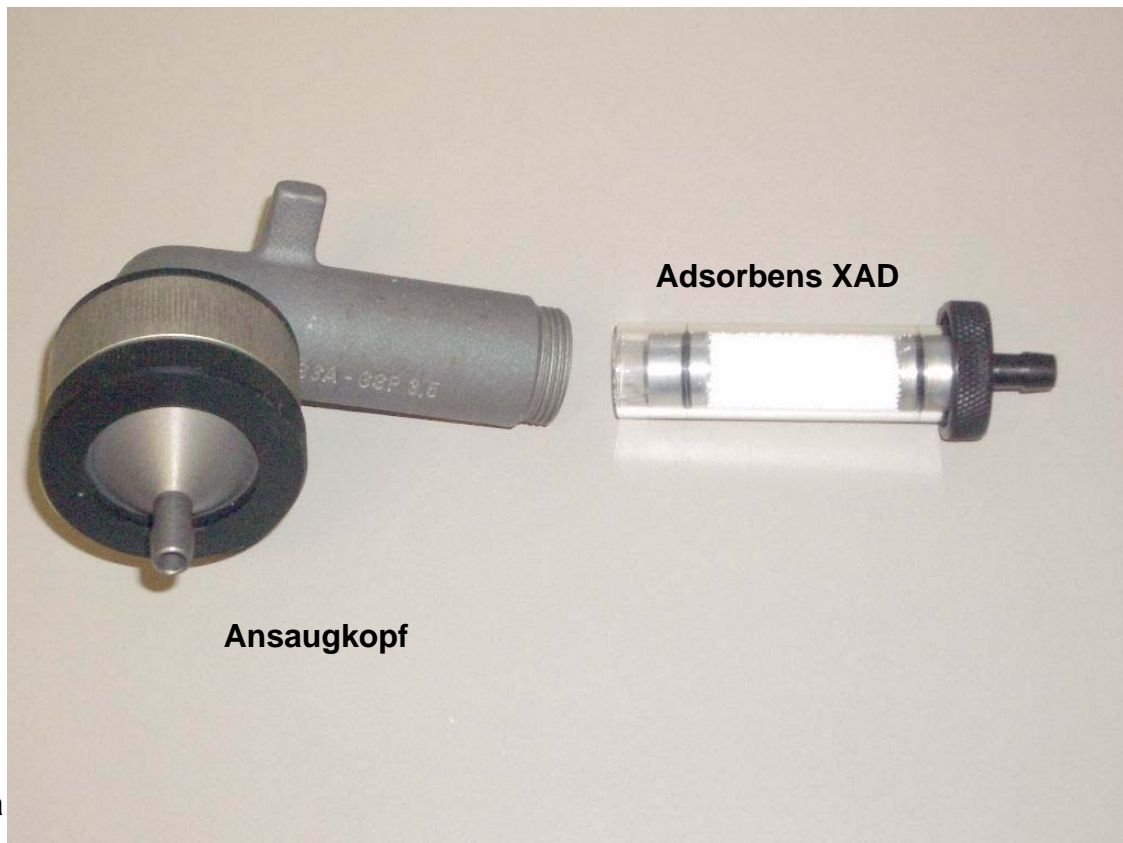


Abb. 2a



Abb. 2b

Abb. 2a u. b.: Für die Emissionsmessungen benutzt PAH-Sammelsysteme nach BIA, s. Abb. 2a und modifiziert zur Kühlung der heißen PAH-Emissionen, s. Abb. 2b.

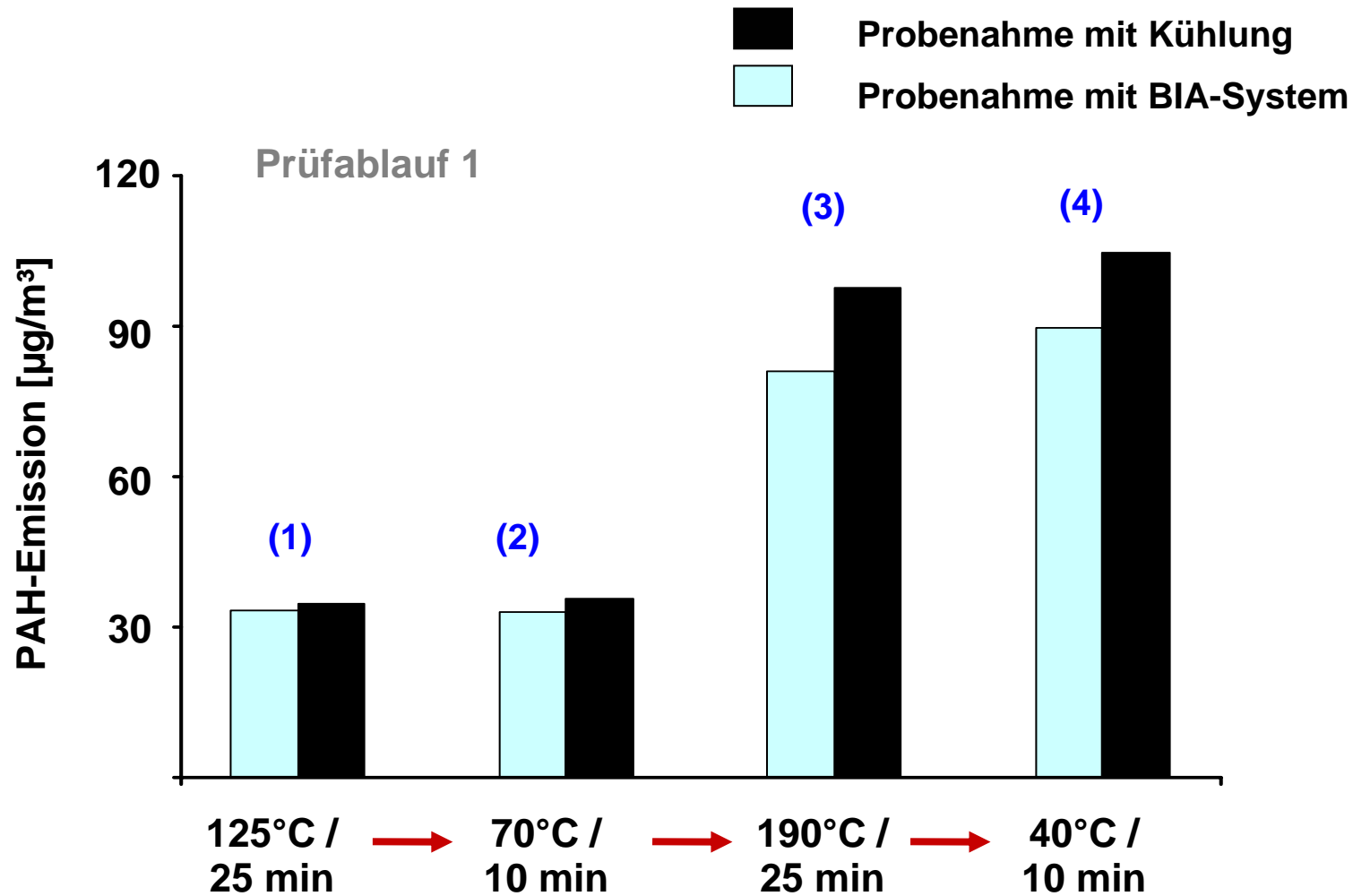


Abb. 3: PAH-Emissionen nach dem im Prüfablauf 1 vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm. Die in Parenthese stehenden Zahlen geben (sowie in allen folgenden Abb.) die jeweiligen Emissionsprobenahmen an.

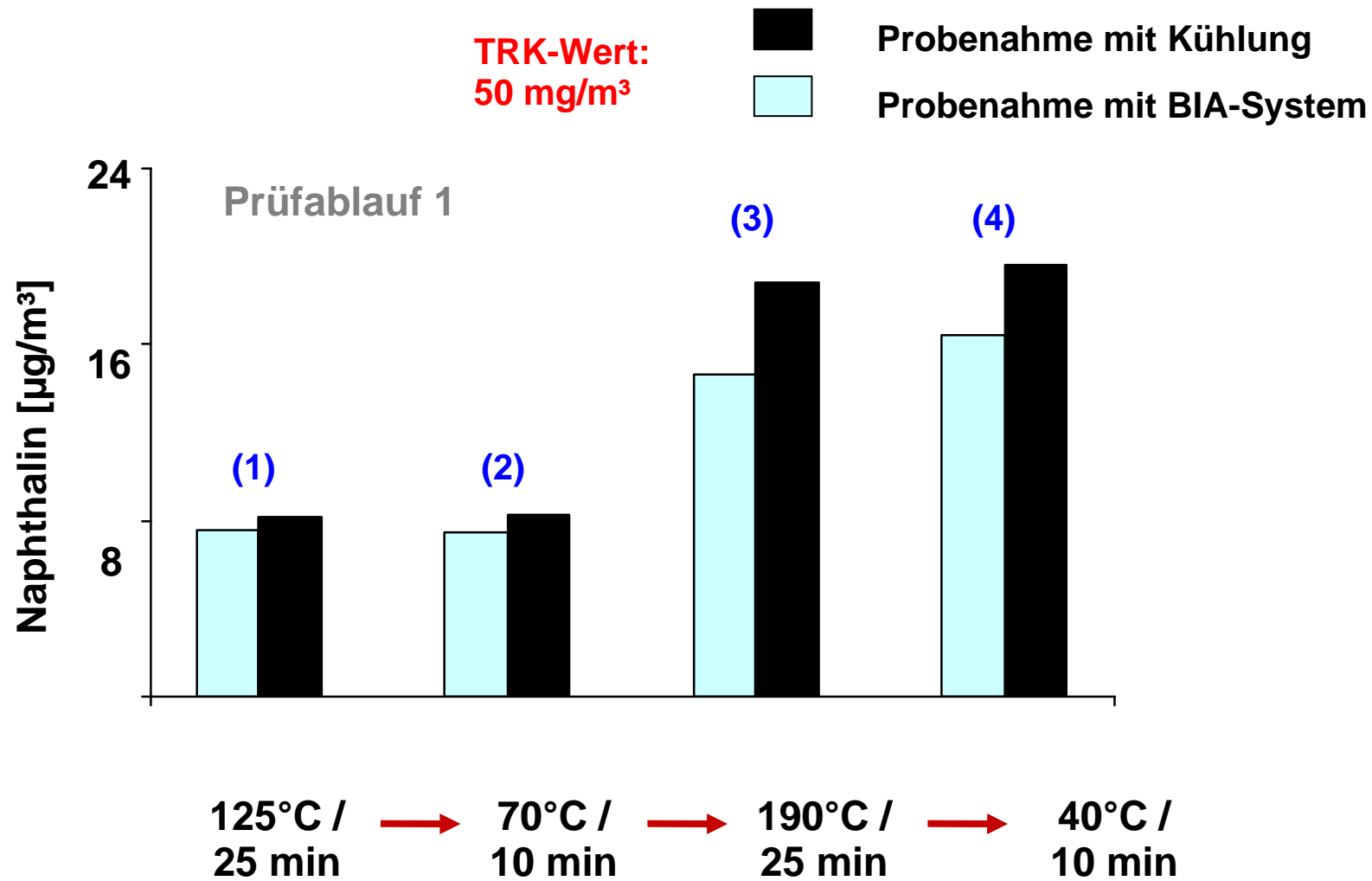


Abb. 3a: Naphthalin-Emissionen nach dem im Prüfablauf 1 vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

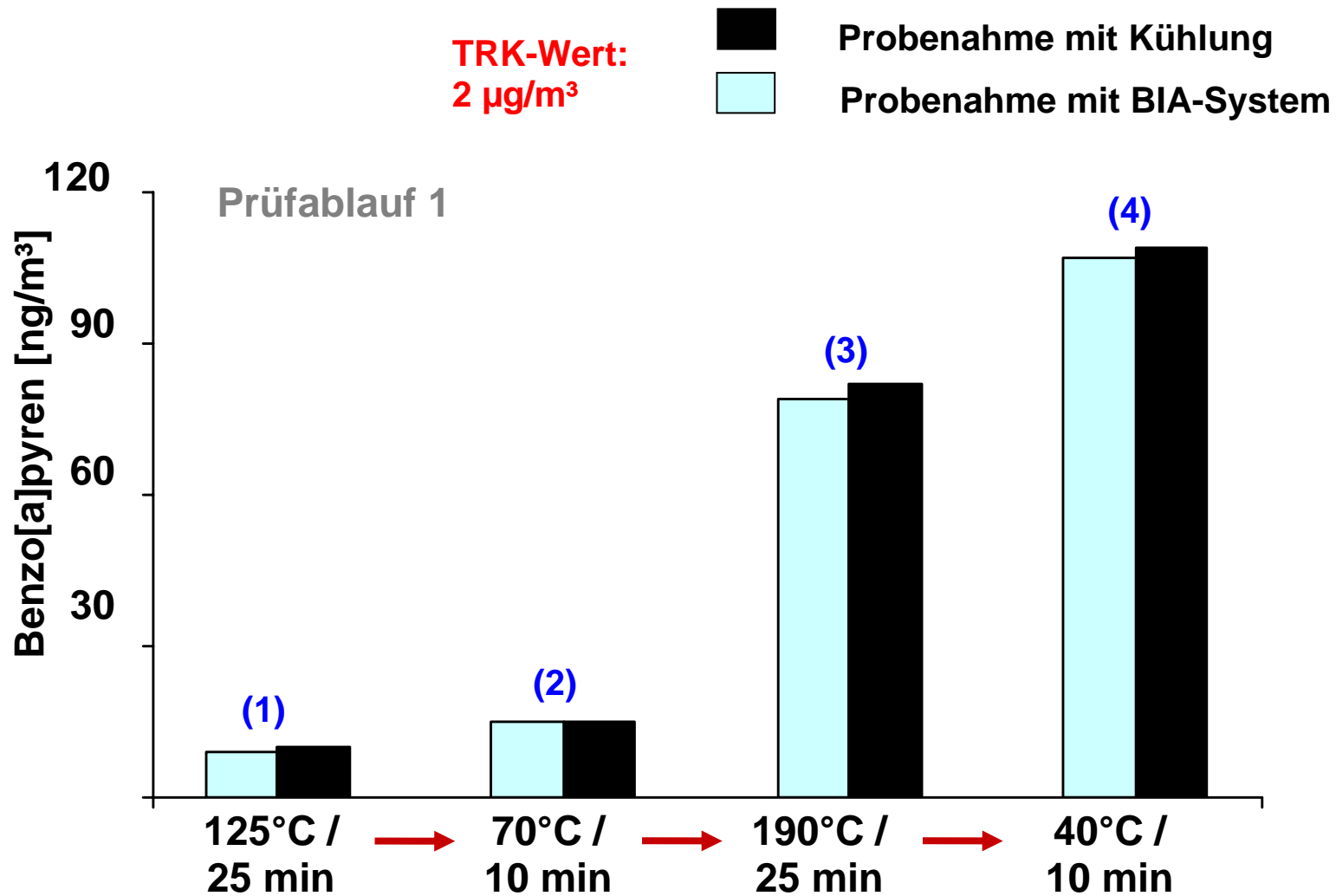


Abb. 3b: Benzo[a]pyren-Emissionen nach dem im Prüfablauf 1 vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

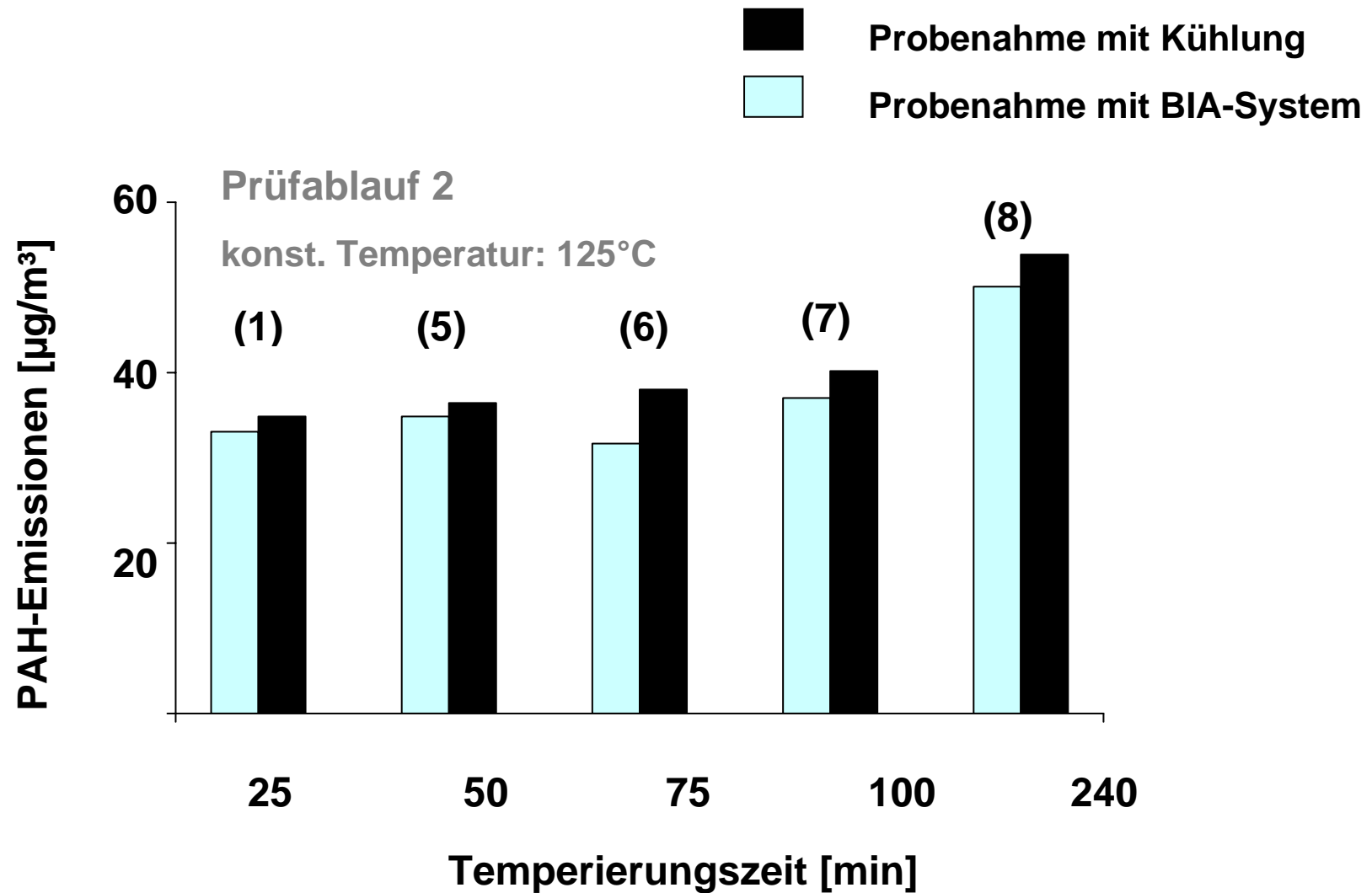


Abb. 4: PAH-Emissionen nach im Prüfablauf 2 und zusätzlich in der 1. Emissionsprobenahme vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

**TRK-Wert:
50 mg/m³**

■ Probenahme mit Kühlung
□ Probenahme mit BIA-System

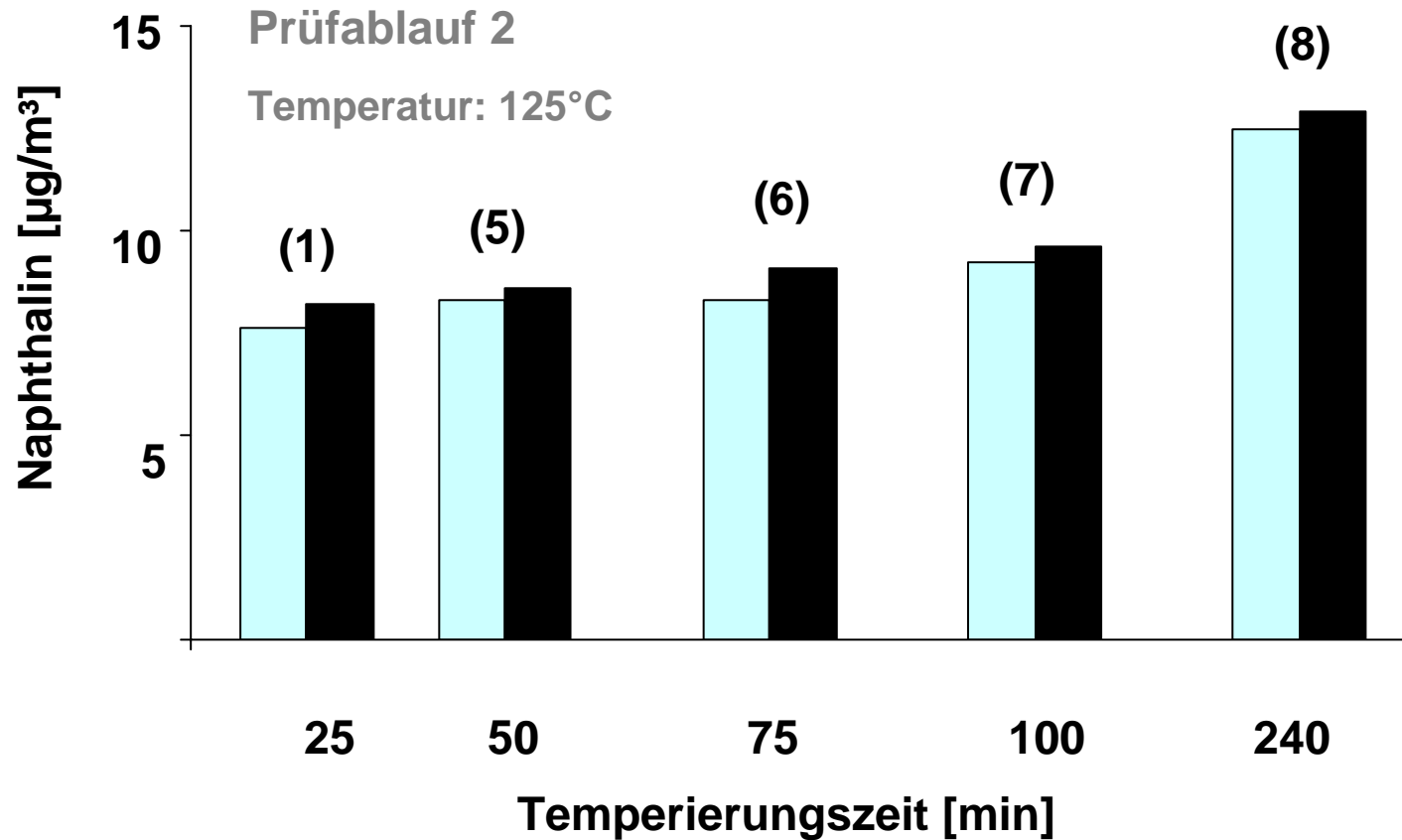


Abb. 4a: Naphthalin-Emissionen nach im Prüfablauf 2 und zusätzlich in der 1.Emissionsprobenahme vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

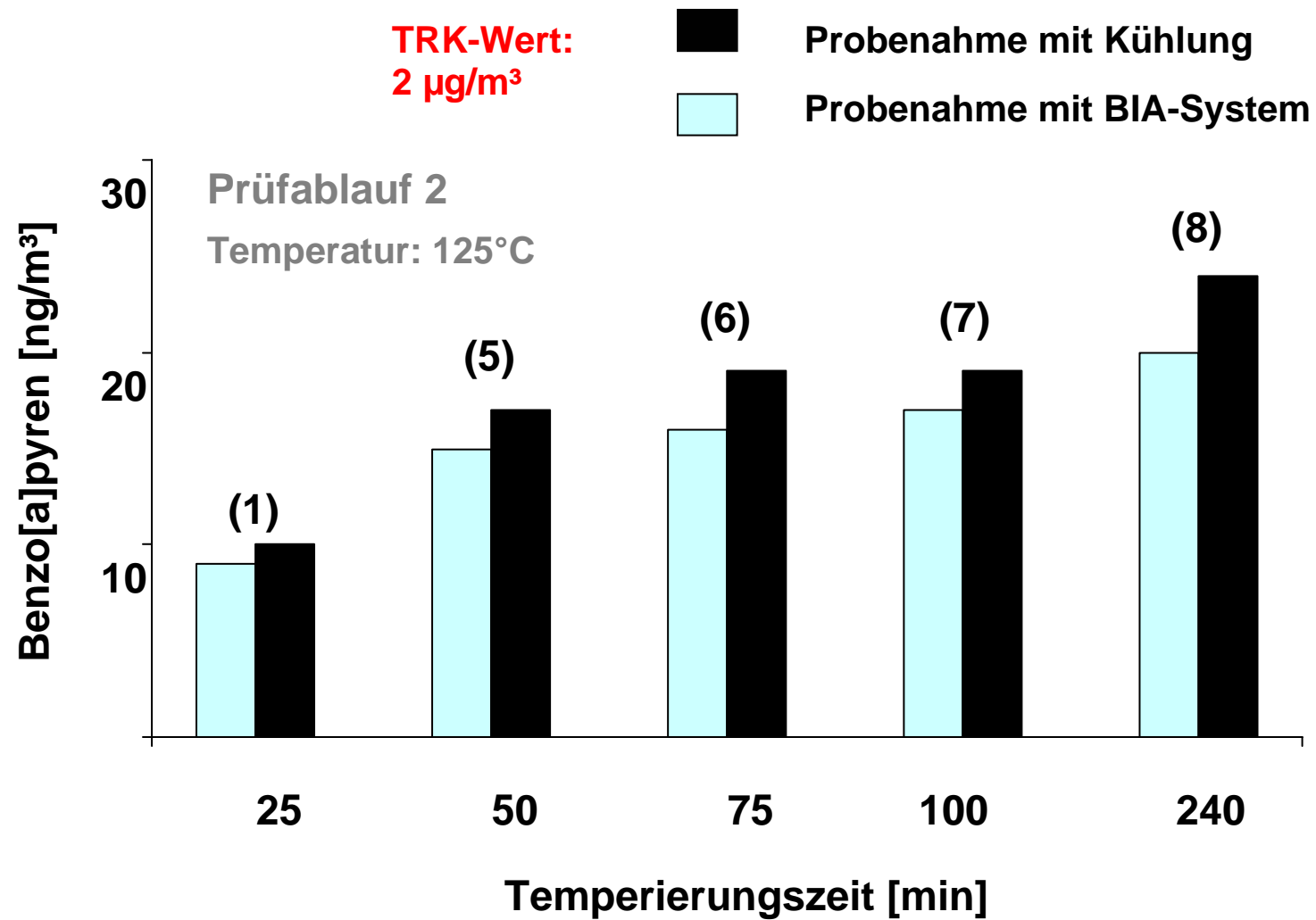


Abb. 4b: Benzo[a]pyren-Emissionen nach im Prüfablauf 2 und zusätzlich in der 1.Emissionsprobenahme vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

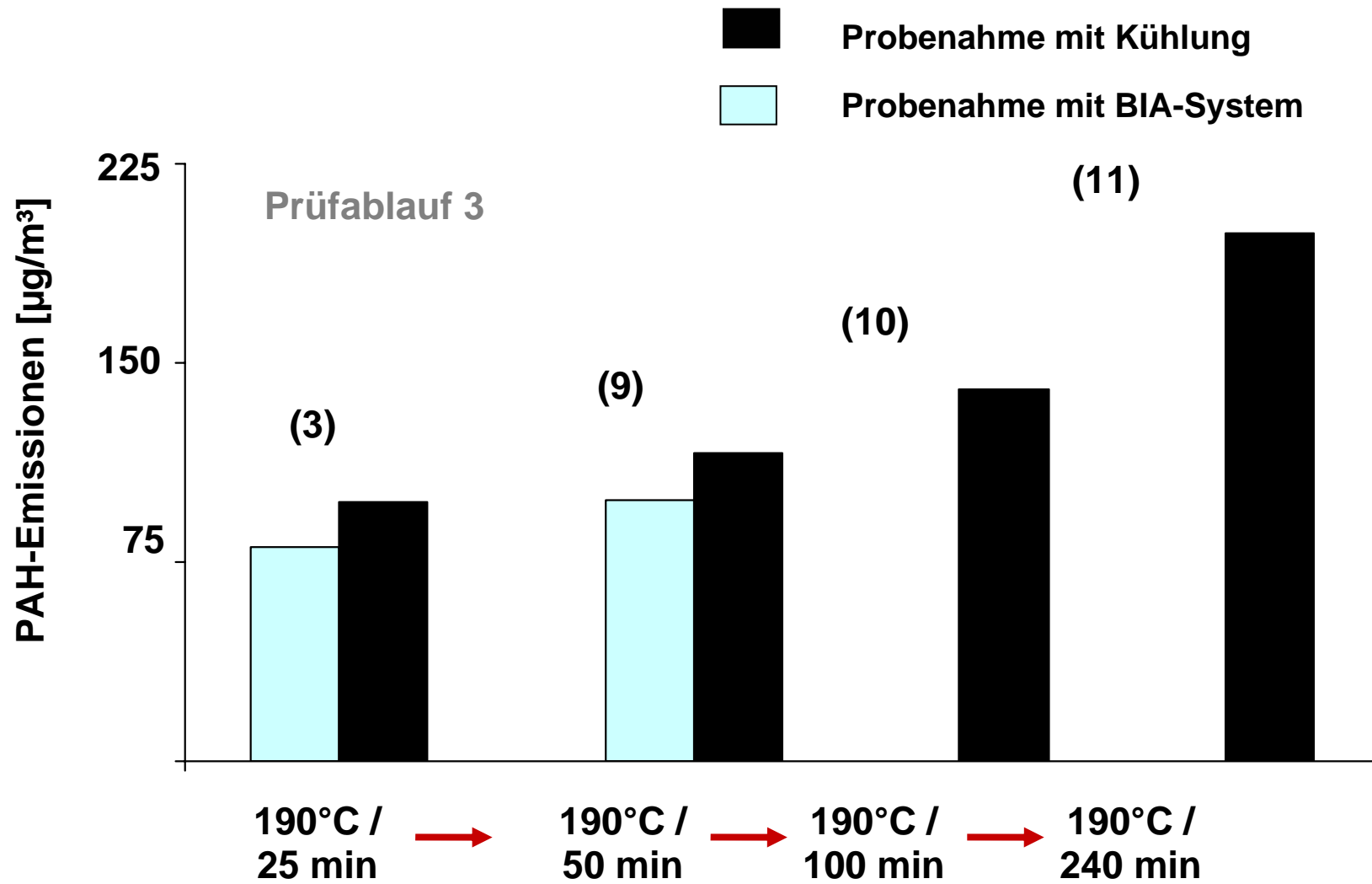


Abb. 5: PAH-Emissionen nach im Prüfablauf 3 und zusätzlich in der 3.Emissionsprobenahme vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

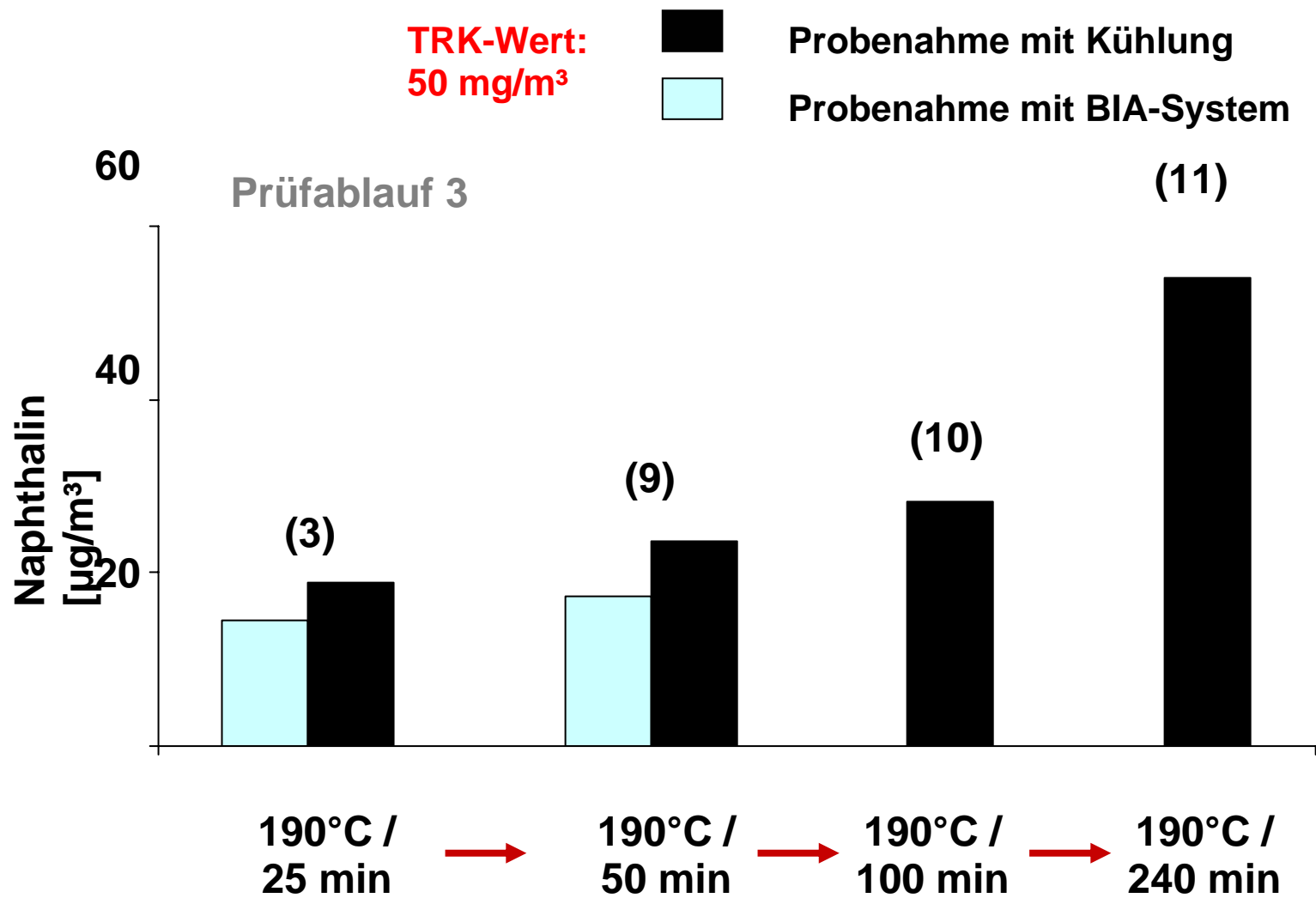


Abb. 5a: Naphthalin-Emissionen nach im Prüfablauf 3 und zusätzlich in der 3.Emissionsprobenahme vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

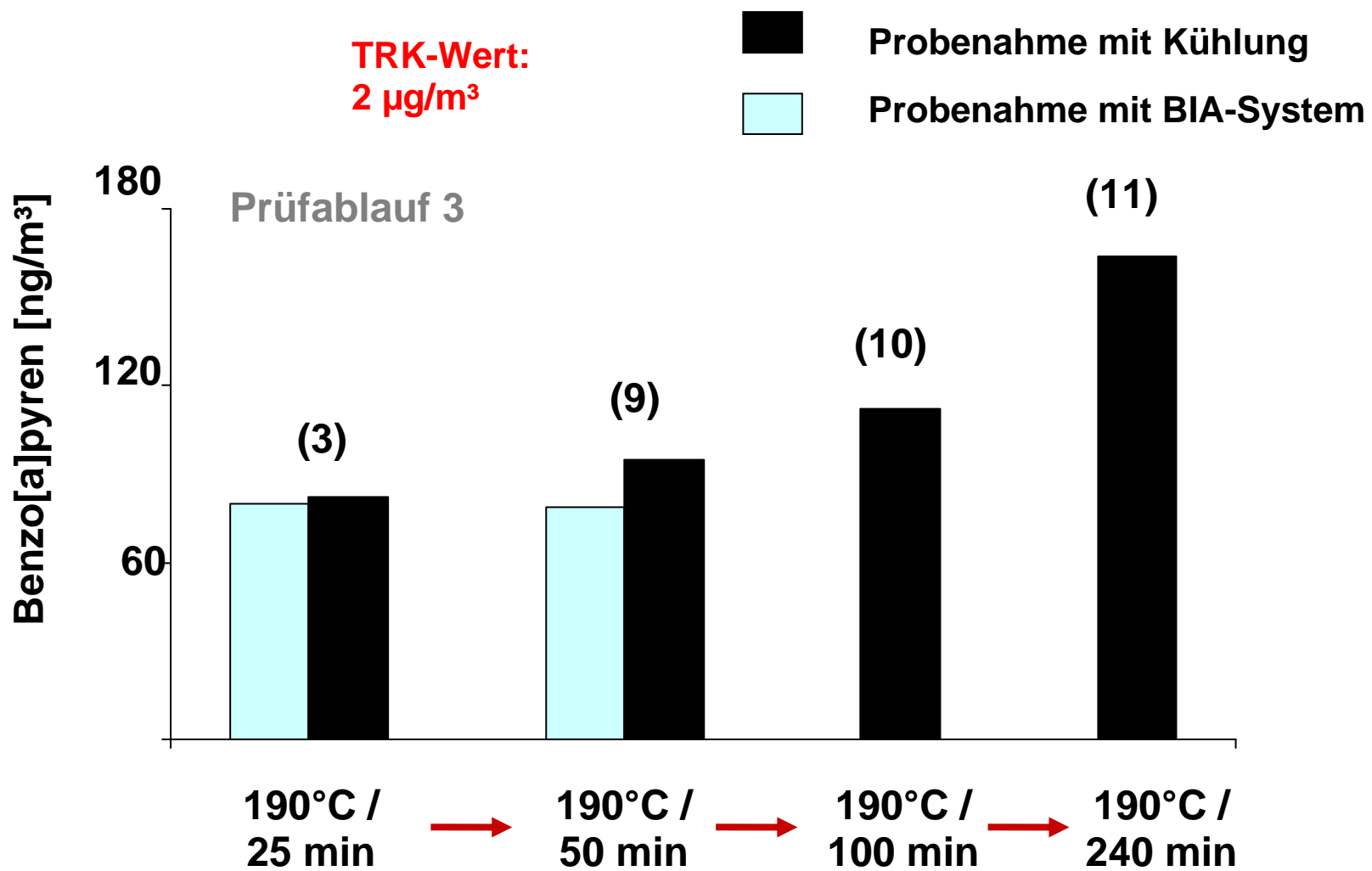


Abb. 5b: Benzo[a]pyren-Emissionen nach im Prüfablauf 3 und zusätzlich in der 3.Emissionsprobenahme vorgegebenen Temperatur- und Zeitprogramm.

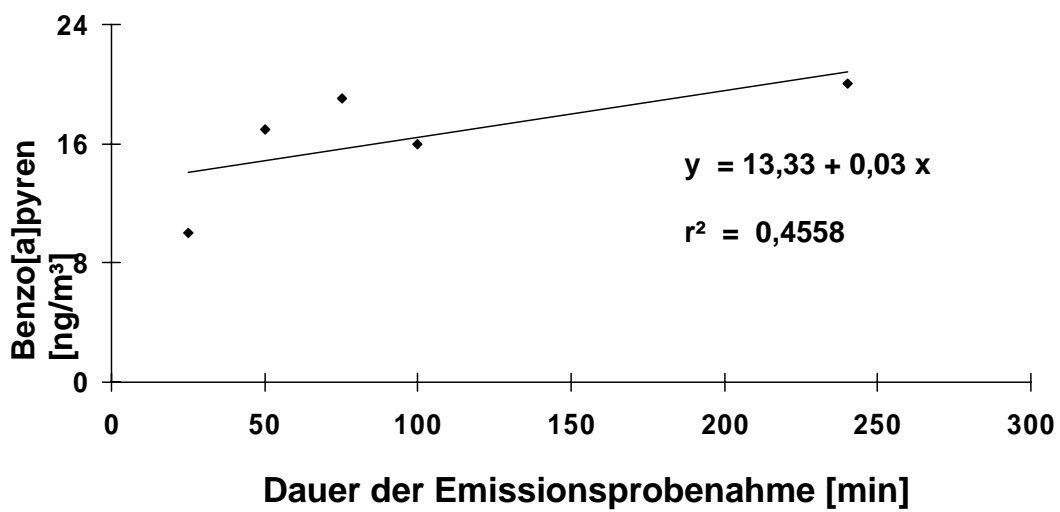
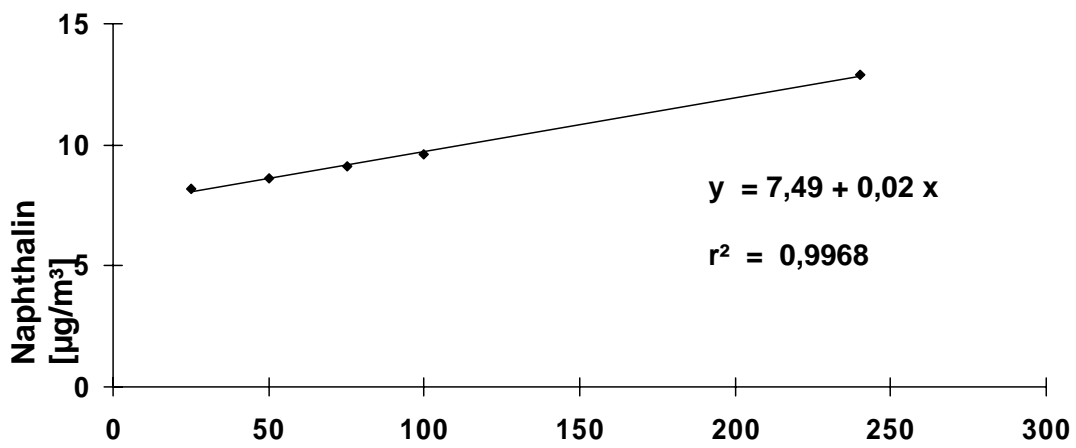
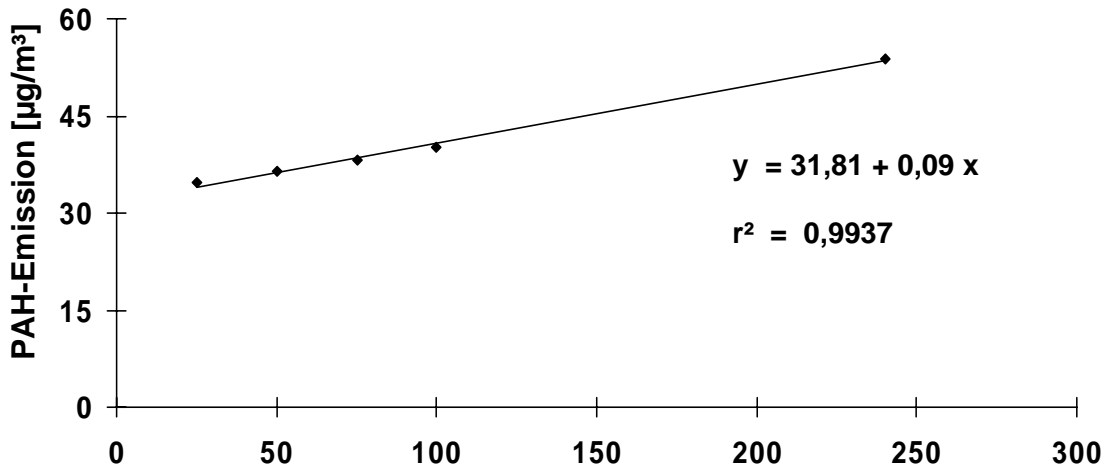


Abb. 6: Zeitabhängiger Verlauf der PAH-Emissionen der Probenahmen 1 und 5 - 8 (Prüfablauf 2) bei konstanter Ofentemperatur von 125°C

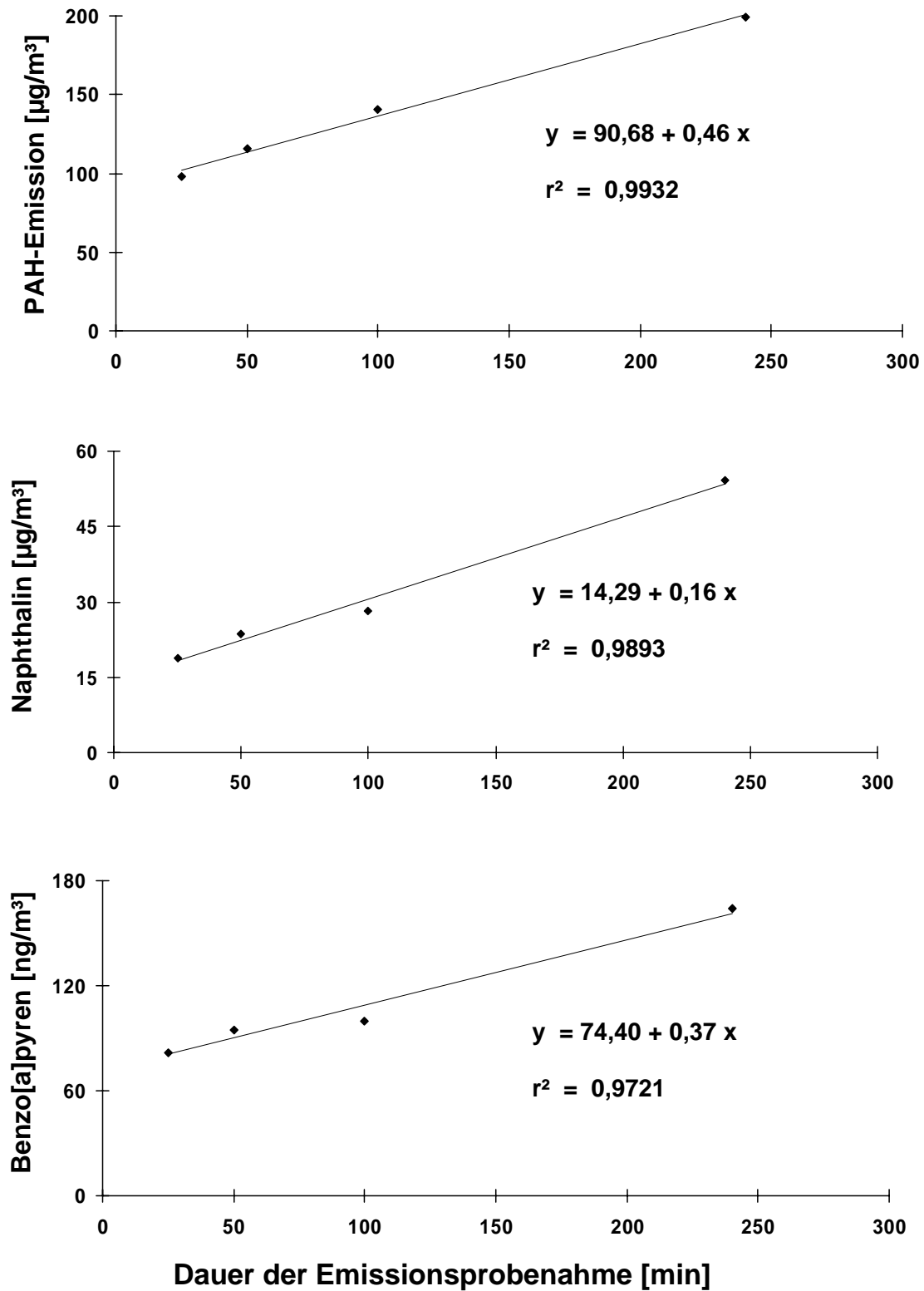


Abb. 7: Zeitabhängiger Verlauf der PAH-Emissionen der Probenahmen 3 und 9 - 11 (Prüfablauf 3) bei konstanter Ofentemperatur von 190°C

Tab. 1: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 1. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

1. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung			
	BIA	Kühler	BIA	Kühler	Kühler	BIA
Naphthalin	7464	8155	7827	8273	8214	7646
1-Benzothiophen	5291	5546	5646	5864	5705	5468
Acenaphthylen	1273	1409	1364	1482	1445	1318
Acenaphthen	3109	3291	3036	3209	3250	3073
Fluoren	7136	7309	7264	7464	7386	7200
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	5100	5218	5355	5446	5332	5227
Pyren	1718	1864	1809	1918	1891	1764
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	754	900	864	955	927	809
Benz[a]anthracen	73	91	56	100	95	65
Chrysen	536	573	445	491	532	491
Benzo[b]fluoranthen	15	18	18	18	18	17
Benzo[k]fluoranthen	9	9	9	9	9	9
Benzo[e]pyren	14	18	16	27	23	15
Benzo[a]pyren	10	10	7	9	10	9
Indeno[1,2,3-cd]pyren	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	32504	34411	33715	35264	34837	33109

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 2: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 2. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

2. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung		Kühler	BIA
	BIA	Kühler	BIA	Kühler		
Naphthalin	7459	8952	7504	7641	8296	7481
1-Benzothiophen	5541	5844	5640	5632	5738	5590
Acenaphthylen	1213	1387	1380	1584	1486	1296
Acenaphthen	3191	3366	3153	3297	3331	3172
Fluoren	7156	7398	7292	7497	7447	7224
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthren	5298	5473	5450	5647	5560	5374
Pyren	1759	1827	1933	2107	1967	1846
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	910	993	993	1076	1035	951
Benz[a]anthracen	76	91	83	121	106	80
Chrysen	523	629	447	531	580	485
Benzo[b]fluoranthren	18	15	23	23	19	20
Benzo[k]fluoranthren	7	15	5	6	10	6
Benzo[e]pyren	18	23	23	23	23	20
Benzo[a]pyren	15	15	15	15	15	15
Indeno[1,2,3-cd]pyren	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	33183	36027	33941	35200	35614	33562

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 3: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 3. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

3. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung		Kühler	BIA
	BIA	Kühler	BIA	Kühler		
Naphthalin	14884	18596	14218	19017	18806	14551
1-Benzothiophen	6982	10736	7253	11153	10944	7118
Acenaphthylen	5338	5762	5253	6164	5963	5295
Acenaphthen	5539	6979	6208	7559	7269	5873
Fluoren	15163	16829	15289	17190	17010	15226
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	14430	16074	13518	14925	15499	13974
Pyren	8723	10252	8921	10583	10418	8822
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	6432	7433	6331	7459	7446	6382
Benz[a]anthracen	580	774	696	878	826	638
Chrysen	2608	3008	2928	3301	3155	2768
Benzo[b]fluoranthen	123	182	115	201	192	119
Benzo[k]fluoranthen	19	105	36	113	109	28
Benzo[e]pyren	82	104	104	115	110	93
Benzo[a]pyren	78	78	82	86	82	80
Indeno[1,2,3-cd]pyren	9	11	4	7	9	6
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	80990	96924	80952	98750	97837	80971

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 4: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 4. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

4. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung			
	BIA	Kühler	BIA	Kühler	Kühler	BIA
Naphthalin	15259	18576	17540	20552	19564	16400
1-Benzothiophen	8355	11491	9155	11931	11711	8755
Acenaphthylen	4275	5967	5609	6907	6437	4942
Acenaphthen	6400	7922	6988	8143	8033	6694
Fluoren	15528	17603	16182	17886	17744	15855
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	14886	15883	14958	16319	16101	14922
Pyren	9621	11627	10907	12074	11850	10264
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	6931	7725	6964	7764	7745	6948
Benz[a]anthracen	722	893	746	931	912	734
Chrysen	3579	3794	3582	3848	3821	3581
Benzo[b]fluoranthen	203	209	218	227	218	210
Benzo[k]fluoranthen	119	146	131	152	149	125
Benzo[e]pyren	278	313	301	334	324	290
Benzo[a]pyren	107	107	107	110	109	107
Indeno[1,2,3-cd]pyren	9	9	9	12	10	9
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	86272	102264	93398	107191	104728	89835

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 5: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 5. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

5. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung			
	BIA	Kühler	BIA	Kühler	Kühler	BIA
Naphthalin	8019	8250	8646	8890	8570	8333
1-Benzothiophen	5549	5754	5715	5894	5824	5632
Acenaphthylen	1350	1485	1414	1562	1523	1382
Acenaphthen	3206	3418	3130	3347	3382	3168
Fluoren	7373	7571	7546	7699	7635	7459
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	5254	5562	5542	5766	5664	5398
Pyren	1839	1926	1952	2125	2026	1896
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	979	1146	934	1050	1098	957
Benz[a]anthracen	71	109	66	115	112	69
Chrysen	531	634	480	570	602	506
Benzo[b]fluoranthen	19	19	19	26	22	19
Benzo[k]fluoranthen	13	13	13	13	13	13
Benzo[e]pyren	24	26	20	26	26	22
Benzo[a]pyren	14	16	15	17	17	15
Indeno[1,2,3-cd]pyren	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	34242	35927	35491	37100	36514	34866

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 6: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 6. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

6. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung		Kühler	BIA
	BIA	Kühler	BIA	Kühler		
Naphthalin	8563	8915	9044	9363	9139	8804
1-Benzothiophen	5707	5964	5764	6136	6050	5736
Acenaphthylen	1471	1623	1537	1695	1659	1504
Acenaphthen	3327	3480	3441	3575	3527	3384
Fluoren	7564	7773	7673	7830	7802	7618
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthren	5241	5802	5555	5812	5807	5398
Pyren	1771	1956	1956	2194	2075	1864
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	952	1209	890	1157	1183	921
Benz[a]anthracen	81	135	95	137	136	88
Chrysen	514	633	528	676	655	521
Benzo[b]fluoranthren	29	24	19	25	24	24
Benzo[k]fluoranthren	10	19	11	14	17	10
Benzo[e]pyren	19	24	24	29	26	21
Benzo[a]pyren	14	19	14	19	19	14
Indeno[1,2,3-cd]pyren	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	26700	37577	36553	38661	38119	31627

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 7: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 7. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

7. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung		Kühler	BIA
	BIA	Kühler	BIA	Kühler		
Naphthalin	9140	9498	9282	9752	9625	9211
1-Benzothiophen	5513	6206	5944	6545	6376	5729
Acenaphthylen	1582	1756	1675	1833	1794	1629
Acenaphthen	3469	3638	3596	3846	3742	3532
Fluoren	7303	7831	7735	8389	8110	7519
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	5821	6160	5559	6060	6110	5690
Pyren	2040	2165	1967	2264	2214	2004
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	1018	1159	1113	1244	1201	1065
Benz[a]anthracen	108	142	131	177	160	119
Chrysen	534	689	678	770	730	606
Benzo[b]fluoranthen	18	23	23	27	25	21
Benzo[k]fluoranthen	12	15	11	15	15	11
Benzo[e]pyren	25	35	36	35	35	31
Benzo[a]pyren	8	12	15	19	16	12
Indeno[1,2,3-cd]pyren	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	36591	39330	37766	40976	40153	37178

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 8: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 8. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

8. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung		Kühler	BIA
	BIA	Kühler	BIA	Kühler		
Naphthalin	12218	12633	12798	13069	12851	12508
1-Benzothiophen	6841	7861	7428	8528	8194	7135
Acenaphthylen	2334	2666	2321	2584	2625	2327
Acenaphthen	4127	4292	4114	4435	4364	4120
Fluoren	10033	10570	10115	10745	10657	10074
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	8547	9102	8731	9353	9228	8639
Pyren	2334	2521	2529	2741	2631	2432
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	1672	1897	1652	1834	1865	1662
Benz[a]anthracen	165	206	196	227	216	181
Chrysen	966	1024	1050	1094	1059	1008
Benzo[b]fluoranthen	22	28	24	30	29	23
Benzo[k]fluoranthen	11	15	6	11	13	8
Benzo[e]pyren	52	56	48	50	53	50
Benzo[a]pyren	25	17	22	24	20	24
Indeno[1,2,3-cd]pyren	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	49348	52888	51033	54724	53806	50191

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 9: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 9. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

9. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]				Mittelwert [ng/m ³]	
	1. Messung		2. Messung		Kühler	BIA
	BIA	Kühler	BIA	Kühler		
Naphthalin	16108	23337	18340	24093	23715	17224
1-Benzothiophen	13001	14499	13605	14571	14535	13303
Acenaphthylen	5406	6134	5176	6240	6187	5291
Acenaphthen	7206	8966	7852	8944	8955	7529
Fluoren	16063	18343	16221	18731	18537	16142
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthren	14926	16166	15540	16841	16504	15233
Pyren	11945	12988	11373	13602	13295	11659
Benzo[b]naphtho[2,1d]thiophen	7051	8217	7484	9008	8613	7268
Benz[a]anthracen	662	901	717	966	933	690
Chrysen	3543	3876	3404	3902	3889	3474
Benzo[b]fluoranthren	197	287	242	326	307	220
Benzo[k]fluoranthren	136	168	181	197	182	158
Benzo[e]pyren	129	149	149	155	152	139
Benzo[a]pyren	68	90	90	100	95	79
Indeno[1,2,3-cd]pyren	10	13	10	13	13	10
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	96450	114135	100383	117688	115912	98417

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 10: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 10. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

10. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]		Mittelwert [ng/m ³]
	1. Messung Kühler	2. Messung Kühler	
Naphthalin	28136	28326	28231
1-Benzothiophen	18678	18799	18739
Acenaphthylen	8865	9072	8969
Acenaphthen	11594	11829	11712
Fluoren	21116	21650	21383
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	18031	18276	18153
Pyren	15065	15260	15162
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	10162	10401	10281
Benz[a]anthracen	1292	1371	1331
Chrysen	5187	5432	5309
Benzo[b]fluoranthen	412	467	440
Benzo[k]fluoranthen	247	277	262
Benzo[e]pyren	168	173	170
Benzo[a]pyren	109	116	112
Indeno[1,2,3-cd]pyren	15	17	16
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	139076	141464	140270

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 11: Konzentrationen mit den resultierenden Mittelwerten [ng/m³] der im Verlauf der 11. Emissionsprobenahme an den beiden Sammelsystemen gemessene einzelnen PAH-Komponenten

11. Emissionsprobenahme PAH-Komponente	PAH-Konzentrationen [ng/m ³]		Mittelwert [ng/m ³]
	1. Messung Kühler	2. Messung Kühler	
Naphthalin	53742	54533	54137
1-Benzothiophen	24864	25202	25033
Acenaphthylen	10042	10204	10123
Acenaphthen	14207	14380	14294
Fluoren	31287	31500	31394
Dibenzothiophen	n. n.	n. n.	n. n.
Phenanthren	n. n.	n. n.	n. n.
Anthracen	n. n.	n. n.	n. n.
Fluoranthen	23877	24378	24128
Pyren	17289	17448	17368
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	12785	13073	12929
Benz[a]anthracen	1944	1986	1965
Chrysen	6537	6585	6561
Benzo[b]fluoranthen	549	583	566
Benzo[k]fluoranthen	321	340	331
Benzo[e]pyren	257	275	266
Benzo[a]pyren	160	169	164
Indeno[1,2,3-cd]pyren	19	20	20
Dibenz[a,h]anthracen	u. N.	u. N.	u. N.
Benzo[g,h,i]perylen	u. N.	u. N.	u. N.
Summe der PAH	197881	200675	199278

n. n. = nicht nachweisbar; u. N. = unter der Nachweisgrenze

Tab. 12: PAH-Massengehalt von Bitumen-Schmelzfolien der Spezifikation Hotmelt-Leichtfolie 115.1; der Fa. Aksys.

PAH-Komponente [ng/g]	1. Messung	2. Messung	Mittelwert
Naphthalin	1961	1930	1946
1-Benzothiophen	105	122	114
Acenaphthylen	39	60	49
Acenaphthen	110	85	97
Fluoren	667	631	649
Dibenzothiophen	1301	1248	1293
Phenanthren	4523	4684	4604
Anthracen	133	113	123
Fluoranthen	886	974	930
Pyren	697	722	709
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	2652	2656	2654
Benz[a]anthracen	280	305	293
Chrysen	2067	2071	2069
Benzo[b]fluoranthen	233	234	234
Benzo[k]fluoranthen	24	27	25
Benzo[e]pyren	515	543	529
Benzo[a]pyren	178	183	181
Indeno[1,2,3-cd]pyren	90	102	96
Dibenz[a,h]anthracen	135	132	134
Benzo[ghi]perylen	507	525	516
Summe der PAH	17105	17385	17245