

Die Messunsicherheit der Olfaktometrie

P. Boeker, T. Haas

Zusammenfassung Werte zur Messunsicherheit der Olfaktometrie werden aus drei Quellen berechnet: aus der Europäischen Norm zur Olfaktometrie DIN EN 13725 (3,44 dB_{OD}), aus Ringversuchsdaten (6 dB_{OD}) und aus einer Monte-Carlo-Simulation (4,5 dB_{OD}). Berechnungsgrundlage ist der „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM). Die Werte haben einen unterschiedlichen Stellenwert, für praktische Messungen ist die Messunsicherheit aus den Ringversuchsdaten die beste Abschätzung. In Prozenten der Geruchskonzentration ausgedrückt, ergeben sich damit Messunsicherheitsgrenzen bei 25 und 400 % eines Messwertes. Die Monte-Carlo-Simulation ermöglicht die Abschätzung der einzelnen Beiträge zur Messunsicherheit bei der Olfaktometrie und gibt Hinweise auf Optimierungsmöglichkeiten. Die nachträgliche Prüferklassierung nach DIN EN 13725, die Ausreißer ausschließen soll, ergibt unter den Bedingungen der Simulation eine Erhöhung der Messunsicherheit.

The measurement uncertainty of olfactometry

Abstract The uncertainty in the measurement of olfactometry is investigated. Data from three different sources were used to calculate numerical values for the uncertainty. The data were derived from the European Standard of Olfactometry EN 13725 (3.22 dB_{OD}), a round-robin test (6 dB_{OD}) and a Monte Carlo simulation (4.5 dB_{OD}). The calculation base is the “Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM). The significance of the uncertainty values from the three data sets is different. The results from the round robin tests give the best estimate for the uncertainty in practical measurements. Upper and lower limits of measurement uncertainty expressed as a percentage of the odour concentration are 25 and 400 % respectively. The various factors which contribute to the measurement uncertainty and their optimisation can be evaluated using a Monte Carlo simulation. The retrospective assessor screening according to EN 13725 introduced to eliminate outliers in fact increases the measurement uncertainty in the simulation.

1 Einleitung

In vielen Diskussionen zu Geruchsfragen wird das Thema der Verlässlichkeit olfaktometrischer Messungen angesprochen. Die Unsicherheit hat ihren Grund in der bekannten Variabilität des menschlichen Geruchsempfindens, die über die eingesetzten Probanden auf das Messergebnis einwirkt. Daher schwanken olfaktometrische Messwerte erheblich, insbesondere, wenn gleiche Proben von verschiedenen Labors untersucht werden [1]. Ausgehend vom physiologischen Sachverhalt, dass Geruchsintensitätsunterschiede erst bei Verdoppelungen der Konzentration wahrgenommen werden (Weber-Fechner-Gesetz), hat sich die Auffassung verbreitet, dass bei olfaktometrischen Messungen ebenfalls ein Toleranzbereich von der Hälfte bis zum Doppelten eines Messwertes eingerechnet werden müsse. In der logarithmischen Einheit dB_{OD} ausgedrückt, bedeutet das eine Toleranz von ± 3 dB_{OD}.

Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Peter Boeker,

Institut für Landtechnik, Abt. Sensorik, Universität Bonn.

Dipl.-Phys. Torsten Haas,

Physikalisches Institut und Institut für Landtechnik, Universität Bonn.

Interessanterweise findet sich in der Literatur und vor allem in der Norm DIN EN 13725 [2] keine explizite Aussage zur Messunsicherheit bei der Olfaktometrie. In der Norm wird auf die Notwendigkeit von Ringversuchen verwiesen, mit denen Präzision und Richtigkeit überprüft werden sollen. Seit 1995 ist international der „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [3] als Standard akzeptiert, um Fragen der Messunsicherheit einheitlich und transparent zu klären. Die dort festgelegten Begriffe und Verfahren liegen der Forschungsarbeit dieses Beitrags zugrunde. Wünschenswert wäre eine zukünftige Handhabung von olfaktometrischen Messwerten, bei denen neben dem Messergebnis auch die Messunsicherheit angegeben wird, wie es im GUM gefordert wird.

Im Beitrag wird der Frage nachgegangen, mit welcher Messunsicherheit gerechnet werden muss, wenn olfaktometrische Messungen beauftragt und von zertifizierten Labors durchgeführt werden. Weiter soll geklärt werden, woher die einzelnen Beiträge zur Messunsicherheit rühren und welche Ansätze zur Verbesserung daraus abgeleitet werden können.

2 Messunsicherheit

Anstelle des früher verwendeten Begriffs des Messfehlers wird im Rahmen des GUM von Messunsicherheit gesprochen. Besonders bei der Geruchsmessung ist Letzteres sinnvoll, da der Begriff Messfehler einen streng festgelegten wahren Wert impliziert, der bei Geruchsmessungen, bei denen immer der Wahrnehmungseindruck einer repräsentativen Gruppe der Bezugspunkt ist, nicht existiert.

Im internationalen Wörterbuch der Metrologie ist die Messunsicherheit definiert als „Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können.“

Die Messunsicherheit kann auf zufälligen und systematischen Einflüssen beruhen [4]. Die systematischen Einflüsse können mit Fehlern im Messverfahren oder mangelnder Kompensation von externen Einflüssen zusammenhängen. Die zufälligen Einflüsse rühren vom Messprinzip her, bei der Olfaktometrie etwa von der Bandbreite der Geruchsempfindlichkeit von Probanden, aber auch von anderen später erläuterten Eigenschaften des Messverfahrens.

Die Messunsicherheit tritt bei zufälligen Einflüssen in Form einer Verteilung der Messwerte auf. Kann eine gaußförmige Verteilung angenommen werden, so ist die Messunsicherheit u gleich der Standardabweichung σ dieser Verteilung. Da die Standardabweichung (Intervall $\pm \sigma$) nur etwa 68 % der Messwerte eingrenzt, wird häufig, um eine höhere Ausagesicherheit zu haben, mit einem vergrößerten Bereich gearbeitet, der erweiterten Messunsicherheit U , die z. B. mit dem Erweiterungsfaktor von 2 bei gaußförmiger Verteilung 95 % der Messwerte einschließt:

$U = k \cdot u$, mit $k = 2$ (für 95%-Konfidenzintervall)

Die Messunsicherheit kann nach dem GUM mit zwei Methoden ermittelt werden [5]. Die Ermittlungsmethode A basiert auf der Auswertung vorhandener Messungen und berechnet

über statistische Prozeduren daraus die Standardmessunsicherheit. Wenn keine ausreichende Datenbasis vorliegt, werden Ermittlungsmethoden des Typs B verwendet, die auf Wahrscheinlichkeitsüberlegungen auf der Basis vorhandenen Wissens über den Messvorgang beruhen. In diese Methodenklasse fällt auch die später im Beitrag verwendete Monte-Carlo-Simulation des Messverfahrens [6].

3 Messgrößen der Geruchsmessung

Die Geruchswahrnehmung beinhaltet drei Aspekte:

- Art oder Qualität des Geruchs in Kategorien wie z. B. Nelduft, muffig, Kanalgeruch.
- Hedonische Wirkung des Geruchs auf einer Skala zwischen sehr angenehm und extrem unangenehm.
- Intensität eines Geruchs mit einer Skala von sehr schwach bis extrem stark.

Für Belange der Umweltmessungen ist der letzte Aspekt der wichtigste. Geruchsbelästigungen werden im Wesentlichen nicht nach Art oder Hedonik unterschieden, es zählt das Vorhandensein eines Geruchs als Belästigungskriterium. Daher wurde aus dem Intensitätsaspekt ein Messverfahren abgeleitet, das Belästigungsberechnungen ermöglicht. Die operationell definierte Messgröße ist die Geruchsstoffkonzentration, die unter Bezug auf die Wahrnehmungsschwelle den Faktor der über der Geruchsschwelle erhöhten Konzentration angibt. Eine Geruchsstoffkonzentration von 300 GE/m³ (GE, Geruchseinheit) bedeutet daher eine Luftprobe, die bei einer dreihundertfachen Verdünnung keine Geruchswahrnehmung mehr auslöst.

Die Geruchsstoffkonzentration erscheint formal wie eine Gaskonzentration, ist aber von den Gaskonzentrationen der enthaltenen geruchsaktiven Gase zu unterscheiden. Bei stark riechenden Stoffen ist die Gaskonzentration der Geruchsstoffe bei gleicher Geruchsstoffkonzentration extrem niedrig, bei wenig riechenden Gasen dagegen hoch.

Bei physikalischen Berechnungen, wie der strömungsmechanischen Ausbreitungsrechnung, kann die Geruchsstoffkonzentration wie eine Gaskonzentration verwendet werden. Bei Fragen der Geruchswirkung führt die Geruchsstoffkonzentration aber leicht zu Fehlinterpretationen. Eine Halbierung der Geruchsstoffkonzentration bedeutet eine eben wahrnehmbare Veränderung der Geruchswirkung.

Den Aspekt der Geruchswahrnehmung gibt die logarithmische Messgröße des Geruchspegels besser wieder.

4 Messverfahren der Olfaktometrie

Das Messverfahren zur Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration ist in der deutschen und europäischen Norm DIN EN 13725 festgeschrieben worden. In dieser Norm sind methodische und technische Bedingungen zur Durchführung der olfaktometrischen Messung beschrieben.

Eine olfaktometrische Messung einer Geruchsprobe wird mit einem sog. Olfaktometer, einem Gasverdünnungssystem, durchgeführt. In Bild 1 ist das Schema der Olfaktometrie dargestellt. Die Probe wird mit dem Verdünnungssystem des Olfaktometers in Form einer geometrischen Reihe (z. B. 16, 32, 64, 128, 256, ... 64 000) stark verdünnt. Über Riechmasken wird der verdünnte Geruchsprobenstrom einer Gruppe von Probanden zugeführt. In Stufen wird die Verdünnung reduziert, ausgehend von einer hohen und daher geruchlosen Verdünnung, bis die Wahrnehmungsschwelle für die darin enthaltenen Geruchsstoffe erreicht wird. Die Probanden signalisieren das Erreichen der Geruchsschwelle. Je nach der individuellen Geruchsschwelle der Probanden melden diese bei unterschiedlichen Verdünnungsstufen eine eben überschwellige Geruchswahrnehmung. Aus der zugehörigen Verdünnungsstufe wird gemäß der Berechnungsvorschrift in der Norm (Bezug der überschwelligen Wahrnehmung auf die geometrische Intervallmitte und Bildung des geometrischen Mittels der Probandenresultate) auf die Geruchsstoffkonzentration in der Probe zurückgerechnet.

Das Messverfahren der Olfaktometrie beruht auf einem in Stufen erfolgenden Abfragen der Geruchswirkung. Die Stufen bauen faktoriell aufeinander auf, in der Regel mit dem Faktor 2. Als Messergebnis werden daher Werte einer geometrischen Reihe erhalten. Erst auf einer logarithmischen Skala sind die Messwerte äquidistant. Da der Geruchssinn, wie auch die anderen menschlichen Sinne, auf einer logarithmischen Wahrnehmungsskala beruht, die im Sinne der evolutionären Nützlichkeit einen riesigen Dynamikbereich überspannen kann, wird zusätzlich zur Geruchsstoffkonzentration die Messgröße des Geruchspegels in dB_{OD} verwendet [7]. Dies ist der zehnfache Logarithmus des Verhältnisses von Geruchsstoffkonzentration zu Geruchsstoffkonzentration an der Geruchsschwelle. In Tabelle 1 sind exemplarisch einige Werte wiedergegeben. Ein Faktor von 10 bei der Geruchsstoffkonzentration bedeutet eine Addition von 10 auf den Ursprungspegel. Eine Verdoppelung der Konzentration ist einer Addition von 3 dB_{OD} äquivalent.

Der logarithmische Geruchspegel ist die durch das Messverfahren implizit vorgegebene Messgröße, die aus Gründen der besseren Anschaulichkeit und technischen Verwendbarkeit aber traditionell und in der Norm kodifiziert in die Geruchsstoffkonzentration umgerechnet wird.

Für Fragen der Messunsicherheit sind aber allein die logarithmierten Größen maßgeblich, wie es auch nach DIN EN 13725 gefordert und praktiziert wird.

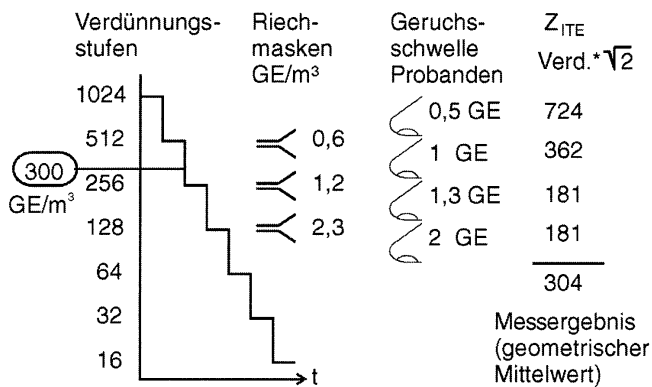


Bild 1. Schema des olfaktometrischen Messverfahrens und der Berechnung (für den Stufenfaktor 2).

GE/m ³	1	10	100	1000	2	4
dB _{OD}	0	10	20	30	3,01	6,02

Tabelle 1. Exemplarische Werte der Geruchsstoffkonzentration und des Geruchspegels.

Klasse 1	Ringversuch 2005		Ringversuch 2003		Summe
	Gas 01	Gas 02	Gas A	Gas B	
n-Butanol					
Anzahl Messungen	24	24	36	37	119
V.-Standardabweichung	0,282	0,230	0,365	0,265	0,302
2*V.-Standardabweichung	0,564	0,460	0,730	0,530	0,604
untere 95-%-Grenze in GE/m ³	0,27	0,35	0,19	0,30	0,25
obere 95-%-Grenze in GE/m ³	3,66	2,88	5,37	3,39	4,02
Erweiterte Messunsicherheit in dB _{OD}	+/- 5,6	+/- 4,6	+/- 7,3	+/- 5,3	+/- 6,0

Tabelle 2. Ergebnisse und Vergleichsstandardabweichung der Ringversuche.

5 Angaben zur Messunsicherheit in DIN EN 13725

In DIN EN 13725 werden keine expliziten Aussagen zur allgemeinen Messunsicherheit von olfaktometrischen Messungen gemacht. Allerdings werden zu drei Bereichen spezielle Qualitätsanforderungen mit Grenzwerten für das einzelne Labor definiert, das olfaktometrische Messungen durchführt:

1. Messungen mit dem Referenzstoff n-Butanol.
2. Messungen an anderen Geruchsstoffen ohne definierten Bezugswert.
3. Leistung der Verdünnungseinrichtung.

Es wird jeweils die Richtigkeit (systematische Abweichung, Bias) und die Präzision (Wiederholpräzision) und daraus zusammengefasst die Genauigkeit betrachtet und mit Grenzwerten versehen.

Implizit können DIN EN 13725 allerdings Annahmen zur Messunsicherheit entnommen werden, die in den einzelnen Labors nicht überschritten werden soll. In den Abschnitten 5.3.2 und 5.3.3 wird das Kriterium für die Wiederholpräzision eines Labors festgelegt und zugleich eine Berechnungsvorschrift angegeben. Das Kriterium für die Wiederholgrenze r , die als Wert einen absoluten Differenzbetrag festlegt, der in 95 % der Fälle nicht überschritten wird, ist angegeben mit $r \leq 0,477$ oder im entlogarithmierten Bereich der Referenz- oder Geruchsstoffkonzentrationen (mathematisch wird die Differenz hier zum Quotienten) mit $10^r \leq 3,0$.

Nach Absicht der Norm wird damit sichergestellt, dass zwischen zwei Einzelmessungen eines Labors unter Wiederholbedingungen der Quotient zwischen zwei Einzelmessungen in 95 % der Fälle ≤ 3 ist.

Nach der Berechnungsvorschrift in Abschn. 5.3.2.4 kann aus dem Kriterium für die Wiederholgrenze r die Standardabweichung s_r berechnet werden. In den Anhängen G und H wird das vollzogen, um aus der Standardabweichung weitere statistische Werte abzuleiten.

Mit Einsetzen des Student-Faktors für unendlich viele Stichproben von $t = 1,96$ ergibt sich eine Standardabweichung von $s_r = 0,1721$. Bei doppelter Standardabweichung, d. h. bei 95 % Vertrauensintervall, erhält man eine erweiterte Messunsicherheit von 0,3442 oder 3,44 dB_{OD}. Die aus der Norm abgeleitete erweiterte Messunsicherheit von $\pm 3,44$ dB_{OD} enthält nur die zufälligen Anteile. Die systematischen Messunsicherheitsanteile, die im Kennwert der Richtigkeit (des Bias) ausgedrückt sind, können nicht aus der Norm quantitativ abgeleitet werden. Deshalb ist der berechnete Wert nur eine Grenzsetzung der Norm und kann in der Praxis höher liegen.

6 Ermittlung der Messunsicherheit aus Ringversuchsergebnissen

In den Jahren 2000, 2005 und 2005 wurden Ringversuche zur Olfaktometrie durchgeführt [8 bis 10]. An den Ringversuchen nahmen zahlreiche nach den Vorgaben der DIN EN 13725 normkonform arbeitende Laboratorien teil. Dabei wurden Referenzmaterialien und andere Geruchsstoffe vermessen.

Die Messunsicherheit eines Messverfahrens kann mit der Vergleichsstandardabweichung s_R eines Ringversuchs abgeschätzt werden [11], da nicht nur einzelne laborinterne und laborspezifische Unsicherheitsanteile, sondern auch laborübergreifend viele verschiedene Unsicherheitsanteile in die Vergleichsstandardabweichung eingehen. Daher ist die Vergleichsstandardabweichung ein zulässiger Schätzwert für die Messunsicherheit eines Messverfahrens, im Gegensatz zur laborinternen Wiederholstandardabweichung, die lediglich eine Präzisionsaussage zur spezifischen Arbeitsweise des einzelnen Labors macht.

Für eine Feststellung der Vergleichsstandardabweichung wurden die Messungen der Ringversuche 2003 und 2005 verwendet, die im Detail publiziert sind. In beiden Ringversuchen wurden jeweils zwei Konzentrationen des Referenzstoffs n-Butanol und zwei weitere Geruchsstoffe ohne festgelegten Geruchsschwellenwert verwendet.

6.1 Messungen an n-Butanol

Da n-Butanol zur Prüferauswahl der Probanden im Panel verwendet wird, ist zu erwarten, dass die Genauigkeit und Präzision für die Messung des Referenzstoffs hoch ist. Für eine Überprüfung dieser Erwartung wurden nur die Ringversuchsdaten der nach DIN EN 13725 normkonform arbeitenden Labore herangezogen.

Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass nur 62 % der Messungen (74 von 119) innerhalb der Spanne zwischen 62 und 246 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n-Butanol liegen. Der geometrische Mittelwert der gemessenen n-Butanolkonzentrationen liegt bei 151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit nahe dem in DIN EN 13725 festgelegten Geruchsschwellenwert von 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die aus den Messungen berechnete empirische Vergleichsstandardabweichung beträgt für die logarithmierten Geruchsschwellenwerte $s_R = 0,302$.

In **Tabelle 2** sind die Einzelergebnisse und die berechnete Vergleichsstandardabweichung über beide Ringversuche und alle n-Butanolkonzentrationen dargestellt.

Durch Umrechnung der Geruchsschwellenkonzentration in die Geruchsschwellen (Division durch 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und Logarithmieren dieser Werte wurde die in **Bild 2** dargestellte Verteilung erhalten. Dabei zeigt sich eine breite Verteilung der Daten um den Logarithmus 0 (1 GE/m³). Die Empfindlichkeitsgrenzen des Mittelwertkriteriums der Prüferauswahl

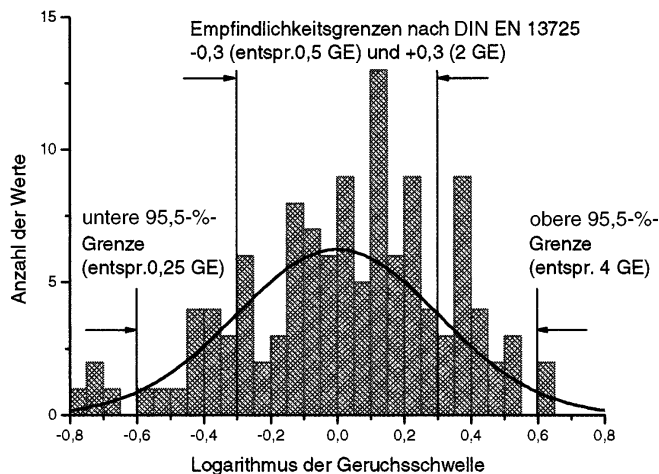


Bild 2. Histogramm der Ringversuchsergebnisse mit berechneter Verteilung.

aus DIN EN 13725 sind auf der Ebene der Geruchsschwellen mit 0,5 und 2 GE eingetragen und schließen lediglich 62 % der Messungen ein.

7 Ermittlung der Messunsicherheit durch Monte-Carlo-Simulation der Olfaktometrie

Die Simulation der Olfaktometrie gibt im Sinne der Ermittlungsmethoden nach Typ B der Messunsicherheit des GUM die Möglichkeit, detailliert und ohne vereinfachende mathematische Annahmen die Messunsicherheit des Verfahrens zu untersuchen [12]. Für das Modell der Olfaktometrie wurde das Messverfahren in allen Details nachgebildet:

- Durch Zufallsverteilung werden Geruchsproben innerhalb eines wählbaren Intervalls generiert. Die Verteilung erfolgt gleichverteilt auf der Ebene der Logarithmen der Geruchsstoffkonzentration.
 - Die Geruchsempfindlichkeit der Prüfer wird nach den Vorgaben der Norm durch eine gaußförmige Verteilung mit dem Mittelwert 1 GE/m³ und einer in DIN EN 13725 angegebenen Standardabweichung zufallsverteilt auf der Ebene der Logarithmen erzeugt.
 - Die Stufen des Verdünnungssystems können mit Faktoren zwischen 1,4 und 2,4 gebildet werden.
 - Der zulässige Fehler des Verdünnungssystems ist einstellbar.
 - Die nachträgliche Prüferklassierung ist implementiert.
- Das Simulationsmodell ermöglicht eine Untersuchung der Einflüsse einzelner Parameter des Messverfahrens ohne aufwendige olfaktometrische Messungen und ohne konstruktive Modifikationen (Bild 3).

7.1 Prüferauswahl in der Simulation

Bei der Erstellung des Modells wurde zunächst eine Prüferauswahl innerhalb des Intervalls von 0,5 bis 2 GE/m³ vorgesehen. Bei genauerer Betrachtung der Angaben in DIN EN 13725 zeigte sich aber, dass diese Auswahl nicht den Vorgaben der Norm entspricht. Die Prüferauswahl geschieht auf der Basis von mindestens zehn einzelnen n-Butanolmessungen innerhalb von mindestens drei Tagen. In Absatz 6.7.2 der DIN EN 13725 werden zwei Kriterien zur Prüferauswahl genannt:

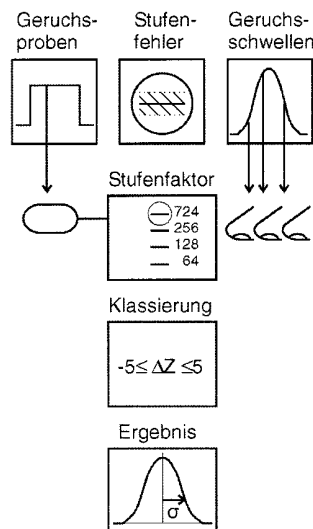


Bild 3. Schema des Monte-Carlo-Simulationsmodells der Olfaktometrie.

1. Die Standardabweichung der logarithmierten Schwellenschätzungen des Referenzstoffs muss kleiner als $\log(2,3) = 0,361728$ sein. Hiermit ist den schwankenden Ergebnissen eines einzelnen Probanden bei der Überprüfung mit n-Butanol Rechnung getragen.

2. Die Mittelwerte der Probandenempfindlichkeit müssen in einem Bereich zwischen der Hälfte und dem Zweifachen des Bezugswertes des Referenzstoffes liegen. In Zahlen lässt sich das in Form der Massenkonzentration zwischen 62 und 246 µg/m³ oder umgerechnet einer Geruchsschwelle zwischen 0,5 und 2 GE der Prüfer ausdrücken.

Erstaunlicherweise erwies sich die Berücksichtigung des ersten Kriteriums als besonders bedeutend. Da das zweite Kriterium unmittelbar anschaulich ist, entsteht der Eindruck, die Probanden hätten eine Riechempfindlichkeit zwischen 0,5 und 2 GE. Überraschend stellt sich bei Berücksichtigung des ersten Kriteriums heraus, dass selbst ein einzelner Proband mit einer Geruchsschwelle von 1 GE wegen der zulässigen Verteilung mit der in DIN EN 13725 festgelegten Standardabweichung von 0,361728 mit einer Wahrscheinlichkeit von 20,5 % eine Geruchsschwelle unter 0,5 GE und dazu komplementär ebenfalls mit 20,5 % eine Geruchsschwelle über 2 GE hat (Bild 4).

Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wurde ein separates Simulationsmodell erstellt, das den Effekt der breiten Verteilung der Einzelprobanden auf die Gesamtverteilung eines Panels von Probanden berechnet, die mit ihren Mittelwerten gleichverteilt eine Geruchsschwelle von 0,5 bis 2 GE haben. In Bild 5 ist dargestellt, wie sich die Breite der Probandenverteilung auf die der Gesamtverteilung auswirkt. Bei sehr enger Verteilung (kleine Standardabweichung σ) bleibt die Gleichverteilung der Probanden zwischen 0,5 und 2 GE fast erhalten. Mit höherem σ entsteht eine gaußförmige Verteilung, die für den in DIN EN 13725 genannten Zahlenwert von $\sigma = 0,361728$ im Bild 4 besonders hervorgehoben ist.

Die Standardabweichung der ermittelten Verteilung beträgt $s_{PR} = 0,404$. Jeweils 22,8 % der Geruchsschwellenwerte liegen unter bzw. über den Grenzen von 0,5 und 2 GE. Aus der Form der Probandenverteilung eines Olfaktometriepanels kann schon geschlossen werden, dass die Ergebnisse von olfaktometrischen Messungen in ähnlicher Weise eine breite Verteilung aufweisen müssen. Im Simulationsmodell der Olfaktometrie wird die ermittelte Verteilung zur zufälligen Ermittlung der Prüfer in der Monte-Carlo-Simulation verwendet.

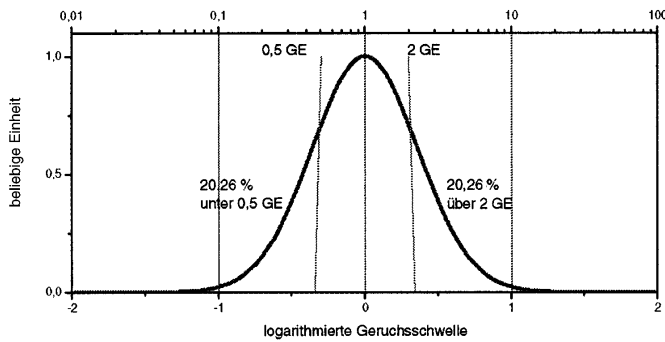


Bild 4. Verteilung der Geruchsschwellen eines einzelnen Probanden mit 1 GE mittlerer Geruchsschwelle nach DIN EN 13725.

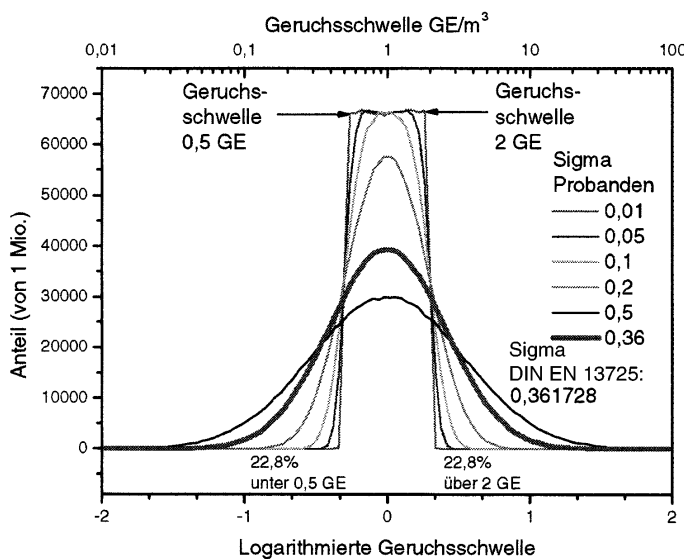


Bild 5. Summenverteilung einer Probandengruppe mit gleichverteilter mittlerer Geruchsempfindlichkeit in den Grenzen nach DIN EN 13725 zwischen 0,5 und 2 GE und überlagerter individueller Verteilung wie in Bild 4.

7.2 Verdünnungseinheit

Das Messverfahren der Olfaktometrie arbeitet mit diskreten Verdünnungsstufen. Da sich aus physiologischen Untersuchungen ergab, dass eine Verdoppelung der Reizstärke zu einer gerade wahrnehmbaren Unterscheidung führt, hat sich in der Olfaktometrie das Verfahren einer stufenweisen Halbierung der Verdünnung, entsprechend einer stufenweisen Verdoppelung der Geruchsstoffkonzentration, etabliert. DIN EN 13725 erlaubt davon abweichend auch Stufenfaktoren zwischen feiner abgestuften 1,4 und größeren 2,4. Durch die diskreten Stufen, mit der die Verdünnungen angeboten und sensorisch beurteilt werden, ist ein Messunsicherheitsanteil vorgegeben. Das Kontinuum der Geruchsproben kann messtechnisch nur in apparativ vorgegebenen Stufen gemessen werden. Zur Bestimmung dieses Anteils wurde im Modell angenommen, dass die Probanden jeweils exakt eine Geruchsschwelle von 1 GE aufweisen.

In Bild 6 ist dargestellt, wie sich die Ergebnisse mit zunehmendem apparativem Fehler verändern. Als apparativer Fehler ist in der Simulation ein Fehler in der Genauigkeit der Verdünnungsstufen angesetzt, mit dem für jeden simulierten Messvorgang die Einstellung der Verdünnungsstufe variiert. Die Ergebnisse zeigen die obere Grenze eines apparativen Fehlereinflusses von Olfaktometern, da auch bei einem – unrealistisch hohen – Fehler von 20 % (entspre-

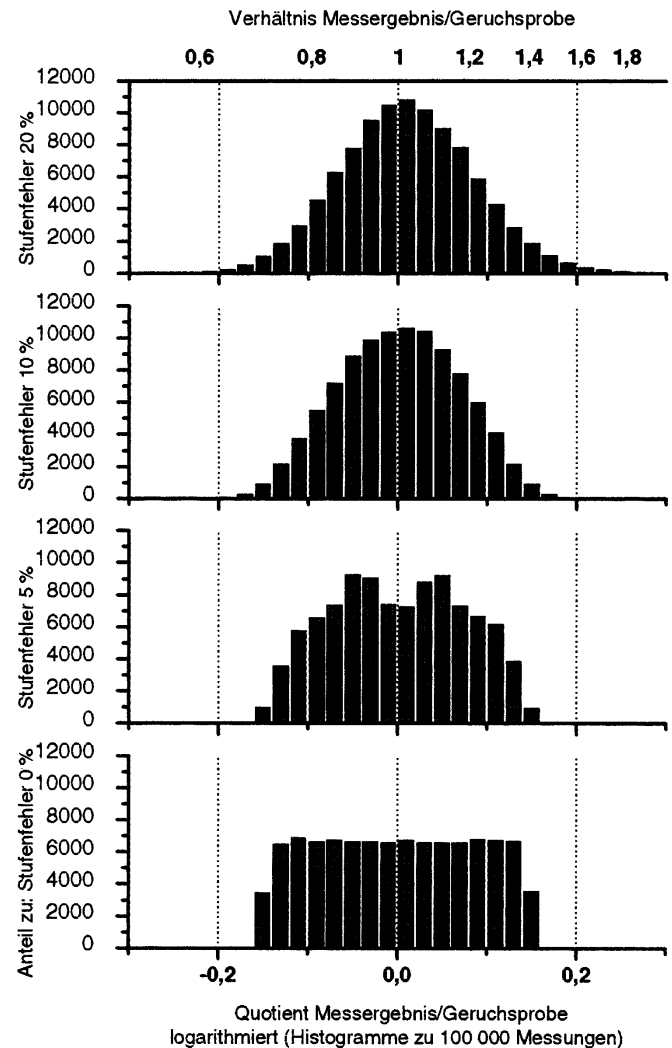


Bild 6. Fehlerverteilung durch die Stufen des olfaktometrischen Messverfahrens.

chend einer Standardabweichung von 0,2 auf die Stufeneinstellung) sich lediglich die ursprünglich rampenförmige Verteilung ohne Fehlereinfluss zu einer gaußförmigen Verteilung wandelt.

Die doppelte Standardabweichung dieser Verteilung und damit der Messunsicherheitsanteil der Stufung des olfaktometrischen Messverfahrens beträgt 0,15 oder in Dezibel 1,5 dB_{OD}.

In den Simulationsrechnungen zeigte sich, dass der apparative Fehleranteil einer ungenauen Einstellung der Olfaktometriestufen keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse mit realen Prüferverteilungen besitzt.

Die Gleichverteilung zum Stufenfehler 0 % ergibt sich aus dem Effekt, dass bei Vorgabe von Geruchsproben zwischen zwei Stufen (z. B. 512 und 1 024) immer genau ein Messergebnis in Höhe des geometrischen Mittelwerts (hier 724 GE) ermittelt wird. Der Quotient von Messergebnis und Geruchsprobe liegt daher gleichverteilt zwischen 1,41 und 0,707 oder logarithmiert zwischen -0,15 und 0,15.

7.3 Nachträgliche Prüferklassierung

In der Norm wird eine zusätzliche Prüferklassierung nach jeder Messung gefordert. Um abweichendes Prüferverhalten auszuschließen, werden Schwellenschätzungen Z_{ITE} , die vom gemeinsamen Mittelwert aller Schwellenschätzungen

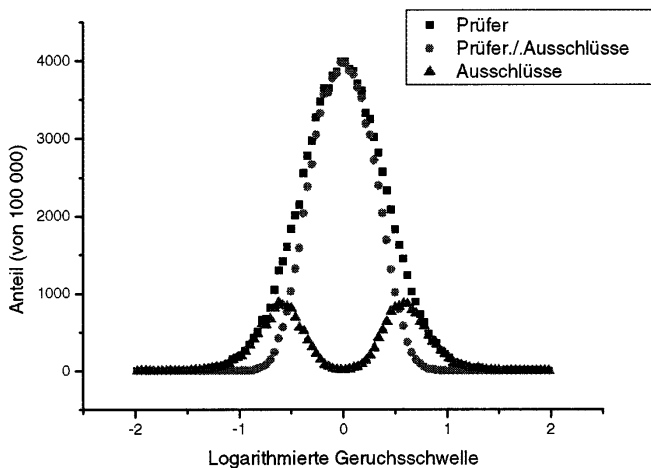


Bild 7. Verteilungen der Geruchsschwellen der Prüfer.

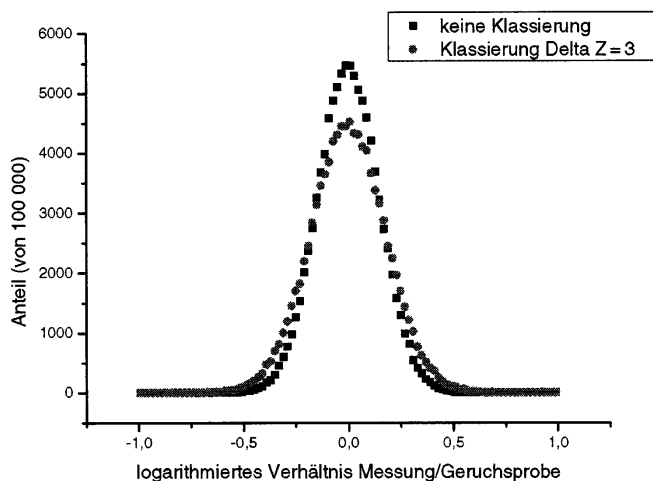


Bild 8. Simulationsergebnis (logarithmiertes Verhältnis von Geruchsmessung zu Geruchsprobe) für ein Panel von acht Prüfern und einem Klassierungskriterium von 3.

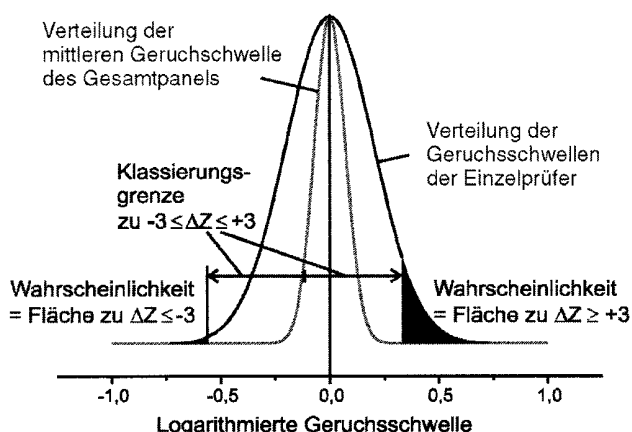


Bild 9. Verteilungen der mittleren Geruchsschwelle des Gesamtpanels und der Einzelprüfer.

um mehr als den Faktor 5 abweichen, von der Auswertung ausgeschlossen. Die Klassierung wurde in der Simulation gemäß der Norm implementiert.

Entgegen der Erwartung stellte sich heraus, dass die Hinzunahme der Prüferklassierung keine Verringerung der Messunsicherheit, sondern im Gegenteil eine – wenn auch

geringe – Vergrößerung der Messunsicherheit zur Folge hat. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde in die Simulation eine detaillierte Darstellung der Geruchsschwellen aller Probanden und der Geruchsschwellen der durch die Prüferklassierung eliminierten Einzelprüfer eingearbeitet. Es zeigt sich die erwartete Funktionsweise der Prüferklassierung: An den Rändern der ursprünglichen Gesamtverteilung werden Prüfer eliminiert. In Bild 7 sind die Histogrammwerte des Gesamtpanels, der eliminierten Prüfer und des verbleibenden Panels für ein Panel von acht Prüfern und ein verschärftes Klassierungskriterium von 3 statt 5 dargestellt. Hier ist deutlich die Elimination von Prüfern mit vom Mittelwert abweichender Geruchsschwelle zu sehen. Die Gesamtverteilung der verbleibenden Panelmitglieder ist deutlich schmaler als die Ursprungsverteilung.

Das Simulationsergebnis zum dargestellten Fall ist jedoch unerwartet. Obwohl die Geruchsschwellenverteilung nun erheblich schmaler ist, steigt die Standardabweichung der simulierten Messungen an (Bild 8).

Zu diesem unerwarteten Verhalten der Simulation konnte eine Erklärung gefunden werden. Im Bereich der Logarithmen wird das Klassierungskriterium nach DIN EN 13725 zu einer Differenz zwischen dem Mittelwert der Schwellenschätzungen aller Prüfer im Panel und der Schwellenschätzung des einzelnen Prüfers. Zwei Verteilungen stellen die Situation grafisch dar: die Verteilung der Einzelprüfergeruchsschwellen mit der Standardabweichung von 0,404 und die Panelverteilung mit der durch die Wurzel der Panelmitglieder geteilten geringeren Standardabweichung. In Bild 9 sind die beiden Verteilungen für ein Panel von acht Prüfern dargestellt. Die Klassierungsgrenzen werden logarithmisch zu Abständen, für eine Grenze von 3 (hier anstelle von 5 zur besseren Verdeutlichung) zur Differenz von 0,48. Im Bild sind für eine beliebige herausgegriffene Panelgeruchsschwelle die Abstände eingetragen, jenseits derer ein Einzelprüfer eliminiert werden muss. Die schwarz eingefärbte Fläche unterhalb der Einzelprüferverteilung ab dem festgelegten Abstand ist das Maß für die Wahrscheinlichkeit, einen zu eliminierenden Prüfer vorzufinden. Aus rein geometrischen Gründen muss die Fläche jenseits des Mittelwerts immer größer sein als diejenige diesseits des Mittelwerts. Damit ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass ein Prüfer jenseits des Mittelwerts die Klassierungsgrenze überschreitet und zu eliminieren ist. Ein Prüfer jenseits des Mittelwerts verschiebt aber, wenn nicht eliminiert, das Gesamtergebnis des Panels zur Mitte hin, verringert daher im Effekt die Breite der Gesamtverteilung einer Messung, mithin auch die Messunsicherheit. Das Klassierungskriterium verhindert diesen korrigierenden Effekt, wodurch die beobachtete Erhöhung der Messunsicherheit verursacht wird.

7.4 Ergebnisse der Referenzsimulation

Olfaktometrische Messungen werden in der Regel mit vier Prüfern durchgeführt. Diese Anzahl ist bei den verbreitet eingesetzten Olfaktometern der TO-Serie der Fa. Ecoma, Honigsee, vorgesehen. Zugleich ist bei diesen Olfaktometern ein Stufenfaktor von 2 üblich bzw. apparativ vorgegeben. Daher wurde als Referenzsimulation der Fall mit vier Prüfern, einem Stufenfaktor von 2 und einer Prüferauswahl nach DIN EN 13725 gewählt. Die nachträgliche Prüferklassierung wurde in der Simulation angewendet. Für den zufälligen relativen Fehler der Stufeneinstellung kam ein

Wert von $\sigma = 0,2$ oder 20 % zum Ansatz. Es werden je drei Wiederholungsmessungen simuliert.

In **Bild 10** ist die Verteilung des logarithmierten Quotienten von Messergebnis zu Geruchsprobe in Histogrammform für 100 000 simulierte Messungen dargestellt. Auf der unteren Abszisse ist der Logarithmus, auf der oberen der Quotient zwischen dem simulierten Messergebnis und der vorgelegten Geruchsprobe aufgetragen. Ein Verhältnis von 2 (oder im Logarithmus von 0,3) bedeutet, dass das Messergebnis gegenüber der Geruchsprobe verdoppelt ist.

In der Breite der Verteilung ist die Messunsicherheit gegeben. Die Standardmessunsicherheit u beträgt für die Referenzsimulation 0,2239. Die erweiterte Messunsicherheit U mit einem Erweiterungsfaktor von 2 schließt 95 % der Messwerte ein und beträgt 0,4478.

Die untere Grenze des 95%-Intervalls berechnet sich durch Entlogarithmieren von -0,4478 zu einem Verhältnis von gemessenem Geruchswert zu vorgegebener Geruchsprobe von 0,36. Der obere Intervallwert ergibt ein Verhältnis von 2,80. In den Geruchspegel dB_{OD} umgerechnet, beträgt für die erweiterte Messunsicherheit U 4,5 dB_{OD} .

7.5 Variationen von Parametern

Zur Untersuchung wurden vier Haupteinflussgrößen auf das olfaktometrische Messverfahren ausgewählt:

1. Probandenanzahl im Panel.
2. Einfluss einer rigideren Probandenauswahl über die Mittelwertspanne.
3. Einfluss einer verringerten zulässigen Streuung einzelner Probandenwerte.
4. Stufenfaktor im Verdünnungssystem.
5. Klassierung.

Die Wertebereiche sind in **Tabelle 3** angegeben. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen sind in **Bild 11** zusammengefasst. Auf der Abszisse sind die drei Parametervarianten indiziert, auf der Ordinate ist die erweiterte Messunsicherheit U in dB_{OD} aufgetragen.

Ausgehend von den Parametern in Tabelle 3 werden die jeweiligen Werte geändert. Die Klassierung wird auf die unterschiedlichen Prüferzahlen bei sonstigen Normbedingungen angewendet.

In **Tabelle 4** zeigt sich die unterschiedliche Wertigkeit der Parameter auf die Messunsicherheit:

- Die Veränderung des Stufenfaktors zeigt keinen großen Einfluss auf die Messunsicherheit, obwohl beim Stufenfaktors 2 zwischen einer Verdünnung von 8 und 64 000 14 Stufen liegen, bei einem Stufenfaktor von 1,4 aber ca. 27 und bei der groben Abstufung von 2,4 nur elf Stufen vorhanden sind.
- Eine große Verringerung der Messunsicherheit ist mit der Erhöhung der Anzahl messender Prüfer verbunden.
- Die Einengung des zweiten Prüferkriteriums auf ein geringeres Mittelwertintervall als 0,5 bis 2 GE Geruchsschwelle

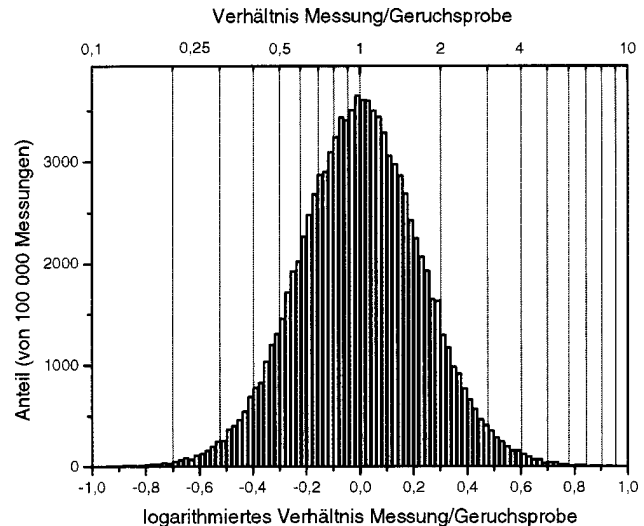


Bild 10. Verteilung des Quotienten von Messergebnis zu Geruchsprobe bei vier Probanden, Mittelwertspanne 0,5 bis 2,0 GE bei Numerus der Probandenstandardabweichung von 2,3, Stufenfaktor 2, nachträglicher Klassierung und drei Wiederholungen pro Messung.

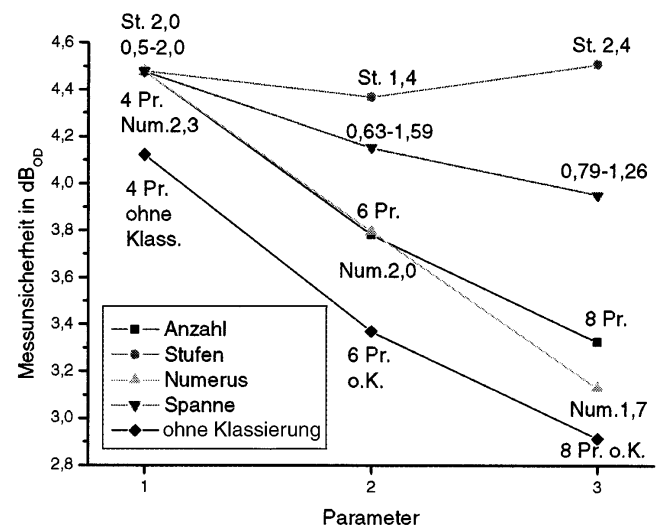


Bild 11. Ergebnisse der Simulationen für fünf Parametervariationen: Anzahl Probanden, Stufenfaktor, Numerus Standardabweichung der Probanden, Spanne des Probandenmittelwertes und nachträgliche Klassierung (Verbindungslinien lediglich optische Hilfe). Pr. = Probanden, o.k. = ohne Klassierung, Num. = Numerus, St. = Stufen

verringert Messunsicherheit nur wenig. In der Simulation wurden die Werte im Logarithmischen von den normgerechten $\pm 0,3$ auf $\pm 0,2$ und $\pm 0,1$ verringert, entsprechend Schwellen von 0,63 bis 1,59 und 0,79 bis 1,26.

- Die Verringerung der zulässigen Streubreite der Geruchsschwellen eines einzelnen Prüfers nach dem ersten Kriterium der Prüferauswahl hat einen großen Einfluss. Damit ergeben sich große Verringerungen der Streubreiten der Prü-

Tabelle 3. Parametervariationen der Simulationen.

Probandenanzahl in Panel	4	6	8
Auswahlkriterium der Probanden	0,5–2,0 GE	0,63–1,58 GE	0,79–1,26 GE
Numerus der Standardabweichung	2,3	2,0	1,7
Stufenfaktor der Verdünnungsstufen	1,4	2	2,4
Nachträgliche Klassierung der Prüfer	Ein (Wert 5)	Aus	–

Tabelle 4. Ergebnisse der Simulation mit Parametervariation. Die Werte der Referenzspalte geben den Bezug für die Parametervariationen in den Spalten I bis III an. Einzige Ausnahme ist die Klassierung, hier ist der Bezug immer auf die betreffende Prüferanzahl angegeben.

	Referenz	I	II	III
Prüferanzahl	4	4	6	8
Messunsicherheit in dB _{OD}		4,5	3,8	3,3
Klassierung	Ein	Aus, 4 Prüfer	Aus, 6 Prüfer	Aus, 8 Prüfer
Messunsicherheit in dB _{OD}		4,1	3,4	2,9
Stufenfaktor	2	2	1,4	2,4
Messunsicherheit in dB _{OD}		4,5	4,4	4,5
Numerus	2,3	2,3	2	1,7
Messunsicherheit in dB _{OD}		4,5	3,8	3,1
Spanne	0,5 bis 2,0	0,5 bis 2,0	0,63 bis 1,59	0,79 bis 1,26
Messunsicherheit in dB _{OD}		4,5	4,2	4,0

Tabelle 5. Berechnete Geruchsschwellen- und Konzentrationsgrenzen.

Anzahl Prüfer n	4	5	6	7	8
(Anzahl n) ^{1/2}	2,00	2,24	2,45	2,65	2,83
Sigma _{Panel}	0,202	0,181	0,165	0,153	0,143
Untere Grenze in GE/m ³	0,39	0,44	0,47	0,49	0,52
Obere Grenze in GE/m ³	2,54	2,30	2,14	2,02	1,93
Untere Konzentrationsgrenze in µg/m ³	49	54	58	61	64
Obere Konzentrationsgrenze in µg/m ³	312	283	263	248	237

ferverteilungen und daher starke Verminderungen der Messunsicherheit. Die Verringerung der Streubreite im angesetzten Bereich wirkt sich sogar stärker aus als die Erhöhung der Prüferanzahl. Wenn allerdings der in der Norm gesetzte Numerus von 2,3 empirische Fakten zur Variation der Geruchsempfindlichkeit von Prüfern wiedergibt, ist dieser Parameterwert nicht willkürlich anders festsetzbar.

● Die Herausnahme der nachträglichen Prüferklassierung zeigt eine deutliche Verringerung der Messunsicherheit.

8 Diskussion der Ergebnisse

8.1 Auswertung der Ringversuche

Bei der Bewertung der Ringversuchsergebnisse aus den Jahre 2005 und 2005 wurden die Messungen, die nicht innerhalb eines Intervalls zwischen 62 und 246 µg/m³ n-Butanol lagen, als nicht innerhalb des normgerechten Empfindlichkeitsbereichs liegend klassifiziert. In den Veröffentlichungen zu den Ringversuchen [8 bis 10] wird explizit auf ein durch die Norm klar definiertes Auswertekriterium verwiesen. Bei genauem Studium der DIN EN 13725 wird aber deutlich, dass diese keine Vorgaben macht.

Das Kriterium der Ringversuche ist identisch mit dem Kriterium 2 der Prüferauswahl und besagt dort nur, dass der Mittelwert der letzten zehn Prüferkontrollmessungen mit n-Butanol in der genannten Spanne liegen muss. Das Kriterium 1 definiert dazu die Standardabweichung, durch die bei einzelnen Messungen durchaus Messwerte außerhalb der Spanne auftreten können (siehe Bild 4).

Eine Übertragung des Kriteriums für die Prüferauswahl eines einzelnen Prüfers auf die Ergebnisse von Messungen mit kompletten Panels von Prüfern ist methodisch nicht begründet. Um aus der zulässigen Geruchsschwellenverteilung

eines einzelnen Prüfers auf diejenige eines Panels von Prüfern zu schließen, kann die Standardabweichung der Panelverteilung aus der Standardabweichung der Verteilung des einzelnen Prüfers gemäß der Gleichung

$$\sigma_{\text{Panel}} = \sigma_{\text{Prüfer}} / \sqrt{n}$$

ermittelt werden [13].

Für unterschiedliche Prüferanzahlen n sind in **Tabelle 5** die berechneten Geruchsschwellengrenzen und die Konzentrationsgrenzen für n-Butanol angegeben. Grundlage der Berechnung ist die in Abschn. 7.1 durch die Prüfersimulation aus den Kriterien 1 und 2 der Norm DIN EN 13725 berechnete Gesamtverteilung mit einer Standardabweichung σ von 0,404.

Wird eine Mindestpanelgröße von vier Prüfern, wie in DIN EN 13725 gefordert, als Referenzwert angenommen, so kann bei Übertragung des Einzelprüferkriteriums auf das Panel das Qualitätskriterium nur mit den Konzentrationsgrenzen von 49 bis 312 µg/m³ n-Butanol gebildet werden.

In den bisher durchgeführten Ringversuchen wurde die Konformität mit den Anforderungen nach DIN EN 13725 durch eine Befragung ermittelt. Einige Labors haben in der Ringversuchsvariante RVplus im Jahr 2005 eine erhöhte Anzahl von n-Butanolproben (zehn Proben) vermessen und damit die laborinterne Wiederholpräzision und Genauigkeit nach EN 13725 ermittelt. Nur zwei von zehn Labors konnten beide Kriterien einhalten, zwei weitere wenigstens eines der Kriterien erfüllen, die restlichen sechs keines.

Bei zukünftigen Ringversuchen sollten daher möglichst viele RVplus-Varianten durchgeführt werden, um mit den dann vollständig nachgeprüft konformen Laboren eine Ermittlung der Messunsicherheit unter eingehaltenen Normbedingungen zu erhalten [14].

In einem Punkt gehen die Anforderungen der Ringversuche über die in der Norm genannten Kriterien hinaus. Anstelle der Prüferauswahl über die letzten zehn (bis maximal 20) Kontrollmessungen mit den beiden Kriterien nach DIN EN 13725 wird eine Prüferkontrolle am Tag der Messung vorausgesetzt. Diese Prüferkontrolle fordert das Einhalten der Mittelwertspanne zwischen 20 und 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n-Butanol für jeden einzelnen Prüfer am Tag der Ringversuchsmessungen. Es ist interessant festzuhalten, dass trotz dieses verschärften Kriteriums die Ringversuchsergebnisse die große Verteilungsbreite aufweisen.

8.2 Vergleichende Betrachtung der ermittelten Messunsicherheiten

Im Beitrag sind drei verschiedene Angaben zu Messunsicherheiten aufgeführt, die allerdings in ihrer Bewertung unterschieden werden müssen.

In DIN EN 13725 ist über das Kriterium für die Wiederholpräzision eine Berechnung der maximal zulässigen Standardabweichung der Messresultate eines Labors unter Wiederholbedingungen berechenbar. Es ergibt sich ein Wert von $\pm 3,44 \text{ dB}_{\text{OD}}$ für die Wiederholpräzision mit 95-%-Konfidenzintervall. In diesem Wert ist der Beitrag des Bias zur Messunsicherheit noch nicht erhalten. Daher stellen die $3,44 \text{ dB}_{\text{OD}}$ eine untere Abschätzung der zulässigen Messunsicherheit nach der Norm dar.

Die bisher vorliegenden Ringversuche liefern den besten Anhaltspunkt für die vorhandene Messunsicherheit der Olfaktometrie. Die beteiligten Labore haben unter den Bedingungen des Ringversuchs mit hoher Sorgfalt die n-Butanol-Referenzproben vermessen. In die Berechnung der Vergleichsstandardabweichung wurden zudem nur die Ergebnisse der normkonform arbeitenden Labore aufgenommen. Trotzdem wird eine erweiterte Messunsicherheit von $\pm 6 \text{ dB}_{\text{OD}}$ erhalten. Dieser Wert hat für die Praxis eine hohe Bedeutung, da er die Realität der Schwankungsbreite von Ergebnissen normkonform arbeitender Labore abbildet. Anschaulich besagt diese Messunsicherheit, dass der Unsicherheitsbereich um einen Messwert zwischen 25 und 400 % dieses Werts liegt. Dieser Befund erklärt zugleich die in der Praxis beobachtete Abweichung von Messwerten, die mit gleichen Proben von verschiedenen Laboren gemessen wurden [15].

Die für die detaillierte Ermittlung der Messunsicherheit durchgeführte Monte-Carlo-Simulation der Olfaktometrie ist ein analytisches Verfahren, bei dem die Vorgaben der Norm im Detail umgesetzt wurden. Auch dieser Wert von $\pm 4,5 \text{ dB}_{\text{OD}}$ kann aber noch nicht die gesamten Beiträge zur Messunsicherheit enthalten. Besonderen Einfluss hat hier die Probenhandhabung eines Labors und die möglichen Ermüdungserscheinungen und Ablenkungen einer Prüfergruppe. Beide Einflüsse lassen sich nicht einfach in das Modell integrieren.

8.3 Konformitätsaussagen

Die Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit zusätzlich zum Messwert, wie im GUM gefordert, hat praktische Bedeutung. Immer, wenn Entscheidungen über Grenzwerte anstehen, ist die Frage nach der Konformität von Messresultaten gestellt [16].

Ist beispielsweise ein oberer Grenzwert von 1 000 GE/m^3 für die Geruchsstoffkonzentration festgelegt und wird die Messunsicherheit mit $\pm 6 \text{ dB}_{\text{OD}}$ angenommen, so existieren drei

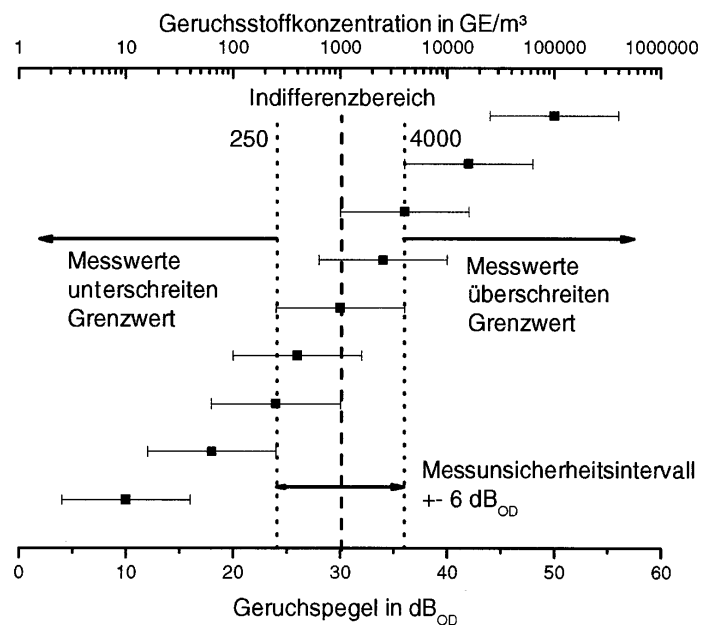


Bild 12. Konformitätsbereiche.

Bereiche (Bild 12). Der Indifferenzbereich von 250 bis 4 000 GE/m^3 ist durch den Grenzwert und das Intervall der Messunsicherheit festgelegt. Erst Messwerte links vom Indifferenzbereich, unter 250 GE/m^3 , unterschreiten sicher den Grenzwert. Messwerte rechts vom Indifferenzbereich, über 4 000 GE/m^3 , überschreiten den Grenzwert.

Es ist eine Frage des Standpunkts, welche Festlegung für eine Konformitätsaussage getroffen wird. Die Messunsicherheit kann als Verschärfung oder als Verminderung der Anforderungen interpretiert werden.

Beispiel 1: Der Emittent ist in der Nachweispflicht, dass er den Grenzwert einhält. Dann sollten alle Messwerte unterhalb des Grenzwertes abzüglich der Messunsicherheit liegen.

Beispiel 2: Der Beschwerdeführer will einem Emittenten eine Grenzwertverletzung nachweisen. Dann sollten erst Messwerte oberhalb des Grenzwertes zuzüglich der Messunsicherheit als Grenzwertverletzungen gerechnet werden können.

9 Ausblick

Die Feststellung der Messunsicherheit der Olfaktometrie hat nicht nur Einfluss auf die Bewertung von Messungen und die Einschätzung von Grenzwerten, sondern ist auch im Hinblick auf die „Elektronische Olfaktometrie“, d. h. die „technisch-sensorische Geruchsmessung“ mit chemischen Sensorsystemen, von Bedeutung [17]. Hier ergibt sich ein Problem mit der Referenzierung, da im Bereich der Geruchsmessung eine Umkehrung der üblichen Situation gegeben ist. Das „Referenzierungsproblem der Olfaktometrie“ lautet daher: Ein Messsystem, das Gase und Geruchsstoffe mit hoher Genauigkeit messen kann, muss mit einer Messmethode von viel geringerer Genauigkeit bezüglich des Wahrnehmungseindrucks Geruch kalibriert werden.

Daraus ergeben sich neue Ziele:

- Erarbeitung von Methoden zur Referenzierung unter den gegebenen Bedingungen.

- Ermittlung von Ansätzen zur Verbesserung der olfaktorischen Messmethode.
- Etablierung von Kombinationsverfahren aus technisch-sensorischer Messung und Olfaktometrie, die „sensorunterstützte Olfaktometrie“ [18].

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung der Untersuchungen im Vorhaben „Erarbeitung von methodischen Grundlagen zur technisch-sensorischen Messung von Geruchswahrnehmungen“. Ein besonderer Dank für die Unterstützung geht an Herrn Dr.-Ing. A. Engelke von der DFG.

Literatur

- [1] *Stockinger, J.*: Messunsicherheiten bei der Olfaktometrie. 71. Darmstädter Seminar Abfalltechnik am 24. Juni 2004.
- [2] DIN EN 13725: Luftbeschaffenheit – Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie. Berlin: Beuth 2003.
- [3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Genf: International Standard Organization (ISO) 1993.
- [4] *Kessel, W.*: Messunsicherheit, ein wichtiges Element der Qualitätssicherung. PTB-Mitteilungen 108 (1998) Nr. 5, S. 377-382.
- [5] *Kessel, W.*: Der ISO/BIPM-Leitfaden zur Ermittlung der Messunsicherheit. Techn. Mess. 68 (2001) Nr. 1, S. 5-13.
- [6] *Siebert, B.; Sommer, K. D.*: Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken. Techn. Mess. 71 (2004) Nr. 2, S. 67-80.
- [7] *Oberthür, R.*: Ein logarithmischer Maßstab mit dB-Einheiten zur Darstellung des Geruchsstoffpegels. Staub – Reinhalt. Luft 50 (1990) Nr. 5, S. 175-183.
- [8] *Mannebeck, D.; Mannebeck, H.*: Qualität und Vergleichbarkeit olfaktorischer Messungen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 62 (2002) Nr. 4, S. 135-140.
- [9] *Maxeiner, B.; Mannebeck, D.*: Ringversuch Olfaktometrie 2003. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 64 (2004) Nr. 3, S. 118-123.
- [10] *Maxeiner, B.*: Olfactometric Interlaboratory Comparison Test 2005. WEF/AWWA Odors and Air Emissions 2006, S. 688-699.
- [11] *Hässelbarth, W.*: BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen. BAM-Forschungsbericht 266. Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin 2004.
- [12] *Sommer, K. D.; Siebert, B.*: Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM. Techn. Mess. 71 (2004) Nr. 2, S. 52-66.
- [13] DIN 1319-3: Grundlagen der Meßtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit. Berlin: Beuth 1996.
- [14] *Maxeiner, B.*: Persönliche Kommunikation, Fa. OlfaTec, Honigsee.
- [15] *Stockinger, J.; Martens, J.; Kahn, R.*: Entwicklung der Emissionsmesstechnik für MBA und Erfahrungen am Beispiel der Haase VocsiBox. Vortrag VDI-Seminar „Messtechnik bei Verbrennungsanlagen“ 2005.
- [16] *Kessel, W.*: Messunsicherheit – Einige Begriffe und Folgerungen für die messtechnische Praxis. PTB-Mitteilungen 111 (2001) Nr. 3, S. 226-244.
- [17] *Boeker, P.; Hamacher, T.; Mannebeck, D.; Wimmer, P.; Horner, G.*: Methodik und Technik der Online-Geruchsmessung. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 63 (2003) Nr. 7/8, S. 283-289.
- [18] Informationen bei AltraSens. www.altrasens.de, Rubrik Olfaktometrie