

The MAK Collection for Occupational Health and Safety

Alkanolamine – Methode zur Bestimmung von 11 Alkanolaminen in der Luft am Arbeitsplatz mittels Ionenchromatographie (IC)

Luftanalysen-Methode

D. Breuer¹, M. Blaskowitz¹, P. Eshlaghi Ansari², R. Hebisch^{3,*}, A. Hartwig^{4,*}, MAK Commission^{5,*}

¹ Methodenentwicklung, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Alte Heerstraße 111, 53757 Sankt Augustin

² Methodenprüfung, Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Hauptstelle, Adalbert-Stifter-Straße 65, 1200 Wien, Österreich

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

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

⁵ Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Kennedyallee 40, 53175 Bonn

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

Keywords: Alkanolamine; Luftanalysen; Analysenmethode; Arbeitsplatzmessung; Gefahrstoff; Ionenchromatographie; Leitfähigkeitsdetektion; IC; Quarzfaserfilter; Flüssigdesorption

Citation Note: Breuer D, Blaskowitz M, Eshlaghi Ansari P, Hebisch R, Hartwig A, MAK Commission. Alkanolamine – Methode zur Bestimmung von 11 Alkanolaminen in der Luft am Arbeitsplatz mittels Ionenchromatographie (IC). Luftanalysen-Methode. MAK Collect Occup Health Saf [Original-Ausgabe. Weinheim: Wiley-VCH; 2018 Jan;3(1):356-381]. Korrigierte Neuveröffentlichung ohne inhaltliche Bearbeitung. Düsseldorf: German Medical Science; 2025. https://doi.org/10.34865/am14143d0019_w

Neuveröffentlichung (Online): 12 Dez 2025

Vormals erschienen bei Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; <https://doi.org/10.1002/3527600418.am14143d0019>

Manuskript abgeschlossen: 01 Mai 2017

Erstveröffentlichung (Online): 24 Jan 2018

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



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

Alkanolamines – Method for the determination of 11 alkanolamines in workplace air using ion chromatography (IC)

[Alkanolamine – Methode zur Bestimmung von 11 Alkanolaminen in der Luft am Arbeitsplatz mittels Ionenchromatographie (IC)]

Air Monitoring Methods in German language

D. Breuer¹, M. Blaskowitz¹, P. Eshlaghi Ansari², R. Hebisch^{3,*}, A. Hartwig^{4,*}, MAK Commission^{5,*}

DOI: 10.1002/3527600418.am14143d0019

Abstract

This analytical method is a validated measurement procedure for the limit value monitoring of 11 alkanolamines such as 2-aminoethanol, diethanolamine, triethanolamine, aminomethyl propanol, 2-dimethylaminoethanol, diglycolamin, methyl diethanolamine, 4-amino-1-butanol, (s)-3-amino-1,2-propanediol, 1-amino-propan-2-ol and 2-amino-2-methyl-1,3-propanediol in workplace air. Sampling is performed by drawing a defined volume of air through a quartz fibre filter impregnated with methanesulfonic acid. The filter is positioned in a GSP sampling head which comply with the requirement of EN 481 for inhalable aerosol and EN 13936 for particle/vapour mixtures. The flow rate is set to 0.5 L/min with a recommended air sample volume of 60 L. After solvent extraction the sample solution is analysed by means of ion chromatography with conductivity detection. The quantitative determination of the alkanolamines is based on calibration functions obtained by means of multiple-point calibrations. The limit of quantification for an individual alkanolamine is in the range from 0.087 to 0.58 mg/m³.

Keywords

Alkanolamin; 2-Aminoethanol; Diethanolamin; Triethanolamin; 2-Amino-2-methylpropanol; 2-(Dimethylamino)ethanol; 2-(2-Aminoethoxy)ethanol; Methyl-diethanolamin; 4-Amino-1-butanol; (S)-3-Amino-1,2-propanediol; 1-Aminopropan-2-ol; 2-Amino-2-methyl-1,3-propanediol; Arbeitsplatzmessung; Gefahrstoffe; Luftanalysen; Messverfahren; GSP-Probenahmekopf; Ionenchromatographie; IC

Author Information

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

² Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA-Hauptstelle), Adalbert-Stifter-Str. 65, 1200 Wien/Österreich

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

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

⁵ Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Kennedyallee 40, 53175 Bonn

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

Alkanolamine – Methode zur Bestimmung von 11 Alkanolaminen in der Luft am Arbeitsplatz mittels Ionenchromatographie

Methodennummer	2
Anwendbarkeit	Luftanalysen
Analyt. Messprinzip	Ionenchromatographie
Abgeschlossen im	Mai 2017

Zusammenfassung

Mit dem hier beschriebenen Messverfahren können die Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) bzw. MAK-Werte von 11 in Kühlschmierstoffen eingesetzten Alkanolaminen, wie z. B. 2-Aminoethanol, Diethanolamin, Triethanolamin, 2-Amino-2-methylpropanol, 2-(Dimethylamino)ethanol, 2-(2-Aminoethoxy)ethanol, Methyldiethanolamin, 4-Amino-1-butanol, (S)-3-Amino-1,2-propandiol, 1-Aminopropan-2-ol und 2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol in der Luft in Arbeitsbereichen überwacht werden [1, 2].

Zur Probenahme wird ein definiertes Luftvolumen mit einer geeigneten Probenahmepumpe durch einen sauer imprägnierten Quarzfaserfilter gesaugt, der in einem GSP-Probenahmekopf positioniert ist. Der verwendete Probenahmekopf entspricht dabei den Anforderungen der DIN EN 481 [3] für einatembare Aerosole und DIN EN 13936 [4] für Partikel/Dampf-Gemische. Zur Probenaufbereitung wird der mit Alkanolaminen belegte Quarzfaserfilter mit Elutionslösung (Methansulfonsäure) extrahiert und die Probelösung ionenchromatographisch mit Hilfe eines Leitfähigkeitsdetektors analysiert. Die quantitative Bestimmung erfolgt anhand von Mehrpunkt-Kalibrierungen mit externen Standards.

Kenndaten des Verfahrens

Präzision:	Standardabweichung (rel.):	$s = 0,18$ bis $5,2 \%$
	Erweiterte Messunsicherheit:	$U = 20,7$ bis $22,3 \%$

	im Konzentrationsbereich von 0,25 bis 9,3 mg/m ³ und n = 6 Bestimmungen	
Bestimmungsgrenze:	2-Aminoethanol (MEA):	0,25 mg/m ³
	Diethanolamin (DEA):	0,10 mg/m ³
	Triethanolamin (TEA):	0,50 mg/m ³
	2-Amino-2-methylpropanol (AMP):	0,46 mg/m ³
	2-(Dimethylamino)ethanol (DMAE):	0,25 mg/m ³
	2-(2-Aminoethoxy)ethanol (DGA):	0,087 mg/m ³
	Methyldiethanolamin (MDEA):	0,25 mg/m ³
	4-Amino-1-butanol (4-AB):	0,25 mg/m ³
	(S)-3-Amino-1,2-propandiol (APD):	0,25 mg/m ³
	1-Aminopropan-2-ol (MIPA):	0,58 mg/m ³
	2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol (AMPD):	0,25 mg/m ³
	bei einem Probeluftvolumen von 60 L, 10 mL Probelösung und 30 µL Injektionsvolumen	
Wiederfindung:	2-Aminoethanol (MEA):	95,0 bis 100,5 %
	Diethanolamin (DEA):	102,9 bis 107,9 %
	Triethanolamin (TEA):	97,0 bis 104,6 %
	2-Amino-2-methylpropanol (AMP):	85,2 bis 89,1 %
	2-(Dimethylamino)ethanol (DMAE):	93,8 bis 101,0 %
	2-(2-Aminoethoxy)ethanol (DGA):	96,1 bis 104,3 %
	Methyldiethanolamin (MDEA):	92,2 bis 102,2 %
	4-Amino-1-butanol (4-AB):	88,4 bis 97,8 %
	(S)-3-Amino-1,2-propandiol (APD):	94,7 bis 99,8 %
	1-Aminopropan-2-ol (MIPA):	95,7 bis 98,0 %
	2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol (AMPD):	94,0 bis 101,3 %
Probenahme- empfehlung:	Probenahmedauer:	2 h
	Probeluftvolumen:	60 L
	Volumenstrom:	0,5 L/min (30 L/h)

Stoffbeschreibung

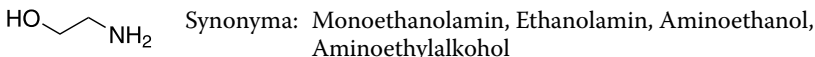
Alkanolamine

Alkanolamine, auch als Aminoalkohole bezeichnet, umfasst eine chemische Stoffgruppe, deren Vertreter über zwei funktionelle Gruppen (eine Hydroxy- und eine Aminogruppe) verfügen. Die Aminogruppe kann dabei von primärer, sekundärer oder tertiärer Struktur sein.

Alkanolamine bilden mit Fettsäuren Salze von geringer Alkalität (hautfreundlich), die eine gute Emulgierwirkung aufweisen. Sie dienen als Emulgatoren z. B. in

Cremes, Lotionen und Rasierschäumen sowie als solche in der Textil-, Leder- und Mineralölindustrie. Wassergemischte Kühlschmierstoffe für die Metallbearbeitung enthalten Alkanolamine als Emulgatoren oder auch zur Regulierung der Alkalität eines Kühlschmierstoffes [5]. Darüber hinaus werden wässrige Lösungen von Ethanolaminen bei der Gasreinigung als Absorptionsmittel für Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff eingesetzt.

2-Aminoethanol (MEA) [141-43-5]

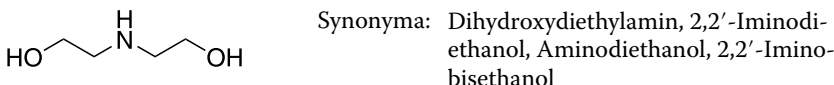


2-Aminoethanol ist eine farblose nach Ammoniak riechende Flüssigkeit von ölgiger Konsistenz (Molmasse 61,08 g/mol, Siedepunkt 172 °C, Flammpunkt 85 °C, Schmelzpunkt 10 °C, Dampfdruck 0,5 hPa bei 20 °C). Es ist mit Wasser mischbar, wobei ihre wässrige Lösung stark alkalisch reagiert.

Der AGW bzw. MAK-Wert von 2-Aminoethanol beträgt 0,51 mg/m³ (0,2 ppm) [1, 2]. Der Kurzzeitwert ist der Spitzenbegrenzungskategorie I mit dem Überschreitungsfaktor 1 zugeordnet. Zudem besitzt MEA die Fußnote „Der Stoff kann gleichzeitig als Dampf und Aerosol vorliegen“. Zur Toxizität von MEA siehe Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [6, 7].

$$1 \text{ mL/m}^3 (\text{ppm}) \triangleq 2,53 \text{ mg/m}^3$$

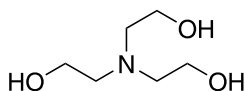
Diethanolamin (DEA) [111-42-2]



Diethanolamin ist ein farbloser, hygroskopischer Feststoff mit ammoniakartigem Geruch (Molmasse 105,14 g/mol, Siedepunkt 269 °C, Flammpunkt 138 °C, Schmelzpunkt 28 °C, Dampfdruck < 0,01 hPa bei 20 °C). Es ist löslich in Wasser (954 g/L bei 20 °C) und mischbar mit Aceton und Ethanol. Industriell wird Diethanolamin als Härter für Epoxidharze eingesetzt und dient als Katalysator bei der Herstellung von Polyurethanen. Zudem ist es ein Zwischenprodukt bei der Herstellung von Waschrohstoffen, Zementhilfsmitteln, Pflanzenschutzmitteln sowie Bohr- und Schneidölen. Darüber hinaus wird es als Absorptionsmittel für Schwefelwasserstoff (H₂S) und Kohlendioxid (CO₂) in chemischen Prozessen eingesetzt.

Der MAK-Wert von Diethanolamin beträgt 1 mg/m³ E [2]. Der Kurzzeitwert ist der Spitzenbegrenzungskategorie I mit dem Überschreitungsfaktor 1 zugeordnet und außerdem ist es in die krebserzeugende Kategorie 3 B eingestuft. DEA besitzt die Fußnote „Der Stoff kann gleichzeitig als Dampf und Aerosol vorliegen“. Zur Toxizität von DEA siehe Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [8].

$$1 \text{ mL/m}^3 (\text{ppm}) \triangleq 4,37 \text{ mg/m}^3$$

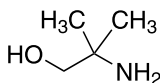
Triethanolamin (TEA) [102-71-6]

Synonyma: 2,2',2''-Nitritoltriethanol, Trihydroxytriethylamin, Tris(2-hydroxyethyl)amin

Triethanolamin ist eine farblose bis gelbliche, hygroskopische Flüssigkeit von viskoser Konsistenz (Molmasse 149,19 g/mol, Siedepunkt 360 °C, Flammpunkt 179 °C, Schmelzpunkt 21 °C, Dampfdruck < 0,01 hPa bei 20 °C). Es ist mischbar mit Wasser, Ethanol und Glycerin. Zudem ist es löslich in Chloroform und Aceton. Triethanolamin wird verwendet als basische Komponente in Seifen und Kosmetik, als Netzmittel für Textilien sowie als Weichmacher in der Lederindustrie. Des Weiteren wird es als Korrosionsinhibitor eingesetzt und dient als Zwischenprodukt zur Herstellung von Seifen, Dispergiermitteln und wasserlöslichen Herbiziden.

Der MAK-Wert von Triethanolamin beträgt 1 mg/m³ E [2]. Der Kurzzeitwert ist der Spitzenbegrenzungskategorie I mit dem Überschreitungsfaktor 1 zugeordnet. Zur Toxizität von TEA siehe Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [9, 10].

$$1 \text{ mL/m}^3 (\text{ppm}) \triangleq 6,190 \text{ mg/m}^3$$

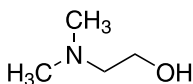
2-Amino-2-methylpropanol (AMP) [124-68-5]

Synonyma: Isobutanolamin, 2-Amino-2-methyl-1-propanol, Dimethyl-2-hydroxyethylamin, β-Aminoisobutylalkohol

2-Amino-2-methylpropanol ist ein farbloser Feststoff mit aminartigem Geruch (Molmasse 89,14 g/mol, Siedepunkt 165 °C, Flammpunkt 81 °C, Schmelzpunkt 30 °C, Dampfdruck < 0,01 hPa bei 20 °C). Es ist leicht löslich in Wasser. 2-Amino-2-methylpropanol wird zur Herstellung von Farbstoffen und Arzneimitteln verwendet.

Der AGW bzw. MAK-Wert von AMP beträgt 3,71 mg/m³ (1 ppm) [1, 2]. Der Kurzzeitwert ist der Spitzenbegrenzungskategorie II mit dem Überschreitungsfaktor 2 zugeordnet. Zudem besitzt AMP die Fußnote „Der Stoff kann gleichzeitig als Dampf und Aerosol vorliegen“. Zur Toxizität von AMP siehe Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [11].

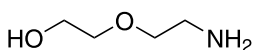
$$1 \text{ mL/m}^3 (\text{ppm}) \triangleq 3,70 \text{ mg/m}^3$$

2-(Dimethylamino)ethanol (DMAE) [108-01-0]

Synonyma: Dimethylethanolamin, 2-(Dimethylamino)-ethanol, N,N-Dimethylethanolamin

2-(Dimethylamino)ethanol ist eine farblose nach Ammoniak riechende Flüssigkeit (Molmasse 89,14 g/mol, Siedepunkt 131 °C, Flammpunkt 31 °C, Schmelzpunkt < 10 °C, Dampfdruck 5,6 hPa bei 20 °C). Es ist mischbar mit Wasser und Ethanol. 2-(Dimethylamino)ethanol dient als Zwischenprodukt bzw. Ausgangsstoff bei der Herstellung von Farbstoffen, Emulgatoren, Korrosionsschutzmitteln und Textilhilfsmitteln. Des Weiteren wird es als Hilfsmittel zur Dispergierung von Farbpigmenten in Wasserlacken eingesetzt. Ein Arbeitsplatzgrenzwert bzw. MAK-Wert für DMAE existiert derzeit nicht.

2-(2-Aminoethoxy)ethanol (DGA) [929-06-6]

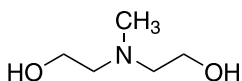


Synonyma: Diglykolamin, Ethylenglykol-mono-(2-aminoethylether), Diethylenglykolamin

2-(2-Aminoethoxy)ethanol ist eine farblose bis leicht gelbliche Flüssigkeit mit aminartigem Geruch (Molmasse 105,14 g/mol, Siedepunkt 218 – 224 °C, Flammpunkt 127 °C, Schmelzpunkt < 11 °C, Dampfdruck < 0,1 hPa bei 20 °C). Es ist mit Wasser mischbar. 2-(2-Aminoethoxy)ethanol, bekannt unter der Bezeichnung Diglykolamin, wird in Stripperlösungen zum Entmetallisieren sowie als Emulgator in Kühlschmiermitteln und zur Gaswäsche verwendet.

Der AGW bzw. MAK-Wert von Diglykolamin beträgt 0,87 mg/m³ (0,2 ppm) [1, 2]. Der Kurzzeitwert ist der Spitzenbegrenzungskategorie I mit dem Überschreitungsfaktor 1 zugeordnet. Zudem besitzt es die Fußnote „Der Stoff kann gleichzeitig als Dampf und Aerosol vorliegen“. Zur Toxizität von Diglykolamin siehe Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [12].

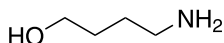
Methyldiethanolamin (MDEA) [105-59-9]



Synonyma: 2,2'-Methyliminodiethanol, N-Methyl-2,2'-iminodiethanol, N,N-Diethanolmethylamin

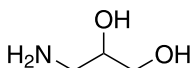
Methyldiethanolamin ist eine farblose Flüssigkeit mit aminartigem Geruch (Molmasse 119,16 g/mol, Siedepunkt 243 °C bei 1013 mbar, Flammpunkt 137 °C, Schmelzpunkt < 21 °C, Dampfdruck 0,0013 hPa bei 20 °C). Es ist mischbar mit Wasser, niederen Alkoholen, Estern, Aceton, Benzol und Chlorkohlenwasserstoffen und nicht mischbar mit Diethylether und aliphatischen Kohlenwasserstoffen. Methyldiethanolamin wird als Katalysator bei der Herstellung von Polyurethan eingesetzt. Zudem findet MDEA Anwendung als Zwischenprodukt bei der Herstellung von Textilhilfsmitteln, Farbstoffen, Insektiziden, Pharmaka sowie Emulgatoren und wird als Absorbens bei der Gaswäsche von Sauergas eingesetzt.

Ein Arbeitsplatzgrenzwert bzw. MAK-Wert für Methyldiethanolamin existiert derzeit nicht. In der MAK- und BAT-Werte-Liste ist MDEA dem Abschnitt II b zugeordnet und hat die Fußnote „Der Stoff kann gleichzeitig als Dampf und Aerosol vorliegen“ [2]. Zur Toxizität von MDEA siehe Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [13].

4-Amino-1-butanol (4-AB) [13325-10-5]

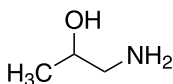
Synonyma: 4-Aminobutan-1-ol, 4-Aminobutanol-1

4-Amino-1-butanol ist eine farblose luftempfindliche und hygroskopische Flüssigkeit (Molmasse 89,14 g/mol, Siedepunkt 206 °C, Flammpunkt 104 °C, Schmelzpunkt 16 bis 18 °C, Dampfdruck 0,06 hPa bei 25 °C). Ein Arbeitsplatzgrenzwert bzw. MAK-Wert für 4-AB existiert derzeit nicht.

(S)-3-Amino-1,2-propandiol (APD) [61278-21-5]

Synonym: (S)-3-Aminopropan-1,2-diol

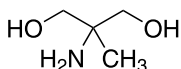
(S)-3-Amino-1,2-propandiol ist ein farbloser Feststoff (Molmasse 91,11 g/mol, Siedepunkt 267 °C, Flammpunkt 113 °C, Schmelzpunkt 54 bis 56 °C, Dampfdruck 0,0015 hPa bei 25 °C). Ein Arbeitsplatzgrenzwert bzw. MAK-Wert für APD existiert derzeit nicht.

1-Aminopropan-2-ol (MIPA) [78-96-6]

Synonyma: 1-Amino-2-propanol, Isopropanolamin

1-Aminopropan-2-ol ist eine farblose Flüssigkeit mit ammoniakartigem Geruch (Molmasse 75,11 g/mol, Siedepunkt 159 °C, Flammpunkt 71 °C, Schmelzpunkt 1,4 °C, Dampfdruck 1,93 hPa bei 20 °C). Es ist mit Wasser mischbar sowie löslich in Ethanol und Benzol. MIPA wird als Korrosionsinhibitor in Kühlschmierstoffen eingesetzt. Zudem findet es Anwendung als Zwischenprodukt bei der Herstellung von Farb- und Arzneistoffen, sowie Estern, Amiden und Salzen höhermolekularer Fettsäuren, die als Waschmittel und Öl-in-Wasser-Emulgatoren eingesetzt werden.

Der AGW von 1-Aminopropan-2-ol beträgt 5,8 mg/m³ (2 ppm) [1]. Der Kurzzeitwert ist der Spitzenbegrenzungskategorie I mit dem Überschreitungsfaktor 2 zugeordnet. Zudem hat MIPA die Fußnote „Der Stoff kann gleichzeitig als Dampf und Aerosol vorliegen“. Zur Toxizität von MIPA siehe Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten [14].

2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol (AMPD) [115-69-5]

Synonyma: 2-Amino-2-methylpropan-1,3-diol, Amino-glykol

2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol ist ein Feststoff (weißer Puder) (Molmasse 105,14 g/mol, Siedepunkt 151 °C bei 13 mbar, Schmelzpunkt 100 – 110 °C, Dampfdruck 0,0087 hPa bei 25 °C). Ein Arbeitsplatzgrenzwert bzw. MAK-Wert für AMPD existiert derzeit nicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlage des Verfahrens	363
2	Geräte, Chemikalien und Lösungen	364
2.1	Geräte	364
2.2	Chemikalien	364
2.3	Lösungen	365
2.4	Vergleichsstandards	365
2.5	Vorbehandlung der Quarzfaserfilter	367
3	Probenahme und Probenaufbereitung	367
3.1	Probenahme	367
3.2	Probenaufbereitung	368
4	Ionenchromatographische Arbeitsbedingungen	368
5	Analytische Bestimmung	369
6	Kalibrierung	369
7	Berechnung des Analysenergebnisses	371
8	Beurteilung des Verfahrens	372
8.1	Präzision und erweiterte Messunsicherheit	372
8.2	Wiederfindung	374
8.3	Bestimmungsgrenze	374
8.4	Kapazität der Quarzfaserfilter	375
8.5	Lagerfähigkeit	375
8.6	Einfluss der Luftfeuchte	376
8.7	Blindwerte	376
8.8	Störeinflüsse	376
9	Diskussion	377
10	Anhang: Präzision und Richtigkeit mittels Vergleichsmessung	377

1 Grundlage des Verfahrens

Mit dem hier beschriebenen Messverfahren können die Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) bzw. MAK-Werte von 11 in Kühlschmierstoffen eingesetzten Alkanolaminen, wie z. B. 2-Aminoethanol, Diethanolamin, Triethanolamin, 2-Amino-2-methylpropanol, 2-(Dimethylamino)ethanol, 2-(2-Aminoethoxy)ethanol, Methyldiethanolamin, 4-Amino-1-butanol, (S)-3-Amino-1,2-propandiol, 1-Aminopropan-2-ol und 2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol in der Luft in Arbeitsbereichen überwacht werden [1, 2].

Zur Probenahme wird ein definiertes Luftvolumen mit einer geeigneten Probenahmepumpe durch einen sauer imprägnierten Quarzfaserfilter gesaugt, der in einem GSP-Probenahmekopf positioniert ist. Der verwendete Probenahmekopf entspricht dabei den Anforderungen der DIN EN 481 [3] für einatembare Aerosole und DIN EN 13936 [4] für Partikel/Dampf-Gemische. Zur Probenaufbereitung wird der mit Alkanolaminen belegte Quarzfaserfilter mit Elutionslösung (Methansulfonsäure) extrahiert und die Probelösung ionenchromatographisch mit Hilfe eines Leit-

fähigkeitsdetektors analysiert. Die quantitative Bestimmung erfolgt anhand von Mehrpunkt-Kalibrierungen mit externen Standards.

2 Geräte, Chemikalien und Lösungen

2.1 Geräte

2.1.1 Geräte für die Probenahme

- Pumpe, geeignet für einen Volumenstrom von 30 L/h (0,5 L/min)
- Gasmengenzähler
- Probenahmesystem GSP mit Aufsatzkegel für einen Volumenstrom von 0,5 L/min, mit Filterkapsel zur Aufnahme eines Quarzfaserfilters, geeignet zur Erfassung der einatembaren Fraktion nach DIN EN 481 [3]
- Quarzfaserfilter, Ø 37 mm (z. B. Merck Millipore, AQFA03700)
- Silikonschlauch zur Verbindung von Pumpe und Probenahmesystem

2.1.2 Geräte für die Probenaufbereitung und Bestimmung

- Schraubdeckelfläschchen aus HDPE, Nennvolumen 20 mL mit Innenkonus und breiter Öffnung (17 mm), Höhe 60 mm
- Messkolben aus Polymethylpenten (PMP), 25, 50, 100 und 1000 mL
- Kolbenhubpipetten, verstellbar, Nennvolumen 0,01 bis 5 mL
- Einmalspritzen, 2, 5 und 10 mL mit passenden Kanülen
- Spritzenvorsatzfilter zur Filtration wässriger Proben für die Ionenchromatographie, Ø 37 mm, Porengröße 0,45 µm
- Autosamplervials aus HDPE mit Schraubkappen und geschlitzten PTFE-Septen, Nennvolumen 1,5 mL
- Ultraschallbad
- Reinstwasseranlage
- Ionenchromatograph mit Säulenthmostat und Leitfähigkeitsdetektor
- Datenauswerteeinheit
- Pinzette

Anmerkung

Die verwendeten Gerätschaften sind vor ihrem Einsatz gründlich zu reinigen (ggf. in der Spülmaschine).

2.2 Chemikalien

Die eingesetzten Alkanolamine sollten mindestens die Reinheit p.a. besitzen und jeweils von zwei unterschiedlichen Herstellern bezogen werden. Die Alkanolamine des einen Herstellers werden für die Kalibrierung eingesetzt, während die Alkanolamine des anderen Herstellers für die Richtigkeitskontrolle der Kalibrierung verwendet werden.

- Methansulfonsäure (MSA), Reinheit $\geq 99,5$ % (Dichte: 1,481 g/mL)
- 2-Aminoethanol (MEA), Reinheit $\geq 99,0$ %
- Diethanolamin (DEA), Reinheit $\geq 98,0$ %
- Triethanolamin (TEA), Reinheit ≥ 99 %
- 1-Aminopropan-2-ol (MIPA), Reinheit 98 %
- 2-Amino-2-methylpropanol (AMP), Reinheit $\geq 99,0$ %
- 2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol (AMPD), Reinheit $\geq 99,5$ %
- Methyldiethanolamin (MDEA), Reinheit ≥ 99 %
- 2-(Diethylamino)ethanol (DEAE), Reinheit $\geq 99,5$ %
- 2-(2-Aminoethoxy)ethanol (DGA), Reinheit 98 %
- 2-Amino-1-butanol (2-AB), Reinheit 97 %
- 4-Amino-1-butanol (4-AB), Reinheit ≥ 98 %
- 1,1'-Iminodipropan-2-ol (IDP), Reinheit $\geq 98,0$ %
- (S)-3-Amino-1,2-propandiol (APD), Reinheit 98 %
- 2-(Dimethylamino)ethanol (DMAE), Reinheit $\geq 99,5$ %

2.3 Lösungen

Der Eluent für die ionenchromatographische Trennung der Alkanolamine wird mittels Reagent-Free Ion Chromatography (RFIC) und einer EGC (Eluent Generator Cartridge) III MSA (Methansulfonsäure) Kartusche direkt in der IC-Anlage hergestellt.

Eluent zur Herstellung von Messlösungen und zur Extraktion der belegten Quarzfaserfilter: Methansulfonsäure (MSA) 20 mmol/L

Dazu werden 1380 μL ($\sim 1,9319$ g) Methansulfonsäure in einen 1000-mL-Messkolben aus PMP pipettiert, mit Reinstwasser aufgefüllt und umgeschüttelt.

Der Eluent ist arbeitstäglich frisch anzusetzen.

Imprägnierlösung für die Quarzfaserfilter: Methansulfonsäure (MSA)
313 mmol/L

In einen 100-mL-Messkolben aus PMP werden 2070 μL ($\sim 3,027$ g) Methansulfonsäure (MSA) pipettiert. Anschließend wird der Messkolben mit Reinstwasser bis zur Marke aufgefüllt und umgeschüttelt.

Die Imprägnierlösung ist bei Lagerung bei Raumtemperatur max. 2 Wochen verwendbar.

2.4 Vergleichsstandards

Stammlösungen

Von den ausgewählten Alkanolaminen werden von den Standards beider Hersteller Einzelstammlösungen für die Kalibrierung und Kontrolle angesetzt.

Einzelstammlösungen: DEA und DGA

In 50-mL-Messkolben (PMP) werden jeweils 125 mg Diethanolamin (DEA) und 2-(2-Aminoethoxy)ethanol (DGA) auf 0,1 mg genau eingewogen. Die Messkolben werden danach mit Reinstwasser bis zur Marke aufgefüllt und umgeschüttelt. Die Konzentrationen an DEA und DGA betragen jeweils 2,5 g/L.

Einzelstammlösungen: MEA, TEA, AMP, DMAE, MDEA, 4-AB, APD, MIPA, AMPD

In 50-mL-Messkolben (PMP) werden jeweils 250 mg an MEA, TEA, AMP, DMAE, MDEA, 4-AB, APD, MIPA und AMPD auf 0,1 mg genau eingewogen. Die Messkolben werden danach mit Reinstwasser bis zur Marke aufgefüllt und umgeschüttelt. Die Konzentrationen an MEA, TEA, AMP, DMAE, MDEA, 4-AB, APD, MIPA und AMPD betragen jeweils 5 g/L.

Summenstammlösung **A** (30 °C): enthält nur APD

In einen 50-mL-Messkolben (PMP), in den ca. 30 mL Reinstwasser vorgelegt wurden, werden 1250 µL (S)-3-Amino-1,2-propandiol (APD) pipettiert. Danach wird der Messkolben mit Reinstwasser bis zur Marke aufgefüllt und umgeschüttelt. Die Konzentration an APD beträgt 125 mg/L.

Summenstammlösung **B** (40 °C): enthält DEA, DGA, DMAE, MIPA und AMPD

In einen 50-mL-Messkolben (PMP), in den ca. 20 mL Reinstwasser vorgelegt wurden, werden von den 11 Einzelstammlösungen jeweils 1250 µL DEA, DGA, DMAE, MIPA und AMPD pipettiert. Danach wird der Messkolben mit Reinstwasser bis zur Marke aufgefüllt und umgeschüttelt. Die Konzentrationen an DEA und DGA betragen jeweils 62,5 mg/L und die Konzentrationen an DMAE, MIPA und AMPD jeweils 125 mg/L.

Summenstammlösung **C** (60 °C): enthält MEA, TEA, AMP, MDEA und 4-AB

In einen 50-mL-Messkolben (PMP), in den ca. 20 mL Reinstwasser vorgelegt wurden, werden von den 11 Einzelstammlösungen jeweils 1250 µL MEA, TEA, AMP, MDEA und 4AB pipettiert. Danach wird der Messkolben mit Reinstwasser bis zur Marke aufgefüllt und umgeschüttelt. Die Konzentrationen an MEA, TEA, AMP, MDEA und 4-AB betragen jeweils 125 mg/L.

Die Stammlösungen sind bei Lagerung im Kühlschrank bei 4 °C mindestens 12 Monate verwendbar.

Kalibrierlösungen

Aus den Summenstammlösungen **A**, **B**, und **C** werden durch geeignete Verdünnungen mit Reinstwasser zehn Kalibrierlösungen in 25-mL-Messkolben (PMP) wie folgt hergestellt:

In 25-mL-Messkolben (PMP), in die jeweils ca. 10 mL Elutionslösung vorgelegt wurde, werden aus den Summenstammlösungen **A**, **B**, und **C** Volumina in 100 µL-Schritten von 100 µL für Standard 1 bis 1000 µL für Standard 10 pipettiert. Anschließend werden die Messkolben mit Elutionslösung (20 mmol/L Methansulfonsäure) bis zur Marke aufgefüllt und umgeschüttelt. Die Konzentrationen der Alkanolamine in den Kalibrierlösungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1 Konzentrationen der 10 Kalibrierstandards

Analyt	Std 1 [mg/L]	Std 2 [mg/L]	Std 3 [mg/L]	Std 4 [mg/L]	Std 5 [mg/L]	Std 6 [mg/L]	Std 7 [mg/L]	Std 8 [mg/L]	Std 9 [mg/L]	Std 10 [mg/L]
MEA	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
DEA	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
TEA	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
MIPA	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
AMP	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
AMPD	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
MDEA	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
DGA	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
4-AB	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
APD	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
DMAE	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0

Die Kalibrierlösungen sind bei Lagerung bei Raumtemperatur mind. 2 Wochen verwendbar.

2.5 Vorbehandlung der Quarzfaserfilter

Zur Filterimprägnierung wird so viel der Imprägnierlösung Methansulfonsäure (313 mmol/L) auf ein Uhrglas gegeben, dass der Quarzfaserfilter darin vollständig getränkt wird. Anschließend wird der Quarzfaserfilter für mindestens 12 Stunden (über Nacht) bei Raumtemperatur getrocknet. Nach dem Trocknen wird der imprägnierte Filter in den Filterhalter gelegt und bis zur Probenahme mit den dafür vorgesehenen Kappen verschlossen. Die Verwendbarkeit eines imprägnierten Filters vor seinem Einsatz beträgt max. zwei Wochen.

3 Probenahme und Probenaufbereitung

3.1 Probenahme

Die Probenahme erfolgt nach Maßgabe der DIN EN 13936 [4] für die Summe eines Alkanolamins bestehend aus Dampf und Tröpfchen. Mit Hilfe einer durchflusstabilisierten Pumpe wird ein definiertes Luftvolumen mit einem Volumenstrom von 0,5 L/min durch den imprägnierten Quarzfaserfilter gesaugt. Der Probenahmekopf muss dabei die Anforderungen der DIN EN 481 [3] für einatembare Aerosole erfüllen. Die empfohlene Probenahmedauer beträgt 2 Stunden. Die Pumpe und das Pro-

benahmesystem werden von einer Person während der Arbeitszeit getragen oder ortsfest verwendet. Ist die Abweichung vom eingestellten Volumenstrom am Ende der Messung größer $\pm 5\%$ wird empfohlen, die Messung zu verwerfen [15]. Die zur Bestimmung der Luftkonzentrationen wichtigen Parameter (Probenvolumen, Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte) werden im Probenahmeprotokoll vermerkt. Direkt nach Beendigung der Probenahme wird der belegte Quarzfaserfilter zur Stabilisierung in ein mit 10 mL Elutionslösung (Methansulfonsäure, 20 mmol/L) gefülltes Schraubdeckelfläschchen überführt. Danach wird das Probenfläschchen mit dem dafür vorgesehenen Deckel verschlossen und kurz umgeschüttelt. Der stabilisierte Quarzfaserfilter ist umgehend dem Analysenlabor zuzuleiten.

3.2 Probenaufbereitung

Das Probenfläschchen mit dem belegten und in Methansulfonsäure stabilisierten Quarzfaserfilter wird zur vollständigen Extraktion der gesammelten Alkanolamine für 15 Minuten im Ultraschallbad behandelt und danach zur Abkühlung auf Raumtemperatur für ca. 30 Minuten stehen gelassen. Danach wird die vollständige Probelösung (≥ 8 mL) mit einer Einmalspritze mit Kanüle aufgenommen und durch einen Spritzenvorsatzfilter in ein neues Probengefäß aus HDPE filtriert, wobei die ersten Milliliter verworfen werden. Die filtrierte Probelösung kann direkt in ein Autosamplervial pipettiert und analysiert werden.

4 Ionenchromatographische Arbeitsbedingungen

Die Kenndaten des Verfahrens wurden unter den nachfolgend aufgeführten Arbeitsbedingungen ermittelt.

Programm 1, 2 und 3

Ionenchromatograph:	ICS2000 Fa. Thermo Fisher Dionex mit Leitfähigkeitsdetektor und Autosampler
Trennsäule:	IonPac CS16, Fa. Thermo Fisher Dionex Länge: 250 mm, Innendurchmesser: 3 mm, Partikelgröße: 5,5 μm
Vorsäule:	IonPac CG16, Fa. Thermo Fisher Dionex Länge: 50 mm, Innendurchmesser: 3 mm, Partikelgröße: 5,5 μm
Eluentgenerator:	EGC III MSA, Fa. Thermo Fisher Dionex
Suppressor:	CERS 500 2 mm, Fa. Thermo Fisher Dionex
Elektronische Suppression:	ca. 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Polarität:	positiv
Injektionsvolumen:	30 μL

	Programm 1	Programm 2	Programm 3
Eluent:	7 mM MSA	20 mM MSA	5 mM MSA
Flussrate:	0,5 mL/min	0,36 mL/min	0,5 mL/min
Druck:	ca. 2060 psi	ca. 2150 psi	ca. 1910 psi
Temperatur der Säule und in der Messzelle:	30 °C	40 °C	60 °C
Suppressorstrom:	11 mA	22 mA	8 mA

Zu beachten gilt, dass bei den Trennbedingungen am Ende eines Analysenlaufes die Konzentration des Eluenten für ca. 10 Minuten auf 40 mM zu erhöhen ist, um auf diese Weise alle Probenreste von der Säule zu spülen. Während des Spülschrittes beträgt der Suppressorstrom 59 mA für die Programme 1 und 3 sowie 43 mA für Programm 2. Anschließend wird das Trennsystem für 20 Minuten mit der jeweiligen Anfangskonzentration equilibriert. Die Abbildungen 1, 2 und 3 zeigen beispielhaft die Ionenchromatogramme der Summenstandards **A**, **B**, und **C** der Alkanolamine unter den o. a. Bedingungen.

Die Konzentrationen der ausgewählten Alkanolamine betragen ca. 2,5 bzw. 1,25 mg/L für DEA und DGA. Störkomponenten, wie z. B. Lithium kommen in der Regel in einer Konzentration von ca. 0,6 mg/L vor und Kationen von Natrium, Ammonium und Kalium mit jeweils ca. 1,2 mg/L. Des Weiteren vorhanden sein können z. B. einfache Amine in den folgenden Konzentrationen: Methylamin ~1,8 mg/L, Dimethylamin ~1,6 mg/L und Trimethylamin ~4,4 mg/L.

5 Analytische Bestimmung

Mit Hilfe eines Autosamplers werden 150 µL der aufbereiteten Probelösung in die 30 µL Probenschleife des Ionenchromatographen injiziert und unter den in Abschnitt 4 angegebenen Bedingungen analysiert. Liegen die ermittelten Konzentrationen oberhalb des Kalibrierbereiches, so sind entsprechende Verdünnungen der Proben mit der Elutionslösung herzustellen und die Messung ist zu wiederholen.

6 Kalibrierung

Zur Erstellung der Kalibrierfunktionen werden die unter Abschnitt 2.4 beschriebenen Kalibrierlösungen verwendet. Von den Kalibrierlösungen werden jeweils 30 µL in den Ionenchromatographen injiziert und wie die Probelösungen analysiert. Die ermittelten Peakflächen werden gegen die entsprechenden Konzentrationen der Kalibrierstandards aufgetragen. Die Kalibrierfunktionen sind im untersuchten Konzentrationsbereich linear oder 2. Ordnung.

Zur Überprüfung der Kalibrierfunktionen sind arbeitstäglich Kontrollproben zu analysieren. Bereits durchgeführte Kalibrierungen sind neu zu erstellen, wenn die analytischen Bedingungen sich ändern oder die Qualitätskontrolle dazu Anlass gibt.

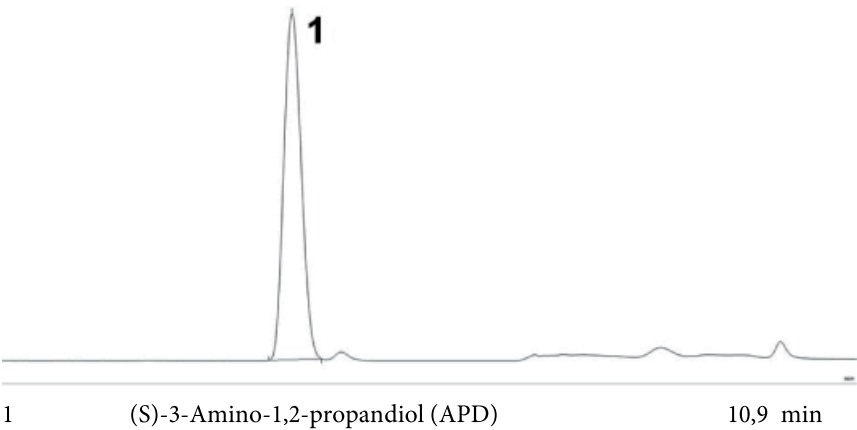


Abb. 1 Ionenchromatogramm von Summenstammlösung A (Arbeitsbedingungen siehe Programm 1 in Abschnitt 4)

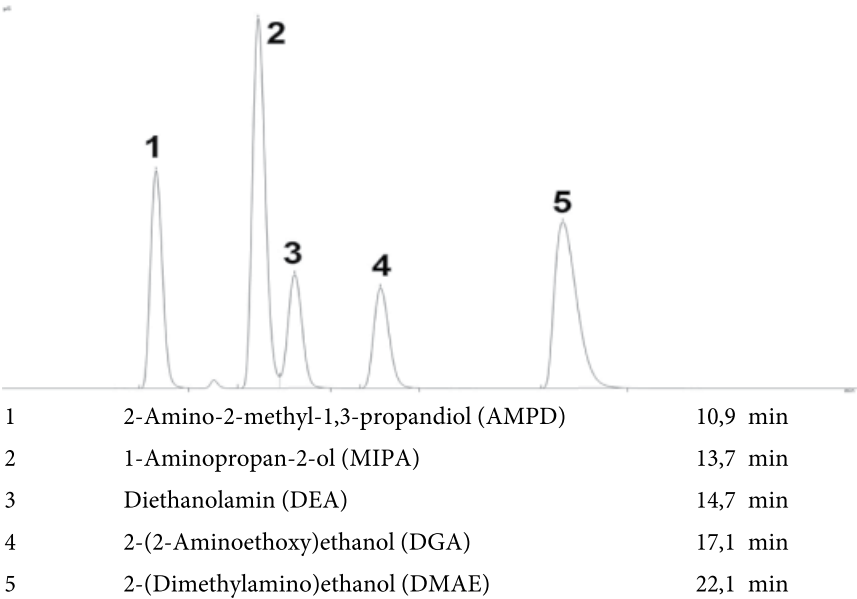


Abb. 2 Ionenchromatogramm von Summenstammlösung B (Arbeitsbedingungen siehe Programm 2 in Abschnitt 4)

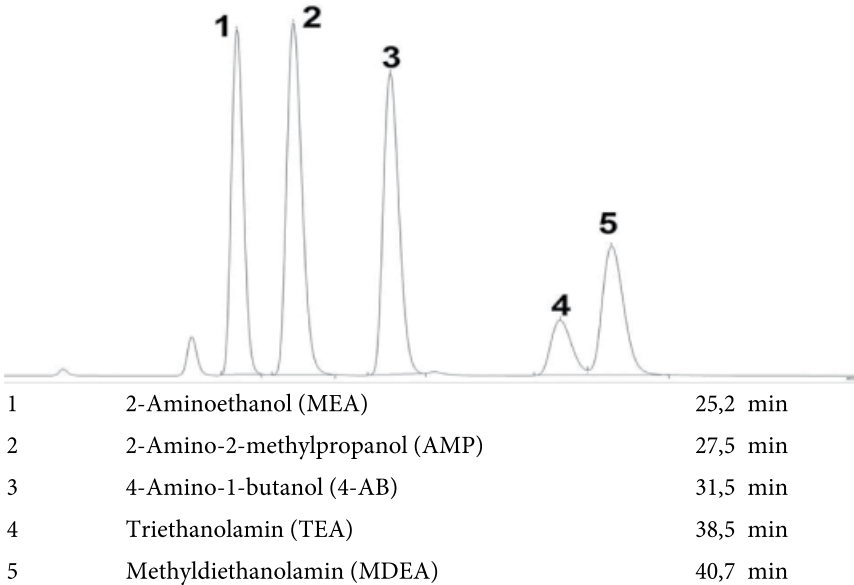


Abb. 3 Ionenchromatogramm von Summenstammlösung C (Arbeitsbedingungen siehe Programm 3 in Abschnitt 4)

7 Berechnung des Analysenergebnisses

Nach Maßgabe der DIN EN 13963 [4] ist für die Konzentration eines Alkanolamins die Summe aus Dampf und Aerosol zu berechnen, da dieser Wert von der Verteilung des Dampf/Aerosol-Gemisches unabhängig ist und nicht durch Randparameter wie z. B. der Raumtemperatur beeinflusst wird. Die Berechnung der Konzentration aus der Summe von Aerosol und Dampf der untersuchten Alkanolamine in der Luft in Arbeitsbereichen erfolgt mit Hilfe der von der Datenauswerteeinheit berechneten Konzentrationen der Alkanolamine in der Messlösung.

Für die ionenchromatographische Bestimmung der Alkanolamine werden mittels der Datenauswerteeinheit Kalibrierfunktionen 1. und 2. Ordnung ermittelt aus denen die Berechnung der Konzentration für die einzelnen Alkanolamine erfolgt. Ausgehend von den analytisch ermittelten Konzentrationen an Alkanolaminen in der Messlösung wird unter Berücksichtigung von Verdünnungen und des verwendeten Probeluftvolumens die Konzentration der einzelnen Alkanolamine in der Luft am Arbeitsplatz berechnet.

Für eine Kalibrierfunktion 1. Grades gilt Gleichung (1) wie folgt:

$$F = b \times \rho_{\text{Alkanolamin(Lösung)}} + a \quad (1)$$

Für eine Kalibrierfunktion 2. Grades gilt Gleichung (2) wie folgt:

$$F = c^2 \times \rho_{\text{Alkanolamin(Lösung)}} + b \times \rho_{\text{Alkanolamin(Lösung)}} + a \quad (2)$$

Es bedeuten:

F	Peakfläche eines Alkanolamins
a	Ordinatenabschnitt der Kalibrierfunktion
b	Steigung der Kalibrierfunktion in L/mg
c	Konstante in (L/mg) ²
$\rho_{\text{Alkanolamin(Lösung)}}$	Massenkonzentration eines Alkanolamins in der Messlösung in mg/L

Unter Berücksichtigung von Elutions- und Probenahmevolumen sowie ggf. der Wiederfindung und Verdünnung berechnet sich die Konzentration für ein Alkanolamin in der Luftprobe nach Gleichung (3) wie folgt:

$$\rho_{\text{Alkanolamin(Luft)}} = \frac{\rho_{\text{Alkanolamin(Lösung)}} \times \eta \times F_E \times F_{\text{Verd.}}}{V_{\text{Luft}}} \quad (3)$$

Es bedeuten:

$\rho_{\text{Alkanolamin(Luft)}}$	Massenkonzentration eines Alkanolamins in der Raumluft in mg/m ³
V_{Luft}	Probeluftvolumen in m ³
η	Wiederfindung (vgl. Abschnitt 8.2)
F_E	Umrechnungsfaktor auf das Elutionsvolumen der Messprobe in L (0,010 L)
$F_{\text{Verd.}}$	Verdünnungsfaktor

8 Beurteilung des Verfahrens

Die Kenndaten der Methode wurden nach Maßgaben der DIN EN 482 [16], DIN EN 1076 [17], DIN EN 13963 [4] und der DIN 32645 [18] ermittelt und mithilfe einer im IFA entwickelten Software berechnet [19].

8.1 Präzision und erweiterte Messunsicherheit

Zur Ermittlung der Präzision wurden Konzentrationen der 11 Alkanolamine im Mindestmessbereich (0,1 GW (Grenzwert); 1 GW und 2 GW) auf imprägnierte Quarzfaserfilter dotiert. Anschließend wurde für 2 Stunden saubere Laborluft mit Luftfeuchten in den Bereichen von 10 bis 30 %, 40 bis 60 % und 70 bis 90 %, mit einem Volumenstrom von 0,5 L/min (30 L/h) durch die Filter gesaugt. Danach wurden die Filter entsprechend den Analysenproben aufbereitet und analysiert (siehe Abschnitte 3.2, 4 und 5).

Die erweiterten Messunsicherheiten wurden unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen nach DIN EN 482 [16] abgeschätzt. Die ermittelten Kenndaten

wie relative Standardabweichung und erweiterte Messunsicherheit sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 2 Standardabweichungen (rel.) und erweiterte Messunsicherheiten U für $n = 6$ Bestimmungen

Alkanolamin	Konzentration [mg/m ³]	Standard- abweichung (rel.) [%]	Erweiterte Messunsicherheit U [%]
2-Aminoethanol (MEA)	0,25	1,1	20,6
	2,5	0,38	20,0
	5,0	0,47	20,0
Diethanolamin (DEA)	0,1	0,94	19,7
	1,1	0,45	19,7
	2,2	0,50	19,7
Triethanolamin (TEA)	0,5	0,91	20,1
	5,0	1,3	20,5
	10,0	0,35	20,7
1-Aminopropan-2-ol (MIPA)	0,55	0,30	19,4
	5,7	0,64	19,5
	11,5	0,47	19,7
2-Amino-2-methylpropanol (AMP)	0,46	0,52	19,8
	4,6	0,72	19,8
	9,3	0,48	19,8
2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol (AMPD)	0,25	0,82	20,2
	2,5	0,41	19,8
	5,0	0,82	19,8
Methyldiethanolamin (MDEA)	0,26	0,98	20,6
	2,6	1,4	20,2
	5,2	0,42	20,4
2-(2-Aminoethoxy)ethanol (DGA)	0,09	0,50	20,7
	0,9	0,18	21,0
	1,7	0,56	20,6
4-Amino-1-butanol (4-AB)	0,25	0,88	21,3
	2,5	0,81	21,3
	4,8	0,34	21,3
(S)-3-Amino-1,2-propandiol (APD)	0,25	1,3	20,1
	2,6	0,62	20,8
	5,3	0,69	20,6
2-(Dimethylamino)ethanol (DMAE)	0,25	0,59	20,2
	2,5	0,40	19,8
	5,0	0,55	19,9

8.2 Wiederfindung

Die Wiederfindungen der Alkanolamine wurden im Zuge der Ermittlung der Präzision im Mindestmessbereich ausgewertet. Für jede Konzentration wurden drei Filter beaufschlagt. Die Ergebnisse können Tabelle 3 entnommen werden.

Bei der überwiegenden Anzahl der Alkanolamine wurden Wiederfindungen im Bereich von 95 bis 105 % ermittelt. Um zu eruieren, ob die Luftfeuchte einen Einfluss auf die Wiederfindung hat, wurde an den Grenzen des Mindestmessbereiches jeweils bei hoher und niedriger Luftfeuchte geprüft.

8.3 Bestimmungsgrenze

Die Bestimmungsgrenzen der Alkanolamine wurden aus 10-Punkt-Kalibrierungen in Konzentrationsbereichen von 0,5 bis 5 mg/L und 0,25 bis 2,5 mg/L für DGA und DEA gemäß DIN 32645 [18] ermittelt. Für alle Alkanolamine konnten die Konzentrationen für den 0,1-fachen Grenzwert als Bestimmungsgrenze aus der Summe von Dampf und Aerosol, bezogen auf 60 L Probeluftvolumen und 10 mL Probelösung, abgesichert werden. In Tabelle 4 sind die Bestimmungsgrenzen für die Alkanolamine aufgeführt. Für die Alkanolamine, für die derzeit kein Grenzwert existiert, wurde ein fiktiver Grenzwert von 2,5 mg/m³ angenommen.

Tab. 3 Mittlere Wiederfindungen der 11 Alkanolamine für n = 6 Bestimmungen

Alkanolamin	Mittlere Wiederfindung [%]		
	0,1 GW*	1 GW	2 GW
2-Aminoethanol (60 °C) (MEA)	94,9	100,5	98,7
Diethanolamin (40 °C) (DEA)	103,7	107,9	106,3
Triethanolamin (60 °C) (TEA)	99,3	104,6	102,6
1-Aminopropan-2-ol (40 °C) (MIPA)	97,2	97,3	97,0
2-Amino-2-methylpropanol (60 °C) (AMP)	85,7	89,1	87,8
2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol (40 °C) (AMPD)	94,8	100,5	100,0
Methyldiethanolamin (60 °C) (MDEA)	95,1	102,2	99,1
2-(2-Aminoethoxy)ethanol (40 °C) (DGA)	97,1	104,3	103,0
4-Amino-1-butanol (60 °C) (4-AB)	89,3	97,8	95,8
(S)-3-Amino-1,2-propandiol (30 °C) (APD)	98,0	94,7	95,2
2-(Dimethylamino)ethanol (40 °C) (DMAE)	94,6	101,0	99,8

* GW = Grenzwert

Tab. 4 Bestimmungsgrenzen (BG) der 11 Alkanolamine

Alkanolamin	BG = 0,1 GW* [mg/m ³]	BG = 0,1 GW [mg/L]
2-Aminoethanol (60 °C) (MEA)	0,25 (EU**)	1,50
Diethanolamin (40 °C) (DEA)	0,10	0,60
Triethanolamin (60 °C) (TEA)	0,50	3,00
1-Aminopropan-2-ol (40 °C) (MIPA)	0,58	3,48
2-Amino-2-methylpropanol (60 °C) (AMP)	0,46	2,76
2-Amino-2-methyl-1,3-propandiol (40 °C) (AMPD)	0,25	1,50
Methyldiethanolamin (60 °C) (MDEA)	0,25	1,50
2-(2-Aminoethoxy)ethanol (40 °C) (DGA)	0,087	0,52
4-Amino-1-butanol (60 °C) (4-AB)	0,25	1,50
(S)-3-Amino-1,2-propandiol (30 °C) (APD)	0,25	1,50
2-(Dimethylamino)ethanol (40 °C) (DMAE)	0,25	1,50

* GW = Grenzwert

** EU = Europäische Union

8.4 Kapazität der Quarzfaserfilter

Die Untersuchung zur Imprägnierung der Quarzfaserfilter wurde – bezogen auf den ungünstigsten Fall – ermittelt unter der Annahme, dass alle im Rahmen der Methodenentwicklung berücksichtigten Alkanolamine eine Konzentration entsprechend dem 2-fachen Grenzwert (2 GW) aufweisen. Dies entspricht einer Stoffmenge von 0,0783 mmol je Alkanolamin. Zudem enthalten 500 µL Imprägnierlösung 0,160 mmol MSA. Zur Vorbehandlung der Filter werden diese komplett mit Imprägnierlösung getränkt und nehmen dabei mehr als 500 µL MSA Lösung auf.

Da die Wiederfindungsversuche (Konzentrationen vom 2-fachen GW bei 2 Stunden Probenahme und 60 L Probenahmenvolumen) keine Auffälligkeiten zeigten, kann davon ausgegangen werden, dass die Imprägnierung im Messbereich ausreichend ist.

8.5 Lagerfähigkeit

Zur Ermittlung der Lagerfähigkeit wurden imprägnierte Quarzfaserfilter an einer dynamischen Prüfgasstrecke bei rel. Luftfeuchten zwischen 70 bis 90 % mit Konzentrationen an Alkanolaminen entsprechend einem Zehntel (0,1 GW) und dem doppelten Grenzwert (2 GW) dotiert. Die dotierten Filter wurden danach in Schraubdeckelfläschchen aus HDPE überführt, mit Elutionslösung überschichtet und die Fläschchen mit den dafür vorgesehenen Deckeln verschlossen und kurz umgeschüttelt. Die Schraubdeckelfläschchen wurden zunächst für 7 Tage bei Raumtemperatur und danach im Kühlschrank bei 4 °C aufbewahrt. Am 1., 3., 7., 21. und 28. Tag wur-

de jeweils eine Probe entnommen und in einer Doppelbestimmung analysiert. Im untersuchten Zeitraum konnten keine Konzentrationsänderungen festgestellt werden. Einzige Ausnahme zeigte sich bei APD, dessen Wiederfindung bei niedrigen Konzentrationen innerhalb von 14 Tagen auf ca. 91 % abgesunken war und bis zum Versuchsende (28 Tage) auf diesem Niveau blieb.

Für den Fall, dass beaufschlagte Proben bis zur Analytik mittels IC einige Zeit gelagert werden müssen, wird bei der Ergebnisberechnung von APD eine Wiederfindung von 0,909 (90,9 %) berücksichtigt. Diese Wiederfindung gilt für den Konzentrationsbereich von 0,25 bis 1,5 mg/m³.

8.6 Einfluss der Luftfeuchte

Der Einfluss der Luftfeuchte wurde bei Alkanolaminkonzentrationen im unteren und oberen Mindestmessbereich (0,1- und 2-facher Grenzwert) bei rel. Luftfeuchten von 10 bis 30 %, 40 bis 60 % sowie von 70 bis 90 % überprüft. Dazu wurden über einen Zeitraum von 2 Stunden 60 Liter Luft mit einem Volumenstrom von 0,5 L/min durch die mit Alkanolaminen dotierten Filter gesaugt. Die eingesetzten rel. Luftfeuchten wurden dabei an einer dynamischen Prüfgasstrecke erzeugt. Unmittelbar nach Dotierung der Filter und Durchsaugen von Luft, wurden die Filter entsprechend den Analysenproben aufgearbeitet und analysiert. Ein Einfluss der Luftfeuchte wurde nicht nachgewiesen.

8.7 Blindwerte

Zur Überprüfung von Blindwerten wurden Quarzfaserfilter imprägniert und über Nacht zum Trocknen bei Raumtemperatur stehen gelassen. Danach wurden die Filter entsprechend den Analysenproben in 10 mL Methansulfonsäure (20 mmol/L) extrahiert und danach für 15 Minuten im Ultraschallbad behandelt. Die komplette Probelösung wurde über einen Spritzenvorfilter filtriert und anschließend ionenchromatographisch unter Verwendung von Programm 2 (40 °C) (siehe Abschnitt 4) analysiert.

Es konnten keine Alkanolamin-Blindwerte nachgewiesen werden. Detektiert wurden jedoch Kationen-Blindwerte, wie z. B. von Natrium-, Kalium- und Ammoniumionen, die in den vorliegenden geringen Konzentrationen nicht stören. Beim Kauf neuer Quarzfaserfilter sollte deshalb auf geringe Blindwertgehalte an Natrium-, Ammonium- und Kaliumionen geachtet werden. Zur Kontrolle sind von neuen Filterchargen aus jeder Packung mindestens zwei nicht imprägnierte Filter auf Blindwerte zu untersuchen. Dazu werden die Filter dem vollständigen Analysengang unterzogen (vgl. Abschnitte 3.2, 4 und 5).

8.8 Störeinflüsse

Unter bestimmten Bedingungen können sich die 11 Alkanolamine gegenseitig stören, so dass eine ausreichende chromatographische Trennung und anschließende

Quantifizierung einzelner Alkanolamine nicht möglich ist. Sollten im ungünstigsten Fall alle 11 Alkanolamine in einer Probe vorliegen, dann können einige der Alkanolamine nur qualitativ bestimmt werden. Zudem können zusätzlich anwesende Alkanolamine, wie z. B. 2-Aminobutan-1-ol [96-20-8] und Diisopropanolamin [110-97-4] mit vorliegenden Alkanolaminen koeluieren. Um eine ausreichende chromatographische Peak-Trennung zu gewährleisten, ist die Anwendung der drei Eluentenprogramme zu empfehlen.

So kann z. B. 2-Amino-2-methylpropanol (AMP) quantitativ nur in Abwesenheit von 1-Aminopropan-2-ol (MIPA) bestimmt werden. Liegen jedoch beide Alkanolamine zusammen in einer Probe vor, dann kann AMP nur qualitativ bestimmt werden. Eine weitere Möglichkeit zur quantitativen Bestimmung von AMP ist die Messung mit dem Eluentenprogramm 1 (30 °C) (siehe Abschnitte 4); allerdings darf in diesem Fall kein 2-Aminoethanol (MEA) in der Probe anwesend sein. Die Praxis zeigt jedoch, dass MEA in den meisten Proben vorkommt und somit eine Quantifizierung von AMP bei dessen Anwesenheit nicht möglich ist.

Untersuchungen zeigen, dass nicht nur Störungen durch Alkanolamine auftreten können, sondern auch durch die Anwesenheit von Natrium-, Kalium- und Ammoniumionen, die z. B. beim Einsatz von wassergemischten Kühlschmierstoffen aus dem Ansetzwasser der Kühlschmierstoffemulsionen kommen oder im Verlauf des Bearbeitungsprozesses gebildet werden. Es hat sich gezeigt, dass häufig hohe Konzentrationen an Ammoniumionen vorliegen, wodurch enorme Störungen auftreten können. Kaliumionen stören ebenfalls, kommen aber im Vergleich zu Ammoniumionen in relativ geringen Konzentrationen in den Proben vor. Natriumionen können in den bisher vorliegenden Konzentrationen gut abgetrennt werden und stören nicht. Darüber hinaus können zudem Verunreinigungen der Probelösung mit Aminen, wie z. B. Methylamin, Dimethylamin und Trimethylamin die Trenneigenschaften der Alkanolamine stören.

9 Diskussion

Mit dem hier beschriebenen Messverfahren lassen sich die Konzentrationen ausgewählter Alkanolamine in der Luft am Arbeitsplatz in Konzentrationsbereichen von einem Zehntel bis zum zweifachen ihres AGW bzw. MAK-Wertes bestimmen. Als Probenahmesystem hat sich ein sauer imprägnierter Filter als geeignet erwiesen. Das in der Methodenvorschrift verwendete Probenahmesystem erfüllt die Voraussetzungen für die Probenahme von Partikel/Dampf-Gemischen entsprechend der DIN EN 13936 [4].

10 Anhang: Präzision und Richtigkeit mittels Vergleichsmessung

Die Präzision und Vergleichbarkeit der hier vorgestellten Analysenmethode wurden im Rahmen von Vergleichsmessungen vom IFA (Institut für Arbeitsschutz der

DGUV) und der AUVA (Allgemeine Unfallversicherungsanstalt Österreich) geprüft. Dazu wurden Realproben in zwei Betrieben (Metallbearbeitung mit wassergemischten Kühlschmierstoffen und Herstellung von Mikrochips) gezogen und vergleichend mit dem hier beschriebenen Messverfahren (IFA) und der Hausmethode der AUVA aufbereitet und analysiert (vgl. Tabellen 5 und 6). Des Weiteren wurden Vergleichsmessungen mit Proben vom IFA durchgeführt.

Die Vergleichsmessungen wurden beispielhaft für das Alkanolamin 2-Amino-2-methylpropanol (AMP) durchgeführt. Anhand der Proben vom IFA, konnten zudem die Alkanolamine Ethanolamin (MEA), Triethanolamin (TEA), Diglykolamin (DGA), 2-(Dimethylamino)ethanol (DMAE) und 2,2'-Methyliminodiethanol (MDEA) zum Methodenvergleich herangezogen werden. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Vergleichsmessungen von Routineproben mit Angaben der Wiederfindungen der AUVA aufgeführt.

Tab. 5 Probenahme und Probenaufbereitung – Vergleich IFA mit der AUVA

	IFA	AUVA
Probenahmesystem	GSP mit Aufsatzkegel für 0,5 L/min und Filterkapsel	Millipore-Kapsel
Volumenstrom	0,5 L/min	0,5 L/min
Probenaufbereitung	Elution in 10 mL MSA (20 mmol/L)	Elution in 5 mL MSA (20 mmol/L)

Tab. 6 Gerätschaften und Arbeitsbedingungen – Vergleich IFA mit der AUVA

	IFA	AUVA
Vorsäule:	IonPac CG16 (3 × 50 mm)	Metrohm, C4 S-Guard/4.0
Trennsäule:	IonPac CS16 (3 × 250 mm); Partikelgröße: 5,5 µm	Metrosep C4 (4 × 250 mm); Partikelgröße: 5 µm
Eluent:	Programm 1: 7 mmol/L	1,7 mmol/L HNO ₃ +
Methansulfonsäure (MSA) 20 mmol/L	Programm 2: 20 mmol/L	0,7 mmol/L Dicapolinsäure +
	Programm 3: 5 mmol/L	0,05 mmol/L 18-Krone-6
Eluentenfluss	Programm 1: 0,50 mL/min Programm 2: 0,36 mL/min Programm 3: 0,50 mL/min	0,93 mL/min
Injektionsvolumen	30 µL	20 µL
Alkanolamin	MEA, DEA, TEA, AMP, MIPA, DMAE, MDEA, DGA, APD, AMPD, 4-AB	MEA, MIPA, DEA, AMP, DGA, TEA, MDEA,
Kalibrierstandard [mg/L]	0,50; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50; 5,00 (für MEA, DEA, DGA wurden die Konzentrationen halbiert)	0,78; 1,56; 3,125; 6,25; 12,5; 25; 50; 100 (für DGA wurde die Konzentration halbiert)

Tab. 7 Ergebnisse von Vergleichsmessungen und Wiederfindungen (IFA mit der AUVA)

Alkanolamin	Anzahl Vergleichs- proben n	Konzentration der Proben vom IFA [mg/m ³]	Wiederfindung AUVA [%]
MEA	10	0,24–1,9	81–116
TEA	3	0,50–2,4	86–106
DGA	3	0,13–0,19	83–115
DMAE	2	0,38–1,4	88–127
MDEA	3	0,46–1,5	89–100

Die Messergebnisse der Proben vom IFA und der AUVA weisen gute Übereinstimmungen auf. Ausgehend von den Ergebnissen vom IFA liegen die stoffunspezifischen Wiederfindungen bei der AUVA im Bereich von 81 bis 127 %.

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Feldversuche aufgelistet, wobei die ermittelte relative Standardabweichung mit kleiner 5 % sehr gut war. Obwohl in zwei Betrieben gemessen wurde, sind hier die Ergebnisse von nur einem Betrieb (Chip-Herstellung) aufgeführt, weil im Betrieb der Metallbearbeitung außer 2-Amino-2-methylpropanol (AMP) keine weiteren Alkanolamine detektiert und somit quantifiziert werden konnten. Dabei wurde AMP zum Vergleich der Methoden bzgl. Probenahme (Probenahmesystem) und Analysenverfahren herangezogen. Entsprechend dem Sicherheitsdatenblatt des verwendeten wassergemischten Kühlschmierstoffes waren neben AMP auch DGA und TEA in besagtem Kühlschmierstoff enthalten, deren Konzentrationen jedoch nicht bestimmbar waren. In Rahmen des Feldversuches wurden neun Proben mit dem vom IFA verwendeten – und hier vorgestellten – Probenahmesystem gesammelt und mit der hier beschriebenen Methode analysiert. Für die Vergleichsmessungen entnahm die AUVA acht Proben mit ihrem Probenahmesystem, die anschließend mit dem Messverfahren der AUVA analysiert und ausgewertet wurden.

Tab. 8 Vergleichende Ergebnisse von AMP im Betrieb eines Chip-Herstellers

Messplatz	Ergebnis IFA [mg/m ³]	Standard- abweichung (rel.) [%]	Ergebnis AUVA [mg/m ³]	Standardabwei- chung (rel.) [%]	Wiederfindung IFA/AUVA [%]
1	2,1 ¹⁾	2,8	1,5 ¹⁾	4,7	140
2	1,7 ²⁾	2,9	1,4 ³⁾	4,0	121

¹⁾ Mittelwert aus 3 Einzelmessungen

²⁾ Mittelwert aus 6 Einzelmessungen

³⁾ Mittelwert aus 5 Einzelmessungen

Die gemessenen Konzentrationen an AMP waren mit der hier vorgestellten Methode (IFA) an beiden Messplätzen höher als die von der AUVA ermittelten. Die Unterschiede lassen sich damit erklären, dass mit dem von der AUVA eingesetzten Probenahmesystem die Anforderungen für die einatembare Fraktion entsprechend der DIN EN 481 [3] sowie der DIN EN 13936 [4] für Partikel/Dampf-Gemische für das verwendete Probenahmesystem nicht erfüllt waren, weil größere Partikel möglicherweise nur unvollständig erfasst wurden.

Literatur

- 1 TRGS 900 (2006) Arbeitsplatzgrenzwerte. BarBl Heft 1/2006 S. 41–55 zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2017 S. 368–370 [Nr. 20] (v. 8.6.2017), <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-900.html>
- 2 DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft (2017) MAK- und BAT-Werte-Liste 2017. Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Mitteilung 53, Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/9783527812110>
- 3 DIN EN 481 (1993) Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel; Deutsche Fassung EN 481:1993. Beuth Verlag, Berlin
- 4 DIN EN 13936 (2014) Exposition am Arbeitsplatz – Messung eines als Mischung aus luftgetragenen Partikeln und Dampf vorliegenden chemischen Arbeitsstoffes – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 13936:2014. Beuth Verlag, Berlin
- 5 Hartwig A (Hrsg.) (2014) Komponenten von Kühlschmierstoffen, Hydraulikflüssigkeiten und anderen Schmierstoffen. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 56. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/3527600418.mb0215khsd0056>
- 6 Greim H (Hrsg.) (2001) 2-Aminoethanol. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 33. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/3527600418.mb14143d0033>
- 7 Hartwig A und MAK Commission (2016) 2-Aminoethanol. The MAK Collection for Occupational Health and Safety Vol. 1, No 1, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527600418.mb14143d0060/abstract>
- 8 Greim H (Hrsg.) (2007) Diethanolamin. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 43. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/3527600418.mb11142d0043>
- 9 Hartwig A (Hrsg.) (2010) Triethanolamin. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 48. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim, <https://doi.org/10.1002/3527600418.mb10271kskd0048>
- 10 Hartwig A und MAK Commission (2016) Triethanolamin. The MAK Collection for Occupational Health and Safety Vol. 1, No 1, <https://doi.org/10.1002/3527600418.mb10271kskd0060>
- 11 Hartwig A (Hrsg.) (2015) 2-Amino-2-methyl-1-propanol. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 59. Lieferung.

Wiley-VCH, Weinheim,

<https://doi.org/10.1002/3527600418.mb12468kskd0059>

- 12 Hartwig A (Hrsg.) (2014) 2-(2-Aminoethoxy)ethanol (Diglykolamin). Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 56. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim,
<https://doi.org/10.1002/3527600418.mb92906kskd0056>
- 13 Greim H (Hrsg.) (1993) Methyldiethanolamin. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 19. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim,
<https://doi.org/10.1002/3527600418.mb10559kskd0019>
- 14 Greim H (Hrsg.) (1994) 1-Aminipropan-2-ol. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 20. Lieferung. Wiley-VCH, Weinheim,
<https://doi.org/10.1002/3527600418.mb7896kskd0020>
- 15 DIN EN ISO 13137 (2014) Arbeitsplatzatmosphäre – Pumpen für die personenbezogene Probenahme von chemischen und biologischen Arbeitsstoffen – Anforderungen und Prüfverfahren (ISO 13137:2013); Deutsche Fassung EN ISO 13137:2013. Beuth Verlag, Berlin
- 16 DIN EN 482 (2015) Exposition am Arbeitsplatz – Allgemeine Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Verfahren zur Messung chemischer Arbeitsstoffe; Deutsche Fassung EN 482:2012+A1:2015. Beuth Verlag, Berlin
- 17 DIN EN 1076 (2010) Exposition am Arbeitsplatz – Messung von Gasen und Dämpfen mit pumpenbetriebenen Probenahmeeinrichtungen – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1076:2009. Beuth Verlag, Berlin
- 18 DIN 32645 (2008) Chemische Analytik – Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen – Begriffe, Verfahren, Auswertung. Beuth Verlag, Berlin
- 19 Heckmann P und Breuer D (2014) Berechnung der erweiterten Messunsicherheit nach IFA <http://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/praxishilfen-gefahrstoffe/software-berechnung-der-erweiterten-messunsicherheit-nach-ifa/index.jsp>