

Langkettige Alkohole – Entwicklung und Validierung eines neuen Messverfahrens

P. Hochwald, K. Pitzke

ZUSAMMENFASSUNG Langkettige Alkohole haben in der Regel ein hohes Molekulargewicht, eine unverzweigte Molekülstruktur und einen primären Alkohol als Endgruppe. Bei kürzeren Kettenlängen liegen sie als farblose, ölige Flüssigkeiten vor und nehmen bei höheren Kettenlängen eine feste wachsartige Form an. Hauptanwendungsgebiete sind die Herstellung von nichtionischen Tensiden und der Einsatz in Kosmetika und Lebensmitteln als Zusatzstoffe. Im Folgenden werden die Entwicklung und Validierung eines Messverfahrens für 18 langkettige Alkohole nach entsprechender Norm und Technischem Regelwerk beschrieben sowie die Probleme, die hierbei aufgetreten sind. Die Probenahme der langkettigen Alkohole erfolgt mittels Gesamtstaub-/Gas-Probenahmesystem (GGP-Mini-System) mit einem dahinter geschalteten Aktivkohleröhrchen, um Partikel und Dämpfe gleichzeitig zu sammeln. Die Analytik erfolgt anschließend auf einem Gaschromatographen mit Flammenionisationsdetektion (FID). Die ermittelten Wiederfindungen sind zufriedenstellend und die Bestimmungsgrenzen der Stoffe liegen unterhalb des 0,1-fachen Beurteilungsmaßstabs. Die Messmethode erfüllt alle Anforderungen an Messverfahren gemäß der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 402. Die nächsten Ziele des Projektes sind die Integration in die Routineanalytik des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), die Durchführung von Realprobenmessungen, die Erweiterung der Methode um weitere Alkohole sowie die Verbesserung der eindeutigen Qualifizierung von Analyten.

1 Einleitung

Der Begriff langkettige Alkohole beschreibt aliphatische Alkohole mit einer Kettenlänge von mehr als fünf Kohlenstoffatomen. Bei Kettenlängen von C_6 bis C_{22} werden sie auch Fettalkohole genannt. Hauptanwendungsgebiete sind die Herstellung von Reinigungsmitteln und der Einsatz in Kosmetika und Lebensmitteln als Emulgatoren, Verdickungsmittel, Feuchtigkeitspender und Duftstoffe. Langkettige Alkohole werden ebenfalls als Schmiermittel, Lösemittel und Weichmacher verwendet oder als Zusatzstoffe bei der Medikamentenherstellung [1]. Der Marktumfang weltweit betrug im Jahr 2023 ca. 3,9 Mio. Tonnen, wobei etwa die Hälfte der kommerziell verwendeten Fettalkohole petrochemisch mittels Ziegler-Synthesen oder Hydroformulierung hergestellt werden. Weiterhin werden Fettalkohole aus natürlichen Quellen wie pflanzlichen Ölen und tierischen Fetten hergestellt [2, 3]. Die Nachfrage nach langkettigen Alkoholen ist in den letzten Jahren aufgrund des erhöhten Bedarfs an Flüssigseifen und Handdesinfektionsmitteln in der Corona-Pandemie und des global expandierenden Beauty-Sektors gestiegen [4].

Long-chain alcohols – development and validation of a new measurement method

ABSTRACT Long-chain alcohols usually have a high molecular weight, unbranched molecular structures and a primary alcohol as the end group. At shorter chain lengths they are present as colourless, oily liquids and take on a solid waxy form at longer chain lengths. The main areas of application are the production of non-ionic surfactants and their use as additives in cosmetics and food. The following describes the development and validation of a measurement method for 18 long-chain alcohols in accordance with the corresponding DIN Standard and technical regulations, as well as the problems encountered in the process. The long-chain alcohols are sampled via the GGP-mini-system with an activated carbon tube connected to collect particles and vapours simultaneously. The analysis is then carried out on a gas chromatograph with flame ionization detection (FID). The recoveries obtained are satisfactory and the limits of quantification of the substances are below 0.1 times the limit value. The method meets all the requirements for measurement procedures in accordance with the Technical Rule for Hazardous Substances (TRGS) 402. The next objectives of this project are to integrate the method into the Institute's for Occupational Safety and Health (IFA's) routine analysis, to carry out real sample measurements and to extend the method to include other alcohols, as well as to improve the unambiguous qualification of analytes.

Mit wenigen Ausnahmen sind Alkohole unterhalb einer Kettenlänge von C_{12} bei Raumtemperatur flüssig, gehören mit Siedepunkten unter 250°C zu den Volatile Organic Compounds (VOC) und liegen größtenteils als Partikel-Dampf-Gemisch vor [5, 6]. Sie haben eine Reiz- bis Ätzwirkung auf die Augen, reizen Atemwege und Haut und können Störungen im Zentralnervensystem hervorrufen. Diese Gefahren und die Hautresorption nehmen mit zunehmender Kettenlänge ab. Ab einer Kettenlänge von C_8 sind Alkohole schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.

Bisher gibt es keine empfohlenen Messverfahren für Alkohole ab einer Kettenlänge von C_5 in der Luft am Arbeitsplatz gemäß Anlage 3, Nummer 3.1, Absatz (7) der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 402 [7], mit Ausnahme von Pentan-1-ol [8]. Die Methode wurde gemäß den Anforderungen der DIN EN ISO 22065, DIN EN ISO 23861 und TRGS 402 validiert [9, 10]. Das Ziel der Methodenentwicklung ist es, die homologe Reihe der Alkohole von C_5 bis C_{13} und alle Isomere, die einen Beurteilungsmaßstab (BM) haben, in einer Methode zusammengefasst in der Arbeitsplatzluft zu sammeln und zu analysieren. Ein weiteres Kriterium ist die Verwendung von Probe-

Tabelle 1. Validierte langkettige Alkohole mit zugehörigen BM.

| Stoffname | CAS Nr. | Beurteilungsmaßstab [mg/m ³] | | Validierter Arbeitsbereich [mg/m ³] | Bestimmungsgrenze bei 40 L PLV [mg/m ³] |
|----------------------|------------|--|--------------|---|---|
| 2,2-Dimethylpropanol | 75-84-3 | 73 | AGW | 3,1–187 | 5,0 |
| 2-Ethylhexan-1-ol | 104-76-7 | 54 ^{1,2} | AGW | 2,5–152 | 3,7 |
| 2-Methylbutan-1-ol | 137-32-6 | 73 | AGW | 2,5–150 | 5,0 |
| 2-Methylbutan-2-ol | 75-85-4 | 73 | AGW | 2,5–150 | 5,0 |
| 3-Methylbutan-1-ol | 123-51-3 | 73 | AGW | 2,5–149 | 5,0 |
| 3-Methylbutan-2-ol | 598-75-4 | 73 | AGW | 2,5–151 | 5,0 |
| 4-Methyl-pentan-2-ol | 108-11-2 | 85 | AGW | 5,0–310 | 6,3 |
| Decanol-1-ol | 112-30-1 | 66 ² | AGW | 5,0–312 | 7,5 |
| Dodecanol-1-ol | 112-53-8 | 10 ² | ILV | 0,8–46 | 1,0 |
| 1-Heptanol | 111-70-6 | 150 ² | ILV | 5,0–314 | 7,5 |
| 1-Hexanol | 111-27-3 | 105 ² | AGW | 5,0–312 | 7,5 |
| Nonanol | 143-08-8 | 150 ² | ILV | 5,0–311 | 7,5 |
| Octan-1-ol | 111-87-5 | 54 ² | AGW | 2,5–150 | 3,7 |
| Pentan-1-ol | 71-41-0 | 73 | AGW | 2,5–150 | 5,0 |
| Pentan-2-ol | 6032-29-7 | 73 | AGW | 2,5–150 | 5,0 |
| Pentan-3-ol | 584-02-1 | 73 | AGW | 2,5–150 | 5,0 |
| Isotridecan-1-ol | 27458-92-0 | 21 ² | AGW | 1,1–65 ³ | 2,1 ³ |
| Undecanol | 112-42-5 | 50 ² | TA Luft [14] | 2,5–151 | 3,7 |

¹ Wert wurde im April 2023 herabgesetzt [11]

² Summe aus Dampf und Aerosol

³ Werte beziehen sich auf die Validierung mit Tridecan-1-ol (CAS: 112-70-9)

nahmeverfahren und Analysensystemen, die in der Routine bereits etabliert sind. In **Tabelle 1** sind alle 18 langkettigen Alkohole mit ihren entsprechenden BM aufgelistet, nach der das Messverfahren entwickelt und validiert wurde. Die Entwicklung und Überarbeitung von Messverfahren ist – so wie die Überprüfung und Aktualisierung der BM auch – ein stetiger Prozess. Während der Ausarbeitung des Messverfahrens wurde der BM für 2-Ethylhexan-1-ol von 54 mg/m³ um das Zehnfache gesenkt. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den BM von 54 mg/m³.

2 Material und Methoden

Die Entwicklung des Messverfahrens basiert auf der Probenahme mithilfe des Gesamtstaub-/Gas-Probenahmekopf-Mini-0,33-Systems (GGP-Mini), das mit einem 13-mm-Glasfaserfilter bestückt ist. Mittels eines lösemittelbeständigen Schlauches (z. B. Viton) wird ein Aktivkohleröhrchen (Dräger, Typ BIA) mit dem GGP-Mini verbunden. In **Bild 1** wird der Probenträger dargestellt. Somit können Partikel und Dämpfe in einer einzigen Probenahme gesammelt werden. Die Probenahmedauer beläuft sich auf 2 h, in denen 40 l Probeluftvolumen durch das System gezogen werden. Dies entspricht einem Volumenstrom von 0,333 l/min. Für die Probenvorbereitung wird der beaufschlagte Probenträger in ein Glasgefäß überführt und mit 10 ml Extraktionsmittel (ter-



Bild 1. GGP-Mini-System mit Transporthülse. Foto: Autoren

näres Gemisch bestehend aus 5 % Methanol, 35 % Schwefelkohlenstoff, 60 % Dichlormethan und internem Standard) überschichtet. Das Extraktionsmittel wird gelegentlich geschüttelt, nach 20 Minuten mittels einer Spritze entnommen und mit einem PTFE-Spritzenvorsatzfilter (45 µm Porengröße) filtriert. Die Analyse der Probe erfolgt durch einen Gaschromatographen (GC) mit anschließender Flammenionisations-Detektion (FID). Die Geräteeigenschaften und Analysenparameter sind in **Tabelle 2** aufgeführt. Ein Beispielchromatogramm ist in **Bild 2** dargestellt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Methodenentwicklung

Ausgehend von den Grundparametern der in der Routine verwendeten Methode wurde ein Mischstandard aller Stoffe herge-

stellt und analysiert, um die Trennung der einzelnen Analyten zu optimieren [12]. Eine Verlängerung der initialen Haltezeit bei 50°C, die Integration einer Haltezeit bei 90°C und die Anpassung des Trägergasstromes erzielten eine gute Trennung aller Analyten, die anfänglich keine ausreichende Trennung aufwiesen oder coeluierten. Durch die hohen Siedepunkte der langkettigen Analyten mit $C_{n>9}$ ist die Verdampfung träger als bei Analyten mit niedrigeren Siedepunkten, was zu einer Verbreiterung der Peakform führt. Die Peakflächen und Retentionszeiten sind jedoch reproduzierbar und eine Anpassung der Injektor- oder Detektor-Temperatur konnte keine Verbesserung erzielen. Um die Peakform der Analyten mit höheren Siedepunkten zu verbessern, wurden die Temperaturrampe und der Fluss zum Ende des Analysenlaufes angepasst und es konnte eine bessere Fokussierung erzielt werden. Um einen großen und dennoch linearen Messbereich von 1 bis 300 mg/m³ zu realisieren, wurde das Split-Verhältnis auf 30:1 (bei 30 ml/min Splitfluss) gesetzt. Bei diesem Split werden an der Bestimmungsgrenze noch ausreichend hohe Signal-zu-Rausch-Verhältnisse erzeugt (Signal-to-Noise Ratio, S/N > 20) und die Peakflächen sind reproduzierbar. Weiterhin können alle Konzentrationen, ausgehend von einem Zehntel BM bis hin zum doppelten BM, in nur einer linearen Kalibrierung sicher und reproduzierbar abgedeckt werden. Als interner Standard wird Cyclohexanol (CAS-Nummer: 108-93-0) verwendet, da das Verhalten in Lösung und bei Lagerung dieser sehr ähnlich zu den ausgewählten Alkoholen ist und es zu keinen Interferenzen mit anderen Analyten kommt.

3.2 Aspekte der Messverfahrensentwicklung

Für die Extraktionsversuche wurden Probenträger dotiert und auf Basis des Vorgehens bei Alkoholen mit ternärem Gemisch extrahiert [13]. Bei ersten Versuchen waren deutliche Verluste zu verzeichnen, was auf die Verwendung von Silikonschläuchen zurückzuführen war. Alkohole mit Kettenlängen zwischen C_6 und

Tabelle 2. Geräteeigenschaften und Analysenparameter

| | |
|--------------------------------|--|
| Chromatograph | Agilent 8890 Series GC-System |
| Injektion | Autosampler: Agilent ALS Spritze, 10 µL, fixierte Nadel, 23–26s/42/Konus, PTFE-Kolben Abdichtung (Gasdicht) Injektor: Agilent Inlet liner, Ultra Inert, Split, gerade, Glaswolle |
| Detektor | FID Düse Agilent, universal fit, 0.018" Innendurchmesser |
| Gerätesteuerung und Auswertung | Openlab CDS, Version 2.5 |
| Trennsäule | DB-5MS UI 60m, ID = 250 µm, FD = 1,0 µm (122–5563UI) |
| Trägergas | Helium |
| Trägergasstrom | Flussprogramm: 1 ml/min für 12 Minuten halten, mit 0,05 ml/min pro min auf 1,3 ml/min, mit 0,1 ml/min pro min auf 1,8 ml/min |
| Split | 30:1 (30 ml/min Splitfluss) |
| Injektortemperatur | 250 °C |
| Injektionsvolumen | 1 µl |
| Ofenprogramm | 50 °C 12 min halten 6 °C/min auf 90 °C, 0 min halten 20 °C/min auf 220 °C, 9,833 min halten 50 °C/min auf 290 °C, 1 min halten 100 °C/min auf 50 °C, 0 min halten |
| Detektortemperatur | 250 °C |

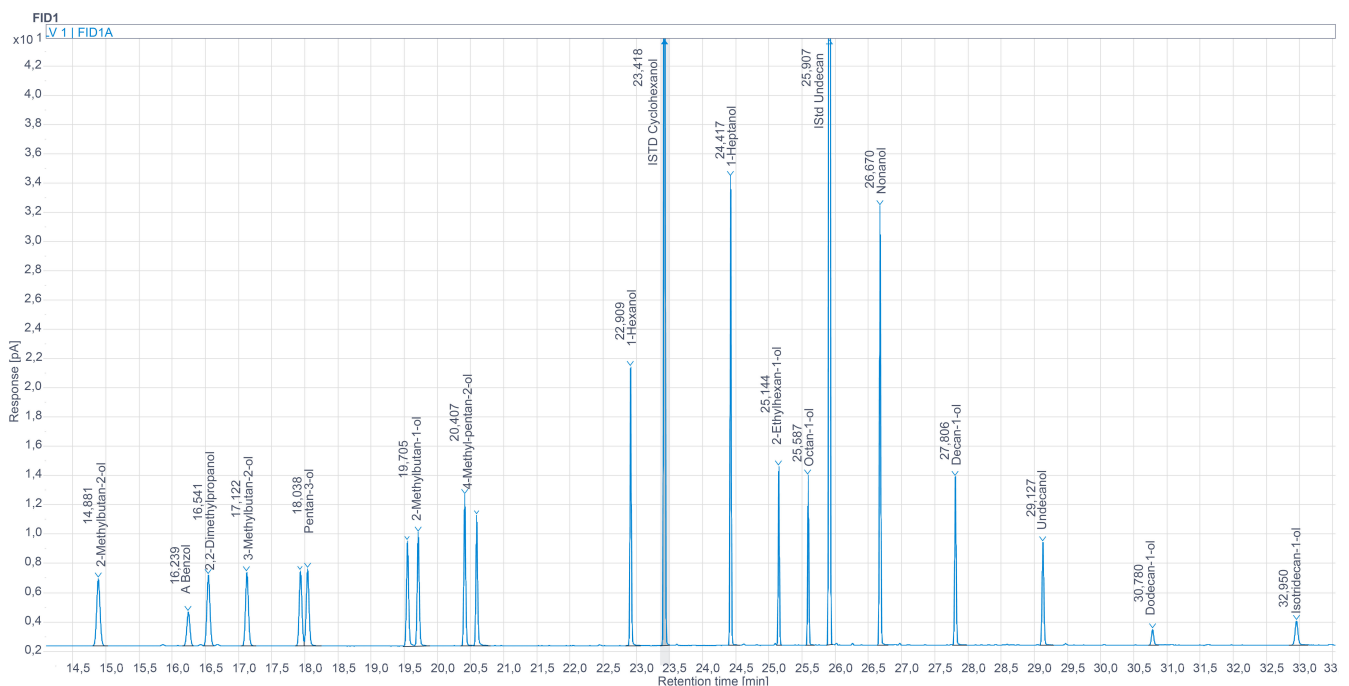


Bild 2. Beispielchromatogramm bei 0,1 BM. Grafik: Autoren

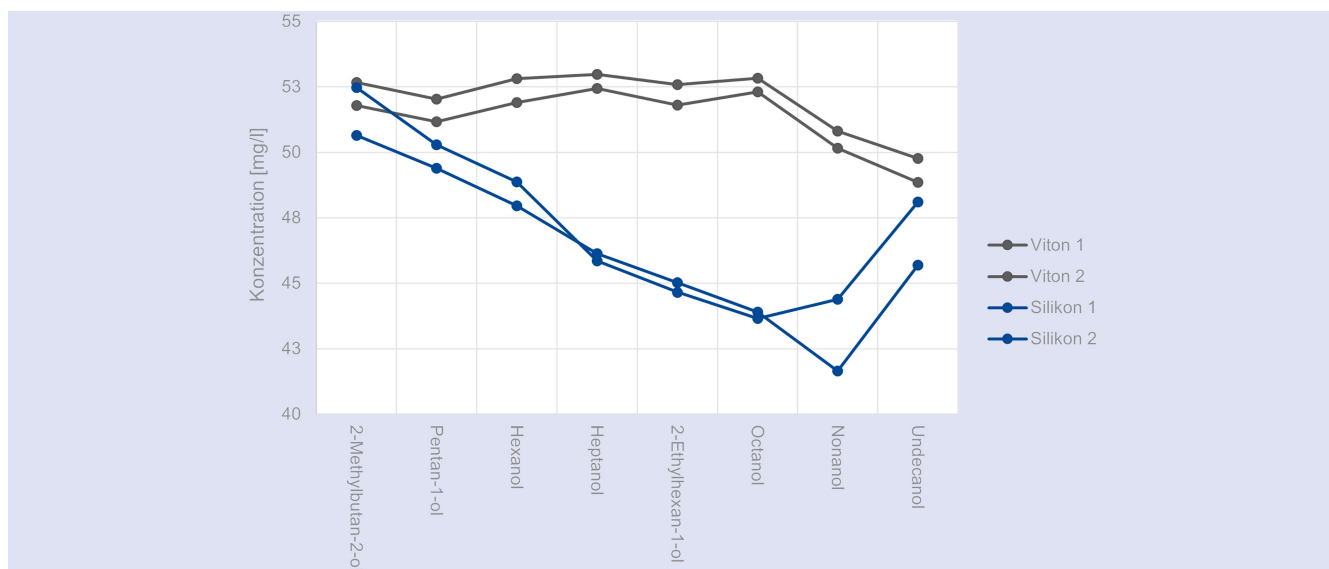


Bild 3. Vergleich Silikon- und Viton-Schlauch für die Probenahme. Grafik: Autoren

C₁₀ werden vom Silikon adsorbiert. Dies wurde nachgewiesen, indem ein Verbindungsschlauch nach erfolgter Probenahme aufgearbeitet wurde und die betroffenen Alkohole quantifiziert werden konnten. Bild 3 zeigt den Vergleich einer Probenahme mit einem Silikonschlauch und einem lösemittelbeständigen Schlauch.

Für die Bestimmung der Extraktionsdauer wurden Vergleichsversuche für unterschiedliche Extraktionszeiten und die Behandlung der Probenträger mit und ohne Ultraschallbad analysiert. Die höchste Wiederfindung und reproduzierbarsten Ergebnisse wurden bei 20 Minuten Extraktionszeit ohne Ultraschallbehandlung erzielt.

Die Kombination der unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Alkohole und des Extraktionsmittels erfordern eine schnelle und sorgfältige Bearbeitung bei der Dotierung und Aufarbeitung der Probenträger. Aufgrund des hohen Dampfdruckes des Extraktionsmittels (z. B. 470 hPa für Dichlormethan) verdunstet es sehr schnell, was ein entsprechendes Handling erfordert [6].

Es wurde ausschließlich mit direktverdrängenden Pipetten gearbeitet, um den Luftraum in der Pipettenspitze zu minimieren, da in diesem Luftraum ein Überdruck entsteht und die Flüssigkeit nicht volumetrisch korrekt abgegeben werden kann.

Weiterhin erzeugt Schwefelkohlenstoff bei Kontakt mit Aktivkohle eine exotherme Reaktion, wodurch ein Verdampfen des Extraktionsmittels und der Analyten zusätzlich begünstigt wird. Um dem vorzubeugen, wird das Extraktionsgefäß schnellstmöglich verschlossen, nachdem der Probenträger mit Extraktionsmittel überschichtet wurde. Der Überstand wird nach der Extraktionszeit mittels einer Kanüle durch ein Septum im Deckel entnommen. Somit wird ein Abdampfen der Chemikalien weiter reduziert.

3.3 Validierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Validierung werden im Folgenden dargestellt. In Tabelle 1 sind die Bestimmungsgrenzen und der vali-

dierte Messbereich aufgeführt. Tabelle 3 zeigt weitere Ergebnisse der Verfahrensvalidierung nach DIN EN ISO 22065 und DIN EN ISO 23861.

Die Probenträger weisen keine Blindwerte auf und es konnte kein Durchbruch festgestellt werden. Die Lagerzeit beträgt 20 Tage für den zweifachen BM. Für die Wiederfindungsversuche bei 40 °C müssen zusätzliche Versuche durchgeführt werden, um Fehler bei der Durchführung der Versuche final ausschließen zu können und gegebenenfalls Korrekturfaktoren für die unterschiedlichen Messbedingungen bei Realproben zu ermitteln.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte Messverfahren für langkettige Alkohole wurde nach DIN EN ISO 22065 und DIN EN ISO 23861 validiert und erfüllt die Anforderungen der TRGS 402 in vollem Umfang.

Die Integration des neu entwickelten Messverfahrens im Messsystems Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (MGU) wird durch die Analyse von realen Arbeitsplatzproben zur Überprüfung auf Eignung als ausreichend robuste Standardmethode erfolgen.

Darüber hinaus hat sich bei der Verfahrensentwicklung gezeigt, dass die Methode hinsichtlich einer verbesserten Qualifizierung von Analyten erweitert werden sollte, wenn mit weiteren langkettigen Alkoholen in der Luft am Arbeitsplatz zu rechnen ist. Eine Möglichkeit hierfür ist die parallele Verwendung einer zweiten Analysensäule mit einer anderen Beschichtung, um eine zweite Retentionszeit als Qualifizierungsfaktor zu erhalten. Die gleichzeitige Detektion mittels FID und Massenspektrometer würde eine eindeutige Identifikation von Analyten und Interferenzen ermöglichen.

Das entwickelte Messverfahren kann um weitere langkettige Alkohole erweitert werden und hat das Potenzial, durch wenige Veränderungen noch niedrigere Bestimmungsgrenzen zu erreichen.

Tabelle 3. Ergebnisse der Validierung.

| Stoffname | Mittlere Wiederfindung [%] | Verfahrensvariationskoeffizient [%] | Erweiterte Messunsicherheit [%] | Wiederfindung bei 20 % Luftfeuchte [%] | Wiederfindung bei 80 % Luftfeuchte [%] | Wiederfindung bei 10 °C [%] | Wiederfindung bei 40 °C [%] |
|----------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|--|-----------------------------|-----------------------------|
| 2,2-Dimethylpropanol | 96,7 | 0,4 | 27,5 | 101,2 | 98,2 | 98,0 | 96,8 |
| 2-Ethylhexan-1-ol | 99,8 | 0,6 | 26,4 | 103,4 | 102,7 | 99,0 | 97,2 |
| 2-Methylbutan-1-ol | 95,0 | 0,6 | 24,0 | 94,1 | 95,4 | 95,9 | 93,7 |
| 2-Methylbutan-2-ol | 95,1 | 0,7 | 26,5 | 97,1 | 93,4 | 94,9 | 93,8 |
| 3-Methylbutan-1-ol | 95,4 | 0,6 | 24,6 | 94,4 | 95,4 | 97,3 | 94,2 |
| 3-Methylbutan-2-ol | 96,2 | 0,7 | 24,6 | 94,1 | 95,3 | 95,9 | 93,4 |
| 4-Methyl-pentan-2-ol | 99,0 | 0,4 | 26,4 | 101,8 | 100,2 | 96,9 | 91,9 |
| Decanol-1-ol | 97,0 | 0,3 | 25,3 | 99,5 | 98,9 | 98,9 | 94,5 |
| Dodecanol-1-ol | 101,4 | 0,6 | 29,3 | 104,3 | 106,1 | 101,7 | 96,5 |
| 1-Heptanol | 97,1 | 0,4 | 25,3 | 96,9 | 97,4 | 99,3 | 93,3 |
| 1-Hexanol | 96,3 | 0,4 | 26,1 | 95,7 | 97,5 | 96,8 | 91,8 |
| Nonanol | 95,3 | 0,3 | 25,7 | 97,4 | 96,5 | 95,2 | 91,0 |
| Octan-1-ol | 98,2 | 0,6 | 26,2 | 102,1 | 100,5 | 97,1 | 92,2 |
| Pentan-1-ol | 95,5 | 0,6 | 25,2 | 94,8 | 97,4 | 99,4 | 95,6 |
| Pentan-2-ol | 96,6 | 0,6 | 25,2 | 94,9 | 97,8 | 99,5 | 96,2 |
| Pentan-3-ol | 96,7 | 0,7 | 24,2 | 95,7 | 96,9 | 96,0 | 94,8 |
| Tridecan-1-ol | 96,8 | 0,7 ³ | 25,0 | 100,1 | 97,8 | 98,1 | 94,1 |
| Undecanol | 97,6 | 0,5 | 25,6 | 101,0 | 99,3 | 98,1 | 94,9 |

Literatur

- [1] Noweck, K.; Grafahrend, W.: „Fatty Alcohols“ Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim, Wiley-VCH 2003.
- [2] Fatty Alcohol Market Size, Share & Trends Analysis By Product (C₆-C₁₀, C₁₁-C₁₄, C₁₅-C₂₂), By Application (Soaps & Detergents, Personal Care, Lubricants, Amines), By Region, And Segment Forecasts, 2015–2022. Report ID: 978-1438038-436-9.
- [3] Fatty Alcohol Market Size, Share & Trends Analysis By Product (C₆-C₁₀, C₁₁-C₁₄, C₁₅-C₂₂), By Application (Soaps & Detergents, Personal Care, Lubricants, Amines), By Region, And Segment Forecasts, 2015–2022; Report ID: 978-1438038-436-9. <https://www.chemanalyst.com/industry-report/fatty-alcohol-market-634>
- [4] Fatty Alcohol Market Size, Share @ Covid-19 Impact Analysis, By Product (C₆-C₁₀, C₁₁-C₁₄, and C₁₅-C₂₂), By Application (Soaps & Detergents, Personal Care, Lubricants, Amines, and Others) and Regional Forecast, 2020-2027. Report ID FBI102900.
- [5] Technical Overview of Volatile Organic Compounds. Hrsg.: Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>
- [6] Gestis-Stoffdatenbank. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). <https://gestis.dguv.de>
- [7] Bewertung von Verfahren zur messtechnischen Ermittlung von Gefahrstoffen in der Luft am Arbeitsplatz. Hrsg.: Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS). https://www.baua.de/DE/Die-BAuA/Aufgaben/Geschaeftsfuehrung-von-Ausschuessen/AGS/pdf/Messverfahren.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- [8] Deckblatt zu Lösemittelgemische, Vorbemerkungen D1, 18. Lieferung 2014. <https://repository.publisso.de/resource/frl:6453606/data>
- [9] DIN EN ISO 22065: Luft am Arbeitsplatz – Gase und Dämpfe – Anforderungen an die Evaluierung von Messverfahren mit pumpenbetriebenen Probenahmegeräten (ISO 22065:2020). Ausg. 02/2021. Bonn, Beuth 2021.
- [10] DIN EN ISO 23861: Luft am Arbeitsplatz – Als Mischung aus luftgetragenen Partikeln und Dampf vorliegender chemischer Arbeitsstoff – Anforderungen an die Bewertung von Messverfahren mit Sammlern (ISO 23861:2022). Ausg. 02/2023. Bonn, Beuth 2023.
- [11] Neue Arbeitsplatzgrenzwerte in der TRGS 900. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin 2023. https://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/arbeitsplatzgrenzwerte/aktuelles/neue-agw_202-04.pdf
- [12] Breuer, D.; Eisenhardt, A.; Ngazil, R.: Benzol. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, Kennzahl 6265. Lieferung 01/2019. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2019. https://www.ifa-arbeitsmappedigital.de/IFA-AM_6265
- [13] Lichtenstein, N.: Ethanol. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, Kennzahl 7330. Lieferung 18/1997. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 1997. https://www.ifa-arbeitsmappedigital.de/IFA-AM_7330
- [14] Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021. GMBI. (2021) Nr. 48-54, S. 1050.



Patrick Hochwald, M.Sc.,
Dipl.-Chem. Katrin Pitzke,
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.