

UMWELT UND GESUNDHEIT

07/2023

Abschlussbericht

Einfluss von Raumumwelt auf Geruchsschwellen

von:

Kirsten Sucker, Christian Monsé

Institut für Prävention und Arbeitsmedizin
der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA), Bochum

Herausgeber:

Umweltbundesamt

UMWELT UND GESUNDHEIT 07/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 61 214 0
FB001102

Abschlussbericht

Einfluss von Raumumwelt auf Geruchsschwellen

von

Kirsten Sucker, Christian Monsé
Institut für Prävention und Arbeitsmedizin
der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[/umweltbundesamt.de](http://umweltbundesamt.de)
[/umweltbundesamt](http://umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)
Bürkle-de-la-Camp Platz 1
44789 Bochum
Abschlussdatum:
Januar 2023

Redaktion:

Fachgebiet FG II 1.2 Toxikologie, gesundheitsbezogene Umweltbeobachtung
Madlen David, Malgorzata Debiak

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1868-4340

Dessau-Roßlau, August 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Einfluss von Raumumwelt auf Geruchsschwellen

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) hat ein Konzept von Geruchsleitwerten (GLW) entwickelt, um Beschwerden über Geruchsbelästigungen im Innenraum zu objektivieren. Das Konzept beruht auf der Annahme, dass chemische Substanzen bei einer Stoffkonzentration, die um ein Vielfaches oberhalb der Geruchsschwelle liegt, als unangenehm und belästigend wahrgenommen werden. Grundlage für die Aufstellung von GLW sind geeignete Geruchsschwellen, die üblicherweise unter Verwendung eines Olfaktometers direkt an der Nase ermittelt werden (nose-only). Anwendung finden die GLW jedoch bei der Beurteilung von Gerüchen in der Innenraumluft, wenn der ganze Mensch dem Geruchsstoff ausgesetzt ist (whole-body). Die Frage war also, ob eine mit dynamischer Olfaktometrie ermittelte Geruchsschwelle eine zuverlässige Aussage über die Wahrnehmung dieses Geruchs im Innenraum ermöglicht.

Insgesamt 21 gesunde Personen (10 Frauen/11 Männer; 19-51 Jahre alt) mit normalem Riechvermögen nahmen an der Studie teil und wurden in der Messung von Geruchsschwellen nach DIN EN 13725 geschult. Zunächst wurden die mit einem Olfaktometer und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd verglichen. Diese Untersuchungen wurden im Expositionslabor (ExpoLab) des IPA unter standardisierten Umgebungsfaktoren durchgeführt: warmes Licht (2800 Kelvin); leises Ventilatorgeräusch (45 dB(A)); 22-24°C; 415 ppm Kohlenstoffdioxid (CO₂); relative Luftfeuchtigkeit 34-45 %. Anschließend wurde der Einfluss von veränderten Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwelle von n-Butanol untersucht: kaltes Licht (6500 Kelvin); Straßenlärm (70 dB(A) mit Spitzen bis 85 dB(A)), erhöhte Temperatur (26°C), 1000 ppm und 4000 ppm CO₂.

Die veränderten Umgebungsfaktoren hatten keinen Einfluss auf die Geruchsschwelle von n-Butanol, weder am Olfaktometer noch in der Raumluft. Einzelne Prüfpersonen wiesen bei Straßenlärm und erhöhter Temperatur höhere Geruchsschwellen auf als unter standardisierten Umgebungsfaktoren. Geruchsschwellenmessungen mit einem Olfaktometer erfordern ein hohes Maß an Konzentration. Eine Störung dieser Konzentration kann zu höheren Geruchsschwellen führen und die intraindividuelle Varianz erhöhen. Die Ergebnisse bestätigen, dass Geruchsschwellenmessungen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen durchgeführt werden sollten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Raumluft gemessenen Geruchsschwellen immer niedriger waren als die mit dynamischer Olfaktometrie ermittelten Geruchsschwellen. Dieser Unterschied war jedoch nur bei n-Butanol, nicht aber bei Benzaldehyd signifikant. Mehrere Studien mit einem baugleichen Olfaktometer hatten gezeigt, dass im Verdünnungssystem, das hauptsächlich aus Edelstahl besteht, signifikante Wandungseffekte bei n-Butanol auftreten können. Diese Wandungseffekte werden als ein möglicher Grund für die beobachteten Unterschiede diskutiert.

Die Studie hat gezeigt, dass eine mit dynamischer Olfaktometrie ermittelte Geruchsschwelle eine zuverlässige Aussage über die Wahrnehmung dieses Geruchs im Innenraum ermöglicht. Die für die Stoffe n-Butanol und Benzaldehyd gezeigte Vergleichbarkeit der Geruchsschwellen sollte unter idealen Laborbedingungen und bei Verwendung standardisierter Messmethoden auch für andere Geruchsstoffe gefunden werden.

Abstract: Influence of indoor environment on odor thresholds

The German Committee on Indoor Air Guide Values (AIR) has developed a concept of odor guideline values (OGV) to objectify complaints about odor nuisance. The concept assumes that chemical substances are perceived as unpleasant and annoying at a concentration level many times above the odor threshold. Therefore, appropriate odor detection thresholds (ODT) are needed, which are usually determined directly at the nose using an olfactometer (nose-only). However, the OGV are used for the assessment of odors in indoor air, when the whole person is exposed to the odorant (whole-body). Thus, the research question was whether an ODT measured with dynamic olfactometry provides a reliable indication of the perception of this odor in an indoor environment.

A total of 21 healthy volunteers (10 women/11 men; 19-51 years old) with normal olfactory abilities participated in the study and were trained in the measurement of ODT according to DIN EN 13725. First, odor thresholds for n-butanol and benzaldehyde determined with an olfactometer and in room air were compared. These investigations were carried out in the exposure laboratory (ExpoLab) of the IPA under standardized environmental conditions: warm light (2800 Kelvin); quiet fan noise (45 dB(A)); 22-24°C; 415 ppm carbon dioxide (CO₂); relative humidity 34-45 %. Then, the influence of the modified environmental conditions on the odor threshold of n-butanol was investigated: cold light (6500 Kelvin); street noise (70 dB(A) with peaks up to 85 dB(A)), elevated temperature (26°C), 1000 ppm and 4000 ppm CO₂.

The modified environmental factors had no effect on the odor threshold of n-butanol, either at the olfactometer or in the room air. Individual subjects exhibited higher odor thresholds in the presence of street noise and elevated temperature than under standardized environmental conditions. Odor threshold measurements with an olfactometer require a high level of concentration. Disturbing this concentration may result in higher odor thresholds and increase intraindividual variance. The results confirm that odor threshold measurements should be performed under controlled environmental conditions.

The results show that odor thresholds measured in room air were always lower than those determined by dynamic olfactometry. However, this difference was significant only for n-butanol, but not for benzaldehyde. Several studies with an identical olfactometer had shown that significant wall effects can occur with n-butanol in the dilution system, which consists mainly of stainless steel. These wall effects are discussed as a possible reason for the observed differences.

The study has shown that an ODT determined with dynamic olfactometry provides a reliable indication of the perception of this odor in an indoor environment. The comparability of odor thresholds shown for the substances n-butanol and benzaldehyde should also be found for other odorants under ideal laboratory conditions and using standardized measurement methods.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
Zusammenfassung.....	12
Summary	15
1 Hintergrund und Problemstellung.....	18
2 Ziel und Gegenstand des Forschungsvorhabens	19
3 Methoden	20
3.1 Expositionsgenerierung und -überwachung	20
3.1.1 Olfaktometrie.....	20
3.1.2 Raumlufte	21
3.1.3 Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration	21
3.1.3.1 Qualitative Konzentrationsprofile für n-Butanol und Benzaldehyd am Olfaktometer und in der Raumlufte des ExpoLab.....	21
3.1.3.2 Berechnung der Konzentrationsstufen für n-Butanol und Benzaldehyd am TO8- Olfaktometer und in der Raumlufte des ExpoLab.....	22
3.1.3.3 Innenraummessung einer Konzentrationsstufe für n-Butanol und Benzaldehyd in der Raumlufte des ExpoLab	23
3.1.4 Auswahl der Studienteilnehmenden.....	23
3.1.4.1 Rekrutierung	23
3.1.4.2 Eignungsuntersuchungen gemäß DIN EN 13725	23
3.1.5 Ermittlung der Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd am TO8- Olfaktometer und mittels Begehung eines Raumes.....	24
3.1.5.1 Ablauf eines Testtages.....	24
3.1.5.2 Geruchsschwellenmessung am TO8-Olfaktometer.....	25
3.1.5.3 Geruchsschwellenmessung in der Raumlufte des ExpoLab	25
3.1.5.4 Umgebungsfaktoren	25
3.1.6 Auswertung.....	26
3.1.6.1 Das Verfahren nach Bland-Altman.....	26
3.1.6.2 Festlegung des Toleranzbereiches auf 0,6 lg(ppb)	27
4 Ergebnisse	29
4.1 Expositionsbedingungen	29
4.1.1 Klimadaten im ExpoLab.....	29
4.1.2 Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration	29

4.1.2.1	Qualitative Konzentrationsprofile für n-Butanol und Benzaldehyd am Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab	29
4.1.2.2	Berechnete Geruchsstoffkonzentration am Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab.....	30
4.1.2.3	Innenraummessung einer Konzentrationsstufe für n-Butanol und Benzaldehyd in der Raumluft des ExpoLab	31
4.1.3	Auswahl der Studienteilnehmenden.....	32
4.1.3.1	Rekrutierung	32
4.1.3.2	Eignungsuntersuchungen gemäß DIN EN 13725	35
4.1.4	Vergleich der Geruchsschwellen von n-Butanol und Benzaldehyd, gemessen am TO8-Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab	38
4.1.5	Einfluss der Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwellen von n-Butanol, gemessen am TO8-Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab	40
5	Diskussion	45
5.1	Rekrutierung und Eignung	45
5.2	Unterschied zwischen Olfaktometrie und Raumluft	45
5.3	Einfluss der Umgebungsfaktoren	47
6	Schlussfolgerungen	50
7	Quellenverzeichnis	51
A	Anhang.....	54
A.1	Kalibrierbericht zum TO8-Olfaktometer der Firma Olfasense.....	54
A.2	Berechnung der Konzentrationsstufen für n-Butanol und Benzaldehyd in der Raumluft des ExpoLab	55
B	Anhang.....	56
B.1	Online-Fragebogen für die Probandenrekrutierung	56
B.2	Bewertung von Akzeptanz und Intensität der Raumluft im ExpoLab.....	58
B.3	Zeitlicher Ablauf eines Testtages mit Olfaktometrie und Raumluftbewertung.....	59
C	Anhang.....	60
C.1	Eignungsuntersuchung: Ausschluss von drei Personen, die zu empfindlich waren (korrigierte Werte)	60
C.2	Qualitätssicherung: Ausschluss von Personen, die zu unempfindlich waren (berechnete Werte).....	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	TO8-Olfaktometer mit erweiterten Sichtschutzblenden und LED-Panel im ExpoLab.....	20
Abbildung 2:	TO8-Olfaktometer – Probenahme im Riechrohr Nr. 3	22
Abbildung 3:	Darstellung der qualitativen Konzentrationsprofile für n-Butanol am Olfaktometer und in der Raumluft.....	29
Abbildung 4:	Darstellung der qualitativen Konzentrationsprofile für Benzaldehyd am Olfaktometer und in der Raumluft	30
Abbildung 5:	Polaritätenprofil für n-Butanol (rot) und Benzaldehyd (blau)..	34
Abbildung 6:	Vergleich der Geruchsschwellen für n-Butanol (Eignung vs. Qualität).....	37
Abbildung 7:	Unter Standardbedingungen ermittelte Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd (Punkte: Individuelle Schwellen, Balken: Mittelwert $\pm$ STD)	38
Abbildung 8:	Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter Standardbedingungen olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)	39
Abbildung 9:	Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter Standardbedingungen olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für Benzaldehyd (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)	40
Abbildung 10:	Einfluss der Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwelle von n-Butanol	41
Abbildung 11:	Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von erhöhter Temperatur olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)	42
Abbildung 12:	Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von kaltem Licht olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)	43
Abbildung 13:	Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von Straßenlärm olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)	43
Abbildung 14:	Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von 1000 ppm CO ₂ olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)	44

Abbildung 15:	Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von 4000 ppm CO ₂ olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)	44
Abbildung 16:	Qualitative Konzentrationsprofile für n-Butanol am Olfaktometer	46
Abbildung 17:	Qualitative Konzentrationsprofile für Propylen am Olfaktometer	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Darstellung der Konzentrationsstufen in ppb und in lg(ppb) ...	27
Tabelle 2:	Berechnete Geruchsstoffkonzentration je Verdünnungsstufe in ppb.....	29
Tabelle 3:	Berechnete Geruchsstoffkonzentration je Verdünnungsstufe in ppb.....	30
Tabelle 4:	Korrigierte Geruchsstoffkonzentration je Verdünnungsstufe in ppb.....	31
Tabelle 5:	Geruchsschwellen je Verdünnungsstufe in ppb auf Basis der berechneten bzw. korrigierten Geruchsstoffkonzentration	32
Tabelle 6:	Kennzahlen der Prüfpersonen	32
Tabelle 7:	Eignung: Individuelle Geruchsschwellen (ppb) für n-Butanol..	35
Tabelle 8:	Qualitätssicherung: Individuelle Geruchsschwellen (ppb) für n-Butanol	36
Tabelle 9:	Deskriptive Kennwerte für die unter Standardbedingungen ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd (ppb, lg(ppb)).....	38
Tabelle 10:	Olfaktometrie vs. Raumluft: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme	39
Tabelle 11:	Einfluss der Umgebungsfaktoren: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme	41
Tabelle 12:	Eignungsuntersuchung: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme	60
Tabelle 13:	Qualitätssicherung: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme	61

Abkürzungsverzeichnis

AIR	Ausschuss für Innenraumrichtwerte
CAS Nr.	Die CAS-Nummer (engl.: Chemical Abstract Service Registry Number) ist die Registriernummer für jeden einzelnen Stoffeintrag in die Datenbank des Chemical Abstract Service und liefert damit eine eindeutige, numerische Kennung für den jeweiligen chemischen Stoff
CO₂	Kohlenstoffdioxid
Eignung	Eignungsuntersuchung (nach DIN EN 13725 für die Auswahl von Prüfpersonen anhand ihrer individuellen Geruchsschwelle)
ExpoLab	Expositionslabor im IPA
GLW	Geruchsleitwert
IPA	Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der DGUV, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)
KI	Konfidenzintervall
LoA	Übereinstimmungsbereich (engl.: limits of agreement), berechnet als Mittelwertlinie $\pm 1,96 \times$ Standardabweichung der Differenzen zweier Messungen
Max	Maximum
MD	Median
Min	Minimum
MRT	Magnetresonanztomograph
N	Anzahl Personen / Größe der Stichprobe
ODT	Geruchswahrnehmungsschwelle (engl.: olfactory detection threshold)
PTFE	Polytetrafluorethylen
SDI	Testwert des Sniffin' Sticks Test: Gesamtpunktzahl aus Schwellenwerttest (n-Butanol-Riechschwelle), Diskriminationstest (Unterscheiden von Geruchsstoffen) und Identifikationstest (Erkennen von Gerüchen); normale Riechfähigkeit: SDI Wert > 30,75
SF₆	Schwefelhexafluorid
STD	Standardabweichung

Zusammenfassung

Hintergrund

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) hat ein Konzept von Geruchsleitwerten (GLW) entwickelt. Es beschreibt eine Vorgehensweise zur Objektivierung von Beschwerden über Geruchsbelästigungen im Innenraum. Es beruht auf der Annahme, dass ein Geruch von den meisten Personen als unangenehm und belästigend wahrgenommen wird, wenn die Stoffkonzentration einer chemischen Substanz um ein Vielfaches oberhalb der Geruchsschwelle liegt. An der Geruchsschwelle ist die Konzentration so gering, dass sie nur eine eben merkliche Empfindung „es riecht“ auslöst. Die Voraussetzung ist, dass die mit einem Olfaktometer direkt an der Nase (nose-only) bestimmte Geruchsschwelle auf die reale Situation der Raumnutzenden übertragbar ist, wenn der ganze Mensch dem Geruchsstoff ausgesetzt ist (whole-body). Hierzu fehlten bislang wissenschaftliche Erkenntnisse. Ebenso ungeklärt ist, ob Umgebungsfaktoren wie Lärm, Licht, Temperatur oder die Kohlenstoffdioxid-(CO₂)-Konzentration in der Raumluft einen Einfluss auf die Geruchswahrnehmung haben.

Studiendesign

Zur Beantwortung dieser Fragen führte das IPA eine Studie im Auftrag des Umweltbundesamt durch. Alle Untersuchungen wurden im ca. 12 qm großen Expositionsraum des IPA (ExpoLab) durchgeführt. Im ExpoLab können die Umgebungsfaktoren Lärm, Licht, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftwechselrate und die CO₂-Konzentration konstant gehalten beziehungsweise gezielt verändert werden.

Im ersten Studienteil wurden freiwilligen Probanden und Probandinnen mit normalem Riechvermögen in der Messung von Geruchsschwellen nach DIN EN 13725 (2003) geschult.

Im zweiten Studienteil wurde mit einem Olfaktometer, welches im ExpoLab stand, die Geruchsschwelle für n-Butanol ermittelt. Um die Geruchsschwelle für n-Butanol in der Raumluft bestimmen zu können, wurden dieselben n-Butanolkonzentrationen wie beim Olfaktometer im ExpoLab erzeugt. Die Studienteilnehmenden betraten das ExpoLab und gaben an, ob sie den n-Butanolgeruch wahrnehmen können oder nicht. Diese beiden Geruchsschwellen (Olfaktometer vs. Raumluft) wurden miteinander verglichen. Anschließend wurde die Vergleichbarkeit der mit dynamischer Olfaktometrie und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für einen weiteren Geruchsstoff, nämlich das nach Mandeln riechende Benzaldehyd, überprüft. Diese Untersuchungen wurden unter standardisierten Umgebungsfaktoren durchgeführt.

Im dritten Studienteil wurde der Einfluss von Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwelle untersucht. Hierzu wurden fünf Umgebungsfaktoren entsprechend verändert, während die Geruchsschwelle für N-Butanol einmal am Olfaktometer und einmal in der Raumluft ermittelt wurde.

Studienteilnehmerinnen und Studienteilnehmer

Die Auswahl der Studienteilnehmenden erfolgte gemäß den Vorgaben der DIN EN 13725. Wenn die Anforderungen an Präzision und Genauigkeit erfüllt waren, wurde der oder die Studienteilnehmende zu einer geeigneten Prüfperson. Es wurden 21 gesunde Prüfpersonen (10 Frauen/11 Männer; 19-51 Jahre alt) eingesetzt.

Geruchsschwellenmessung am Olfaktometer

Zur Bestimmung der Geruchsschwellen wurde ein rechnergesteuertes Olfaktometer (TO8, Olfasense GmbH, Kiel) mit vier Plätzen und automatischer Auswertung verwendet. Um eine Geruchsschwelle zu ermitteln, wurden bis zu sechs Konzentrationsstufen in aufsteigender Reihenfolge präsentiert, wobei im unter-schwelligen, nicht wahrnehmbaren Bereich begonnen

wurde. Nach jeder Darbietung musste per Knopfdruck entschieden werden „Ja, es riecht“ oder „Nein, es riecht nicht“ (Ja/Nein-Methode). Um Ratetendenzen zu vermeiden, wurden Proben mit nicht riechender Luft eingestreut. Die Stoffkonzentration an der Geruchsschwelle wurde als geometrischer Mittelwert aus der letzten nicht wahrgenommenen und der ersten wahrgenommenen Stufe berechnet.

Geruchsschwellenmessung in der Raumluft

Mit Hilfe eines Kalibriergasgenerators wurde der verdünnte Geruchsstoff der Raumluft im ExpoLab beigemischt. Dabei wurden exakt dieselben Konzentrationsstufen realisiert, wie am Olfaktometer. Die Stoffkonzentrationen wurden per online-Massenspektrometrie mit einer zeitlichen Auflösung im Sekundentakt überwacht. Frühere Untersuchungen hatten gezeigt, dass die Expositionsatmosphäre im ExpoLab homogen, stabil und reproduzierbar ist (Monsé et al., 2012). Zur Ermittlung einer Geruchsschwelle betraten die Prüfpersonen das ExpoLab, bewerteten den Geruch (Ja/Nein-Methode) und verließen das ExpoLab wieder. Dann wurde die nächsthöhere Konzentrationsstufe realisiert.

Umgebungsfaktoren im ExpoLab

Die im ExpoLab realisierten standardisierten Umgebungsfaktoren waren: warmes Licht (2800 Kelvin); leises Ventilatorgeräusch (45 dB(A)); 22-24°C; 415 ppm Kohlenstoffdioxid (CO₂); relative Luftfeuchtigkeit 34-45 %.

Die veränderten Umgebungsfaktoren waren: kaltes Licht (6500 Kelvin); Straßenlärm (70 dB(A) mit Spitzen bis 85 dB(A)), erhöhte Temperatur (26°C), 1000 ppm und 4000 ppm CO₂. Pro Untersuchungstag wurde immer nur ein Umgebungsfaktor verändert, die anderen entsprachen den Standardbedingungen.

Ergebnisse und Diskussion

Um die Übereinstimmung bzw. den Unterschied zwischen den beiden Methoden zur Geruchsschwellenbestimmung, Olfaktometrie vs. Raumluft, zu bewerten, wurde das Verfahren nach Bland-Altman angewendet (Bland & Altman, 1986). Die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten als Maß für den Grad der Übereinstimmung zwischen zwei Messmethoden oder eine Regressionsanalyse sind dafür ungeeignet (Grouven et al., 2007).

Bei den Geruchsschwellenmessungen wurde als Stufensprung zwischen zwei benachbarten Konzentrationsstufen der Faktor „2“ gewählt, also immer das „Doppelte“. Die Geruchsstoffkonzentration (ppb) wurde, wie von der DIN EN 13725 gefordert, in logarithmierte Werte (Basis 10) umgerechnet (Boeker & Haas, 2007). Damit entspricht die „Verdopplung“ einer Konzentrationsstufe in ppb einer Addition von 0,3 lg(ppb). Die im Messsystem der DIN EN 13725 enthaltene Präzision der Messwerte liegt bei einer Konzentrationsstufe, also $\pm 0,3 \lg(\text{ppb})$ und die Streuung umfasst zwei Konzentrationsstufen, also $\pm 0,6 \lg(\text{ppb})$. Auf Basis dieser Überlegungen wurde eine Abweichung zwischen den olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen von $> 0,3 \lg(\text{ppb})$ und eine Streuung der Geruchsschwellen von $> 0,6 \lg(\text{ppb})$ als signifikant, d. h. als inhaltlich bedeutsam bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Raumluft gemessenen Geruchsschwellen immer niedriger waren als die Geruchsschwellen, die mit dynamischer Olfaktometrie ermittelt wurden. Dieser Unterschied war jedoch nur bei n-Butanol, nicht aber bei Benzaldehyd signifikant, d. h. als inhaltlich bedeutsam. Mehrere Studien mit einem baugleichen Olfaktometer hatten gezeigt, dass im Verdünnungssystem, das hauptsächlich aus Edelstahl besteht, signifikante Wandungseffekte bei n-Butanol auftreten können. Diese Wandungseffekte wurden bei der Berechnung der Konzentrationsstufen am Olfaktometer berücksichtigt und waren Grundlage für die Generierung

der Konzentrationsstufen in der Raumluft des ExpoLab. Es ist daher unwahrscheinlich, dass Wandungseffekte allein für den Unterschied der Geruchsschwellen verantwortlich sind.

Ein weiterer Grund für die unterschiedlichen Geruchsschwellen in der Raumluft und am Olfaktometer könnte die Form der am TO8-Olfaktometer verwendeten Riechrohre sein. Die Prüfpersonen halten ihre Nase in das Riechrohr. Das erzeugt Turbulenzen im Inneren des Riechrohres, die einen Luftstrom in das Riechrohr hinein bewirken. Das könnte zu einer Verdünnung der dargebotenen Geruchsproben mit der Umgebungsluft führen (Hansen et al., 2013).

Ein methodischer Aspekt, der zu den niedrigeren Geruchsschwellen in der Raumluft beigetragen haben kann, ist die Tatsache, dass bei den Raumluftmessungen keine Nullproben verwendet werden konnten. Wenn die Konzentrationsstufen in aufsteigender Reihenfolge dargeboten werden, so steigt die Erwartungshaltung, die Geruchsschwelle zu erreichen, zunehmend an, was zu falsch positiven Antworten führen kann (Dravnieks & Jarke, 1980). Das kann insbesondere bei den Messungen mit Benzaldehyd einen Einfluss gehabt haben, da diese Untersuchungen gegen Ende der Studie durchgeführt wurden.

Die veränderten Umgebungsfaktoren hatten keinen direkten Einfluss auf die Geruchsschwelle von n-Butanol, weder am Olfaktometer noch in der Raumluft. Einzelne Prüfpersonen wiesen jedoch bei Straßenlärm und erhöhter Temperatur höhere Geruchsschwellen auf als unter Standardbedingungen und auch die Streuung der Geruchsschwellen war insgesamt höher.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die mit dynamischer Olfaktometrie ermittelte Geruchsschwelle eine zuverlässige Aussage über die Wahrnehmung dieses Geruchs im Innenraum ermöglicht. Die für die Stoffe n-Butanol und Benzaldehyd gezeigte Vergleichbarkeit der Geruchsschwellen sollte unter idealen Laborbedingungen und bei Verwendung standardisierter Messmethoden auch für andere Geruchsstoffe gefunden werden.

Geruchsschwellenmessungen mit einem Olfaktometer erfordern ein hohes Maß an Konzentration. Eine Störung dieser Konzentration kann zu höheren Geruchsschwellen führen und auch die individuelle Varianz erhöhen. Obwohl die veränderten Umgebungsfaktoren keinen direkten Einfluss auf die Geruchsschwelle hatten, bestätigen die Ergebnisse die Forderung der DIN EN 13725, dass Geruchsschwellenmessungen unter standardisierten Umgebungsfaktoren durchgeführt werden sollten.

Summary

Background

The German Committee on Indoor Air Guide Values (AIR) has developed a concept of odor guideline values (GLW). It describes an approach for objectifying complaints about odor nuisances. It assumes that an odor is perceived by most people as unpleasant and annoying if the concentration of a chemical substance is many times above the odor threshold. At the odor threshold, the concentration is so low that it only triggers a just noticeable sensation like „it smells“. The prerequisite is that the odor threshold determined with an olfactometer directly at the nose (nose-only) is transferable to the real situation of the people using the room, i.e. when the whole person is exposed to the odorant (whole-body). Up to now, there has been a lack of scientific knowledge on this subject. It is also unclear whether environmental factors such as noise, light, temperature or the carbon dioxide (CO₂) concentration in the room air have an influence on odor perception.

Study design

To answer these questions, the IPA conducted a study on behalf of the German Environment Agency. All studies were conducted in the IPA's exposure laboratory (ExpoLab) which is approximately 30 square meters. In the ExpoLab, environmental factors like noise, light, temperature, air humidity, air exchange rate and CO₂ concentration can be kept constant or selectively changed.

The first part of the study, volunteers with normal olfactory abilities were trained in the measurement of odor thresholds according to DIN EN 13725 (2003).

The second part of the study, the odor threshold for n-butanol was determined using an olfactometer located in the ExpoLab. n-Butanol is a standard odorant in olfactometry and is found, among other things, in bananas, cheese or breast milk. The olfactometer is a device for the controlled presentation of an odorant sample at various concentration levels directly to the nose. To be able to determine the odor threshold for n-butanol in room air, the same n-butanol concentrations were generated in the ExpoLab as with the olfactometer. Study participants entered the ExpoLab and indicated whether they could detect the n-butanol odor or not. These two odor thresholds (olfactometer vs. room air) were then compared. Subsequently, the comparability of the odor thresholds determined with dynamic olfactometry and in room air was verified for another odorant, namely benzaldehyde, which smells like almonds. These studies were conducted under standardized environmental factors.

The third part of the study, the influence of environmental factors on odor threshold was investigated. For this purpose, five environmental factors were modified accordingly, while the odor threshold for n-butanol was determined again at the olfactometer and in room air.

Study participants

The study participants were selected in accordance with the requirements of DIN EN 13725. If the requirements for precision and accuracy were met, the study participant became a so-called assessor. Twenty-one healthy subjects (10 women/11 men; 19-51 years old) participated.

Odor threshold measurement at the olfactometer

A computer-controlled olfactometer (T08, Olfasense GmbH, Kiel, Germany) with four positions and automatic evaluation was used to determine the odor thresholds. To determine an odor threshold, up to six concentration levels were presented in ascending order, starting in the subthreshold, not perceptible range. After each presentation, a decision had to be made by pressing a button „Yes, it smells“ or „No, it does not smell“ (yes/no method). To avoid guessing

tendencies, samples were interspersed with odorless air. Substance concentration at the odor threshold was calculated as the geometric mean of the last unperceived level and the first perceived level.

Odor threshold measurement in room air

With the aid of a calibration gas generator, the diluted odorant was added to the room air in the ExpoLab, where the same concentration levels were realized as on the olfactometer. The substance concentrations were monitored by online mass spectrometry with a temporal resolution every second. Previous studies had shown that the exposure atmosphere in the ExpoLab was homogeneous, stable and reproducible (Monsé et al., 2012). To determine an odor threshold, subjects entered the ExpoLab, rated the odor (yes/no method), and left the ExpoLab. Then the next higher concentration level was realized.

Environmental factors in the ExpoLab

The standardized environmental factors realized in the ExpoLab were: warm light (2800 Kelvin); quiet fan noise (45 dB(A)); 22-24°C; 415 ppm CO₂; relative humidity 34-45 %.

Modified environmental factors were: cold light (6500 Kelvin); street noise (70 dB(A) with peaks up to 85 dB(A)), elevated temperature (26°C), 1000 ppm and 4000 ppm CO₂. Only one environmental factor was ever changed per study day; the others were the same as standard conditions.

Results and discussion

To evaluate the agreement or difference between the two methods for odor threshold determination, olfactometry vs. room air, the Bland-Altman procedure was used (Bland & Altman, 1986). The calculation of a correlation coefficient as a measure of the degree of agreement between two measurement methods or a regression analysis are not suitable for this purpose (Grouven et al., 2007).

For the odor threshold measurements, a step factor „2“ was chosen as step factor between two adjacent concentration levels, i.e. always the „double“. The odorant concentration (ppb) was converted into logarithmic values (base 10), as required by DIN EN 13725 (Boeker & Haas, 2007). Thus, the „doubling“ of a concentration level in ppb corresponds to an addition of 0.3 lg(ppb). The precision of the measured values as given in the measurement system of DIN EN 13725 is one concentration level, i.e. $\pm 0.3 \lg(\text{ppb})$, and the scatter comprises two concentration levels, i.e. $\pm 0.6 \lg(\text{ppb})$. Based on these considerations, a deviation between odor thresholds determined olfactometrically and in room air of $> 0.3 \lg(\text{ppb})$ and a scatter of odor thresholds of $> 0.6 \lg(\text{ppb})$ were judged to be significant, i.e., of substantive importance.

The results show that odor thresholds measured in room air were always lower than odor thresholds determined by dynamic olfactometry. However, this difference was significant only for n-butanol, but not for benzaldehyde. Several studies with an identical olfactometer had shown that substantial wall effects can occur for n-butanol in the dilution system, which consists mainly of stainless steel. These wall effects were considered when calculating the concentration levels at the olfactometer and were the basis for generating the concentration levels in the room air of the ExpoLab. It is therefore unlikely that wall effects alone are responsible for the difference in odor thresholds.

Another reason for the difference in odor thresholds determined in room air and at the olfactometer could be the shape of the olfactory tubes of the T08 olfactometer. The assessors hold their nose into the olfactory tube. This creates turbulence inside the olfactory tube, which causes airflow into the olfactory tube. This could lead to dilution of the presented odor samples with the ambient air (Hansen et al., 2013).

One methodological aspect that may have contributed to the lower odor thresholds in room air is the fact that zero samples could not be used in the room air measurements. When the concentration levels are presented in ascending order, the expectation of reaching the odor threshold increases progressively, which may lead to false positive responses (Dravnieks & Jarke, 1980). This may have been particularly influential in the measurements with benzaldehyde, as these tests were conducted toward the end of the study.

The altered environmental factors had no direct effect on the odor threshold of n-butanol, determined neither at the olfactometer nor in room air. However, some assessors exhibited higher odor thresholds under street noise and elevated temperature than under standard conditions, and the overall dispersion of odor thresholds was also higher.

Conclusions

The results show that odor thresholds determined with dynamic olfactometry provide a reliable indication of the perception of this odor in indoor air. The comparability of odor thresholds shown for the substances n-butanol and benzaldehyde should also be found for other odorants under ideal laboratory conditions and using standardized measurement methods.

Odor threshold measurements with an olfactometer require a high level of concentration. Disturbing this concentration can result in higher odor thresholds and increase individual variance. Although the altered environmental factors had no direct influence on the odor threshold, the results confirm the requirement of DIN EN 13725 that odor threshold measurements should be performed under standardized environmental factors.

1 Hintergrund und Problemstellung

Der vorliegende Abschlussbericht dokumentiert die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Einfluss von Raumumwelt auf Geruchsschwellen“ (FKZ 3719 61 214 0), das vom Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA) im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) im Zeitraum Mai 2020 bis Dezember 2022 durchgeführt wurde. Ausgangspunkt war, dass der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) im Jahr 2014 ein erstes Konzept zur gesundheitlich-hygienischen Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mit Hilfe von sogenannten Geruchsleitwerten (GLW) veröffentlicht hatte (Ad-hoc AG, 2014).

Das Konzept beruht auf der Annahme, dass chemische Substanzen bei einer Stoffkonzentration, die deutlich oberhalb der Geruchsschwelle liegt, als unangenehm und belästigend wahrgenommen werden. Grundlage für die Aufstellung von GLW sind daher geeignete Geruchsschwellen, die üblicherweise unter Verwendung eines Olfaktometers direkt an der Nase ermittelt werden (nose-only). Anwendung finden die GLW jedoch bei der Beurteilung von Gerüchen in Innenräumen, wenn der ganze Mensch den Geruchsstoffen ausgesetzt ist (whole-body). Es liegen jedoch keine Daten vor, ob die mit einem Olfaktometer bestimmte Geruchsschwellen eine zuverlässige Aussage über die Wahrnehmung dieses Geruchs in einem Innenraum erlauben.

Es ist darüber hinaus bekannt, dass die Geruchswahrnehmung, vor allem bei niedrigen Konzentrationen im Bereich der Geruchsschwelle, von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird. Umgebungsfaktoren wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, aber auch Lärm oder der visuelle Eindruck des Raumes können die Geruchswahrnehmung verändern. Typische Umgebungsfaktoren, die im Innenraum immer wieder zu Beschwerden führen, sind hohe Temperaturen (im Sommer), trockene Luft (im Winter) und Lärm (Brauer et al., 2006). Im Innenraum wird als untere Grenze eine relative Luftfeuchte von 30 % diskutiert (von Hahn, 2007). In Bezug auf die Lichtverhältnisse kann sowohl zu helles Licht (Blendung) als auch zu wenig Licht störend sein. Laut Empfehlung (Ad-hoc AG, 2008) gelten Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂) von 1000-2000 ppm als hygienisch auffällig und von über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel. Eine systematische Untersuchung zu dem Einfluss der Umgebungsfaktoren auf die Höhe der Geruchsschwelle fehlt bisher.

2 Ziel und Gegenstand des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Vorhabens war die Überprüfung der Übertragbarkeit der mit einem handelsüblichen Olfaktometer bestimmten Geruchsschwellen auf die reale Situation der Raumnutzenden.

Zur Bestimmung der Geruchsschwellen sollten nur Personen eingesetzt werden, die in der Messung von Geruchsschwellen geschult waren und die Qualitätsanforderungen der DIN EN 13725 (2003) erfüllten.

Die Studie bestand daher aus drei Studienabschnitten:

1. Gesunde Studienteilnehmende mit normalem Riechvermögen wurden mit dem Standardgeruchsstoff n-Butanol in der Messung von Geruchsschwellen mittels dynamischer Olfaktometrie trainiert und wurden so zu geeigneten Prüfpersonen.
2. Geruchsschwellenmessungen für die beiden Stoffe n-Butanol und Benzaldehyd wurden am Olfaktometer und in der Raumluft durchgeführt. Die Umgebungsfaktoren wurden konstant gehalten.
3. Der Einfluss von fünf Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwelle von n-Butanol wurde am Olfaktometer und in der Raumluft untersucht. Dazu wurden die Umgebungsfaktoren Temperatur, Licht, Lärm und zwei unterschiedliche CO₂-Konzentration in der Raumluft variiert.

3 Methoden

Die Studie orientierte sich an der DIN EN 13725 (2003) und an der DIN ISO 16000-28 (2012) und -30 (2015). In der DIN EN 13725 wird die Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration von gasförmigen Geruchsproben mit der dynamischen Olfaktometrie beschrieben. In der DIN ISO 16000-28 und -30 werden Methoden zur Durchführung von Geruchsprüfungen im Innenraum beschrieben.

3.1 Expositionsgenerierung und -überwachung

Alle Geruchsschwellenmessungen fanden im Expositionslabor (ExpoLab) des IPA statt, das ein Volumen von 28,6 m³ und eine Grundfläche von 11,4 m² hat. Die Lüftung im ExpoLab erfolgte ohne Umluftanteil, sondern mit kontinuierlicher Zufuhr von frischer, gefilterter Außenluft. Dazu wurden Hochleistungsschwebstofffilter (HEPA - H 13) verwendet. Zur Vorbehandlung der Druckluft für das Olfaktometer und für den HovaCal wurde eine Aktivkohlepatrone eingesetzt und anschließend ein Feinfilter (1,0 µm Porenweite), gefolgt von einem Feinstfilter (0,01 µm Porenweite). Während der Untersuchungen lag die Luftwechselrate bei 386 m³ pro Stunde. Das entspricht einem 13,5-fachen Luftwechsel pro Stunde. Für Büroräume wird ein Luftwechsel von 4- bis 8-fach pro Stunde empfohlen (DIN EN 16798-3, 2011; ASR 3.6 Lüftung). Temperatur und relative Luftfeuchte wurden kontinuierlich aufgezeichnet.

3.1.1 Olfaktometrie

Ein Olfaktometer ist eine computergesteuerte Verdünnungseinheit zur Darbietung von Geruchsstoffproben. Das im Rahmen dieser Studie verwendete TO8-Olfaktometer (Olfasense GmbH, Kiel; Seriennummer E0.8038) stand im ExpoLab (Abbildung 1). Das TO8-Olfaktometer deckte mit insgesamt 15 Verdünnungsstufen einen Verdünnungsbereich von etwa 1:4 bis 1:65.000 ab. Bei jeder Stufe reduzierte sich die Konzentration um den Faktor 2 zur jeweils vorherigen Stufe. Die laut Kalibrierbericht (Anhang A.1) tatsächlich realisierten Verdünnungsstufen waren 1:15605, 8082, 3869, 1900, 979, 500, 257, 132, 64.

Abbildung 1 TO8-Olfaktometer mit erweiterten Sichtschutzblenden und LED-Panel im ExpoLab



Quelle: eigene Darstellung, IPA

Aufgrund der Corona (SARS-CoV-2) Pandemie wurden spezielle Arbeitsschutzmaßnahmen entwickelt. Die einfachen Sichtschutzblenden des TO8-Olfaktometers wurden durch geeignete Abtrennungen ersetzt. Somit konnten bis zu vier Personen gleichzeitig am Olfaktometer arbeiten, da eine räumliche Abtrennung der vier Arbeitsplätze gewährleistet war (Abbildung 1). Die Probanden betraten einzeln unter Beachtung der Abstandsregeln das ExpoLab und trugen bis zum Erreichen des Platzes eine Mund-Nase-Bedeckung, die vom IPA zur Verfügung gestellt wurde. Vor Betreten und nach Verlassen des ExpoLab wurde die erforderliche Handhygiene durchgeführt. Dazu stand ein Desinfektionsspender im Flur vor dem ExpoLab bereit. Am Ende eines Untersuchungstages wurden die Kontaktflächen im ExpoLab mit entsprechenden Desinfektionsmitteln gereinigt.

3.1.2 Raumluf

Im ExpoLab wurde die jeweilige Geruchsstoffkonzentration am Boden über Quellauslässe kontinuierlich zugeführt und unter der Decke abgesaugt. Auf diese Weise konnte eine homogene Verteilung der Geruchsstoffkonzentration im ExpoLab sichergestellt werden. Untersuchungen mit Schwefelhexafluorid (SF_6) hatten gezeigt, dass im ExpoLab eine homogene, stabile und reproduzierbare Expositionsatmosphäre hergestellt werden kann. Untersuchungen mit Kohlenstoffdioxid (CO_2) hatten gezeigt, dass das Öffnen der Tür oder die Atemtätigkeit von vier Personen die Expositionsatmosphäre kaum verändert und Störungen innerhalb kürzester Zeit behoben werden können (Monsé et al., 2012).

Die Generierung der Geruchsstoffkonzentrationsstufen im ExpoLab erfolgte mit Hilfe eines Prüfgasgenerators (HovaCal, IAS GmbH, Oberursel). Mit zwei Spritzenkolbenpumpen wurde der flüssige Geruchsstoff in einer zuvor hergestellten Ausgangsverdünnung (siehe 3.1.3.2) mit Wasser kontinuierlich in ein Ofenmodul transportiert. Dort wurde der Geruchsstoff verdampft und in eine Vorkammer weitergeleitet, wo er mit Stickstoffgas verdünnt und dann zusammen mit dem geregelten Klimaanlagestrom in der gewünschten Zielkonzentration in das ExpoLab eingeleitet wurde.

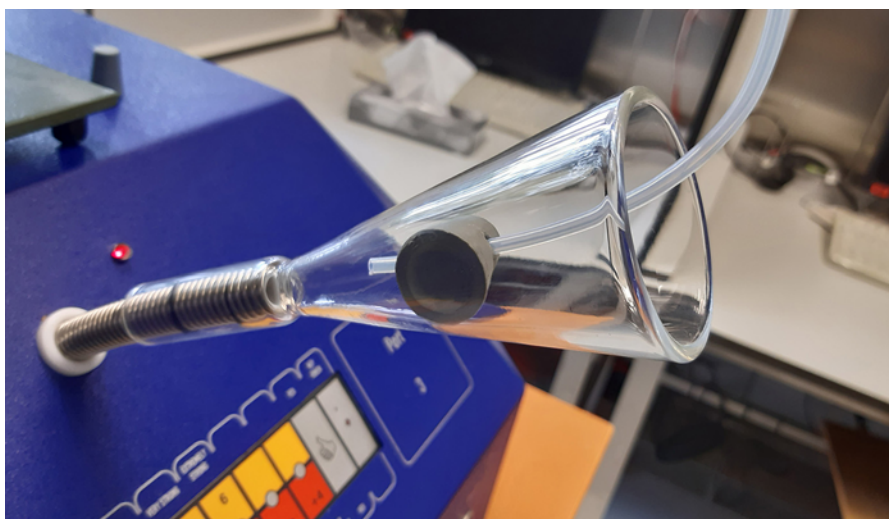
3.1.3 Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration

3.1.3.1 Qualitative Konzentrationsprofile für n-Butanol und Benzaldehyd am Olfaktometer und in der Raumluf des ExpoLab

In Ermangelung eines geeigneten Prüfgases für n-Butanol und Benzaldehyd im ppb-Bereich wurden zunächst rein qualitative Konzentrationsprofile mit einem Echtzeit-Massenspektrometer (CIMS, Airsense.net, MS4 Analysentechnik GmbH, Rockenberg) aufgezeichnet.

Das Ziel war, im ExpoLab exakt dieselben Konzentrationsstufen zu erzeugen wie im Riechrohr des TO8-Olfaktometers. Daher erfolgte die Probenahme immer direkt in einem „Riechrohr“, d. h. in einem am Olfaktometer aufgesteckten Glastrichter (Abbildung 2). Am Auslass von Probandenplatz Nr. 3 wurde der Geruchsstoff mit einem Liter pro Minute angesaugt und über einen Teflonschlauch in das Massenspektrometer geführt, wo im chemischen Ionisationsmodus alle zwei Sekunden ein Messwert erzeugt wurde. Für fünf Verdünnungsstufen (8082, 3869, 1900, 979, 500) wurde der n-Butanolgehalt sowohl am Olfaktometer als auch in der Raumluf aufgezeichnet. Der Gehalt an Benzaldehyd wurde für drei Verdünnungsstufen (1900, 979, 500) aufgezeichnet. Beim Wechsel auf die nächste Verdünnungsstufe wurde die Messung mit dem Massenspektrometer auf geruchsloses Inertgas umgeschaltet.

Abbildung 2: TO8-Olfaktometer – Probenahme im Riechrohr Nr. 3



Quelle: eigene Darstellung, IPA

3.1.3.2 Berechnung der Konzentrationsstufen für n-Butanol und Benzaldehyd am TO8-Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab

Am TO8-Olfaktometer wurden die einzelnen Konzentrationsstufen durch Verdünnung einer Ausgangskonzentration mit gereinigter Pressluft erzeugt.

Für die Generierung der n-Butanol-Konzentrationsstufen (CAS Nr. 71-36-3) wurden zwei 10 L Prüfgasflaschen (Fa. Westfalen AG) mit einer Ausgangskonzentration von jeweils 59,5 ppm und 61,2 ppm n-Butanol und 5 L Tedlar-Beutel (Fa. SKC Inc.) als Probenbeutel verwendet.

Für die Generierung der Benzaldehyd-Konzentrationsstufen (CAS Nr. 100-52-7) wurde eine 10 L Prüfgasflasche (Fa. Westfalen AG) mit einer Ausgangskonzentration von 14,8 ppm Benzaldehyd verwendet und die oben genannten 5 L Tedlar-Beutel als Probenbeutel.

Um Adsorptionseffekte im Beutel zu vermeiden, wurde der Beutel immer zu Beginn eines Messtages dreimal „gespült“, d. h. mit dem Geruchsstoff gefüllt und wieder entleert. Der Beutel mit der vierten Füllung wurde dann an das TO8-Olfaktometer angeschlossen und für die Messungen verwendet.

Für eine quantitative Abschätzung der Geruchsstoffkonzentrationen im ExpoLab wurde der exakte Volumenstrom der Klimaanlage experimentell ermittelt und die exakt dosierte Menge an flüssigem Geruchsstoff berücksichtigt (Monsé et al., 2014).

Die Aufzeichnung einer Abklingkurve mit Propylen ergab eine Luftaustauschrate von 13,5-fach pro Stunde. Multipliziert mit dem Raumvolumen von 28,6 m³ entspricht das einem Volumenstrom von 386 m³ pro Stunde. Mit eingerechnet wurden die Standardbedingungen (0°C und ein Druck von 1,013 bar) und das Volumen aus der Vorkammer (1,8 m³ pro Stunde).

Zur Herstellung der n-Butanol-Konzentrationsstufen wurde eine Ausgangsverdünnung von 10 ml n-Butanol auf 1000 ml Wasser hergestellt. n-Butanol hat eine Dichte von 0,81 g/cm³ und eine Molmasse von 74,12 g/mol. Zur Herstellung der Benzaldehyd-Konzentrationsstufen wurden eine Ausgangsverdünnung von 5 ml Benzaldehyd auf 1000 ml Wasser verwendet. Benzaldehyd hat eine Dichte von 1,04 g/cm³ und eine Molmasse von 106,12 g/mol. Wasser hat eine Dichte von 1,00 g/cm³ und eine Molmasse von 18,015 g/mol. Es wurde davon ausgegangen, dass sich bei einer Verdünnung von 1:100 bzw. 1:200 die Dichte des Wassers nach dem Zumischen von n-Butanol bzw. Benzaldehyd nicht verändert. Die Berechnungsschritte sind Anhang A.2 zu entnehmen.

3.1.3.3 Innenraummessung einer Konzentrationsstufe für n-Butanol und Benzaldehyd in der Raumlufte des ExpoLab

Zur Überprüfung der Plausibilität der berechneten Geruchsstoffkonzentration in der Raumlufte des ExpoLab wurde für die Verdünnungsstufe 979 eine Innenraummessung für n-Butanol und für Benzaldehyd durchgeführt. Die Messungen erfolgten im Rahmen des Messsystems Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger auf Basis des § 19 SGB VII und nach den Kriterien der TRGS 402 für Arbeitsplatzmessungen. Es wurde eine Dreifachbestimmung durchgeführt.

3.1.4 Auswahl der Studienteilnehmenden

3.1.4.1 Rekrutierung

Interessierte Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer wurden über eine Ankündigung der Studie auf der IPA-Homepage rekrutiert. Die Überprüfung der Ausschlusskriterien erfolgte vorab mit einem online-Fragebogen (Anhang B.1). Personen mit einer chronischen Erkrankung (z. B. Asthma, Sinusitis, Diabetes, Migräne), von der bekannt ist, dass sie die Riechfähigkeit beeinträchtigen könnte, und Schwangere sowie stillende Frauen durften nicht an der Studie teilnehmen.

Außerdem wurden aktiv rauchende Personen und Personen, die die Anforderungen an eine normale Riechfähigkeit nicht erfüllten, von der Studienteilnahme ausgeschlossen. Um den Raucherstatus zu überprüfen, wurde im Rahmen der Eignungsuntersuchung ein Cotinin-Schnelltest im Urin durchgeführt. Das Riechvermögen wurde mit dem Sniffin' Sticks Test (Hummel et al., 1997; Oleszkiewicz et al., 2019) untersucht.

3.1.4.2 Eignungsuntersuchungen gemäß DIN EN 13725

Zur Auswahl geeigneter Prüfpersonen wurde die Geruchsempfindlichkeit gegenüber n-Butanol am Olfaktometer gemäß DIN EN 13725 an drei nicht aufeinanderfolgenden Tagen untersucht.

Jeweils zu Beginn eines Tages wurde der Hintergrundgeruch im Expositionsraum durch die Studienteilnehmenden bewertet. Dabei wurde die Akzeptanz der Raumlufte (Akzeptanzskala von -1 bis +1; Skala in Schritten von 0,05) und die Geruchsintensität (Kategorienskala von 0 bis 6 in Kategorienskala 0-6) bewertet (Anhang B.2).

Mit Hilfe der Methode der Polaritätenprofile (Sucker & Hangartner, 2012) konnten sich die Prüfpersonen mit dem Geruch von n-Butanol bzw. Benzaldehyd vertraut machen.

Pro Tag wurden vier Messungen mit jeweils vier Durchgängen durchgeführt. Während eines Durchgangs wurde den Studienteilnehmenden n-Butanol in sinkender Verdünnung, d. h. mit zunehmender Konzentration, im Wechsel mit geruchsloser Luft dargeboten. Die Konzentration der Probenluft erhöhte sich bei jedem Schritt um den Faktor 2 zur jeweils vorherigen Stufe. Die Atemzeit betrug 3000 ms. Die Studienteilnehmenden wurden nach jedem Schritt gefragt, ob sich die aktuelle Probenluft von der geruchslosen Luftprobe unterscheidet (Ja/Nein-Methode). Die Studienteilnehmenden wurden gebeten, nur mit „JA“ zu antworten und dazu einen Handtaster zu betätigen, wenn sie sich ganz sicher waren. Zur Qualitätssicherung wurden zwei Proben mit geruchsloser Luft in zufälliger Reihenfolge eingestreut. Die Spüldauer zwischen den Durchgängen betrug 5 Sekunden, zwischen den Messungen 60 Sekunden. Laut Herstellerangaben liegt der Volumenstrom einer Probe bei 1,2 m³ pro Stunde.

Pro Durchgang wurde für jede Person eine individuelle Geruchsschwelle ermittelt. Die Geruchsschwelle berechnet sich als geometrischer Mittelwert aus der ersten wahrgenommenen und der letzten nicht wahrgenommenen Geruchsstoffkonzentration. Der erste Durchgang jeder Messung wurde systematisch verworfen. Daraus ergaben sich insgesamt 12 gültige Schwellenmessungen pro Tag, d. h. 36 Messungen an allen drei Tagen. Laut DIN EN 13725 müssen bei der Eignungsuntersuchung mindestens 10 und maximal 20 einzelne Geruchsschwellen pro Person, die an drei nicht aufeinanderfolgenden Tagen ermittelt wurden, berücksichtigt werden. Für die Eignungsuntersuchungen wurden die letzten sechs gültigen Geruchsschwellen pro Tag ausgewählt, d. h. insgesamt 18 Geruchsschwellen aus allen drei Tagen.

Gemäß DIN EN 13725 muss bei geeigneten Prüfpersonen die individuelle Empfindlichkeit in einem Bereich zwischen 20 – 80 ppb liegen und die maximale individuelle Standardabweichung kleiner als 2,3 sein. Zur Berechnung wurden die oben genannten 18 Schwellen verwendet. Studienteilnehmende, die diese Anforderungen nicht erfüllten, wurden von der Studie ausgeschlossen.

Die DIN EN 13725 fordert weiterhin die Einhaltung statistischer Qualitätskriterien. Die Präzision beschreibt die Variabilität der Geruchsschwellen und wird als Standardabweichung berechnet. Die Genauigkeit beschreibt die Abweichung der Geruchsschwellen von der durchschnittlichen Empfindlichkeit gegenüber dem Geruchsstoff n-Butanol. Die Gruppe der Prüfpersonen muss die Anforderungen an Präzision ($r \leq 0,477$) und Genauigkeit ($A \leq 0,217$) erfüllen.

Als zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahme wurden an jedem Testtag zuerst immer drei gültige Geruchsschwellen für n-Butanol am Olfaktometer unter Standardbedingungen ermittelt. Auf diese Weise wurden weitere 18 Geruchsschwellen pro Person unter Standardbedingungen erhoben. Auch auf diese Geruchsschwellen wurden die Qualitätskriterien der DIN EN 13725 angewendet.

3.1.5 Ermittlung der Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd am TO8-Olfaktometer und mittels Begehung eines Raumes

3.1.5.1 Ablauf eines Testtages

In Anhang B.3 wird der zeitliche Ablauf eines Testtages dargestellt.

1. In einem ersten Schritt wurde zur Qualitätssicherung eine olfaktometrische Messung mit vier Durchgängen für n-Butanol unter Standardbedingungen durchgeführt. Da die erste Messung immer systematisch verworfen wurde, erhielt man je Testtag drei olfaktometrische Geruchsschwellen für n-Butanol unter Standardbedingungen.

2. Anschließend wurden vier olfaktometrische Messungen mit jeweils vier Durchgängen für Benzaldehyd bzw. für n-Butanol unter veränderten Umgebungsfaktoren durchgeführt (siehe 3.1.5.2). Diese Messungen entfielen für n-Butanol unter Standardbedingungen. Da die erste Messung immer systematisch verworfen wurde, erhielt man je Testtag 12 olfaktometrische Geruchsschwellen für Benzaldehyd oder für n-Butanol unter veränderten Umgebungsfaktoren. Für die Auswertung wurden nur die ersten drei Schwellen verwendet.

3. Schließlich wurden drei Durchgänge zur Bestimmung von drei Geruchsschwellen in der Raumluft des ExpoLab durchgeführt. So erhielt man 3 Geruchsschwellen für Benzaldehyd oder n-Butanol unter Standardbedingungen und für n-Butanol unter veränderten Umgebungsfaktoren.

3.1.5.2 Geruchsschwellenmessung am TO8-Olfaktometer

Die olfaktometrischen Geruchsschwellenmessungen wurden genauso durchgeführt wie bei der Eignungsuntersuchung (siehe 3.1.4.2).

3.1.5.3 Geruchsschwellenmessung in der Raumluft des ExpoLab

Der Ablauf einer Geruchsschwellenmessung in der Raumluft des ExpoLab orientierte sich an der DIN ISO 16000-28 (2012) und -30 (2015) und an der DIN EN 13725. Aufgrund der Infektionsschutz- und Hygienemaßnahmen hielten sich alle Prüfpersonen zwischen den Messungen auf dem Flur vor dem ExpoLab auf und trugen dabei eine FFP2-Maske.

Zur Bewertung einer Konzentrationsstufe betraten die Prüfpersonen den Beobachtungsraum und warteten dort drei Minuten, ohne dabei eine Maske zu tragen. Dann betraten alle Prüfpersonen zügig das Expositionslabor und setzten sich auf ihren zugewiesenen Platz am Olfaktometer. Die Prüfpersonen beantworteten die Frage, ob sich die aktuelle Luft im ExpoLab von der Luft im Beobachtungsraum unterscheidet (Ja/Nein-Methode). Die Prüfpersonen wurden gebeten, nur mit „JA“ zu antworten und dazu ihre Antwort auf einem Datenaufnahmebogen zu notieren, wenn sie sich ganz sicher waren. Die Bewertung dauerte etwa eine Minute. Anschließend verließen alle Prüfpersonen das ExpoLab, setzten ihre Maske wieder auf und nahmen auf dem Flur Platz.

Dann wurde die nächst höhere Konzentrationsstufe im ExpoLab realisiert. Das dauerte etwa 10 Minuten. Dann betraten die Prüfpersonen den Beobachtungsraum erneut und die zweite Messung startete. Wenn alle Prüfpersonen den Geruch zweimal sicher wahrgenommen hatten, war ein Durchgang beendet.

Nach Beendigung eines Durchgangs wurde die Dosierung des Geruchsstoffs in die Raumluft abgeschaltet und das ExpoLab etwa 30 Minuten „gespült“. Anschließend begann der nächste Durchgang. Pro Tag wurden drei Geruchsschwellenmessungen in der Raumluft durchgeführt, mit jeweils bis zu fünf Messungen, d. h. fünf aufsteigenden Konzentrationsstufen.

3.1.5.4 Umgebungsfaktoren

Um den Einfluss veränderter Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwelle zu untersuchen, wurden fünf unterschiedliche Bedingungen im ExpoLab realisiert. Pro Tag wurde nur ein Umgebungsfaktor untersucht. Die übrigen Umgebungsfaktoren wurden entsprechend konstant gehalten.

Standard

Die standardisierten Umgebungsfaktoren waren: warmes Licht (2800 Kelvin); leises Ventilatorgeräusch (45 dB(A)); 22-24°C; 415 ppm Kohlenstoffdioxid (CO₂); relative Luftfeuchtigkeit 34-45 %.

Straßenlärm

Zur Realisierung der Umgebungsbedingung „Straßenlärm“ wurde ein Audio File mit Straßenlärm aus der Datenbank des NDR verwendet sowie ein Verstärker mit zwei Standboxen mit 30 Watt Sinusleistung. Der Lärmpegel lag bei 70 dB(A) mit Spitzen bis 85 dB(A).

Kaltes Licht

Das Licht im ExpoLab direkt über dem TO8-Olfaktometer wurde mit zwei LED-Panel (120 cm x 60 cm) (Fa. TXL-Licht, Gotha) erzeugt (siehe Abbildung 1). Die Lichtleistung lag bei 4860 Lumen. Die Umgebungsbedingung „kaltes Licht“ hatte eine Farbtemperatur von 6500 Kelvin.

26°C Raumtemperatur

Eine konstante Raumtemperatur von 26°C wurde mit Hilfe eines elektrischen Heizlüfters (TW853, Fa. Graf) realisiert. Die Temperatur wurden zusammen mit der Luftfeuchtigkeit kontinuierlich aufgezeichnet

Kohlenstoffdioxidkonzentration (1.000 ppm und 4.000 ppm CO₂)

Laut AIR gelten Konzentrationen unter 1.000 ppm CO₂ in der Raumluft als hygienisch unbedenklich, Konzentrationen zwischen 1.000 und 2.000 ppm als hygienisch auffällig und Konzentrationen über 2.000 ppm als hygienisch inakzeptabel (Ad-hoc AG, 2008).

Im Rahmen der Studie wurde eine konstante CO₂ Konzentrationen von 1.000 ppm und 4.000 ppm dynamisch erzeugt, d. h. reines CO₂ wurden kontinuierlich in das ExpoLab zugeführt und gleichzeitig abgesaugt. Es wurde CO₂ aus Druckflaschen (Airproducts GmbH, Deutschland) verwendet. Die korrekte Dosierung wurde mit Hilfe eines kalibrierten Massenflussreglers (Bronkhorst Deutschland Nord GmbH, Deutschland) sichergestellt. Zusätzlich wurden die Konzentrationen alle 20 Sekunden mit einem nicht-dispersiven Infrarotdetektor (Infralyt 50, Saxon Junkalor GmbH, Dessau-Roßlau) überwacht.

3.1.6 Auswertung

Zur deskriptiven Darstellung der Ergebnisse wurden Mittelwert und Standardabweichung (STD), Median (MD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.), geometrischer Mittelwert, 95%-Konfidenzintervall und die Anzahl (N) verwendet. Die Pearson-Produkt-Moment Korrelation wurde verwendet, um die Polaritätenprofile für n-Butanol und Benzaldehyd mit dem repräsentativen Gestank- und Duftprofil zu vergleichen.

3.1.6.1 Das Verfahren nach Bland-Altman

Um die Übereinstimmung bzw. den Unterschied zwischen den beiden Methoden zur Geruchsschwellenbestimmung, Olfaktometrie vs. Raumluft, zu bewerten, wurde das Verfahren nach Bland-Altman angewendet (Bland & Altman, 1986). Die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten als Maß für den Grad der Übereinstimmung zwischen zwei Messmethoden oder eine Regressionsanalyse sind dafür ungeeignet (Grouven et al., 2007). Stellt man die Ergebnisse graphisch als Punktwolke dar, läge eine perfekte Korrelation bereits vor, wenn die Werte zweier Messreihen auf einer Geraden liegen. Eine gute Übereinstimmung ist jedoch nur gegeben, wenn die Werte der beiden Messreihen auf der Winkelhalbierenden liegen.

Bei dem Bland-Altman-Diagramm handelt es sich um eine graphische Darstellungsmethode. In dieser Sonderform eines Punktdiagramms werden die Differenzen der beiden Methoden (Raumluft – Olfaktometrie) gegen den Mittelwert der beiden Methoden $((\text{Olfaktometrie} + \text{Raumluft})/2)$ aufgetragen.

Das Bland-Altman-Diagramm bietet eine optische Beurteilung, (a) ob in der Raumluft systematisch höhere oder niedrigere Geruchsschwellen gemessen werden, als mit dem T08-Olfaktometer, (b) wie stark die Streuung der Abweichung der Methoden ist und (c) ob die Abweichung der Methoden oder die Streuung der Abweichungen von der Höhe der Werte abhängig ist. Für Letzteres ist eine logarithmische Darstellung der Messwerte sinnvoll (Bland & Altman, 1999).

Zur leichteren Interpretation wurden drei Linien dargestellt: Der Mittelwert aller Differenzen wurde als horizontale Linie eingezeichnet (gestrichelte Linie). Diese Mittelwertlinie beschreibt die systematische Abweichung (Bias) der einen Methode (Raumluft) von der

anderen (Olfaktometrie). Liegt die Mittelwertlinie nahe bei 0, gibt es keinen Hinweis auf eine systematische Abweichung zwischen den beiden Methoden.

Zwei weitere Linien, berechnet als Mittelwertlinie $\pm 1,96 \times$ Standardabweichung der Differenzen (gepunktete Linien), begrenzen den Übereinstimmungsbereich (LoA, „limits of agreement“) (Bland & Altman, 1999). Der Abstand der LoA von der Mittelwertlinie bzw. die Größe der LoA gibt die Streuung der Messdifferenzen zwischen den beiden Methoden wieder. Zur Bewertung wurde ein Toleranzbereich festgelegt (siehe 3.1.6.2).

Für die Mittelwertlinie und die beiden Übereinstimmungsgrenzen wurden zusätzlich die 95%-Konfidenzintervalle berechnet (grauer Bereich), um den Stichprobenfehler im Verhältnis zur Größe der Stichprobe zu berücksichtigen (Giavarina, 2015).

Außerdem wurden die Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme tabellarisch dargestellt: Mittelwert aller Differenzen (Bias), die untere ($-$ LoA) und die obere ($+$ LoA) Grenze der LoA (Übereinstimmungsbereich) und die dazu gehörenden 95%-Konfidenzintervalle sowie die Größe der LoA.

3.1.6.2 Festlegung des Toleranzbereiches auf 0,6 lg(ppb)

Laut DIN EN 13725 muss bei einer geeigneten Prüfperson die Geruchsschwelle für n-Butanol zwischen 20 ppb und 80 ppb liegen, also zwischen dem 0,5-fachen und dem 2-fachen der vorgegebenen Geruchsschwelle von 40 ppb. Als Stufensprung zwischen zwei benachbarten Verdünnungsstufen wurde der Faktor „2,0“ gewählt, also immer das „Doppelte“.

Die Geruchsstoffkonzentration (ppb) wurde, wie von der DIN EN 13725 gefordert, in logarithmierte Werte (Basis 10) umgerechnet (Tabelle 1) (Boeker & Haas, 2007).

Tabelle 1: Darstellung der Konzentrationsstufen in ppb und in lg(ppb)

ppb	lg(ppb)
501	2,7
251	2,4
126	2,1
63	1,8
32	1,5
16	1,2
8	0,9
4	0,6
2	0,3

Damit entspricht die „Verdopplung“ einer Konzentrationsstufe in ppb einer Addition von 0,3 lg(ppb). Die im Messsystem der DIN EN 13725 enthaltene Präzision der Messwerte liegt bei einer Konzentrationsstufe, also $\pm 0,3$ lg(ppb) und die Streuung umfasst zwei

Konzentrationsstufen, also $\pm 0,6 \lg(\text{ppb})$. Auf Basis dieser Überlegungen wurde ein Bias von $> 0,3 \lg(\text{ppb})$ und ein LoA von $> 0,6 \lg(\text{ppb})$ als signifikant, d. h. als inhaltlich bedeutsam bewertet.

Die Auswertung der Daten erfolgte mit Excel Version 1809, Graph Pad Prism Version 8.1.0, und dem Statistikpaket IBM SPSS 28.0 für Windows.

Die Geruchsschwellenmessungen mit Benzaldehyd wurden nur mit 20 Personen (10 Frauen; 10 Männer) durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Expositionsbedingungen

4.1.1 Klimadaten im ExpoLab

Wie in Tabelle 2 zu sehen ist, waren Temperatur und Luftfeuchtigkeit während der Eignungsuntersuchungen und auch an den Testtagen mit n-Butanol und Benzaldehyd stabil und wiesen nur an den Testtagen mit erhöhter Temperatur entsprechend andere Werte auf.

Tabelle 2: Berechnete Geruchsstoffkonzentration je Verdünnungsstufe in ppb

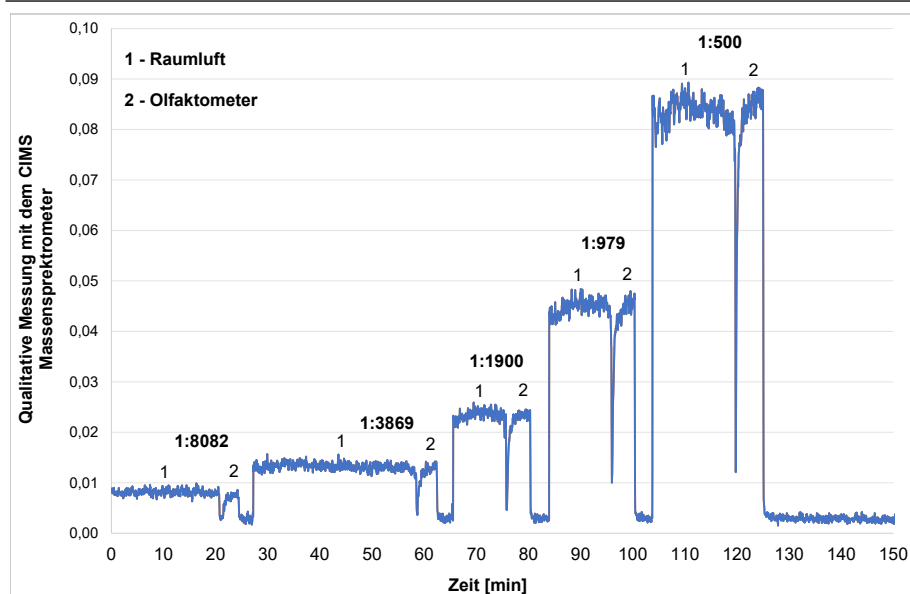
	Temperatur (in Grad Celsius)			Luftfeuchtigkeit (in Prozent)		
	Mittelwert	STD	% STD	Mittelwert	STD	% STD
Eignung	22,9	0,5	2,1	38,9	2,7	6,9
n-Butanol	22,9	0,3	1,2	37,2	2,0	5,5
Benzaldehyd	23,3	0,5	2,2	40,7	2,3	5,6
Gesamt	22,8	0,4	1,7	38,0	2,5	6,5
erhöhte Temperatur	26,0	0,4	1,4	34,3	1,8	5,1

4.1.2 Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration

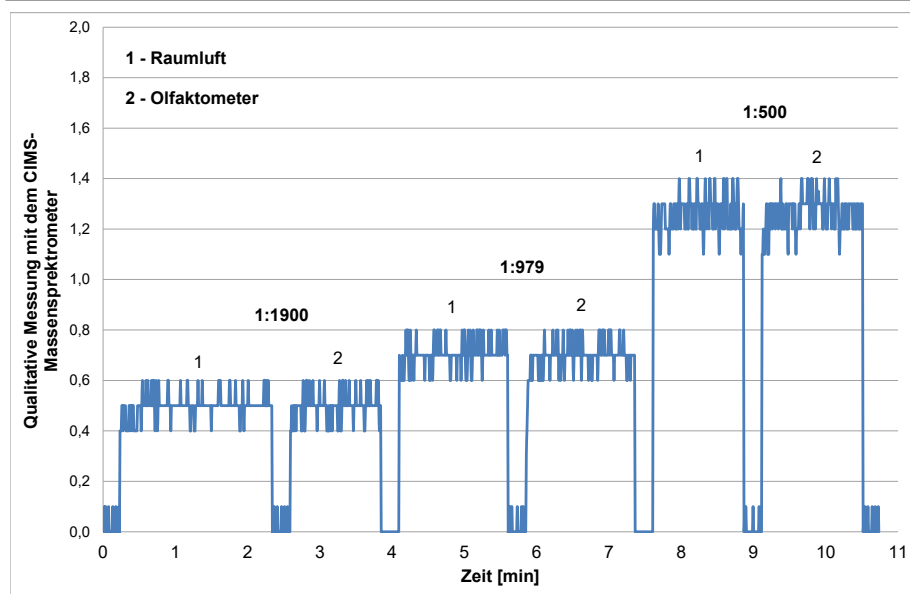
4.1.2.1 Qualitative Konzentrationsprofile für n-Butanol und Benzaldehyd am Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab

Die Aufzeichnung der qualitativen Konzentrationsprofile für n-Butanol (Abbildung 3) und Benzaldehyd (Abbildung 4) zeigt keine wesentlichen Unterschiede beim Vergleich der Messungen am T08-Olfaktometer und in der Raumluft.

Abbildung 3: Darstellung der qualitativen Konzentrationsprofile für n-Butanol am Olfaktometer und in der Raumluft



Quelle: eigene Darstellung, IPA

Abbildung 4: Darstellung der qualitativen Konzentrationsprofile für Benzaldehyd am Olfaktometer und in der Raumluft


Quelle: eigene Darstellung, IPA

4.1.2.2 Berechnete Geruchsstoffkonzentration am Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab

Die Geruchsstoffkonzentration am TO8-Olfaktometer ist immer abhängig von der Ausgangskonzentration in der Prüfgasflasche. Tabelle 3 zeigt die Konzentrationen für n-Butanol und Benzaldehyd am TO8-Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab für jede Verdünnungsstufe.

Tabelle 3: Berechnete Geruchsstoffkonzentration je Verdünnungsstufe in ppb

Verdünnungsstufe		n-Butanol			Benzaldehyd	
		TO8-Olfaktometer, Prüfgasflasche mit 59,5 ppm	TO8-Olfaktometer, Prüfgasflasche mit 61,2 ppm	ExpoLab	TO8-Olfaktometer, Prüfgasflasche mit 14,8 ppm	ExpoLab
1	15605	3,8	3,9	2,5	0,9	-
2	8082	7,4	7,6	5,0	1,8	-
3	3869	15,4	15,8	9,9	3,8	2,8
4	1900	31,3	32,5	19,8	7,8	5,6
5	979	60,8	62,5	39,7	15,1	11,1
6	500	119,0	122,4	79,4	29,6	22,5
7	257	231,5	238,1	-	57,6	-
8	132	450,8	463,6	-	112,1	-
9	64	929,7	956,3	-	231,3	-

4.1.2.3 Innenraummessung einer Konzentrationsstufe für n-Butanol und Benzaldehyd in der Raumlufte des ExpoLab

Eine Innenraummessung von Benzaldehyd war nicht möglich, da das zu Verfügung stehende Messsystem zu unempfindlich ist. Im ExpoLab wurde für die Verdünnungsstufe 979 eine Konzentration von 11,05 ppb, also 0,05 mg/m³ realisiert. Die Bestimmungsgrenze der Innenraummessung liegt jedoch bei 2 mg/m³.

Für die Verdünnungsstufe 979 ergab die Innenraummessung von n-Butanol die folgenden Werte: 45,4 ppb, 45,4 ppb und 42,2 ppb. Das Ergebnis zeigt, dass die für die Raumlufte berechneten Konzentrationsstufen plausibel waren, aber die für das TO8-Olfaktometer um im Mittel 35 % (n-Butanol) abwichen.

Das deutet darauf hin, dass es im TO8-Olfaktometer zu Substanzverlusten aufgrund von Adsorptionseffekten gekommen sein kann, wie sie von Kasper et al. (2017) und Hansen et al. (2013) beschrieben wurden. Kasper et al. (2017) konnten zeigen, dass die Wiederfindungsrate für n-Butanol an einem TO8-Olfaktometer bei einer Darbietungsdauer von 2,2 Sekunden etwa 68 % betrug und erst nach 60 Sekunden 100 % erreichte.

Daher wurden die Konzentrationsstufen für die Olfaktometrie erneut berechnet, wobei für n-Butanol von einer Wiederfindungsrate von 65 % und bei Benzaldehyd von 73 % ausgegangen wurde (Tabelle 4).

Tabelle 4: Korrigierte Geruchsstoffkonzentration je Verdünnungsstufe in ppb

Verdünnungsstufe		n-Butanol			Benzaldehyd	
		TO8-Olfaktometer, Prüfgasflasche mit 59,5 ppm (65 %)	TO8-Olfaktometer, Prüfgasflasche mit 61,2 ppm (65 %)	ExpoLab	TO8-Olfaktometer, Prüfgasflasche mit 14,8 ppm (73 %)	ExpoLab
1	15605	2,5	2,5	2,5	0,7	-
2	8082	4,8	4,9	5,0	1,3	-
3	3869	10,0	10,3	9,9	2,8	2,8
4	1900	20,4	20,9	19,8	5,7	5,6
5	979	39,5	40,6	39,7	11,0	11,1
6	500	77,4	79,6	79,4	21,6	22,5
7	257	150,5	154,8	-	42,0	-
8	132	293,0	301,4	-	81,8	-
9	64	604,3	621,6	-	168,8	-

Die am TO8-Olfaktometer realisierten Verdünnungsstufen und die Umrechnung in die entsprechenden Geruchsschwellen in Abhängigkeit von der Konzentration des Prüfgases sind in Tabelle 5 zu sehen. Dabei wurden die berechneten und die korrigierten Geruchsschwellenkonzentrationen gemäß Tabelle 3 und 4 zugrunde gelegt.

Tabelle 5: Geruchsschwellen je Verdünnungsstufe in ppb auf Basis der berechneten bzw. korrigierten Geruchsstoffkonzentration

Verdünnungs- stufe*		n-Butanol				Benzaldehyd		ExpoLab berechnet	
		Prüfgas: 59,5 ppm berechnet	Prüfgas: 59,5 ppm korrigiert	Prüfgas: 61,2 ppm berechnet	Prüfgas: 61,2 ppm korrigiert	Prüfgas: 14,8 ppm berechnet	Prüfgas: 14,8 ppm korrigiert	n-Butanol	Benzaldehyd
2	8082	5,3	3,5	5,4	3,5	1,3	1,0	3,5	-
3	3869	10,7	6,9	11,0	7,1	2,6	1,9	7,0	2,8
4	1900	22,0	14,3	22,7	14,7	5,4	4,0	14,0	4,0
5	979	43,6	28,4	45,1	29,1	10,9	7,9	28,0	7,9
6	500	85,1	55,3	87,5	56,8	21,1	15,4	54,1	15,8
7	257	166,0	107,9	170,7	111,0	41,3	30,1	-	-
8	132	323,0	210,0	332,2	216,0	80,4	58,6	-	-
9	64	647,4	420,8	665,8	432,8	161,0	117,5	-	-

*Erste sicher gerochene Verdünnungsstufe

4.1.3 Auswahl der Studienteilnehmenden

4.1.3.1 Rekrutierung

Insgesamt reichten 38 an der Studie interessierte Personen einen Rekrutierungsfragebogen ein. Drei Personen wurden ausgeschlossen, weil sie aufgrund einer chronischen Erkrankung nicht geeignet waren. 28 Personen nahmen an den Eignungsuntersuchungen teil. Acht Personen nahmen nicht teil, weil bereits genügend Personen für die Studie rekrutiert worden waren. Sechs Personen erfüllten nicht die Vorgaben der DIN EN 13725 und wurden von der weiteren Studienteilnahme ausgeschlossen. 21 Prüfpersonen, davon 10 Frauen und 11 Männer, nahmen an der Studie teil (Tabelle 6).

Tabelle 6: Kennzahlen der Prüfpersonen

Merkmal	Männer	Frauen	Gesamt
Anzahl	11	10	20
Alter	34 (19 – 51)	33 (23 – 47)	33 (19 – 51)
19-29 Jahre	4	4	8
30-39 Jahre	3	3	6
40-51 Jahre	4	3	7
Größe	181 (173 – 195)	170 (157 – 190)	176 (157 – 195)
Gewicht	81 (60 – 124)	69 (58 – 90)	75 (58 – 124)
SDI	35 (31 – 39)	36 (32 – 39)	35 (31 – 39)

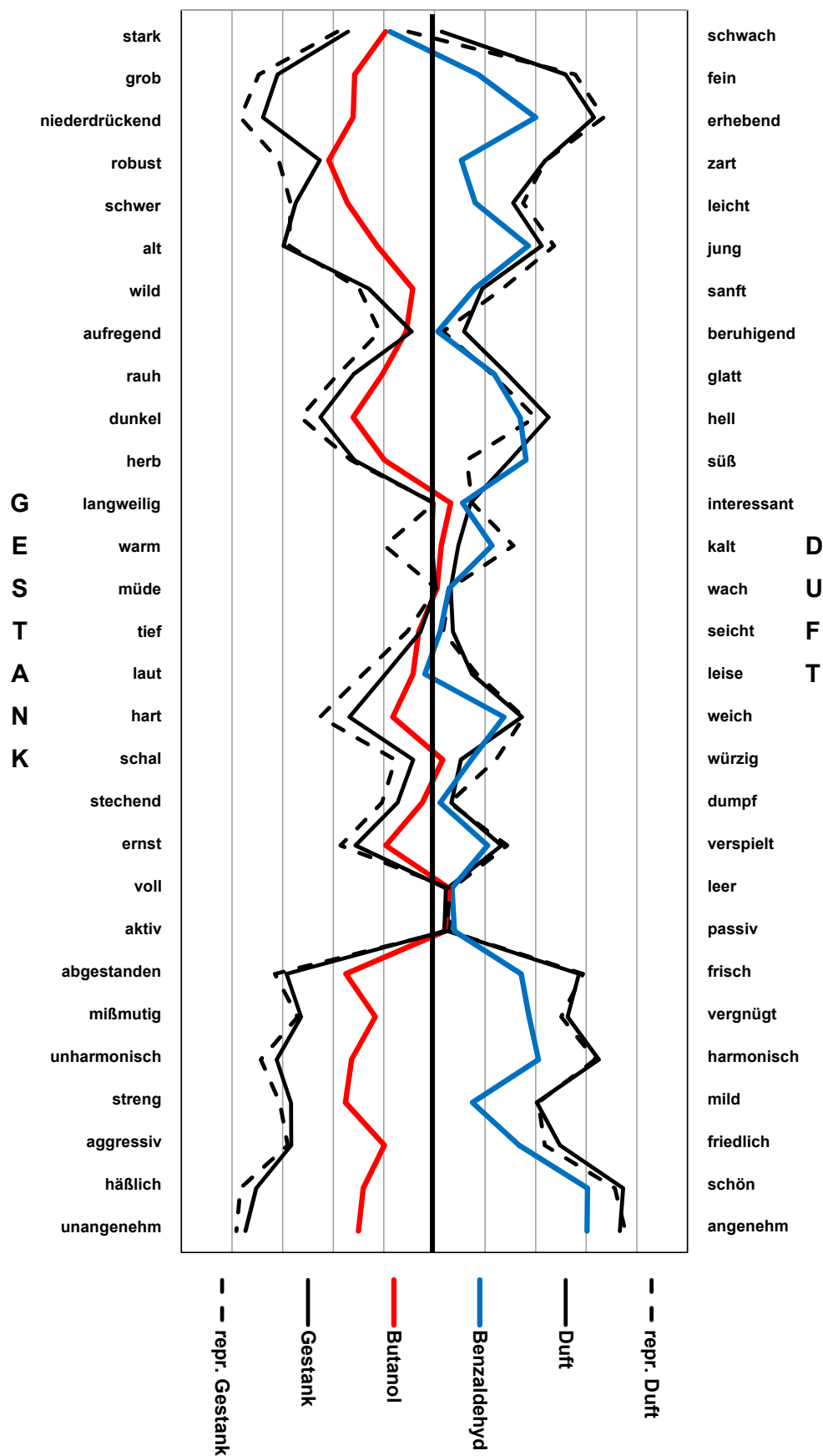
SDI: Gesamtwert des Sniffin' Sticks Test; normal, wenn SDI > 30,75 (Oleszkiewicz et al., 2019)

Die Prüfpersonen waren zwischen 19 und 51 Jahre alt. Der Sniffin' Sticks Test ergab, dass alle über eine normale Riechfähigkeit ($SDI > 30,75$) (Oleszkiewicz et al., 2019) verfügten. Niemand hatte eine chronische Erkrankung, wie z. B. Asthma, Sinusitis, Diabetes oder Migräne, die die Riechfähigkeit beeinträchtigen könnte, und bei allen war der Cotinin-Test zur Überprüfung des Raucherstatus negativ.

Die Geruchsschwellenmessungen für n-Butanol im Rahmen der Eignungsuntersuchungen wurden an drei nicht aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Jeweils zu Beginn eines Tages wurde der Hintergrundgeruch im ExpoLab durch die Prüfpersonen bewertet. An allen Tagen beurteilten alle Prüfpersonen die Akzeptanz der Raumluft (Akzeptanzskala von -1 bis +1; Skala in Schritten von 0,05) mit mindestens 0,30 oder höher und die Geruchsintensität (Kategorienskala 0-6) mit 0 oder 1. Ein Mittelwert für die Akzeptanz und die Geruchsintensität wurde nicht berechnet.

Die Hedonik der beiden Geruchsstoffproben wurde mit der Methode der Polaritätenprofile beurteilt. In Abbildung 5 ist zu sehen, dass n-Butanol als Gestank und Benzaldehyd als Duft beurteilt werden. Die Pearson-Produkt-Moment Korrelationen mit dem repräsentativen Gestankprofil lagen bei +.92 für n-Butanol und bei -.67 für Benzaldehyd und mit dem repräsentativen Duftprofil dementsprechend bei -.70 beziehungsweise bei +.85.

Abbildung 5: Polaritätenprofil für n-Butanol (rot) und Benzaldehyd (blau)



Quelle: eigene Darstellung, IPA

4.1.3.2 Eignungsuntersuchungen gemäß DIN EN 13725

Die Geruchsschwellen für n-Butanol wurden im Rahmen der Eignungsuntersuchungen und zusätzlich im Rahmen der Qualitätssicherung zu Beginn jedes Testtages ermittelt. Mittelwert und Standardabweichung der 18 Geruchsschwellen je Prüfperson, der geometrische Gruppenmittelwert $\pm$ 95% Konfidenzintervall und die zugehörigen Qualitätskriterien der DIN EN 13725 sind in den folgenden Tabellen 7 und 8 zusammengestellt.

Tabelle 7: Eignung: Individuelle Geruchsschwellen (ppb) für n-Butanol

Kürzel der Prüfperson	Mittelwert berechnet (20 – 80)	Mittelwert korrigiert	Standardabweichung ($\leq 2,3$)
HSEE001	25	17	1,7
BRHN004	30	33	1,7
EKHE005	31	20	1,7
DMNA006	37	24	1,7
BDAS008	30	19	1,4
MPAN009	49	32	1,6
ESEO010	59	38	1,5
WBTE012	27	17	1,5
LRAA014	42	27	1,4
DPAA015	44	28	1,4
WDSA016	33	22	1,5
DPAL017	55	35	1,5
IEAA018	52	34	1,5
HCEK019	32	37	1,7
IBTA020	70	21	1,5
WAAN021	37	45	2,0
GRAA022	45	24	1,4
BATM023	50	29	1,6
EMEN024	37	33	1,5
SFAE025	32	24	1,8
GAAF026	25	21	1,5
Gesamt-Mittelwert (geometrisch) $\pm$ 95% KI	39 (31 – 52) ppb	27 (20 – 35) ppb	
Wiederholpräzision ($\leq 0,477$)	0,364	0,364	
Genauigkeit ($\leq 0,2017$)	0,0631	0,2378	

Die individuellen Geruchsschwellen wurden einmal auf Basis der berechneten und einmal auf Basis der korrigierten Geruchsschwellen ermittelt (siehe Tabelle 4). Die Anforderungen der DIN EN 13725 sind in Klammern angegeben.

Im Rahmen der Eignungsuntersuchung erfüllten alle Prüfpersonen die Anforderungen an die individuelle Empfindlichkeit (20 – 80 ppb) und an die maximale individuelle Standardabweichung ($< 2,3$) gemäß DIN EN 13725 und die Gruppe erfüllte die Anforderungen an

Präzision ($r \leq 0,477$) und Richtigkeit ($A \leq 0,217$), wenn man die berechneten Geruchsstoffkonzentrationen zugrunde legt. Bezogen auf die korrigierten Werte wären drei Prüfpersonen (grau markiert) zu empfindlich gewesen (Tabelle 7).

Tabelle 8: Qualitätssicherung: Individuelle Geruchsschwellen (ppb) für n-Butanol

Kürzel der Prüfperson	Mittelwert berechnet (20 – 80)	Mittelwert korrigiert	Standardabweichung ($\leq 2,3$)
HSEE001	72	50	1,7
BRHN004	83	56	1,6
EKHE005	35	26	2,0
DMNA006	39	28	1,8
BDAS008	46	29	2,0
MPAN009	53	40	1,6
ESEO010*	78	52	1,5
WBTE012	41	30	1,8
LRAA014	64	40	1,4
DPAA015	72	52	1,8
WDSA016	53	32	1,6
DPAL017	78	57	1,7
IEAA018	83	50	2,1
HCEK019	69	45	2,0
IBTA020	53	36	1,6
WAAN021	102	61	1,6
GRAA022	50	31	1,9
BATM023	56	35	1,7
EMEN024	87	61	2,0
SFAE025	43	28	2,3
GAAF026	46	35	1,8
Gesamt-Mittelwert (geometrisch) $\pm$ 95% KI	62 (44 – 87) ppb	40 (29 – 56) ppb	
Wiederholpräzision ($\leq 0,477$)	0,371	0,371	
Genauigkeit ($\leq 0,2017$)	0,2566	0,0696	

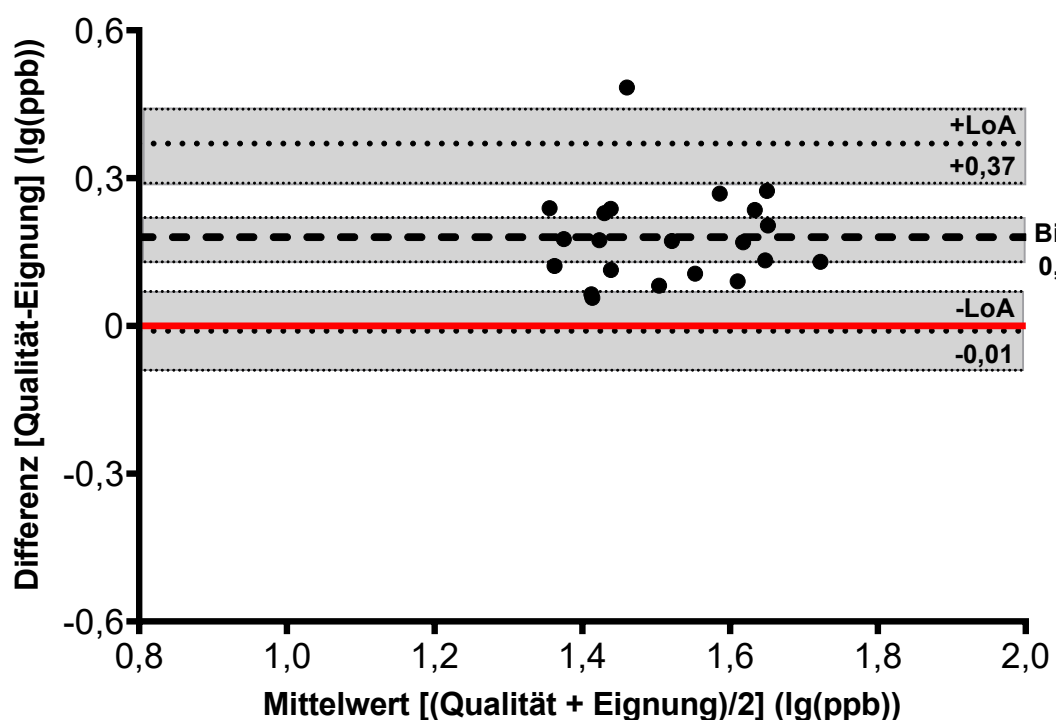
*Eine männliche Prüfperson nahm nicht an den Untersuchungen mit Benzaldehyd teil.

Die individuellen Geruchsschwellen wurden einmal auf Basis der berechneten und einmal auf Basis der korrigierten Geruchsschwellen ermittelt (siehe Tabelle 4). Die Anforderungen der DIN EN 13725 sind in Klammern angegeben.

Der Vergleich mit den im Rahmen der Qualitätssicherung erhobenen Daten zeigt, dass alle Prüfpersonen mit der Zeit etwas unempfindlicher wurden, d. h. höhere Geruchsschwellen aufwiesen. Bezogen auf die berechneten Konzentrationen lagen die mittleren Geruchsschwellen von vier Prüfpersonen > 80 ppb (grau markiert) (Tabelle 8). Legt man jedoch die korrigierten Werte zugrunde, wurden alle Anforderungen der DIN EN 13725 erfüllt.

Wie Abbildung 6 zeigt, weichen die Geruchsschwellen systematisch um 0,18 lg(ppb) ab. Da dieser Unterschied jedoch kleiner als 0,3 lg(ppb) ist, wird er als nicht signifikant eingestuft. Das Übereinstimmungsintervall lag zwischen -0,01 bis +0,37 lg(ppb). Mit einer Größe von 0,38 lg(ppb) ist er kleiner als 0,6 lg(ppb) und somit nicht signifikant.

Abbildung 6: Vergleich der Geruchsschwellen für n-Butanol (Eignung vs. Qualität)



Die Geruchsschwellen wurden während der Eignungsuntersuchung (Eignung) bzw. während der Qualitätssicherung an jedem Testtag (Qualität) ermittelt. (Bland-Altman-Diagramm: Differenz: Qualität – Eignung; Mittelwert aus Qualität und Eignung; Mittelwertlinie (Bias): gestrichelt, $\pm$ LoA: gepunktet, 95%-KI: grau)

Quelle: eigene Darstellung, IPA

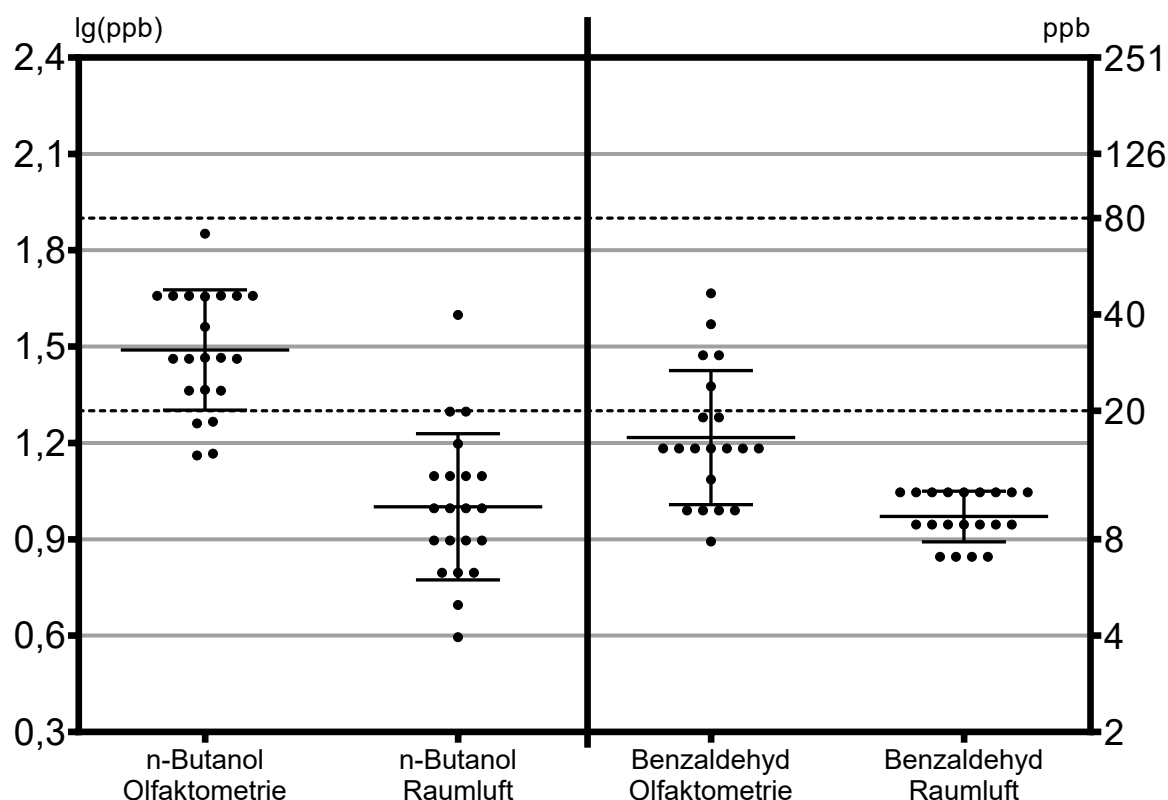
Die weiteren Auswertungen wurden mit den korrigierten Werten durchgeführt.

Zur Qualitätssicherung der Ergebnisse wurden die Auswertungen mit dem Bland-Altman-Verfahren noch einmal unter Ausschluss der in Tabelle 6 markierten 3 Prüfpersonen (Anhang C.1) und einmal unter Ausschluss der in Tabelle 7 markierten 4 Prüfpersonen (Anhang C.2) durchgeführt.

4.1.4 Vergleich der Geruchsschwellen von n-Butanol und Benzaldehyd, gemessen am TO8-Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab

In Abbildung 7 werden die unter Standardbedingungen olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen niedriger liegen, als die mit dem TO8-Olfaktometer ermittelten Geruchsschwellen (Tabelle 9).

Abbildung 7: Unter Standardbedingungen ermittelte Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd (Punkte: Individuelle Schwellen, Balken: Mittelwert $\pm$ STD)



Quelle: eigene Darstellung, IPA

Tabelle 9: Deskriptive Kennwerte für die unter Standardbedingungen ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd (ppb, lg(ppb))

ppb	n-Butanol (N=21)		Benzaldehyd (N=20)	
	Olfaktometrie	Raumluft	Olfaktometrie	Raumluft
geometrischer Mittelwert $\pm$ STD	30,9 $\pm$ 14,2	10,0 $\pm$ 7,7	16,5 $\pm$ 10,1	9,4 $\pm$ 1,7
Median (Min. – Max.)	29,2 (14,5 – 71,1)	9,9 (3,9 – 39,7)	15,2 (7,8 – 46,3)	8,8 (7,0 – 11,1)
lg(ppb)				
Mittelwert $\pm$ STD	1,49 $\pm$ 0,19	1,00 $\pm$ 0,23	1,22 $\pm$ 0,21	0,97 $\pm$ 0,08
Median (Min. – Max.)	1,47 (1,16 – 1,85)	1,00 (0,60 – 1,60)	1,18 (1,89 – 1,67)	0,95 (0,85 – 1,05)

Beim Vergleich der unter Standardbedingungen olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen zeigte das Bland-Altman-Diagramm (Tabelle 10, Abbildung 8-9) bei n-Butanol eine systematische Abweichung von $-0,49 \text{ lg(ppb)}$ und ein Übereinstimmungsintervall von $-1,13 \text{ lg(ppb)}$ bis $0,15 \text{ lg(ppb)}$. Die in der Raumluft gemessenen Geruchsschwellen waren systematisch niedriger als die mit dem Olfaktometer ermittelten Geruchsschwellen. Der Unterschied betrug mehr als eine Verdünnungsstufe ($0,49 \text{ lg(ppb)} > 0,3$) und wird damit als signifikant eingestuft. Die Größe des Übereinstimmungsbereichs umfasste mehr als vier Konzentrationsstufen ($1,28 \text{ lg(ppb)} > 0,6$) und wird ebenfalls als signifikant bewertet.

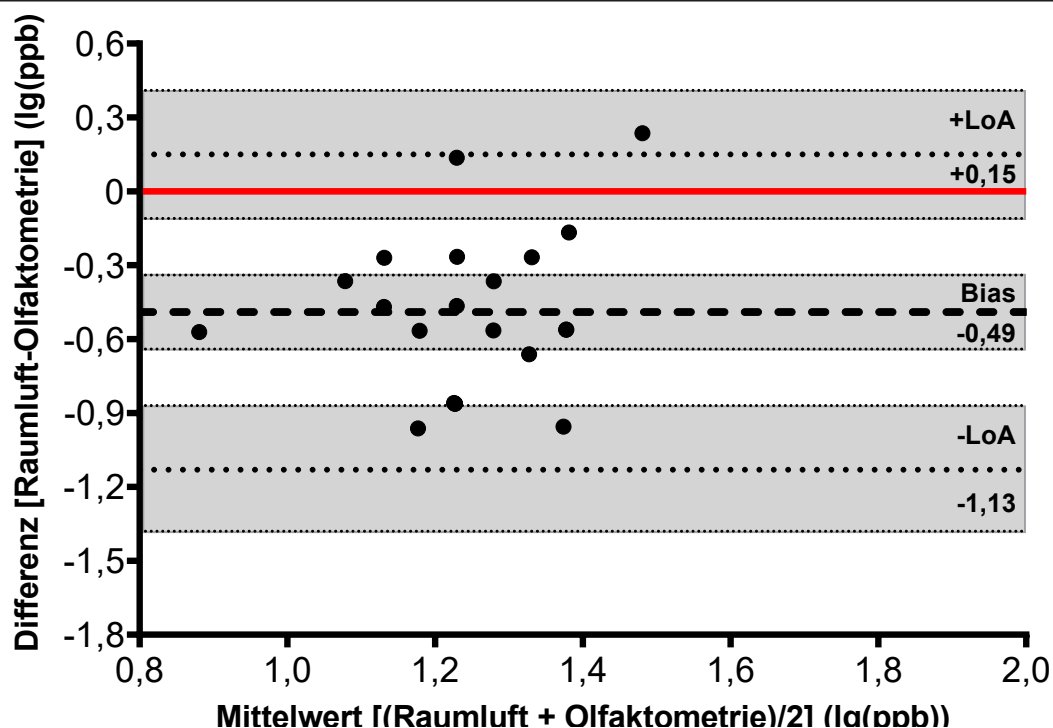
Bei Benzaldehyd lag die systematische Abweichung bei $-0,25 \text{ lg(ppb)}$ und das Übereinstimmungsintervall zwischen $-0,76 \text{ lg(ppb)}$ und $0,27 \text{ lg(ppb)}$. Der Unterschied ist demnach nicht signifikant, aber der Übereinstimmungsbereich umfasst mehr als drei Konzentrationsstufen ($1,02 \text{ lg(ppb)} > 0,6$) und ist damit signifikant.

Tabelle 10: Olfaktometrie vs. Raumluft: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme

Vergleich Olfaktometrie vs. Raumluft [lg(ppb)] (Standardbedingungen)	Bias ($\pm 95\text{-KI}$)	$- \text{LoA}$ ($\pm 95\text{-KI}$)	$+ \text{LoA}$ ($\pm 95\text{-KI}$)	LoA
n-Butanol	-0,49 (-0,64 – -0,34)	-1,13 (-1,38 – -0,87)	0,15 (-0,11 – 0,41)	1,28
Benzaldehyd	-0,25 (-0,37 – -0,12)	-0,76 (-0,97 – -0,55)	0,27 (-0,05 – 0,48)	1,02

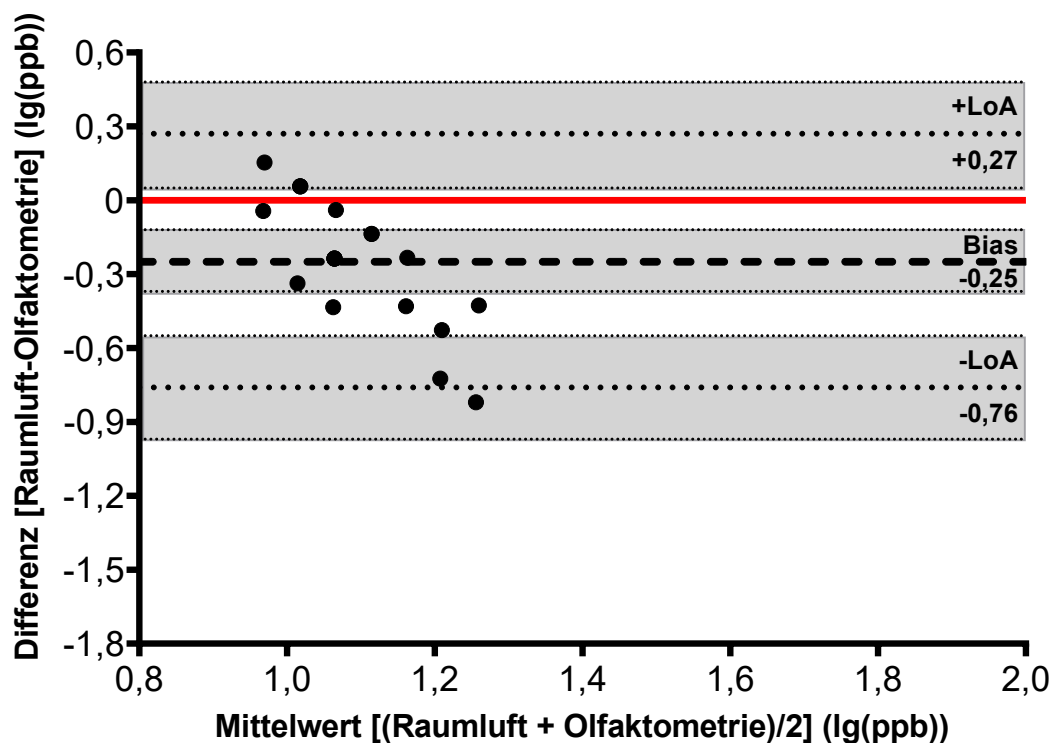
Bias: Mittelwert aller Differenzen; LoA: Übereinstimmungsbereich (limits of agreement).

Abbildung 8: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter Standardbedingungen olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm \text{LoA}$: gepunktet; 95%-KI: grau)



Quelle: eigene Darstellung, IPA

Abbildung 9: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter Standardbedingungen olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für Benzaldehyd (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)



Quelle: eigene Darstellung, IPA

4.1.5 Einfluss der Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwellen von n-Butanol, gemessen am TO8-Olfaktometer und in der Raumluft des ExpoLab

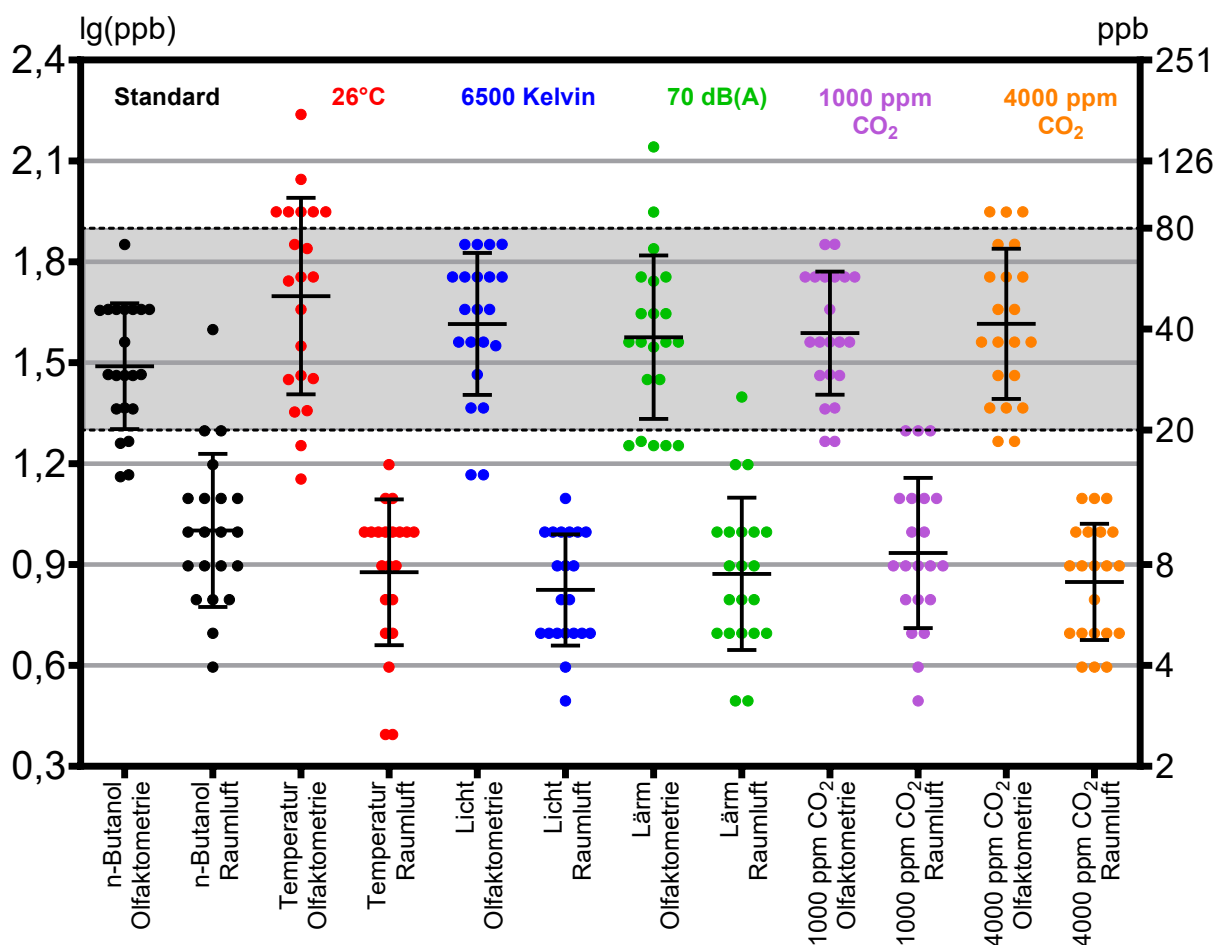
In Abbildung 10 werden Mittelwert und Standardabweichung der individuellen Geruchsschwellen für n-Butanol dargestellt, die unter dem Einfluss der fünf Umgebungsfaktoren und zum Vergleich unter Standardbedingungen ermittelt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen immer niedriger liegen, als die mit dem TO8-Olfaktometer ermittelten Geruchsschwellen.

Tabelle 11: Einfluss der Umgebungsfaktoren: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme

Geruchsschwellen für n-Butanol [lg(ppb)]	Bias (± 95%-KI)	- LoA (± 95%-KI)	+ LoA (± 95%-KI)	LoA
Standard: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,49 (-0,64 – -0,34)	-1,13 (-1,38 – -0,87)	0,15 (-0,11 – 0,41)	1,27
erhöhte Temperatur: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,82 (-1,01 – -0,63)	-1,63 (-1,96 – -1,30)	-0,01 (-0,34 – 0,31)	1,62
kaltes Licht: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,79 (-0,91 – -0,67)	-1,30 (-1,51 – -1,10)	-0,28 (-0,49 – -0,07)	1,02
Straßenlärm: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,70 (-0,86 – -0,54)	-1,39 (-1,67 – -1,11)	-0,01 (-0,29 – 0,26)	1,38
CO ₂ (1000 ppm): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,65 (-0,75 – -0,56)	-1,07 (-1,24 – -0,90)	-0,24 (-0,40 – -0,07)	0,84
CO ₂ (4000 ppm): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,77 (-0,88 – -0,65)	-1,26 (-1,45 – -1,06)	-0,28 (-0,48 – -0,08)	0,98

Bias: Mittelwert der Differenzen (Raumluft – Olfaktometrie); LoA: Übereinstimmungsbereich (limits of agreement).

Abbildung 10: Einfluss der Umgebungsfaktoren auf die Geruchsschwelle von n-Butanol



Vergleich der olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen; Punkte: Individuelle Geruchsschwellen, Balken: Mittelwert ± STD)

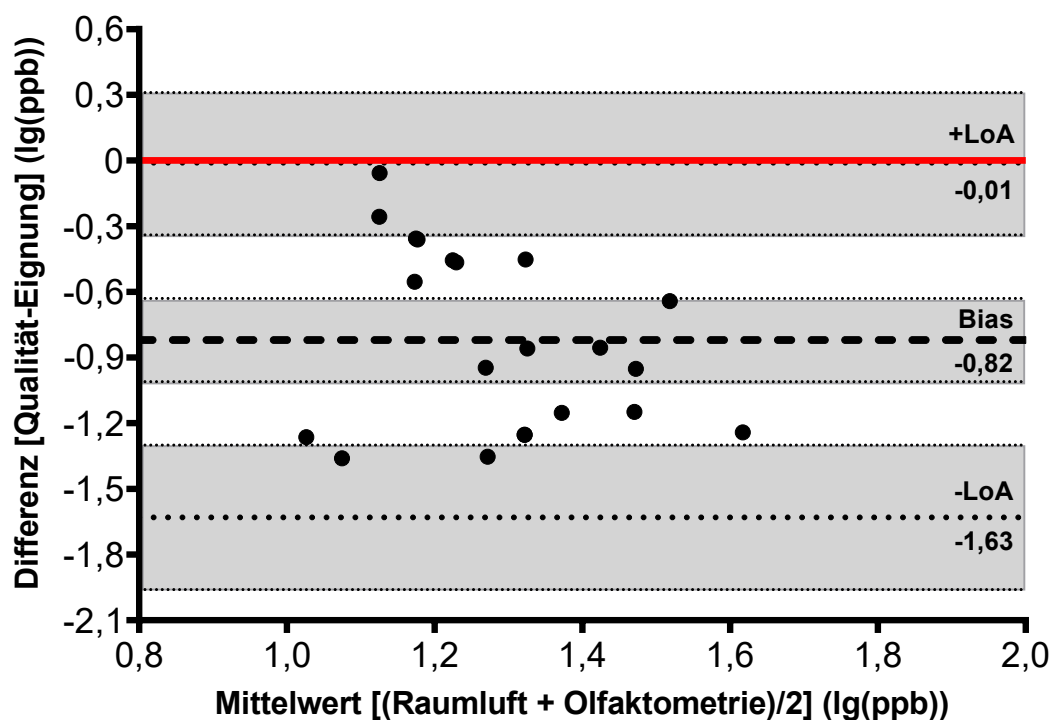
Quelle: eigene Darstellung, IPA

Die Bland-Altman-Diagramme (Tabelle 11, Abbildung 11-15) bestätigen, dass eine systematische Abweichung zwischen der olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol vorliegt. Diese Abweichung ist unter dem Einfluss der fünf Umgebungsfaktoren noch größer und umfasst mehr als zwei Konzentrationsstufen ($> 0,6 \text{ lg(ppb)}$).

Die Größe des Übereinstimmungsbereichs ist unter dem Einfluss der erhöhten Temperatur und des Straßenlärm besonders groß und umfasst mehr als vier Konzentrationsstufen ($1,62 \text{ lg(ppb)}$ bzw. $1,38 \text{ lg(ppb)} > 1,2 \text{ lg(ppb)}$).

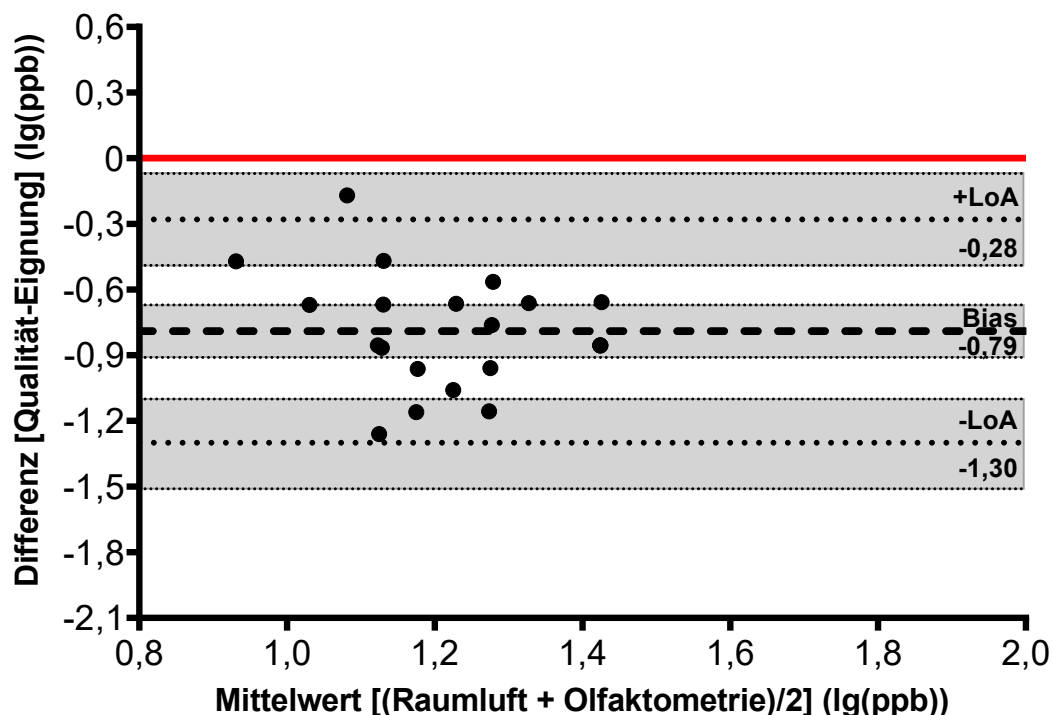
In Abbildung 10 ist zu sehen, dass an den Testtagen mit erhöhter Temperatur oder Straßenlärm einzelne Personen besonders hohe Geruchsschwellen aufweisen, verglichen mit den übrigen Testtagen. Diese „Ausreißerwerte“ führen zu einer großen Streuung der Geruchsschwellen und in der Folge zu einem großen LoA.

Abbildung 11: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von erhöhter Temperatur olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)



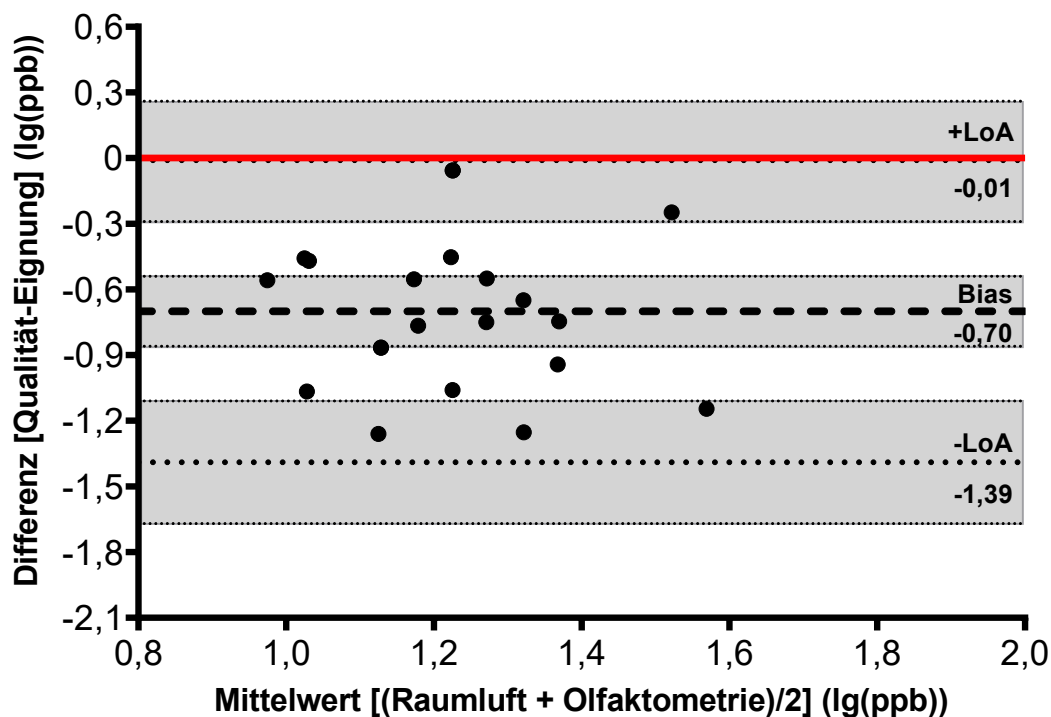
Quelle: eigene Darstellung, IPA

Abbildung 12: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von kaltem Licht olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)



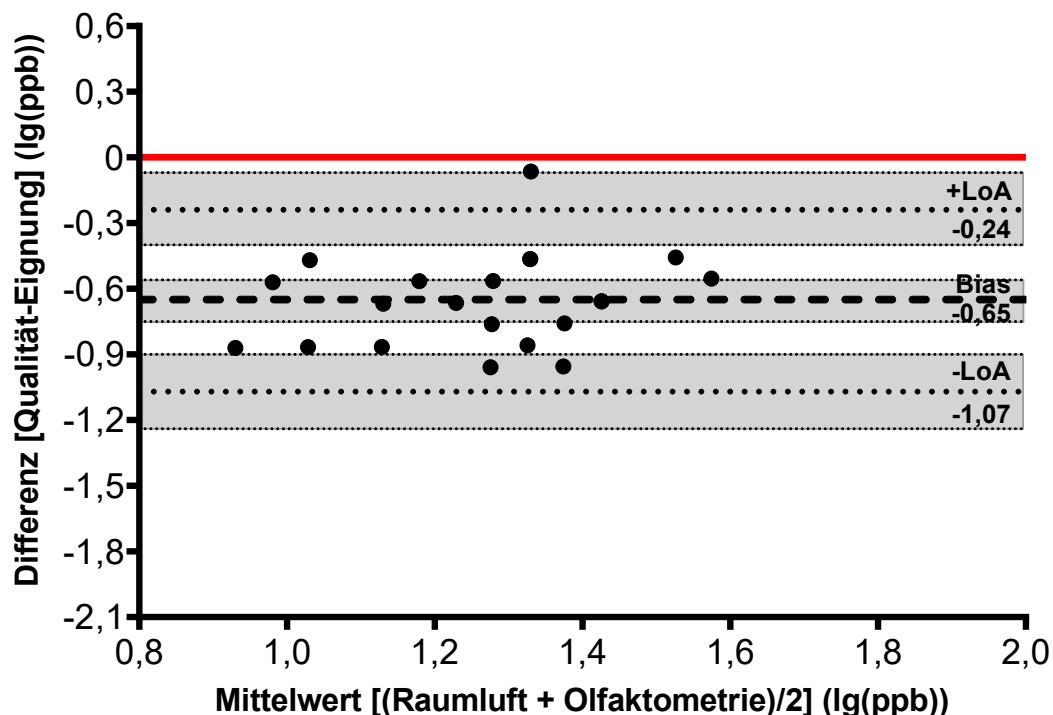
Quelle: eigene Darstellung, IPA

Abbildung 13: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von Straßenlärm olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; $\pm$ LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)



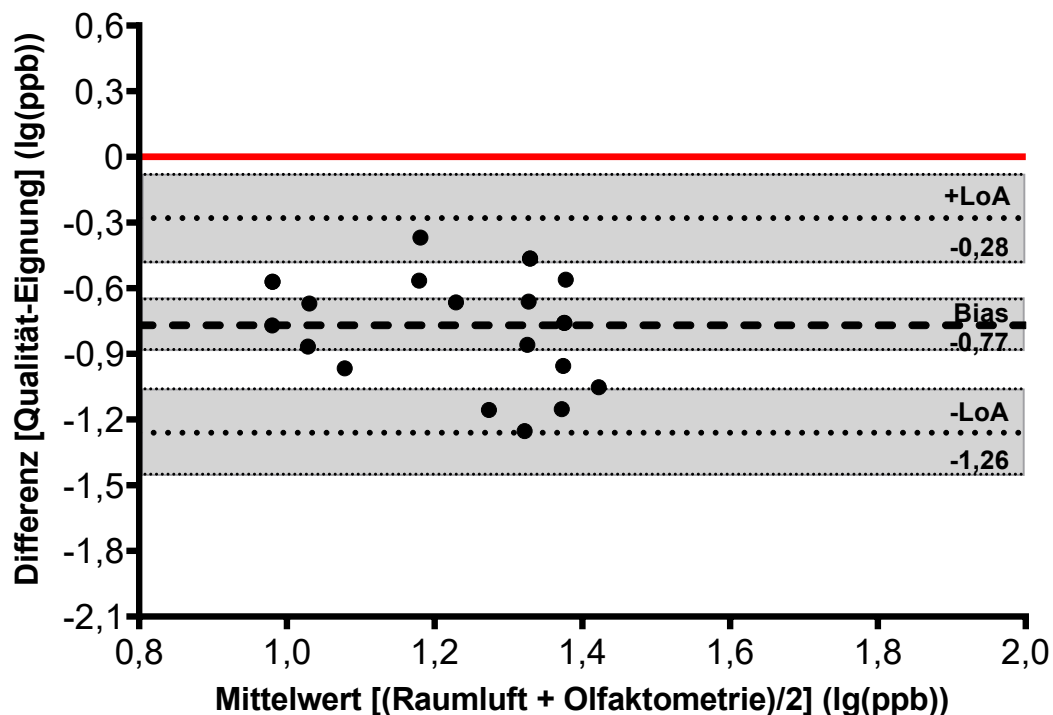
Quelle: eigene Darstellung, IPA

Abbildung 14: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von 1000 ppm CO₂ olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; ± LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)



Quelle: eigene Darstellung, IPA

Abbildung 15: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich der unter dem Einfluss von 4000 ppm CO₂ olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen für n-Butanol (Bias: gestrichelt; ± LoA: gepunktet; 95%-KI: grau)



Quelle: eigene Darstellung, IPA

5 Diskussion

5.1 Rekrutierung und Eignung

Die Studie wurde mit 21 geeigneten Prüfpersonen (10 Frauen/11 Männer) durchgeführt. Die Qualitätssicherung hat gezeigt, dass vier Personen während der Eignungsuntersuchung sehr empfindlich waren und drei Personen im Verlauf der Studie unempfindlicher wurden. Der Ausschluss dieser Personen und eine erneute Auswertung führten jedoch nicht zu anderen Ergebnissen (Anhang C).

5.2 Unterschied zwischen Olfaktometrie und Raumluft

Der Vergleich der Geruchsschwellen für n-Butanol und Benzaldehyd, die unter Standardbedingungen olfaktometrisch und in der Raumluft ermittelt wurden, zeigt zunächst, dass die in der Raumluft ermittelten Geruchsschwellen immer niedriger sind. Die systematische Abweichung ist für n-Butanol aber nicht für Benzaldehyd signifikant. Die Varianz der Geruchsschwellen liegt im Bereich von zwei Konzentrationsstufen ($0,6 \lg(\text{ppm})$), mit vereinzelt Ausreißerwerte. Die Varianz der in der Raumluft gemessenen Geruchsschwellen für Benzaldehyd ist geringer als bei n-Butanol.

Eine mögliche Erklärung für den Unterschied zwischen den olfaktometrisch und den in der Raumluft bestimmten Geruchsschwellen betrifft bauliche Aspekte des verwendeten Olfaktometers. Im TO8-Olfaktometer bestehen die Oberflächen, die mit dem Geruchsstoff in Kontakt kommen, aus inerten Materialien wie Edelstahl (Blenden), Polytetrafluorethylen (Teflon®) (Schläuche) und Glas (Riechrohr). Chemische Substanzen sollten demnach nicht oder nur in sehr geringem Maße an diesen Oberflächen absorbieren. Mehrere Untersuchungen mit einem baugleichen TO8-Olfaktometer konnten zeigen, dass je nach verwendetem Geruchsstoff zum Teil deutliche Wandungseffekte zu beobachten waren. Die Wandungseffekte führten dazu, dass die Wiederfindungsrate nicht bei 100 % lag, d. h. die am Riechrohr gemessene n-Butanol-konzentration war geringer, als die auf Basis der Ausgangskonzentration berechneten n-Butanolkonzentrationen je Verdünnungsstufe. Außerdem unterschieden sich die Wiederfindungsraten abhängig von der Darbietungsdauer und der jeweiligen Verdünnungsstufe.

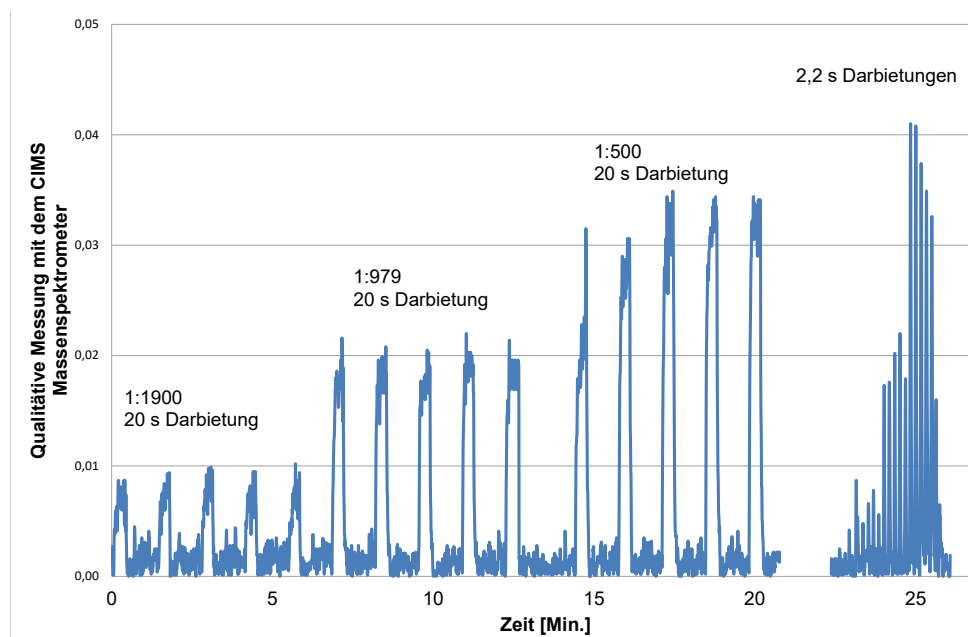
Hansen et al. (2013) konnten zeigen, dass die Wiederfindungsrate bei n-Butanol zwischen 90 % und 95 % lag. Als Ausgangskonzentration wurde 5 ppm verwendet und es wurden sechs Verdünnungsstufen (128 bis 4096) untersucht. Schon nach wenigen Sekunden wurde bei der Verdünnungsstufe 128 (39 ppm n-Butanol) eine stabile Konzentration erreicht.

Kasper et al. (2017) ermittelten eine Wiederfindungsrate für n-Butanol von 98,8 % ($\pm 3,1$ %) bei einer Darbietungsdauer von 60 Sekunden; von 76,7 % ($\pm 2,1$ %) bei einer Darbietungsdauer von 15 Sekunden; von 68,1 % ($\pm 12,7$ %) bei einer Darbietungsdauer von 2,2 Sekunden. Auch hier wurde, unabhängig von der Verdünnungsstufe, nach wenigen Sekunden eine stabile Konzentration erreicht. Außerdem konnte gezeigt werden, dass mit der Zeit eine Sättigung der Oberflächen erfolgt. Im Vergleich zur ersten Messung, waren die Wiederfindungsraten bei der zweiten und der dritten Messung deutlich höher und näherten sich den erwarteten Werten an. Die Geruchsluftproben wurden nicht im Wechsel mit geruchsloser Luft dargeboten und die Ausgangskonzentration war deutlich niedriger (20 ppm) als in unserer Studie (60 ppm). Weitere Untersuchungen ergaben, dass die Verluste hauptsächlich im Verdünnungssystem erfolgen, das aus Edelstahl besteht, und nicht im Verteilungssystem, das aus PTFE-Schläuchen besteht.

In einer weiteren Studie konnten Kasper et al. (2018) zeigen, dass die Verluste bei hohen Konzentrationen stärker sind als bei niedrigen Konzentrationen und dass eine Darbietungsdauer von 2,2 Sekunden oder von 15 Sekunden nicht zu deutlichen Unterschieden führt.

Eigene vergleichende Untersuchungen bestätigen, dass die Konzentration von n-Butanol bei einer Verdünnungsstufe von Durchgang zu Durchgang deutlich stärkeren Schwankungen unterliegt als die Konzentration von Propylen (Abbildung 16 und 17).

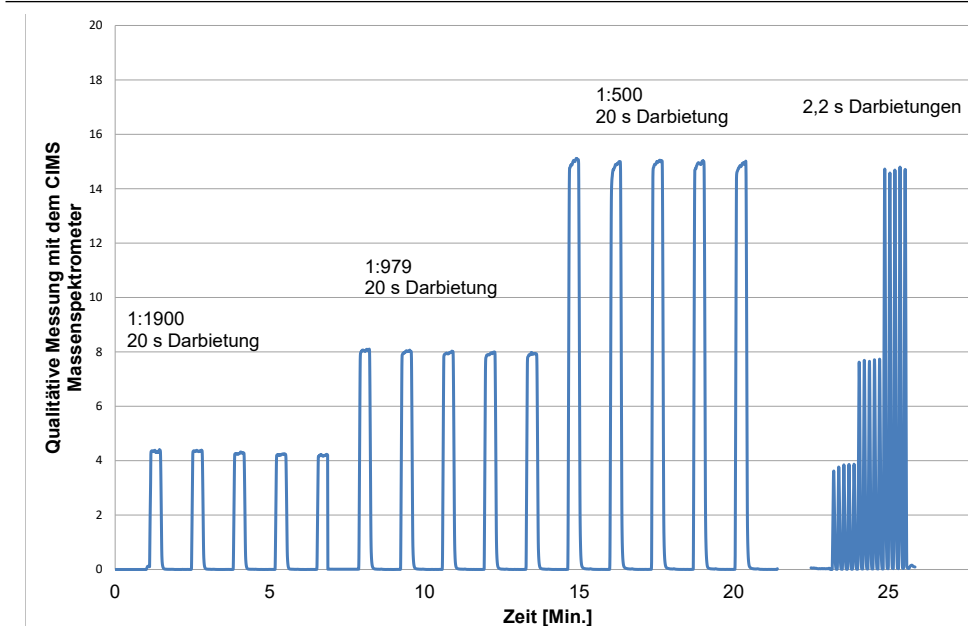
Abbildung 16: Qualitative Konzentrationsprofile für n-Butanol am Olfaktometer



Vergleich der Darbietungsdauer von 20 Sekunden und 2,2 Sekunden für drei Verdünnungsstufen.

Quelle: eigene Darstellung, IPA

Abbildung 17: Qualitative Konzentrationsprofile für Propylen am Olfaktometer



Vergleich der Darbietungsdauer von 20 Sekunden und 2,2 Sekunden für drei Verdünnungsstufen.

Quelle: eigene Darstellung, IPA

Die beschriebenen Wandungseffekte am Olfaktometer wurden bei der Berechnung der Konzentrationsstufen am Olfaktometer berücksichtigt und waren Grundlage für die Generierung der Konzentrationsstufen in der Raumluft des ExpoLab. Es ist daher unwahrscheinlich, dass Wandungseffekte allein für den Unterschied in den Geruchsschwellen verantwortlich sind.

Ein weiterer Grund für die unterschiedlichen Geruchsschwellen in der Raumluft und am Olfaktometer könnte die Form der am T08-Olfaktometer verwendeten Riechrohre sein. Die Prüfpersonen halten ihre Nase in das Innere des Riechrohres. Das erzeugt Turbulenzen im Inneren des Riechrohres, die einen Luftstrom in das Riechrohr hinein bewirken. Das könnte zu einer Verdünnung der dargebotenen Geruchsproben mit der Umgebungsluft führen (Hansen et al., 2013).

Ein methodischer Aspekt, der zu den niedrigeren Geruchsschwellen in der Raumluft beigetragen haben kann, ist die Tatsache, dass keine Nullproben verwendet werden konnten. Bei einer Abfolge von aufsteigenden Konzentrationsstufen steigt die Erwartungshaltung, die Geruchsschwelle zu erreichen, zunehmend an, was zu falsch positiven Antworten führen kann (Dravnieks & Jarke, 1980). Das kann insbesondere bei den Messungen mit Benzaldehyd einen Einfluss gehabt haben, da diese Testtage zu den letzten Untersuchungstagen im Rahmen der Studie gehörten.

5.3 Einfluss der Umgebungsfaktoren

Ein deutlicher Einfluss der fünf Umgebungsfaktoren auf die Höhe der n-Butanol-Geruchsschwelle ist nicht erkennbar. Alle olfaktometrischen Geruchsschwellen liegen im Bereich zwischen 20 und 80 ppb; alle in der Raumluft gemessenen Geruchsschwellen liegen im Bereich zwischen 4 und 16 ppb, mit einzelnen Ausreißerwerten. An den Tagen mit einem veränderten Umgebungsfaktor liegen die olfaktometrisch ermittelten Geruchsschwellen etwas höher und die in der Raumluft gemessenen Geruchsschwellen etwas niedriger als an den Tagen mit standardisierten Umgebungsbedingungen, aber diese Unterschiede sind nicht signifikant.

Allerdings ist ein Einfluss auf die Varianz der Geruchsschwellen erkennbar. Straßenlärm und die hohe Temperatur führten zu einer stärkeren Streuung der individuellen Geruchsschwellen, insbesondere bei der Olfaktometrie. Bei beiden Umgebungsfaktoren reagierten einige Prüfpersonen unempfindlicher im Vergleich zu den Standardbedingungen.

Es wird immer wieder behauptet, dass eine niedrige Luftfeuchtigkeit das Geruchsempfinden beeinträchtigt, weil die Schleimhäute in der Nase austrocknen. Dementsprechend verbessert eine hohe Luftfeuchtigkeit das Geruchsempfinden. Jeder hat schon einmal selbst erlebt, dass die Natur nach einem Regenschauer stärker riecht. Das liegt daran, dass der erhöhte Wasserdampf in der Luft mehr geruchsverursachenden Moleküle einfängt und dafür sorgt, dass diese länger in der Luft bleiben und über weitere Strecken transportiert werden (Müller-Schwarze, 2009). Mit einer Austrocknung der Schleimhäute hat das eher nichts zu tun, denn eine gesunde Nase bringt trotz hoher Außentemperaturen und niedriger relativer Luftfeuchtigkeit die Atemluft auf Körpertemperatur und reichert sie mit bis zu 90 % Luftfeuchtigkeit an (Naftali et al., 2005). Dies ist auch der Grund dafür, dass unterschiedliche Temperaturen keinen Einfluss auf die Riechfähigkeit haben (Stone, 1963).

Diese Erkenntnisse werden unterstützt von einer experimentellen Humanstudie mit 50 gesunden Teilnehmenden (40 Männer, 10 Frauen; Durchschnittsalter 33 Jahre). In dieser Studie konnte kein Einfluss von Temperatur (20-35°C) oder Luftfeuchtigkeit (30-75 %) auf die Riechfähigkeit, untersucht mit dem Sniffin' Sticks Test, gefunden werden (Drews et al., 2021). In einer Studie zum Einfluss von Luftfeuchtigkeit und einem verringerten Luftdruck reduzierten sich die mit dem Sniffin' Sticks Test ermittelten Geruchsschwelle für n-Butanol sowohl bei

30 % (Mittelwert und Standardabweichung: $6,4 \pm 3,3$) als auch bei 80 % ($7,2 \pm 3,3$) relativer Luftfeuchte im Vergleich zu den beiden Messungen bei 50 % ($9,5 \pm 2,3$; $7,5 \pm 2,4$). Allerdings war die Anzahl der Teilnehmenden relativ klein ($N = 23$ bis 27) und nicht alle Personen wurden unter gleichen Bedingungen getestet. Ein statistischer Vergleich wurde für diese Ergebnisse nicht durchgeführt. Die unterschiedlichen Mittelwerte in der 50 %-Bedingung und die Höhe der Standardabweichung der Messwerte innerhalb einer Testbedingung zeigen, dass kein deutlicher Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Riechvermögen erkennbar ist.

Auch aus der molekularbiologischen Forschung gibt es Hinweise darauf, dass beim Menschen die Luftfeuchtigkeit keinen Einfluss auf das Riechvermögen hat. Max-Planck-Wissenschaftler (Krång et al., 2012) haben herausgefunden, dass Einsiedlerkrebse besser „riechen“ können, wenn sich die Geruchsstoffe in feuchter Luft befinden. Das gilt jedoch nicht für Fruchtfliegen, bei denen keinerlei Unterschiede zwischen trockener und feuchter Luft festgestellt wurden. Eine Erklärung dafür ist, dass das Geruchsvermögen von Einsiedlerkrebsen im Vergleich zu Fruchtfliegen unterentwickelt ist. Die Vorfahren unserer heutigen Insektenarten haben den Übertritt vom Meer auf die Kontinente schon in sehr frühen Erdzeitaltern vollzogen und ihr Geruchssinn ist inzwischen sehr gut an das Landleben angepasst. Landlebende Krebse haben eine Art Basisausstattung und können ihren Geruchssinn zwar auch an Land einsetzen, doch halten sich gerne in Küstennähe auf, weil die Luft dort feuchter ist.

In Bezug auf die Wirkung von Lärm auf den Geruchssinn gibt es Hinweise, dass eher ein hoher Lärmpegel (100 dB(A) mit Spitzen bis 110 dB(A)) und ein akustisches Muster mit mehreren Intensitäten und Tonhöhen die Geruchsschwelle beeinflussen können. Dies wurde in einer Studie untersucht (Fjaeldstad et al., 2019), die über einen Kopfhörer Lärm, wie er während einer Untersuchung in einem Magnetresonanztomographen (MRT) zu hören ist, simulierte. Die Verminderung der Geruchsschwelle für n-Butanol, die mit dem Sniffin' Sticks Test untersucht wurde, war zwar gering, aber statistisch signifikant (MRT: $7,68 \pm 2,34$ vs. Ruhe: $6,75 \pm 2,07$). Eine Erklärung für die Wirkung von Lärm auf den Geruchssinn ist, dass der Lärm bei der Durchführung des Riechtests stört, sich die Testpersonen ablenken lassen und nicht mehr so gut konzentrieren können.

Ein gleichmäßiges Geräusch, wie z. B. weißes Rauschen, führte nicht zu einer Verschlechterung des Riechvermögens. In zwei experimentelle Humanstudien (Rahne et al., 2018; Fischer et al., 2020), in der die Wirkungen von Lärm und Über- bzw. Unterdruck auf die olfaktorischen und gustatorischen Funktionen untersucht wurden, zeigten sich keine Veränderungen der mit dem Sniffin' Sticks Test untersuchten Geruchsschwelle für n-Butanol. Verglichen wurden die über Kopfhörer dargebotenen Lärmbedingungen „weißes Rauschen mit 70 dB(A)“ und „Hintergrundgeräuschpegel mit 59 dB(A)“.

In einer anderen Studie, in der der Einfluss von lauten Hintergrundgeräuschen (Partygeräusch mit 70 dB(A)) im Vergleich zu einem ruhigen Testraum ohne Hintergrundgeräusche untersucht wurde, zeigten sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die mit dem Sniffin' Sticks Test untersuchte Geruchsschwelle für n-Butanol (Walliczek-Dworschak et al., 2016).

Beim Vergleich von nonverbalem Lärm (Partygeräusch) mit verbal bedeutsamen Lärm (Vorlesen eines humoristischen Hörbuchs), jeweils mit 70 dB(A) über Kopfhörer dargeboten, zeigte sich, dass die Persönlichkeit einen Einfluss darauf hat, in welche Richtung sich die mit dem Sniffin' Sticks Test untersuchte Geruchsschwelle für n-Butanol verändert. Bei introvertierten Personen wurde die Riechfähigkeit etwas schlechter und bei extravertierten Personen etwas besser, wenn sie das Hörbuch hörten. Bei nonverbalem Partylärm veränderte sich die Riechfähigkeit dagegen nicht (Seo et al., 2012).

Diese Ergebnisse passen gut zu unseren Studienergebnissen, die zeigen, dass sich zwar die mittlere Gruppenschwelle nicht unter dem Einfluss von Straßenlärm ändert, aber einige Prüfpersonen eine Veränderung ihrer individuellen Geruchsschwellen aufweisen.

Es ist bekannt, dass die Informationen aus den verschiedenen sensorischen Modalitäten, wie Sehen, Hören, Berühren, Riechen und Schmecken vom Nervensystem gemeinsam verarbeitet werden (sog. multimodale Integration). So konnte eine Studie zeigen, dass stärkere Gerüche mit dunkleren Farben assoziiert werden, d. h. die Helligkeit der Farbe variiert umgekehrt mit der wahrgenommenen Geruchsintensität (Kemp & Gilbert, 1997). Untersuchungen zum Einfluss von erhöhten CO₂-Konzentrationen oder veränderten Lichtbedingungen im Hinblick auf die Farbtemperatur auf die Geruchsschwelle gibt es bislang nicht.

In einer Untersuchung zur Wirkung der Lichtfarbe im Raum auf den Geschmack wurde festgestellt, dass Weißwein bei blauem oder rotem Umgebungslicht subjektiv besser schmeckte als bei grünem oder weißem Licht. Die Umgebungsfarbe veränderte zwar den Geschmack, aber nicht den Geruch (Oberfeld et al., 2009).

Die meisten Geruchsstoffe aktivieren sowohl die olfaktorische als auch die trigeminale Wahrnehmung. N-Butanol ist ein reiner Geruchsstoff. Dagegen ist Kohlenstoffdioxid geruchlos und aktiviert die trigeminale Wahrnehmung erst bei hohen Konzentrationen über 10.000 ppm (Wise et al., 2003). In einer experimentellen Humanstudie mit bis zu 20.000 ppm wurden keine Auswirkungen auf subjektive oder objektive Parameter gefunden (Maniscalco et al., 2022). Daher gehen wir davon aus, dass eine CO₂-Konzentration von 1000 ppm oder 4000 ppm keinen Einfluss auf die Geruchswahrnehmungsschwelle von n-Butanol hat.

6 Schlussfolgerungen

Die Studie hat gezeigt, dass eine mit dynamischer Olfaktometrie ermittelte Geruchsschwelle eine zuverlässige Aussage über die Wahrnehmung dieses Geruchs im Innenraum ermöglicht. Die für die Stoffe n-Butanol und Benzaldehyd gezeigte Vergleichbarkeit der Geruchsschwellen sollte dementsprechend unter idealen Laborbedingungen und bei Verwendung standardisierter Methoden auch für andere Geruchsstoffe gefunden werden.

Die sehr geringe Varianz der in der Raumluft gemessenen Geruchsschwellen für Benzaldehyd weisen darauf hin, dass sogenannte Erwartungseffekte aufgetreten sein können. Bei olfaktometrischen Messungen werden üblicherweise Nullproben eingestreut, um Ratetendenzen zu verhindern. Bei der Messung von Geruchsschwellen in der Raumluft war das jedoch aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Für die Ableitung von GLW sollten daher qualitätsgesicherte Geruchsschwellenwerte verwendet werden, die mit dynamischer Olfaktometrie nach einer standardisierten Vorgehensweise empirisch ermittelt wurden.

Die veränderten Umweltbedingungen hatten keinen Einfluss auf die mittlere Geruchsschwelle von n-Butanol. Jedoch wiesen einzelne Prüfpersonen bei Straßenlärm oder erhöhter Temperatur höhere Geruchsschwellen auf als unter Standardbedingungen. Geruchsschwellenmessungen erfordern ein hohes Maß an Konzentration. Eine Störung dieser Konzentration kann die Varianz der Messwerte erhöhen und damit die Zuverlässigkeit der Messung verschlechtern. Die Ergebnisse bestätigen, dass Geruchsschwellenmessungen unter kontrollierten Umgebungsfaktoren durchgeführt werden sollten. Deshalb gibt die DIN EN 13725 entsprechenden Umgebungsfaktoren vor.

7 Quellenverzeichnis

- Ad-hoc AG. (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. In: Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz, 2008, 51, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 1358 – 1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- Ad-hoc AG. (2014): Gesundheitlich hygienische Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mithilfe von Geruchsleitwerten. In: Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz, 2014, 57, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 148 – 153. <https://doi.org/10.1007/s00103-013-1882-3>
- Arbeitsstättenverordnung, mit Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR), ASR 3.6 Lüftung. (Ausgabe Jan. 2012) GMBI Nr. 6 vom 27. Februar 2012, S. 92, zuletzt geändert durch GMBI Nr. 24 vom 18. Mai 2018, S. 474.
- Bland, J.M., Altman, D. G. (1986): Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. In: Lancet, 1986, 1(8476), 307 – 310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Bland, J.M., Altman, D. G. (1999): Measuring agreement in method comparison studies. In: Stat Methods Med Res, 1999, 8(2), 135 – 160. <https://doi.org/10.1177/096228029900800204>
- Brauer, C., Kolstad, H., Ørbaek, P., Mikkelsen, S. (2006): No consistent risk factor pattern for symptoms related to the sick building syndrome: a prospective population-based study. In: Int Arch Occup Environ Health, 2006, 79(6), 453 – 464. <https://doi.org/10.1007/s00420-005-0074-3>
- Boeker, P., Haas, T. (2007): The measurement uncertainty of olfactometry. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 2007, 67, 331 – 340.
- DIN e.V. (Hrsg.) 2003. DIN EN 13725:2003-07: Luftbeschaffenheit; Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie; Deutsche Fassung EN 13725:2003. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN e.V. (Hrsg.) 2012. DIN ISO 16000-28:2012-12: Innenraumluftverunreinigungen, Teil 28: Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten mit einer Emissionsprüfkammer (ISO 16000-28:2012), Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (Hrsg.) 2015. DIN ISO 16000-30:2015-05: Innenraumluftverunreinigungen, Teil 30: Sensorische Prüfung der Innenraumluft (ISO 16000-30:2014), Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (Hrsg.) 2017. DIN EN 16798-3:2017-11: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4); Deutsche Fassung EN 16798-3:2017. Berlin: Beuth Verlag.
- Dravnieks, A., Jarke, F. (1980): Odor threshold measurement by dynamic olfactometry: Significant operational variables. In: Journal of the Air Pollution Control Association, 1980, 30(12), 1284 – 1289. <https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10465182>
- Drews, T., Nehring, M., Werner, A., Hummel, T. (2021): The sense of smell is not strongly affected by ambient temperature and humidity: a prospective study in a controlled environment. In: Eur Arch Otorhinolaryngol, 2021, 278(5), 1465 – 1469. <https://doi.org/10.1007/s00405-020-06436-3>
- Fischer, H. G., Schmidtbauer, C., Seiffart, A., Bucher, M., Plontke, S. K., Rahne, T. (2020): Contribution of ambient noise and hyperbaric atmosphere to olfactory and gustatory function. In: PLoS One, 2020, 15(10), e0240537. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240537>
- Fjaeldstad, A. W., Nørgaard, H. J., Fernandes, H. M. (2019): The impact of acoustic fMRI-noise on olfactory sensitivity and perception. In: Neuroscience, 2019, 406, 262 – 267. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.03.028>
- Giavarina, D. (2015): Understanding Bland Altman analysis. In: Biochem Med (Zagreb), 2015, 25(2), 141 – 151. <https://doi.org/10.11613/BM.2015.015>

- Grouven, U., Bender, R., Ziegler, A., Lange, S. (2007): Der Kappa-Koeffizient. In: Dtsch Med Wochenschr., 2007, Suppl. 132, e69 – e73. <https://doi.org/10.1055/s-2007-959047>
- Hansen, M. J., Adamsen, A. P., Feilberg, A. (2013): Recovery of odorants from an olfactometer measured by proton-transfer-reaction mass spectrometry. In: Sensors (Basel), 2013, 13(6), 7860 – 7871. <https://doi.org/10.3390/s130607860>
- Hummel, T., Sekinger, B., Wolf, S. R., Pauli, E., Kobal, G. (1997): „Sniffin’ Sticks“: Olfactory performance assessed by the combined testing of odor identification, odor discrimination and olfactory threshold. In: Chemical Senses, 1997, 22(1), 39 – 52. <https://doi.org/10.1093/chemse/22.1.39>
- Kasper, P. L., Hansen, M. J., Feilberg, A. (2018): Impact of saturation effects during dynamic olfactometry on low-concentration environmental odour samples. In: Chemical Engineering Transactions, 2018, 68, 37 – 42. <https://doi.org/10.3303/CET1868007>
- Kasper, P. L., Mannebeck, D., Oxbøl, A., Nygaard, J. V., Hansen, M. J., Feilberg, A. (2017). Effects of dilution systems in olfactometry on the recovery of typical livestock odorants determined by PTR-MS. In: Sensors (Basel), 2017, 17(8), 1859. <https://doi.org/10.3390/s17081859>
- Kemp, S. E., Gilbert, A. N. (1997): Odor intensity and color lightness are correlated sensory dimensions. In: Am J Psychol, 1997, 110(1), 35 – 46. PMID: 9100340
- Krång, A. S., Knaden, M., Steck, K., Hansson, B. S. (2012): Transition from sea to land: olfactory function and constraints in the terrestrial hermit crab *Coenobita clypeatus*. In: Proc Biol Sci, 2012, 279(1742), 3510 – 3519. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012>.
- Maniscalco, J., Hoffmeyer, F., Monsé, C., Jettkant, B., Marek, E., Brüning, T., Bünger, J., Sucker, K. (2022): Physiological responses, self-reported health effects, and cognitive performance during exposure to carbon dioxide at 20 000 ppm. In: Indoor Air, 2022, 32(1), e12939. <https://doi.org/10.1111/ina.12939>
- Monsé, C., Bünger, J., Brüning, T., Merget, R. (2014) Generation and characterization of airborne ethyl 2-cyanoacrylate atmospheres in a human whole-body exposure unit. In: Anal. Methods, 2014, 6, 3124 – 3132. <https://doi.org/10.1039/C3AY42131G>
- Monsé, C., Sucker, K., van Thriel, C., Broding, H.C., Jettkant, B., Berresheim, H., Wiethage, T., Käßlerlein, H., Merget, R., Bünger, J., Brüning, T. (2012): Considerations for the design and technical setup of a human whole-body exposure chamber. In: Inhal Toxicol, 2012, 24(2), 99 – 108. <https://doi.org/10.3109/08958378.2011.640362>
- Müller-Schwarze, D. Chemical ecology of vertebrates. Cambridge, England: Cambridge University Press. 2009.
- Naftali, S., Rosenfeld, M., Wolf, M., Elad, D. (2005): The air-conditioning capacity of the human nose. In: Ann Biomed Eng, 2005, 33(4), 545 – 553. <https://doi.org/10.1007/s10439-005-2513-4>
- Oberfeld, D., Hecht, H., Allendorf, U., Wickelmaier, F. (2009): Ambient lighting modifies the flavor of wine. In: Journal of Sensory Studies, 2009, 24(6), 797 – 832. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2009.00239.x>
- Oleszkiewicz, A., Schriever, V. A., Croy, I., Hähner, A., Hummel, T. (2019): Updated Sniffin’ Sticks normative data based on an extended sample of 9139 subjects. In: Eur Arch Otorhinolaryngol, 2019, 276(3), 719 – 728. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-5248-1>
- Rahne, T., Köppke, R., Nehring, M., Plontke, S. K., Fischer, H. G. (2018): Does ambient noise or hypobaric atmosphere influence olfactory and gustatory function? In: PLoS One, 2018, 3(1), e0190837. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190837>
- Seo, H.-S., Hähner, A., Gudziol, V., Scheibe, M., Hummel, T. (2012): Influence of background noise on the performance in the odor sensitivity task: effects of noise type and extraversion. In: Exp. Brain Res, 2012, 222(1-2): 89 – 87. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3222-5>

Stone, H. (1963): Influence of temperature on olfactory sensitivity. In: Journal of Applied Physiology, 1963, 18(4), 746 – 751. <https://doi.org/10.1152/jappl.1963.18.4.746>

Sucker, K., Hangartner, M. (2012): Die Methode der Polaritätenprofile zur Beurteilung der hedonischen Geruchsqualität - Reliabilität und Validität. In: Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 2012, 72(10), 411 – 417.

von Hahn, N. (2007): Trockene Luft und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 2007, 67(3), 103 – 107.

Walliczek-Dworschak, U., Pellegrino, R., Lee, S., Hummel, C., Hähner, A., Hummel, T. (2016): Olfactory performance can be influenced by the presentation order, background noise, and positive concurrent feedback. In: Chemical Senses, 2016, 41(8), 697 – 701. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjw079>

Wise, P. M., Wysocki, C. J., Radil, T. (2003): Time-intensity ratings of nasal irritation from carbon dioxide. In: Chem Senses, 2003, 28(9), 751 – 760. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjg065>

A Anhang

A.1 Kalibrierbericht zum TO8-Olfaktometer der Firma Olfasense



Page 4 of calibration certificate 000606 dated 03.03.2020
Seite 4 zum Kalibrierschein 000606 vom 03.03.2020

Results

Ergebnisse

Setting	Dilution					Accuracy	Instability
Y/N	expected	observed		standard	difference	A _d	I _d
	Z _{exp}	Z _{w,d}		deviation	exp. - obs.		
i				n = 10			
1	65536	69983	±	611	-4447	0,07	2,2%
2	32768	33329	±	114	-561	0,02	1,1%
3	16384	15605	±	62	779	0,06	0,7%
4	8192	8082	±	26	110	0,02	0,6%
5	4096	3869	±	8,8	227	0,06	0,6%
6	2048	1900	±	6,9	148	0,08	0,6%
7	1024	979	±	3,8	45	0,05	0,4%
8	512	500	±	2,68	12	0,03	0,9%
9	256	257	±	1,30	-1	0,01	0,5%
10	128	132	±	0,66	-4	0,04	0,6%
11	64	64	±	0,39	0	0,01	0,5%
12	32	33	±	0,24	-1	0,03	0,4%
13	16	16,2	±	0,04	0	0,02	2,6%
14	8,0	8,6	±	0,06	-1	0,08	1,4%
15	4,0	4,4	±	0,02	0	0,09	0,7%

Quelle: Olfasense GmbH

A.2 Berechnung der Konzentrationsstufen für n-Butanol und Benzaldehyd in der Raumluft des ExpoLab

Butanol	Verdünnungsstufe am Olfaktometer	15605	8082	3869	1900	979	500
Wasserdampf	ppm	250	500	1000	2000	4000	8000
Molmasse von Wasser	g/mol	18,02	18,02	18,02	18,02	18,02	18,02
Wasserdampf	mg/m ³	200,9	401,8	803,6	1607,1	3214,2	6428,4
Stickstoff	L/min	30	30	30	30	30	30
Butanol verdünnt auf 1000 ml Wasser	ml	10	10	10	10	10	10
Wasserdampf	ml	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Molmasse von Butanol	g/mol	74,12	74,12	74,12	74,12	74,12	74,12
Dichte von Butanol	g/cm ³	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
verdampfte Flussrate (Wasser)	g/min	0,0060	0,0121	0,0241	0,0482	0,0964	0,1929
Dichte von Wasser	g/cm ³	1	1	1	1	1	1
Wasser/Stunde	ml/h oder g/h	0,362	0,723	1,446	2,893	5,786	11,571
Volumenfluss	µl/h	3,62	7,23	14,46	28,93	57,86	115,71
Massenfluss (Dichte von Butanol * Volumenfluss)	mg/h	2,93	5,86	11,72	23,43	46,86	93,73
Luftwechselrate (Austauschrate)	m ³ /h	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
ExpoLab Volumen (Kammervolumen)	m ³	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6
Volumenstrom	m ³ /h	386	386	386	386	386	386
Gasvolumen aus Vorkammer	m ³ /h	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Volumenstrom ExpoLab in Normkubikmeter	N m ³ /h	355,7	355,7	355,7	355,7	355,7	355,7
Gasvolumen aus Vorkammer in Normkubikmeter	N m ³ /h	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
Butanol in der Raumluft	µg/m ³	8,20	16,39	32,78	65,57	131,14	262,27
	ppb	2,5	5,0	9,9	19,8	39,7	79,3
Benzaldehyd	Verdünnungsstufe am Olfaktometer			3869	1900	979	500
Wasserdampf	ppm			625	1250	2500	5000
Molmasse von Wasser	g/mol			18,02	18,02	18,02	18,02
Wasserdampf	mg/m ³			502,2	1004,4	2008,9	4017,8
Stickstoff	L/min			30	30	30	30
Benzaldehyd verdünnt auf 1000 ml Wasser	ml			5	5	5	5
Wasserdampf	ml			1000	1000	1000	1000
Molmasse von Benzaldehyd	g/mol			106,12	106,12	106,12	106,12
Dichte von Benzaldehyd	g/cm ³			1,04	1,04	1,04	1,04
verdampfte Flussrate (Wasser)	g/min			0,0151	0,0301	0,0603	0,1205
Dichte von Wasser	g/cm ³			1	1	1	1
Wasser/Stunde	ml/h oder g/h			0,904	1,808	3,616	7,232
Volumenfluss	µl/h			4,52	9,04	18,08	36,16
Massenfluss (Dichte von Butanol * Volumenfluss)	mg/h			4,70	9,40	18,80	37,61
Luftwechselrate	m ³ /h			13,5	13,5	13,5	13,5
ExpoLab Volumen	m ³			28,6	28,6	28,6	28,6
Volumenstrom	m ³ /h			386	386	386	386
Gasvolumen aus Vorkammer	m ³ /h			1,8	1,8	1,8	1,8
Volumenstrom ExpoLab in Normkubikmeter	N m ³ /h			355,7	355,7	355,7	355,7
Gasvolumen aus Vorkammer in Normkubikmeter	N m ³ /h			1,66	1,66	1,66	1,66
Benzaldehyd in der Raumluft	µg/m ³			13,16	26,33	52,66	105,31
	ppb			2,8	5,6	11,1	22,2

Quelle: eigene Darstellung, IPA

B Anhang

B.1 Online-Fragebogen für die Probandenrekrutierung



Angaben zur Person	VP-ID (ABCD)					VP-Nummer (wird eingetragen)
---------------------------	--------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	---------------------------------

1.1 Geburtsdatum (DD.MM.YYYY) 1.2 Geschlecht m ☐ w ☐ d ☐

1.3 Körpergröße in cm 1.4 Gewicht in kg 1.5 Tätigkeit

Fragen zum Gesundheitsstatus

2	Welche der folgenden Krankheiten sind bei Ihnen jemals ärztlich festgestellt worden?	ja	nein	weiß nicht
2.1	Migräne (d.h. anfallartige Kopfschmerzen, die wiederholt und meist halbseitig auftreten, in den frühen Morgenstunden beginnen und Stunden bis Tage dauern können)	☐	☐	☐
2.2	Störung der Schilddrüsenfunktion	☐	☐	☐
2.3	Zuckerkrankheit (Diabetes)	☐	☐	☐
2.4	Ohnmachtsanfälle / Bewusstlosigkeit / Epilepsie	☐	☐	☐
2.5	Chronischer Schnupfen, häufige Entzündung der Nasennebenhöhlen (Sinusitis)	☐	☐	☐
2.6	Nahrungsmittelallergie	☐	☐	☐
2.6.1	Falls ja, was genau:			
2.7	Hautausschlag (Neurodermitis, Schuppenflechte, Ekzeme)	☐	☐	☐
2.7.1	Falls ja, was genau:			
2.8	Bluthochdruck (Hypertonie)	☐	☐	☐
2.9	Chronische Herzkrankheit (Angina pectoris, Herzrhythmusstörungen)	☐	☐	☐
2.10	Durchblutungsstörungen (z.B. in den Beinen, im Gehirn)	☐	☐	☐
2.11	Chronische Magenbeschwerden (Gastritis), Sodbrennen (Reflux)	☐	☐	☐
2.12	Magen- oder Zwölffingerdarmgeschwür, Ulcuskrankheit	☐	☐	☐
2.13	Gallensteine, Lebererkrankung	☐	☐	☐
2.14	Einschränkungen der Nierenfunktion	☐	☐	☐
2.15	Haben Sie weitere Krankheiten, die hier nicht genannt wurden?	☐	☐	☐
2.15.1	Falls ja, was genau:			
2.16	Nehmen Sie regelmäßig Medikamente ein?	☐	☐	☐
2.16.1	Falls ja, was genau:			

Quelle: eigene Darstellung, IPA

Atemwegserkrankungen		ja	nein	weiß nicht
3.1	Hatten Sie Husten und Auswurf an den meisten Tagen von 3 Monaten eines Jahres?	☐	☐	☐
3.2	Hatten Sie in den letzten 12 Monaten ein pfeifendes oder brummendes Geräusch im Brustkorb?	☐	☐	☐
3.2.1	Falls ja: Hatten Sie dieses Geräusch auch, wenn Sie nicht erkältet waren?	☐	☐	☐
3.3	Hatten Sie jemals Anfälle von Kurzatmigkeit bzw. Atemnot?	☐	☐	☐
3.3.1	Falls ja: Hatten Sie irgendwann in den letzten 12 Monaten anfallartige Atemnot in Ruhe (ohne körperliche Belastung)?	☐	☐	☐
3.4	Wurde bei Ihnen die Diagnose "Asthma" ärztlich festgestellt?	☐	☐	☐
3.4.1	Falls ja: Hatten Sie in den letzten 12 Monaten einen Asthmaanfall?	☐	☐	☐

Allergische Erkrankungen		ja	nein	weiß nicht
4.1	Haben Sie eine allergische Erkrankung der Atemwege? Falls ja, was genau? _____	☐	☐	☐
4.2	Haben Sie schon einmal bei einem Arzt (z.B. Hautarzt) einen Allergietest (z.B. Prick-Test) gemacht? Falls ja, mit welchem Ergebnis? _____	☐	☐	
4.3	Haben Sie den Verdacht, dass Sie eine Allergie haben, <u>ohne dass ärztlich</u> eine Diagnose gestellt wurde? Falls ja, Allergie auf: _____	☐	☐	

Rauchen				
5.1	Haben Sie jemals regelmäßig Zigaretten (Zigarren, Pfeife) geraucht?	☐ Raucher	☐ Ex-Raucher	☐ Nie-Raucher
Nur für Raucher und Ex-Raucher				
5.1.1	Durchschnittlich pro Tag: Wie viele Zigaretten rauchen Sie bzw. haben Sie geraucht?	_____	Anzahl	
5.1.2	Durchschnittlich pro Tag: Wie viele Zigarren/Pfeife rauchen Sie bzw. haben Sie geraucht?	_____	Anzahl	
5.1.3	Wie alt waren Sie, als Sie mit dem Rauchen begonnen haben?	_____	Jahre	
Nur für Ex-Raucher				
5.1.4	Seit wie vielen Monaten / Jahren haben Sie nicht mehr geraucht? (Bitte nicht zutreffendes frei lassen!)	_____ Monate	_____ Jahre	
Nur Raucher				
5.1.5	Wie viele Jahre haben Sie zwischendurch nicht mehr geraucht?	_____	Jahre	
5.1.6	Wie viele Zigaretten haben Sie heute schon geraucht?	_____	Anzahl	
5.1.7	Wie viele Zigarren/Pfeifen haben Sie heute schon geraucht?	_____	Anzahl	
5.2	Haben Sie jemals Kautabak gekaut?	☐ ja	☐ nein	

B.3 Zeitlicher Ablauf eines Testtages mit Olfaktometrie und Raumluftbewertung

Uhrzeit	Dauer	Proband*Innenen
08:00		Proband*Innen kommen im IPA an, Corona-Test
08:15		ins ExpoLab gehen
	00:01	1. Akzeptanz/Intensität bewerten
	00:15	2. Olfaktometrie (Standard) - 1 Messung (4 Durchgänge)
08:31		ExpoLab verlassen und auf dem Flur Platz nehmen
	00:14	Start Umweltfaktor (Licht, Lärm, Temperatur, CO₂ (1000 / 4000 ppm))
08:45		ins ExpoLab gehen
	01:00	Olfaktometrie (Umweltfaktor) - 4 Messungen (16 Durchgänge)
09:45		ExpoLab verlassen und auf dem Flur Platz nehmen
	00:15	Butanol: Start Stufe 1 (15605)
10:00	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
10:03	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
10:04	00:01	ExpoLab verlassen
10:05	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 2 (8082)
10:15	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
10:18	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
10:19	00:01	ExpoLab verlassen
10:20	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 3 (3869)
10:30	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
10:33	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
10:34	00:01	ExpoLab verlassen
10:35	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 4 (1900)
10:45	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
10:48	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
10:49	00:01	ExpoLab verlassen
10:50	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 5 (979)
11:00	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
11:03	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
11:04	00:01	ExpoLab verlassen
11:05	00:30	1. Durchgang beendet; ExpoLab Lüften
11:20	00:15	Butanol: Start Stufe 1 (15605)
11:30	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
11:33	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
11:34	00:01	ExpoLab verlassen
11:35	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 2 (8082)
11:45	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
11:48	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
11:49	00:01	ExpoLab verlassen
11:50	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 3 (3869)
12:00	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
12:03	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
12:04	00:01	ExpoLab verlassen
12:05	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 4 (1900)
12:15	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
12:18	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
12:19	00:01	ExpoLab verlassen
12:20	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 5 (979)
12:30	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
12:33	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
12:34	00:01	ExpoLab verlassen
12:35	00:30	2. Durchgang beendet; ExpoLab Lüften
Uhrzeit	Dauer	Proband*Innenen
12:50	00:15	Butanol: Start Stufe 1 (15605)
13:00	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
13:03	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
13:04	00:01	ExpoLab verlassen
13:05	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 2 (8082)
13:15	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
13:18	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
13:19	00:01	ExpoLab verlassen
13:20	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 3 (3869)
13:30	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
13:33	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
13:34	00:01	ExpoLab verlassen
13:35	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 4 (1900)
13:45	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
13:48	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
13:49	00:01	ExpoLab verlassen
13:50	00:10	Proband*Innen warten auf dem Flur; Start Stufe 5 (979)
14:00	00:03	Proband*Innen betreten den Beobachtungsraum
14:03	00:01	Proband*Innen betreten das ExpoLab; Bewertung am Platz
14:04	00:01	ExpoLab verlassen
14:05	00:30	3. Durchgang beendet

Quelle: eigene Darstellung, IPA

C Anhang

C.1 Eignungsuntersuchung: Ausschluss von drei Personen, die zu empfindlich waren (korrigierte Werte)

Tabelle 12: Eignungsuntersuchung: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramm

Geruchsschwellen für [lg(ppb)]	Bias (± 95%-KI)	– LoA (± 95%-KI)	+ LoA (± 95%-KI)	LoA
Eignung vs. Qualität	0,16 (0,12 – 0,19)	0,02 (-0,04 – 0,08)	0,30 (0,24 – 0,35)	0,27
Standard (n-Butanol): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,50 (-0,65 – -0,35)	-1,10 (-1,36 – -0,84)	0,10 (-0,16 – 0,36)	1,20
Standard (Benzaldehyd) Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,25 (-0,40 – -0,11)	-0,81 (-1,06 – -0,56)	0,30 (0,05 – 0,55)	1,11
erhöhte Temperatur: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,90 (-1,09 – -0,72)	-1,64 (-1,97 – -1,32)	-0,16 (-0,49 – 0,16)	1,48
kaltes Licht: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,80 (-0,92 – -0,67)	-1,30 (-1,52 – -1,08)	-0,29 (-0,51 – -0,08)	1,00
Straßenlärm: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,73 (-0,92 – -0,55)	-1,46 (-1,78 – -1,14)	-0,01 (-0,32 – 0,31)	1,45
CO ₂ (1000 ppm): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,67 (-0,78 – -0,57)	-1,11 (-1,30 – -0,92)	-0,24 (-0,43 – -0,05)	0,86
CO ₂ (4000 ppm): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,80 (-0,92 – -0,67)	-1,30 (-1,52 – -1,08)	-0,29 (-0,51 – -0,07)	1,01

Bias: Mittelwert der Differenzen (Raumluft – Olfaktometrie); LoA: Übereinstimmungsbereich (limits of agreement).

C.2 Qualitätssicherung: Ausschluss von Personen, die zu unempfindlich waren (berechnete Werte)

Tabelle 13: Qualitätssicherung: Kennzahlen der Bland-Altman-Diagramme

Geruchsschwellen für n-Butanol [lg(ppb)]	Bias (± 95%-KI)	– LoA (± 95%-KI)	+ LoA (± 95%-KI)	LoA
Eignung vs. Qualität	0,17 (0,12 – 0,23)	-0,03 (-0,12 – 0,06)	0,38 (0,29 – 0,47)	0,41
Standard (n-Butanol): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,44 (-0,49 – -0,28)	-1,04 (-1,32 – -0,77)	0,17 (-0,10 – 0,45)	1,22
Standard (Benzaldehyd) Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,27 (-0,41 – -0,12)	-0,81 (-1,07 – -0,56)	0,28 (0,03 – 0,53)	1,10
erhöhte Temperatur: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,74 (-0,95 – -0,53)	-1,55 (-1,91 – -1,18)	-0,07 (-0,29 – 0,43)	1,62
kaltes Licht: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,75 (-0,89 – -0,61)	-1,29 (-1,53 – -1,05)	-0,21 (-0,45 – -0,03)	1,08
Straßenlärm: Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,64 (-0,81 – -0,47)	-1,30 (-1,60 – -1,01)	-0,02 (-0,27 – 0,32)	1,33
CO ₂ (1000 ppm): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,65 (-0,77 – -0,54)	-1,10 (-1,31 – -0,90)	-0,20 (-0,40 – -0)	0,90
CO ₂ (4000 ppm): Olfaktometrie vs. Raumluft	-0,69 (-0,80 – -0,59)	-1,10 (-1,28 – -0,92)	-0,29 (-0,47 – -0,11)	0,80

Bias: Mittelwert der Differenzen (Raumluft – Olfaktometrie); LoA: Übereinstimmungsbereich (limits of agreement).