

Sensorische Prüfung von Bauprodukten  
Weiterentwicklung der Probendarbietung und Vereinfachung  
des Messverfahrens

vorgelegt von

Simone Brandt, M. Sc.  
ORCID: 0000-0001-8071-7068

an der Fakultät III – Prozesswissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr. Vera Susanne Rotter  
Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Andreas Held  
Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Müller

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19. Dezember 2024

Berlin 2025



## Projekteinordnung

Die vorliegende Promotion ist ein Ergebnis eines Forschungsprojekts, das im Rahmen des Ressortforschungsplans des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) durchgeführt wurde. Das Projekt, welches vom Umweltbundesamt initiiert wurde, trägt den Titel „Geruchs- und emissionsarme Produkte für eine gesunde Innenraumluft – Entwicklung von Anforderungen für den Blauen Engel bei innenraumrelevanten, großflächigen Produkten“ und fand im Zeitraum November 2017 bis Januar 2024 statt. In diesem Rahmen untersuchten die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin) und die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) die sensorische Wahrnehmung und die Emissionen elastischer und holzbasierter Bodenbeläge. Ziel war es die Kenntnisse über diese Produktgruppen zu vertiefen und Vorschläge für Anforderungen an die empfundene Intensität der Produkte für das Umweltzeichen Blauer Engel zu entwickeln.

Im Zuge der Untersuchungen wurde innerhalb der Promotion die Methode zur Ermittlung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten für den Innenraum untersucht, Vorschläge für eine Weiterentwicklung erarbeitet und diese experimentell überprüft. Die Promotion erfolgte dabei in Kooperation zwischen der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) und der HTW Berlin.

Eine besondere Herausforderung während der Durchführung dieser Arbeit war die Zeit der Corona-Pandemie von 2020 bis 2022, in der insbesondere die notwendigen personengebundenen sensorischen Prüfungen nicht oder nur eingeschränkt durchgeführt werden konnten. Die damit verbundenen Herausforderungen fließen in die Arbeit mit ein.



BAM



## Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde zwischen 2018 und 2024 während meiner Tätigkeit an der HTW Berlin erstellt und unter der fachlichen Betreuung von Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Müller an der HTW Berlin verfasst. Ich möchte ihr meinen herzlichen Dank aussprechen für die kontinuierliche Unterstützung in meiner praktischen und theoretischen Arbeit sowie für die zahlreichen fachlichen Diskussionen.

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Held von der TU Berlin gebührt mein herzlicher Dank für die Übernahme der fachlichen Betreuung und seine wissenschaftliche Begleitung.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen an der HTW Berlin. Besonders möchte ich mich bei dem Laboringenieur Philipp Krimmel für seine praktische Unterstützung beim Aufbau der Adaptersteuerung bedanken und bei dem Wissenschaftlichen Mitarbeiter André Badura für seine oft kurzfristige und lösungsorientierte Hilfe. Dem studentischen Mitarbeiter Anton Knigge danke ich für seine einwandfreie Unterstützung bei den sensorischen Messungen und die Entwicklung des Fragebogens für ungeschulte Prüfende. Dr. Constance Holman danke ich für die Übernahme von Übersetzungen in die englische Sprache.

Ich danke auch meinem Projektpartner der BAM herzlichst für die Möglichkeit, über mehrere Wochen Messungen in ihren Laboren durchführen zu können. Ein besonderer Dank geht dabei an Dr. Wolfgang Horn und Sabine Kalus für ihre praktische Unterstützung und die hilfreichen fachlichen Gespräche, insbesondere zu analytischen Fragestellungen.

Beim Umweltbundesamt möchte ich Dr. Wolfgang Plehn, Katja Becken und Dr. Ana Maria Scutaru für ihre fachlichen Anregungen, besonders während der Projektbesprechungen, danken. Dr. Frank Brozowski danke ich zusätzlich für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Ein herzlicher Dank geht an alle Personen, die mit ihrer geschulten Nase dazu beigetragen haben, die vielen Einzelergebnisse zu generieren.

Ich möchte den Laboren, die am Ringversuch teilgenommen haben, für ihre Teilnahme an der Messung zur vereinfachten Bewertung der empfundenen Intensität danken. Ein besonderer Dank gilt den Personen und Instituten, die ich persönlich oder virtuell (während der Corona-Pandemie) besuchen konnte. Hier möchte ich insbesondere Dr.-Ing. Laura Brosig von der Olfasense GmbH in Kiel, Dr. Andrea Burdack-Freitag vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Holzkirchen, Alexandra Kühn vom eco-INSTITUT Germany GmbH in Köln und Nicole Schulz vom Fraunhofer WKI in Braunschweig erwähnen.

Antje Plagemann danke ich herzlich für ihre einfühlsame Unterstützung in wertvollen Gesprächen.

Meiner lieben Freundin Marika danke ich für das Korrekturlesen meiner Arbeit. Es war beruhigend jemanden zu haben, die sich nicht mit dem Thema auskennt und sich ganz auf das Korrekturlesen konzentrieren kann.

Meiner Familie danke ich für ihren unermüdlichen Zuspruch, der mir immer wieder Kraft und Motivation geschenkt hat. Mein besonders herzlicher Dank gilt meinem Mann Matthias für die Gespräche während langer Spaziergänge und die Unterstützung auf meinem Lebensweg.

Berlin, im Juli 2024

## Vorveröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen enthalten Ergebnisse dieser Arbeit:

### Fachzeitschriften

- [1] Brandt, S., Brozowski, F., Horn, W., Plehn W. & Müller, B. (2021). *Weiterentwicklung des Geruchsmessverfahrens für Bauprodukte*. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, 81(03-04), 151-155.
- [2] Brandt, S., Brozowski, F., Horn, W., Plehn W. & Müller, B. (2022). *Weiterentwicklung des Geruchsmessverfahrens für Bauprodukte (Teil II). Entwicklung eines Adapters und vereinfachtes Bewertungsverfahren*. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 82(03-04), 83-89.

### Forschungsberichte

- [1] Horn, W. (2022). *Report on Results of RR-VOC-O-BAM-2021*(unveröffentlichter Bericht). Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM).
- [2] Müller, B., Brandt, S., Badura, A., Knigge, A., (im Druck). *Geruchs- und emissionsarme Produkte für eine gesunde Innenraumluft Entwicklung von Anforderungen für den Blauen Engel bei innenraumrelevanten, großflächigen Produkten*. UBA-Texte. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

### Konferenzbeiträge

- [1] Paper & Vortrag: Brandt, S., Müller, B., de Lima Vasconcelos, S., Sattler, M. & Horn, W (2019). *Präzisierung der Geruchsprüfung für Bauprodukte nach DIN ISO 16000-28 - Untersuchung von Vergleichsmaßstäben*. 12. Fachkongress der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e. V. Hallstadt, Deutschland.
- [2] Vortrag: Brandt, S., Horn, W., Müller B. (2021). *Geruchsprüfung bei elastischen Bodenbelägen: Möglichkeiten und Grenzen der Geruchsreduzierung*. 28. WaBoLu-Innenraumtage. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Deutschland.
- [3] Paper & Vortrag: Brandt, S., Brozowski, F., Horn, W., Plehn W. & Müller, B. (2021). *Further development of odour testing of building products - Sample presentation and evaluation of perceived intensity*. 17th International Conference Healthy Buildings Europe 2021. Oslo, Norwegen.
- [4] Paper & Vortrag: Brandt, S., Brozowski, F., Horn, W., Plehn W. & Müller, B. (2022). *New developments in odour testing: Adapter connects emission test chamber and funnel*. CLIMA 2022 conference. Rotterdam, Niederlande.
- [5] Vortrag: Brandt, S., Müller, B. (2022). *Aktuelle Entwicklungen zum Geruchsmessverfahren ISO 16000-28 - Probennahmesystem und Intensitätsbewertung*. 29. WaBoLu-Innenraumtage. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

- [6] Extended Abstract & Posterpräsentation: Brandt, S., Brozowski, F., Horn, W., Plehn W. & Müller, B. (2022). *Odour Emissions from Building Products - Simplifying the Evaluation of Perceived Intensity*. Indoor Air Conference 2022 “Healthy people in a healthy indoor environment”. Kuopio, Finland.
- [7] Paper & Vortrag: Brandt, S., Brozowski, F., Horn, W. & Müller, B. (2023). *Odour testing of building products: Examinations for an on-going development of the test standard ISO 16000-28*. Healthy Building 2023 Europe Conference. Aachen, Deutschland.

## Kurzbeschreibung

In Deutschland erfolgt die Geruchsmessung von Bauprodukten gemäß der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und der Richtlinie VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015). Die Methode verwendet eine geschulte Prüfergruppe, um die empfundene Intensität  $I$  zu bestimmen. Ein Bauprodukt gilt für den Innenraum als geruchlich geeignet, wenn die Intensität nach 28 Tagen in der Emissionsprüfkammer die Höhe von  $7 p_i$  nicht überschreitet.

Bisher ist die sensorische Prüfung und Bewertung von Bauprodukten auf freiwilliger Grundlage im Schema des Ausschusses zur gesundheitlichen Prüfung von Bauprodukten (AgBB) und in zahlreichen Vergabekriterien des Umweltzeichens Blauer Engel verankert. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit sollen die Akzeptanz der Messmethode steigern und ihre Anwendung fördern.

Die Dissertation behandelt folgende Forschungsthemen:

### 1. Weiterentwicklung der Probendarbietung unter Verwendung eines Adapters

Die sensorische Bewertung eines Bauprodukts erfolgt standardmäßig mit Probenbehältern. Obwohl die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) Anforderungen an das Material sowie die Vorbereitung und Durchführung der Messungen stellt, gibt es Herausforderungen bei ihrer Verwendung.

Ein Adapter wird entwickelt, gebaut und in seiner Anwendung erprobt, um die Emissionsprüfkammer und den Bewertungstrichter miteinander zu verbinden. Dieser Ansatz vermeidet den Transport und die Lagerung empfindlicher Luftproben und reduziert somit Verluste von geruchsaktiven Substanzen. VOC-Messungen und sensorische Bewertungen zeigen die Eignung des Adapters zur Darbietung von Geruchsproben. Die Ergebnisse zeigen, dass die mit dem Adapter dargebotene Probenluft eine sehr ähnliche Zusammensetzung in Bezug auf VOC-Konzentrationen aufweist wie die Luft in den Emissionsprüfkammern. Am Adapter kann demnach die gleiche Luft dargeboten werden wie bei direkter Messung. Auch die empfundenen Intensitäten sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Prüfkammerluftbewertung. Die Untersuchungen zeigen auch die Bedeutung der Vermeidung einer Vermischung von Probenluft und Umgebungsluft sowie die Notwendigkeit, Probennahmesysteme dicht zu konzipieren.

### 2. Vereinfachung der Bewertung der empfundenen Intensität

Ein vereinfachtes Verfahren wird entwickelt, bei dem den Prüfenden lediglich die Referenzintensität von  $7 p_i$  zum Vergleich mit der Probenluft angeboten wird. Sie sollen angeben, ob sie die Intensität der Probenluft stärker, gleich stark oder schwächer empfinden. Für die Bewertung wird festgelegt, dass eine unzumutbare Belästigung vorliegt, wenn mehr als 30 % der Prüfenden angeben, dass die Probenluft in ihrer Intensität stärker empfunden wird als die Referenzintensität.

Die Auswertung zeigt, dass das vereinfachte Verfahren für die meisten Produkte geeignet ist, jedoch bei holzbasierten Produkten zu abweichenden Bewertungen führen kann, was vermutlich auf ihre Hedonik zurückzuführen ist. Sowohl geschulte als auch ungeschulte Prüfende sind in der Lage, die vereinfachte Bewertung durchzuführen.

## Short Description

In Germany, the odour measurement of building products is carried out according to the method described in DIN ISO 16000-28 (2021) and specified in the VDI 4302 Sheet 1 guideline (2015). The strength of the odour is determined as a perceived intensity by a trained group of testers. A building product is considered suitable for indoor use in terms of odour if its perceived intensity does not exceed 7pi after 28 days in the emission test chamber.

To date, the sensory testing and evaluation of building products has been anchored in the scheme of the Committee for Health-related Evaluation of Building Products (AgBB) and in numerous award criteria for indoor products of the Blue Angel Ecolabel on a voluntary basis, due to their current low number of official measurements. This research work aims to help to increase acceptance of these measurement methods and promote the use of odour testing and assessment.

The following two research topics are at the centre of the study:

### 1. Further development of sample presentation using an adapter

The standard sensory evaluation of a construction product is carried out using sample containers. Although DIN ISO 16000-28 sets requirements for the material and pre-treatment of the sample containers as well as for the performance of the assessment, there are difficulties with the use of sample containers.

In this doctoral thesis, an adapter for sample presentation is developed, built and tested in situ, connecting the emission test chamber and the evaluation funnel. This approach avoids the transport and storage of sensitive air samples, reducing losses of odour-active substances. This is verified by means of VOC measurements and sensory evaluations. The VOC concentrations obtained using the adapter are very similar compared to the VOC concentrations measured directly at the emission test chamber. Therefore, the air presented with the adapter is almost the same as that presented in direct measurements. In addition, the perceived intensities obtained using the adapter are comparable to the results obtained at the emission test chamber. The results also emphasise the importance of avoiding mixture of sample air with ambient air as well as the airtightness of presentation systems and sample containers.

### 2. Simplification of the evaluation of the perceived intensity

A simplified procedure is developed in this work in which the testers are only offered the reference intensity of 7pi for comparison. During the assessment, they simply indicate whether they perceive the intensity of the building product odour to be stronger, equally strong or weaker to the reference value. To analyse the results, the percentage of the testers' results showing that the product sample smells stronger than the reference intensity of acetone is calculated. For the evaluation, it is determined that an odour is unacceptable if this percentage is greater than 30%.

In summary, the measurements demonstrate that the simplified procedure is suitable for building products. Both trained groups of testers and large, untrained groups are suitable for carrying out the simplified assessment. However, wood products should be evaluated critically due to their often pleasant hedonic odour effects.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen .....	XI
Formelzeichen .....	XIII
Abbildungsverzeichnis .....	XIV
Tabellenverzeichnis .....	XIX
1 Einleitung .....	1
2 Zielsetzung .....	4
2.1 Weiterentwicklung der Probendarbietung mit einem Adapter .....	4
2.2 Vereinfachte Bewertung der empfundenen Intensität .....	6
3 Grundlagen .....	8
3.1 Geruchsstoffe und Geruchswahrnehmung .....	8
3.2 Sensorische Messungen .....	12
3.2.1 Entwicklung .....	12
3.2.2 Messgrößen .....	16
3.2.2.1 Akzeptanz .....	17
3.2.2.2 Empfundene Intensität .....	18
3.2.2.3 Hedonik .....	19
3.2.2.4 Zumutbarkeit .....	20
3.2.3 Bestimmung von Geruchsemissionen .....	20
3.2.3.1 Anforderungen an die Räume und Prüfausrüstungen .....	21
3.2.3.2 Probendarbietung .....	22
3.2.3.3 Statistische Auswertung .....	26
3.2.3.4 Anforderungen an die Versuchsleitung .....	26
3.2.3.5 Anforderungen an die Prüfergruppe .....	27
3.2.4 Bewertung nach dem AgBB-Schema .....	28
3.3 Ermittlung der VOC-Emissionen .....	29
3.3.1 Probenahme .....	30
3.3.2 Thermodesorption .....	30
3.3.3 Gaschromatographie .....	30
3.3.4 Massenspektrometrie .....	31
3.4 Emissionsprüfkammern .....	32
3.5 Hitzdrahtanemometer .....	35

3.6	Photoakustische Spektroskopie .....	35
4	Aktueller Forschungsstand.....	38
4.1	Probendarbietung.....	38
4.1.1	Vergleich der Verfahren zur Geruchsbewertung.....	38
4.1.1.1	Projektergebnisse des Hermann-Rietschel-Institutes (2011).....	38
4.1.1.2	Projektergebnisse des Fraunhofer WKI (2016) .....	40
4.1.1.3	Projektergebnisse der HTW Berlin, BAM und RWTH Aachen (2017) .....	41
4.1.1.4	Ergebnisse aus einem Ringversuch der BAM (2018).....	42
4.1.1.5	Gesamtauswertung der Projektergebnisse aus der Literatur .....	43
4.1.2	Verwendung von Masken.....	44
4.2	Geruchsbewertung .....	46
4.2.1	Bewertung von Bauprodukten anhand der Zumutbarkeit .....	46
4.2.2	Untersuchung zum Vergleich sensorischer Messgrößen.....	53
5	Versuchsaufbau und -durchführung.....	54
5.1	Sensorische Messungen .....	54
5.1.1	Laboraufbau und –ausstattung .....	54
5.1.2	Beschreibung des Vergleichsmaßstabes.....	56
5.1.3	Messung der Acetonkonzentration am Vergleichsmaßstab .....	57
5.1.4	Ermittlung des Luftvolumenstroms in den Trichtern .....	58
5.1.5	Prüferauswahl und Schulung.....	60
5.1.6	Probenauswahl, Probenvorbereitung und Beladung .....	62
5.1.6.1	Elastische Bodenbeläge und holzbasierte Produkte.....	62
5.1.6.2	Lacke.....	64
5.1.7	Vorbehandlung der Probenbehälter.....	65
5.1.8	Durchführung der Messungen .....	67
5.1.9	Auswertung der Daten.....	69
5.2	VOC-Messungen .....	70
5.2.1	Probenauswahl, Probenvorbereitung und Beladung .....	71
5.2.2	Probenahme .....	72
5.2.3	Analyse mit dem GC/MS-System .....	73
5.2.4	Auswertung der Daten.....	74
6	Weiterentwicklung der Probendarbietung mit einem Adapter .....	76
6.1	Messungen zum Vergleich der Verfahren zur Geruchsbewertung.....	78
6.2	Anforderungen an den Adapter .....	80

6.3	Untersuchungen zur Entwicklung des Adapters.....	82
6.3.1	Volumen der Probenbehälter und Emissionsprüfkammern.....	82
6.3.2	Art der Probenbehälter: Prüfung der festen Form.....	85
6.3.2.1	Beschreibung des Glasgefäßes.....	85
6.3.2.2	VOC-Messungen.....	86
6.3.2.3	Sensorische Messungen.....	89
6.3.2.4	Schlussfolgerung: Anwendung von Probenbehältern mit fester Form.....	93
6.3.3	Materialuntersuchung und Herstellung der flexiblen Probenbehälter.....	93
6.3.3.1	Herstellung der Probenbehälter aus Folienmaterial.....	94
6.3.3.2	Ermittlung des Volumens der Probenbehälter aus Folienmaterial.....	96
6.3.3.3	VOC-Messungen von Probenbehältern aus Folienmaterial.....	97
6.3.3.4	Schlussfolgerungen zur Anwendung flexibler Probenbehälter.....	100
6.3.4	Peripherie des Adapters.....	101
6.4	Bau und Betrieb des Adapters.....	104
6.4.1	Auswahl der Bauteile.....	104
6.4.2	Betriebsanleitung des Adapters.....	106
6.5	Untersuchungen des Adapters.....	107
6.5.1	VOC-Messungen.....	108
6.5.1.1	Ergebnisse bei Probenahme am durchströmten Adapter.....	110
6.5.1.2	Ergebnisse bei Probenahme aus dem Behälter des Adapters.....	115
6.5.1.3	Ergebnisse bei Probenahme aus einem am Trichter gefüllten Behälter ...	118
6.5.1.4	Schlussfolgerungen zu VOC-Messungen.....	119
6.5.2	Volumenstrommessungen.....	120
6.5.2.1	Ermittlung des Volumenstroms und der Darbietungsdauer.....	120
6.5.2.2	Messungen zur Abdichtung des Probenbehälters im Adapter.....	123
6.5.3	Sensorische Messungen.....	124
6.5.3.1	Messungen mit erster Adapterversion: manueller Kugelhahn.....	124
6.5.3.2	Messungen mit zweiter Adapterversion: Magnetventil.....	126
6.5.3.3	Messungen mit dritter Adapterversion: optimierte Abdichtung.....	129
6.5.3.4	Schlussfolgerungen zu den sensorischen Messungen.....	131
6.6	Auswertung und Diskussion.....	132
7	Vereinfachte Bewertung der empfundenen Intensität.....	135
7.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	136
7.1.1	Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden.....	136

7.1.2	Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden.....	138
7.1.3	Laborringversuch mit geschulten Prüfenden.....	140
7.2	Ergebnisse.....	141
7.2.1	Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden.....	141
7.2.2	Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden.....	148
7.2.3	Laborringversuch mit geschulten Prüfenden.....	152
7.3	Auswertung und Diskussion.....	153
7.3.1	Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden.....	153
7.3.2	Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden.....	154
7.3.3	Laborringversuch mit geschulten Prüfenden.....	156
7.3.4	Gesamtblick.....	156
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	158
8.1	Verbesserung der Probedarbietung mit einem Adapter.....	158
8.2	Vereinfachte Bewertung der empfundenen Intensität.....	163
9	Literaturverzeichnis.....	167
10	Anhang.....	I
Anhang A: Untersuchungen zur Entwicklung des Probedarbietungssystems Adapter.....		II
Anhang A1: Daten zu Kapitel 6.1 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Standardverfahren.....		II
Anhang A2: Daten zu Kapitel 6.3.2.3 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und festes System (Glasgefäß).....		III
Anhang A3: Daten zu Kapitel 6.5.3.1 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Adapter (1. Version: manueller Kugelhahn).....		IV
Anhang A4: Daten zu Kapitel 6.5.3.2 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Adapter (2. Version: Magnetventil).....		V
Anhang A5: Daten zu Kapitel 6.5.3.3 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Adapter (3. Version: optimierte Abdichtung).....		VI
Anhang B: Untersuchungen zur vereinfachten Messung der empfundenen Intensität.....		VII
Anhang B1: Daten zu Kapitel 7.2.1 - Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden.....		VII
Anhang B2: Daten zu Kapitel 7.2.2 - Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden.....		XV
Anhang C: Ermittlung des Volumens der Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar® mit einer Gasuhr (Daten zu Kapitel 6.3.3.2).....		XVII

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
AgBB	Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten
AGÖF	Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CLIMPAQ	Chamber for Laboratory Investigations of Materials, Pollution and Air Quality
DE-UZ	Vergabekriterien des Blauen Engels
EI	Elektronen-Stoß-Ionisation
GC	Gaschromatographie
GE	Geruchseinheiten
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
HRI	Hermann-Rietschel-Institut
HTW Berlin	Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
MS	Massenspektroskopie
PAS	photoakustische Spektroskopie
PD	Unzufriedenheitsprozentsatz (englisch: percentage dissatisfied)
PET	Polyethylenterephthalat, Nalophan®
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVF	Polyvinylfluorid, Tedlar®
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SVOC	schwer flüchtige organische Verbindung (englisch: semi volatile organic compound)
TIC	Totalionenchromatogramm
TFI	Teppichforschungsinstitut
TU Berlin	Technische Universität Berlin
TSVOC	Summe der schwer flüchtigen organischen Verbindungen (englisch: total semi volatile organic compound)
TVOC	Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (englisch: total volatile organic compound)

UBA	Umweltbundesamt
VOC	flüchtige organische Verbindung (englisch: volatile organic compound)
VVOC	leicht flüchtige organische Verbindung (englisch: very volatile organic compound)
Fraunhofer WKI	Fraunhofer Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut

## Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Produktoberfläche	m <sup>2</sup>
C <sub>i</sub>	Stoffkonzentration	μg/m <sup>3</sup>
F	Korrekturfaktor	-
L	Produktbeladungsfaktor	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
n	Luftwechselrate	h <sup>-1</sup>
NIK	niedrigste interessierende Konzentration	μg/m <sup>3</sup>
q <sub>A</sub>	flächenspezifische Luftdurchflussrate	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
R-Wert	Risikoindex	[-]
rF	relative Luftfeuchte	%
t	Zeit (z. B. Dauer einer Messung, Befüllung, Probenahme)	h, min, s
T	Temperatur	°C, K
u	atomare Masseneinheit	u
V	Volumen	m <sup>3</sup> , l
V <sub>PB</sub>	Volumen Probenbehälter	m <sup>3</sup> , l
V <sub>EPK</sub>	Volumen Emissionsprüfkammer	m <sup>3</sup> , l
$\dot{V}$	Volumenstrom am Trichter	l/s
ΔV	Volumendifferenz	l
Π	empfundene Intensität (perceived intensity)	pi
Σ	Summe	-

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Geruchsbewertungsverfahren gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021): a) Standardverfahren, b) alternatives Verfahren.....	5
Abbildung 2-2: Idee zur Weiterentwicklung der Geruchsbewertungsverfahren gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) durch Verwendung eines Adapters .....	6
Abbildung 3-1: Aufbau der Riechschleimhaut und Weiterleitung der olfaktorischen Signale zum Bulbus olfactorius (Schünke & Faller, 2016) .....	9
Abbildung 3-2: Kategorienskala für die Bestimmung der Hedonik (VDI, 1994).....	14
Abbildung 3-3: Zusammenhang zwischen der empfundenen Luftqualität in Dezipol und Geruchseinheiten in GE (D. Müller et al., 2004).....	15
Abbildung 3-4: Akzeptanzskala; modifiziert nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) .....	17
Abbildung 3-5: Skala zur Ermittlung der Hedonik .....	20
Abbildung 3-6: Schema eines Standardtrichters (DIN, 2021).....	22
Abbildung 3-7: Schema des Darbietungssystems; modifiziert nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021; B. Müller, 2002) .....	24
Abbildung 3-8: Schema zur gesundheitlichen Bewertung der Emissionen aus Bauprodukten, modifizierte Darstellung (AgBB, 2021).....	28
Abbildung 3-9: Schematischer Aufbau der PAS in den INNOVA Gasmonitoren der Firma LumaSense Technologies A/S (AE, 2020).....	36
Abbildung 4-1: Vergleich der Bewertungen hinsichtlich der empfundenen Intensitäten mittels direkter Bewertung mit der CLIMPAQ und unter Verwendung von Probenbehältern aus Tedlar (B. Müller et al., 2011).....	39
Abbildung 4-2: Vergleich der Bewertungen der empfundenen Intensität mit Probenbehältern aus Nalophan® (indirekt) und im direkten Verfahren durch das WKI (Salthammer, Schulz, Stolte, Uhde & Bartsch, 2016).....	40
Abbildung 4-3: Vergleich der Bewertungen der empfundenen Intensität im direkten Verfahren und mit Probenbehältern aus Tedlar® und Nalophan® durch das WKI (Salthammer, Schulz, Stolte, Uhde & Bartsch, 2016).....	41
Abbildung 4-4: Vergleich der Bewertungen der ermittelten empfundenen Intensität (links) und Hedonik (rechts) von fünf textilen Bodenbelägen durch direkte Bewertung an der HTW Berlin und Verwendung von Probenbehältern aus Tedlar® an der RWTH Aachen (B. Müller et al., 2019) .....	42
Abbildung 4-5: Empfundene Intensität und Hedonik sowie Anzahl der Prüfenden der teilnehmenden Labore im Ringversuch der BAM in 2018 (Horn et al., 2018) .....	43
Abbildung 4-6: Maske für Geruchsbewertungen gemäß der alten Fassung der DIN ISO 16000-28 von 2012.....	45
Abbildung 4-7: Oberfläche der Datenerfassungssoftware für ungeschulte Prüfende (B. Müller et al., 2011).....	47
Abbildung 4-8: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität und Zumutbarkeit (B. Müller et al., 2011).....	48
Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität und Hedonik (B. Müller et al., 2011).....	48

Abbildung 4-10: Zusammenhang zwischen Zumutbarkeit und dem Prozentsatz Unzufriedener (PD-Wert) (nach (B. Müller et al., 2011) Beispiele hinzugefügt) .....	49
Abbildung 4-11: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität und Zumutbarkeit (B. Müller et al., 2011) mit Eintrag der Vorschläge für die Bewertung beim Blauen Engel (7 pi) und beim AgBB-Schema (11 pi) .....	49
Abbildung 4-12: Vorschlag für die Bewertung von Bauprodukten mit dem Blauen Engel (B. Müller et al., 2011).....	50
Abbildung 4-13: Vorschlag für die Bewertung gemäß AgBB-Schema (B. Müller et al., 2011)	50
Abbildung 4-14: Vorschlag zur Festlegung von Geruchszonen; H = Hedonik, Akz = Akzeptanz, PD-Wert = Prozentsatz Unzufriedener (Panašková & Müller, 2015).....	53
Abbildung 5-1: Grundrisskizze des Luftqualitätslabors der HTW Berlin .....	55
Abbildung 5-2: Blick in das Luftqualitätslabor vom Eingang aus fotografiert: Prüfraum mit Trichtern zur Probenluftdarbietung und Vergleichsmaßstab (links), Adapter (vorn) und CLIMPAQs (rechts).....	55
Abbildung 5-3: Aufbau des Vergleichsmaßstabes der HTW Berlin; modifiziert (DIN, 2021).....	57
Abbildung 5-4: Ansaugschlauch des Gasmonitors über einem Trichter des Vergleichsmaßstabes zur Messung der Acetonkonzentration .....	57
Abbildung 5-5: Messung der Strömungsgeschwindigkeit am Trichter mit dem Hitzdrahtanemometer eingebaut in ein Rohr zur Laminarisierung der Strömung.....	58
Abbildung 5-6: Toleranzfeld für die gemessene empfundene Intensität mit Beispielen für Bewertungen durch zwei Prüfende; modifiziert nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021).....	61
Abbildung 5-7: Zuschnitt holzbasierter Prüfstücke mit Fugenanteilen: a) empfohlene Standardanordnung starrer Bodenbelägen mit Beispielmaßen (DIBt, 2015), b) Foto eines zugeschnittenen Prüfstücks mit Angabe der Maße .....	63
Abbildung 5-8: Foto des Ofeninnenraumes mit Probenbehältern aus Tedlar® zum Ausheizen.....	66
Abbildung 5-9: Foto eines Trichtereinsatzes als hygienische Maßnahme während der Corona-Pandemie.....	69
Abbildung 5-10: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Geruchsmessung für die empfundene Intensität und die Hedonik in Anlehnung an die VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) .....	69
Abbildung 5-11: Fotos der 270 l-Emissionsprüfkammer beladen mit Prüfstücken: a) Linoleum und Kautschuk, b) Lackprobe .....	71
Abbildung 5-12: Foto eines Sorptionsrohrs neben seinem Container sowie Probenahmepumpe mit Schlauch.....	73
Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Entwicklung, dem Bau und der Optimierung des Adapters .....	77
Abbildung 6-2: Empfundene Intensität elastischer Bodenbeläge (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und dem Standardverfahren (St) der Geruchsbewertung mit Behältern aus Nalophan® (N).....	79

Abbildung 6-3: Hedonik elastischer Bodenbeläge (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und dem Standardverfahren (St) der Geruchsbewertung mit Probenbehältern aus Nalophan® (N) .....	79
Abbildung 6-4: Schematische Darstellung des Glasgefäßes zur Verwendung als Adapter ...	86
Abbildung 6-5: Foto des an die 270 l-Emissionsprüfkammer angeschlossenen Glasgefäßes und VOC-Probenahme bei der BAM.....	86
Abbildung 6-6: Relative VOC-Konzentrationen im durchströmten Glasgefäß, nach Zustromstopp und Lagerung normiert auf die Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer einer Lackprobe (Lack B).....	89
Abbildung 6-7: Foto des Glasgefäßes an der HTW Berlin mit Zustrom von Probenluft am unteren und Bewertungstrichter am oberen Ende.....	90
Abbildung 6-8: Empfundene Intensität eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Glasgefäßes (G) mit abnehmbarem Deckel und einem Trichter.....	91
Abbildung 6-9: Hedonik eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Glasgefäßes (G) mit abnehmbarem Deckel und einem Trichter .....	92
Abbildung 6-10: Maße zur Herstellung der Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar® ....	94
Abbildung 6-11: Probenbehälter im Adapter: a) Nalophan®; b) Tedlar® .....	95
Abbildung 6-12: Anschluss der Probenbehälter an die 270 l-Emissionsprüfkammer: a) Nalophan®, b) Tedlar® .....	97
Abbildung 6-13: Vergleich der relativen VOC-Konzentrationen einer Lackprobe (Lack A) im Probenbehälter aus Nalophan® nach Befüllung und Lagerung normiert auf die Emissionsprüfkammer .....	100
Abbildung 6-14: Vergleich der relativen VOC-Konzentrationen einer Lackprobe (Lack A) im Probenbehälter aus Tedlar® nach Befüllung und Lagerung normiert auf die Emissionsprüfkammer .....	100
Abbildung 6-15: Entwurf des Adapters.....	102
Abbildung 6-16: Schematische Darstellung des Adapters .....	103
Abbildung 6-17: Foto des Adapters im Luftqualitätslabor der HTW Berlin .....	106
Abbildung 6-18: Darstellung der Probenahmestellen zur Ermittlung der VOC-Konzentrationen der mithilfe des Adapters bereitgestellten Probenluft.....	109
Abbildung 6-19: Fotos der drei Versuchsreihen: a) Probenahme am durchströmten Adapter, b) Probenahme aus dem Behälter des Adapters nach Zustromstopp, c) Befüllen eines zweiten Probenbehälters zur Beprobung hinter dem Adapter.....	109
Abbildung 6-20: Proben für die VOC-Messungen mit dem Adapter in der 270 l-Emissionsprüfkammer: a) Bodenbeläge Kautschuk und Linoleum, b) zwei Petrischalen mit Lack B .....	110
Abbildung 6-21: Relative VOC-Konzentrationen am durchströmten Adapter mit Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® normiert auf die Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer für eine Probe aus Kautschuk und Linoleum – zwei Versuche .....	112

Abbildung 6-22: Relative VOC-Konzentrationen am durchströmten Adapter mit Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® normiert auf die Konzentration in der Emissionsprüfkammer für eine Lackprobe (Lack B) - vier Versuche.	114
Abbildung 6-23: Relative VOC-Konzentrationen nach Zustromstopp des Adapters mit Probenbehältern aus Tedlar® normiert auf die Konzentration in der Emissionsprüfkammer für eine Lackprobe (Lack B) – vier Versuche .....	117
Abbildung 6-24: Relative VOC-Konzentrationen in einem zweiten Probenbehälter aus Tedlar® am Ausstrom befüllt normiert auf die Konzentration in der Emissionsprüfkammer für eine Lackprobe (Lack B) - zwei Versuche.....	119
Abbildung 6-25: Volumenstromerfassung am Trichter des Adapters während und direkt nach einer Behälterentleerung (Nalophan®) – manueller Kugelhahn (erste Adapterversion).....	121
Abbildung 6-26: Volumenstromerfassung am Trichter des Adapters während und direkt nach einer Behälterentleerung (Nalophan®) - Magnetventil (zweite Adapterversion).....	122
Abbildung 6-27: Volumenstromerfassung am Trichter des Adapters während und direkt nach einer Behälterentleerung (Tedlar®) - Magnetventil (zweite Adapterversion).....	122
Abbildung 6-28: Verbesserung der Abdichtung an der Verbindung zwischen Probenbehälter und Rohrstutzen des Adapters (dritte Adapterversion) .....	124
Abbildung 6-29: Empfundene Intensität eines Lackes (L), eines holzbasierten Bodenbelags (hB) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit manuellem Kugelhahn und Behältern aus Nalophan® (N).....	125
Abbildung 6-30: Hedonik eines Lackes (L), eines holzbasierten Bodenbelags (hB) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit manuellem Kugelhahn und Behältern aus Nalophan® (N).....	125
Abbildung 6-31: Empfundene Intensität eines elastischen Bodenbelags (eB), eines textilen Bodenbelags (tB) und eines Lackes (L) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil und Behältern aus Nalophan® (N) und Tedlar® (T).....	127
Abbildung 6-32: Hedonik eines elastischen Bodenbelags (eB), eines textilen Bodenbelags (tB) und eines Lackes (L) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil und Behältern aus Nalophan® (N) und Tedlar® (T).....	128
Abbildung 6-33: Empfundene Intensität eines Lackes (L) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil, optimierter Abdichtung und Behältern aus Tedlar® (T).....	130
Abbildung 6-34: Hedonik eines Lackes (L) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil, optimierter Abdichtung und Behältern aus Tedlar® (T).....	130

Abbildung 6-35: Vergleich der direkten Bewertungen der empfundenen Intensität mit der Bewertung unter Verwendung des Adapters und Probenahmebehältern ...	133
Abbildung 7-1: Messung und Bewertung mit der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage.....	136
Abbildung 7-2: Excel-Fragebogen für ungeschulte Prüfende .....	139
Abbildung 7-3: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität $\Pi$ in pi und dem Ergebnis der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden für elastischen und textilen Bodenbelägen sowie Lacken.....	142
Abbildung 7-4: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität $\Pi$ in pi und dem Ergebnis der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden für holzbasierte Produkte.....	143
Abbildung 7-5: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität $\Pi$ in pi und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden .....	144
Abbildung 7-6: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität $\Pi$ in pi und der Hedonik mit geschulten Prüfenden.....	145
Abbildung 7-7: Zusammenhang des 90 %-Vertrauensbereichs der empfundenen Intensität mit der Anzahl geschulter Prüfender .....	146
Abbildung 7-8: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität $\Pi$ in pi und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden - Darstellung der Messungen, die den 90 %-Vertrauensbereich von $\pm 2,0$ pi einhalten.....	147
Abbildung 7-9: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) mit geschulten Prüfenden und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten und ungeschulten Prüfenden .....	149
Abbildung 7-10: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) mit geschulten Prüfenden und der Hedonik mit geschulten und ungeschulten Prüfenden.....	150
Abbildung 7-11: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) mit geschulten Prüfenden und des Prozentsatzes der unzumutbaren Bewertungen mit ungeschulten Prüfenden .....	151
Abbildung 7-12: Zusammenhang zwischen der Hedonik mit ungeschulten Prüfenden und des Prozentsatzes der unzumutbaren Bewertungen mit ungeschulten Prüfenden .....	151
Abbildung 7-13: Zusammenhang zwischen dem PD-Wert der Akzeptanz und dem Prozentsatz der unzumutbaren Bewertungen (beides mit ungeschulten Prüfenden ermittelt) .....	152
Abbildung 7-14: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität einer Lackprobe (Lack C) ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden im Rahmen des Ringversuches.....	153

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Luftvolumenstrom am Auslass typischer Emissionsprüfkammern unterschiedlicher Größe bei verschiedenen Luftwechselraten (blaue Felder: der Luftvolumenstrom von 0,6 l/s wird erreicht und eine direkte Messung ist zulässig) .....	23
Tabelle 4-1:	Sensorische Prüfung nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) in den Vergabekriterien des Blauen Engels für emissionsarme Produkte (Stand: Dezember 2023) .....	52
Tabelle 5-1:	Hinzugefügte Komponenten in den untersuchten Lacken .....	65
Tabelle 6-1:	Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und dem Standardverfahren der Geruchsbeurteilung sowie Differenzen der Mittelwerte .....	80
Tabelle 6-2:	Anforderungen an den Adapter (Probenbehälter und Peripherie) .....	81
Tabelle 6-3:	Berechnete Zeitdauern zur Befüllung eines 20 l großen Probenbehälters bei unterschiedlichen Luftwechselraten und Emissionsprüfkammern unterschiedlicher Volumina .....	84
Tabelle 6-4:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im Glasgefäß einer Probe aus Kautschuk .....	87
Tabelle 6-5:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im Glasgefäß einer Lackprobe (Lack B) .....	88
Tabelle 6-6:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® für eine Probe aus Kautschuk .....	98
Tabelle 6-7:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® nach Lagerungszeit für eine Lackprobe (Lack A) .....	99
Tabelle 6-8:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Tedlar® nach Lagerungszeit für eine Lackprobe (Lack A) .....	99
Tabelle 6-9:	Hahnstellungen des Adapters bei unterschiedlichen Betriebszuständen ....	102
Tabelle 6-10:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® am durchströmten Adapter für eine Probe aus Kautschuk und Linoleum – zwei Versuche .....	111
Tabelle 6-11:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® am durchströmten Adapter für eine Lackprobe (Lack B) – vier Versuche .....	113
Tabelle 6-12:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im Probenbehälter aus Tedlar® des Adapters nach Zustromstopp für eine Lackprobe (Lack B) – vier Versuche .....	116
Tabelle 6-13:	VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in einem zweiten Probenbehälter aus Tedlar® am Ausstrom des Adapters befüllt für eine Lackprobe (Lack B) - zwei Versuche .....	118

Tabelle 6-14:	Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und der Adapterbewertung mit Kugelhahn (erste Adapterversion) sowie Differenzen der Mittelwerte .....	126
Tabelle 6-15:	Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und der Adapterbewertung mit Magnetventil (zweite Adapterversion) sowie Differenzen der Mittelwerte .....	128
Tabelle 6-16:	Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und der Adapterbewertung mit optimierter Abdichtung (dritte Adapterversion) sowie Differenzen der Mittelwerte .....	131
Tabelle 6-17:	Mittelwerte der Differenzen der empfundenen Intensität bei Anwendung des Standardverfahrens und der einzelnen Adapterversionen. ....	134
Tabelle 7-1:	Überblick der Produkte und Messungen für die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden .....	137
Tabelle 7-2:	Dokumentation der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit den drei möglichen Bewertungen .....	138
Tabelle 7-3:	Überblick der Produkte und Messungen für die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden .....	138
Tabelle 7-4:	Anzahl der Messungen in den vier Quadranten des Diagramms nach Abbildung 7-5 .....	144
Tabelle 7-5:	Anzahl der Messungen in den vier Quadranten des Diagramms nach Abbildung 7-8 – Darstellung der Messungen, die den 90 %-Vertrauensbereich von $\pm 2,0 \pi$ einhalten .....	147

# 1 Einleitung

Gerüche in Innenräumen können aus verschiedenen Quellen stammen. Einerseits werden sie durch den Menschen selbst eingetragen, beispielsweise durch Körpergerüche, verwendete Pflegeprodukte oder Zigarettenrauch. Andererseits hängt es von der Raumnutzung ab, ob beispielsweise im Raum gekocht wird, Duftkerzen verwendet oder lang anhaltend riechende Reinigungsmittel eingesetzt werden. Stören solche Gerüche, so lassen sie sich oft vergleichsweise einfach entfernen: Produkte oder Tätigkeiten, die den Geruch verursachen, können identifiziert und vermieden werden.

Im Gegensatz dazu verbleiben Produkte, die für den Bau oder die Einrichtung verwendet werden, zumeist dauerhaft im Innenraum und können über Monate oder sogar Jahre hinweg riechen. Diese oft als unangenehm empfundenen Gerüche können einen erheblichen Einfluss auf die Gesundheit sowie das Wohlbefinden der Raumnutzenden haben und ihre Beseitigung stellt ein Problem dar.

Die Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik in Mannheim nimmt Meldungen entgegen, bei denen ein Verdacht auf eine Berufskrankheit durch die Nutzung von Innenräumen besteht. Dabei hat die Anzahl der Meldungen in den letzten Jahren zugenommen und es werden fast durchweg unangenehme Gerüche gemeldet (Mayer, 2013).

Eine nicht repräsentative Umfrage des Umweltbundesamtes zum Thema Geruch ergab, dass sich von etwa 300 teilnehmenden Personen 75 % durch Gerüche belästigt fühlten und diese als unangenehm oder sehr unangenehm beschrieben. Als Hauptquellen für Gerüche wurden Bauprodukte und Einrichtungsgegenstände wie Bodenbeläge, Wandfarben und Möbel genannt (Umweltbundesamt, 2020). Die Gerüche werden durch Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) aus diesen Produkten verursacht.

Seit 1997 existiert in Deutschland der Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB), der bestrebt ist, die Emissionen aus Bauprodukten zu senken. Bereits im Jahr 2000 stellte der Ausschuss Kriterien für deren Prüfung und Bewertung auf. Die veröffentlichten „Anforderungen an die Innenraumluftqualität in Gebäuden: Gesundheitliche Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, SVOC und SVOC) aus Bauprodukten“ (AgBB, 2021) werden seitdem kontinuierlich aktualisiert. Das Umweltzeichen Blauer Engel hat die Prüfung in vielen Vergabekriterien für innenraumrelevante Bauprodukte übernommen und stellt dabei noch höhere Anforderungen an die maximal zulässigen VOC-Emissionen, um nur emissionsarme Produkte auszuzeichnen. Diese Bestrebungen haben dazu geführt, dass Hersteller ihre Produkte optimieren konnten und Verbraucherinnen und Verbraucher in die Lage versetzt wurden, emissionsarme Produkte auszuwählen. Insgesamt hat dies dazu geführt, dass die VOC-Emissionen aus Bauprodukten in den letzten Jahren erfreulicherweise zwar deutlich abgenommen haben, jedoch die Geruchsbelastung etwa gleich geblieben ist (B. Müller et al., 2019). Die zunehmende Luftdichtheit der Gebäudehülle durch die energieeffiziente Bauweise der letzten Jahre hat sogar dazu geführt, dass vermehrt gesundheitliche Beschwerden in Bezug auf die Raumluftqualität auftraten (B. Müller et al., 2016).

Bei Belastungen durch Gerüche liefert die analytische Ermittlung der VOC-Emissionen häufig keinen Anhaltspunkt. Dies deckt sich auch mit Raumlufthuntersuchungen, bei denen niedrige gemessene VOC-Konzentrationen fern von toxikologisch begründeten Grenzwerten zu gesundheitlichen Beschwerden führen. Die Erkenntnisse aus Forschung und Praxis zeigen, dass zwischen den VOC-Konzentrationen und dem Geruch meist kein direkter Zusammenhang besteht (Brosig et al., 2014; Mayer, 2013; B. Müller et al., 2019).

Chemische und physikalische Methoden sind oft unempfindlich für Gerüche und Reizwirkungen von Luftschadstoffen, und auch die biologischen Wirkungen von Kombinationen einzelner Verbindungen können nicht sinnvoll erfasst werden (ECA, 1999). Der menschliche Geruchssinn ist in der Lage, Geruchsstoffe in sehr geringen Konzentrationen wahrzunehmen, die messtechnisch nicht erfasst werden können, oder er ist für bestimmte Substanzen vollkommen unempfindlich (Ilvonen et al., 2015; Sucker et al., 2014). Oft liegen Geruchsstoffe in Stoffgemischen vor, wobei der Geruch des Stoffgemisches unvorhersehbar ist. Die Geruchswirkung der Komponenten kann durch gegenseitige Beeinflussung aufgehoben oder verstärkt werden (LfU, 2020). Die Gerüche addieren sich nicht und können sich sogar gegenseitig durch sogenanntes Maskieren völlig auslöschen (Mücke & Lemmen, 2010). Nur in einigen Fällen lassen sich Geruchsstoffe durch die Anwendung kombinierter technisch-sensorischer Verfahren, wie der Gaschromatographie-Olfaktometrie, aus den Emissionen von Bauprodukten identifizieren (Burdack-Freitag et al., 2015).

Die Wahrnehmung des Geruchs selbst stellt keinen toxischen Wirkungsendpunkt dar (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte, 2014), das heißt, sie sagt nichts darüber aus, ob eine gesundheitsschädliche Wirkung ausgelöst wird. Allerdings wird sie oft mit der Besorgnis verbunden, dass es sich um gefährliche Stoffe handeln könnte, was eine erhöhte Aufmerksamkeit und Anspannung verursacht und zu physiologischen Veränderungen führen kann (Mayer, 2013). Die Betroffenen beschreiben unspezifische Symptome des Sick Building Syndroms, wie Reizung der Augen, Nase und des Rachens, Hautausschläge, Kopfschmerzen und häufige Atemwegsinfekte (Mayer, 2013; VDI, 2015). Ein Einfluss auf die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit konnte ebenfalls nachgewiesen werden. In Laborexperimenten und Feldversuchen zum Einfluss von Emissionen aus Teppichböden auf die Arbeitsleistung von Büroangestellten wurde ein Leistungsabfall und eine sinkende Zufriedenheit gemessen (Wyon & Wargocki, 2006).

Neben den Auswirkungen auf die Gesundheit haben Bauprodukte, die Emissionen und Gerüche verursachen, auch in Bezug auf die Energieeffizienz von Gebäuden eine Bedeutung. Der Anteil am jährlichen Gesamtenergiebedarf der Europäischen Union im Gebäudebereich beträgt 40 %. Die Mitgliedstaaten haben sich daher gemäß der europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD, 2018) verpflichtet, bis 2050 langfristige Renovierungsstrategien für öffentliche und private Gebäude festzulegen. Das Ziel ist es, deren Umbau in Niedrigstenergiegebäude, also Gebäude mit einem fast bei null liegendem oder sehr geringem Energiebedarf, zu erleichtern. Darüber hinaus dürfen Neubauten seit 2021 nur noch nach dem Niedrigstenergiestandard gebaut werden.

Das Ziel der energieeffizienten Bauweise, einhergehend mit besserer Wärmedämmung und dicht schließenden Fenstern und Türen, ist eine dichte Gebäudehülle. Wenn in energetisch effizienten Gebäuden mit geringem Luftwechsel aufgrund von Gerüchen häufiger manuell

gelüftet wird (meist durch unkontrollierte Fensterlüftung), nimmt der Energiebedarf des Gebäudes zu (Panašková, 2012). Dies kann zudem die Behaglichkeit für die Nutzenden durch sinkende Temperaturen im Raum oder unerwünschte Luftströmungen beeinflussen und gesundheitliche Probleme verursachen (Fisk & Seppänen, 2007). Der Einsatz emissionsarmer Bauprodukte kann die Betriebskosten in Wohngebäuden senken (Babich et al., 2020).

Um den Einsatz emissionsarmer Bauprodukte zu fördern und die Energieeffizienz von Gebäuden auslegen und bewerten zu können, legt die Norm DIN EN 16798-1 (DIN, 2022b) Eingangsparmeter für das Innenraumluftklima, darunter die Raumluftqualität, fest. Gebäude gelten nur dann als schadstoffarm oder sehr schadstoffarm, wenn die in Innenräumen verwendeten Bauprodukte größtenteils emissionsarm oder sehr emissionsarm sind. In Emissionstests ermittelte VOC-Konzentrationen dürfen definierte Werte nicht überschreiten.

Da insgesamt die analytischen Methoden für die Geruchsbewertung nicht hilfreich sind und Gerüche Auswirkungen auf die Gesundheit der Raumnutzenden sowie auf die Energieeffizienz von Gebäuden haben, ist die sensorische Prüfung von Bauprodukten seit der ersten Veröffentlichung des AgBB-Schemas vorgesehen (AgBB, 2003). Jedoch bestanden unterschiedliche Auffassungen darüber, wie der Geruch optimal erfasst werden kann und in den folgenden Jahren wurde in verschiedenen Forschungsprojekten und in der Normungsarbeit an der Verfahrensentwicklung gearbeitet (Umweltbundesamt, 2015).

Seit 2012 steht mit der DIN ISO 16000-28 eine international anerkannte Norm zur Verfügung, die die sensorische Messung von Bauprodukten unter Verwendung von Emissionsprüfkammern beschreibt. Seit 2015 gibt es zudem mit der Richtlinie VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) eine nationale Richtlinie, die ergänzende Messanforderungen zur Norm festlegt. Der AgBB hat die sensorische Prüfung nach diesen Methoden 2018 in das Bewertungsschema aufgenommen und ein vorläufiges Beurteilungskriterium festgelegt. Damit wird nun das vollständige Emissionsverhalten von Bauprodukten mithilfe von Messungen zur Ermittlung der VOC-Emissionen und sensorischen Prüfungen bewertet. Die sensorische Prüfung erfolgt zunächst auf freiwilliger Basis, da das Messverfahren der Norm und die Bewertungsmethodik weiter zu präzisieren sind und bislang wenige Untersuchungen vorliegen (AgBB, 2021). Um sensorische Prüfungen zu etablieren, ist der Blaue Engel den Empfehlungen des AgBB gefolgt und hat die sensorische Prüfung und Bewertung in eine Reihe von Vergabekriterien für Produkte im Innenraum aufgenommen, bisher allerdings meist noch nicht als potenzielles Ausschlusskriterium.

Aus den beschriebenen Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutzes ist es wichtig, die Anwendung der sensorischen Prüfung von Bauprodukten weiter voran zu bringen. Die Prüfung und Verwendung von emissions- und geruchsarmen Bauprodukten ist entscheidend für die Gewährleistung einer gesunden Raumluft und einen energieeffizienten Gebäudebetrieb. Eine Weiterentwicklung der Methode, hinsichtlich einer Erhöhung der Präzision und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, kann dabei hilfreich sein. Die Zielsetzungen dieser Arbeit setzen genau an dieser Stelle an.

## 2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit sollten die folgenden zwei Forschungsziele zur Weiterentwicklung der Messmethode gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) bearbeitet werden:

1. Weiterentwicklung der Probendarbietung mit dem Ziel, den Einfluss der Art der Probendarbietung auf das Messergebnis zu reduzieren. Hierzu wird ein Adapter entwickelt, gebaut und auf seine Funktionsfähigkeit hin geprüft (KAPITEL 2.1).
2. Vereinfachung der Bewertung der empfundenen Intensität mit dem Ziel, den Messaufwand und damit verbundene Messunsicherheiten bei der Bewertung zu reduzieren. Ein Vorschlag zur vereinfachten Bewertung der empfundenen Intensität wird entwickelt und auf seine Anwendbarkeit überprüft (KAPITEL 2.2).

### 2.1 Weiterentwicklung der Probendarbietung mit einem Adapter

Für die Geruchsmessung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) wird das zu untersuchende Prüfstück unter vorgegebenen Bedingungen in Bezug auf Temperatur und relative Luftfeuchte sowie einem gemäß DIN EN 16516 (DIN, 2020) festgelegtem Emissionsszenario, also unter den Bedingungen, die in einem realen Raum zu erwarten sind, in eine Emissionsprüfkammer eingebracht. Am Tag der Geruchsprüfung wird die Abluft der Prüfkammer einer Prüfergruppe zur Bewertung dargeboten. Dabei muss sichergestellt werden, dass ein ausreichender und konstanter Luftvolumenstrom von 0,6 bis 1,0 l/s zur Verfügung steht, um zu verhindern, dass Umgebungsluft beim Riechen angesaugt und die Probenluft verdünnt wird. Werden für die Messungen Emissionsprüfkammern ab einem Volumen von 3 m<sup>3</sup> genutzt, so wird dieser Luftvolumenstrom an der Abluft der Prüfkammer erreicht. Dort kann ein Trichter für eine direkte Geruchsbewertung angebracht werden (Abbildung 2-1 b). Da die Prüflabore üblicherweise kleinere Emissionsprüfkammern für die Geruchsprüfungen nutzen, mit denen dieser Volumenstrom nicht erreicht werden kann, ist die direkte Bewertung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) meist nicht möglich und wird daher nur als alternatives Verfahren beschrieben. Beim Standardverfahren der Geruchsbewertung werden flexible Probenbehälter aus dafür zugelassenen Materialien verwendet, die die Probenluft nicht durch eigene Emissionen verändern können und die geruchsarm sind. Diese werden in einem ersten Schritt an der Abluft der Emissionsprüfkammer mit Probenluft gefüllt und in einem zweiten Schritt in ein Darbietungssystem mit luftdichtem Gehäuse eingebracht, wobei die Öffnung in Richtung des angeschlossenen Trichters platziert wird (Abbildung 2-1 a). Durch Betätigung eines Tasters wird ein Ventilator gestartet, das einen Überdruck im Gehäuse erzeugt und das Volumen des Probenbehälters verkleinert. Die Probenluft strömt so mit dem erforderlichen Luftvolumenstrom von 0,6 bis 1,0 l/s in Richtung Trichter aus.

Das Material der Probenbehälter darf die Probenluft nicht durch eigene Emissionen verändern und muss geruchsarm sein. Da Durchlässigkeits- und Adsorptionseffekte zum Verlust geruchsrelevanter Substanzen führen können, werden die Materialien in einem analytischen und sensorischen Validierungsverfahren untersucht, bevor ihre Anwendung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) zugelassen wird. Bisher dürfen die Materialien Polyethylenterephthalat (PET, Nalophan®) und Polyvinylfluorid (PVF, Tedlar®) verwendet werden. Die Behälter selbst müssen auf Luftdichtheit geprüft und je nach Material vorbehandelt werden, um Hintergrundgerüche zu vermeiden und einen

Gleichgewichtszustand zwischen Adsorption und Desorption an der inneren Oberfläche des Behältermaterials zu erreichen.

Verschiedene Studien zeigen, dass die Art der Geruchsbewertung Einfluss auf die sensorische Bewertung der empfundenen Intensität  $I$  hat. Bei der Verwendung von Probenbehältern kann es zum Verlust geruchsrelevanter Substanzen kommen, und je nach verwendetem Verfahren (Standardverfahren oder direktes Verfahren) kann es Unterschiede in der Bewertung geben. Die meisten Messungen sind zwar verlässlich, jedoch wäre eine direkte Geruchsbewertung eigentlich zu bevorzugen. Diese ist jedoch in den meisten Fällen nicht möglich und die Verluste müssen in Kauf genommen werden.

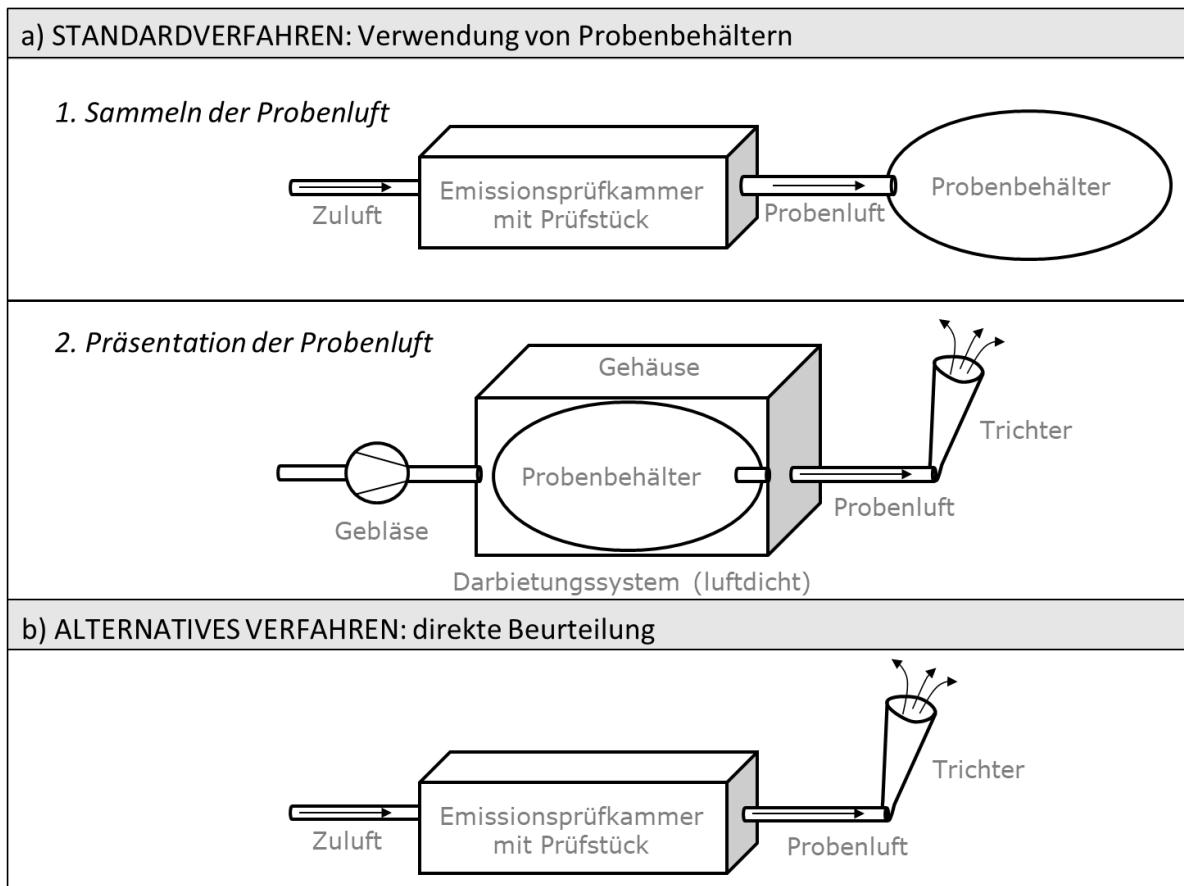


Abbildung 2-1: Geruchsbewertungsverfahren gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021): a) Standardverfahren, b) alternatives Verfahren

Ziel dieser Arbeit sollte es sein, die Geruchsbewertung ähnlich wie bei der direkten Messung auch bei Verwendung kleinerer Emissionsprüfkammern als  $3 \text{ m}^3$  durchführen zu können, indem zur Reduzierung möglicher Verluste die Sammlung und Darbietung von Probenluft in nur einem Schritt ermöglicht wird. Wie Abbildung 2-2 zeigt, soll zu diesem Zweck ein Probenbehälter als Puffer am Auslass der Emissionsprüfkammer dauerhaft positioniert werden, um mit Probenluft gefüllt und ständig durchströmt zu werden. Nur zum Zeitpunkt der Probenahme soll die Befüllung bzw. Durchströmung kurzfristig unterbrochen werden, um eine ausreichend große Menge Probenluft für die Geruchsbewertung zur Verfügung zu stellen. Da Probenahme und -darbietung dabei technisch miteinander verbunden werden und eine Erhöhung des Volumenstroms auf  $0,6$  und  $1,0 \text{ l/s}$  erfolgt, wird das System Adapter genannt.

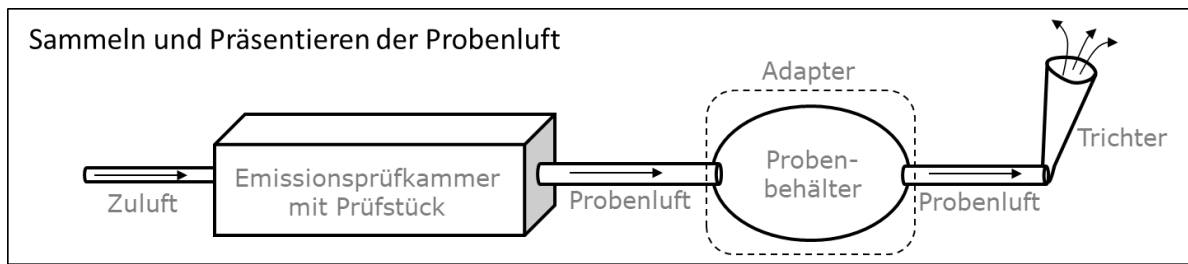


Abbildung 2-2: Idee zur Weiterentwicklung der Geruchsbewertungsverfahren gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) durch Verwendung eines Adapters

Da die Probenluft bei Verwendung eines Adapters im Vergleich zum üblicherweise angewandten Standardverfahren der Geruchsbewertung eine geringere Lagerzeit erfährt, wird angenommen, dass Verluste geruchsaktiver Substanzen dadurch reduziert werden können und die Probenluft für die Bewertung wenig verändert oder sogar unverändert vorliegen kann.

Der Adapter sollte entwickelt, gebaut, in sensorischen und analytischen Messungen untersucht und je nach Ergebnis weiter optimiert werden. Die Durchführung der Messungen wird präzise beschrieben, um seine Anwendung im Rahmen der Messungen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) bei der nächsten Überarbeitung der Norm vorzuschlagen und möglichst in diese zu integrieren. Voraussetzung dafür ist, dass sich in den Untersuchungen zeigt, dass der Adapter geeignet ist, die Reproduzierbarkeit von Geruchsmessungen zu verbessern.

## 2.2 Vereinfachte Bewertung der empfundenen Intensität

Es gibt verschiedene Messgrößen, mit denen die Geruchsbewertung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) erfolgen kann. In Deutschland ist die Messung der empfundenen Intensität  $\Pi$  mit der Einheit  $\pi$  („pi“ ist die Abkürzung für perceived intensity) üblich, wobei mittels eines Vergleichsmaßstabes der Einfluss der subjektiven Geruchsempfindung auf das Messergebnis minimiert werden kann. Am Maßstab strömen an mindestens sechs Trichtern Luftgemische aus, denen die Referenzsubstanz Aceton in mehreren definierten Konzentrationen beigemischt wurde. Die Konzentrationen werden in aufsteigender Reihenfolge dargeboten, wobei die niedrigste Konzentration 20 mg Aceton pro Kubikmeter Luft ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) beträgt, was einer empfundenen Intensität von 0  $\pi$  beträgt und die Wahrnehmungsschwelle von Aceton darstellt. Die höchste Konzentration, die standardgemäß darzubieten ist, beträgt 320  $\text{mg}/\text{m}^3$ , was einer empfundenen Intensität von 15  $\pi$  entspricht. Die Intensitäten von 0 bis 15  $\pi$  liegen im Bereich üblicher Intensitäten von Bauprodukten zur Verwendung im Innenraum. Sollte es Produkte geben, die intensiver wahrgenommen werden, kann die Darbietung höherer Acetonintensitäten bis maximal 20  $\pi$  erfolgen. Der Zusammenhang zwischen eingestellter Acetonkonzentration und empfundener Intensität ist linear (B. Müller et al., 2019). Eine Prüfergruppe, die in einem 5-tägigen Verfahren eigens darauf geschult wurde, vergleicht die dargebotenen Acetonintensitäten mit der Intensität der Probenluft und ordnet diese ein. Aus den mit dieser Referenzmethode ermittelten Einzelwerten lässt sich der Mittelwert der empfundenen Intensität der Probenluft bestimmen.

Für die Ermittlung der empfundenen Intensität war in der alten Fassung der DIN ISO 16000-28 von 2012 eine Mindestzahl von 8 Prüfenden vorgegeben und die Genauigkeit der Bewertung, ausgedrückt durch den 90 %-Vertrauensbereich, musste bei

$\pm 2,0$  pi liegen (DIN, 2012a). Da die geforderte Genauigkeit der Bewertung bei vielen Messungen nicht erreicht werden konnte, wird nun eine Gruppengröße von 12 bis 15 Personen empfohlen, um mindestens 10 verwertbare Messergebnisse zu erzielen. Falls dabei die Anforderung an den Vertrauensbereich nicht erfüllt werden kann, ist dies gemäß aktueller Fassung im Prüfbericht zu dokumentieren (DIN, 2021).

Mit der nun größeren empfohlenen Gruppengröße steigt jedoch der Messaufwand für die ohnehin schon aufwendige Geruchsprüfung. Auch kann es vorkommen, dass der geforderte 90 %-Vertrauensbereich bei einer Messung dennoch nicht erreicht wird. Im Rahmen dieser Arbeit sollte daher eine Idee zur Vereinfachung der Bewertung der empfundenen Intensität am Vergleichsmaßstab untersucht werden, mit der sich der Messaufwand für die Ermittlung der empfundenen Intensität reduzieren lässt.

Die Bewertung der empfundenen Intensität erfolgt nach dem Schema des AgBB, laut dem eine unzumutbare Belästigung gegeben ist, wenn mehr als 30 % einer nicht geschulten Gruppe von Befragten einen Geruch als unzumutbar beurteilen. Daraus ableitend und aus gesundheitlichen Aspekten setzt der AgBB eine empfundene Intensität von 7 pi nach 28 Tagen als vorläufiges Beurteilungskriterium an (AgBB, 2021).

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird daraus abgeleitet, dass ein Bauprodukt zur Verwendung im Innenraum ungeeignet ist, wenn mehr als 30 % einer Gruppe von Befragten angeben, den Geruch einer Probe intensiver als eine zum Vergleich angebotene Acetonkonzentration von 7 pi zu empfinden. Für die Ermittlung der sensorischen Eignung von Bauprodukten für den Innenraum ist letztlich wichtig zu wissen, ob ein Bauprodukt eine empfundene Intensität von  $\leq 7$  pi oder  $> 7$  pi am 28. Tag nach Beginn der Messung aufweist. Die Kenntnis über den genauen Wert, wie er mit der Referenzmethode gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ermittelt wird, ist nicht erforderlich.

Um dies zu untersuchen, wird den Prüfenden eine Acetonintensität von 7 pi ( $160 \text{ mg/m}^3$ ) an einem der Trichter des Vergleichsmaßstabes angeboten. Sie sollen ermitteln, ob die Probenluft im Vergleich dazu intensiver ( $>$ ) oder weniger bis gleich intensiv ( $\leq$ ) wahrgenommen wird. Die Geruchsintensität einer Probe wird damit in einen von zwei möglichen Bereichen eingeordnet. Die vereinfachte Messung wird „Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage“ genannt.

Ziel der Untersuchungen sollte es sein, zu prüfen, ob das vereinfachte Verfahren zur sensorischen Bewertung von Bauprodukten geeignet ist und inwieweit eine Anwendung möglich ist. Zur Erreichung valider Ergebnisse sollte eine hohe Anzahl an Messungen durchgeführt werden. Es sollte auch geprüft werden, ob sich der Messaufwand der Geruchsprüfung in Bezug auf das notwendige Messequipment, die Aufgabe für die Prüfenden und den erforderlichen Schulungsbedarf vereinfachen lässt. Darüber hinaus sollte eine Empfehlung für die notwendige Größe der Prüfergruppe erarbeitet werden. Wenn sich die vereinfachte Messung als hilfreich erweist, kann sie für eine Anwendung in der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) vorgeschlagen werden.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Geruchsstoffe und Geruchswahrnehmung

Dieses Kapitel beschreibt die Merkmale von Geruchsstoffen sowie den Aufbau und die Funktionsweise des olfaktorischen Systems des Menschen. Dargelegt werden auch der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Geruchswahrnehmung sowie die Zusammenhänge zwischen der Stärke eines Reizes und der wahrgenommenen Intensität eines Geruchs.

Geruchsstoffe sind Stoffe in der Luft, die vom olfaktorischen System wahrgenommen werden können, wobei es sich meist um flüchtige organische Verbindungen (VOC) handelt, die in aliphatische Kohlenwasserstoffe, Terpene, aromatische Verbindungen, organische Schwefel- und Stickstoffverbindungen eingeteilt werden können (Mücke & Lemmen, 2010). Im Allgemeinen handelt es sich um Substanzen mit Molekulargewichten unter 350 g/mol, die hydrophile und lipophile Eigenschaften aufweisen (Roßmann, 2004). Auch die Art des Isomers eines Moleküls und seine Konzentration haben einen Einfluss auf die Geruchswahrnehmung und die Qualität eines Geruchs (Albrecht & Wiesmann, 2006), wobei ein genereller Zusammenhang zwischen der Molekülstruktur und der Geruchswahrnehmung nicht bekannt ist.

Bei jedem Atemzug strömen Geruchsstoffe aus der Umgebung und aus dem Mundraum in die Nase ein und erreichen die Riechschleimhaut (olfaktorisches Epithel) im oberen Bereich der Nasenhöhle. Dieses auf beiden Seiten der Nasenscheidewand insgesamt etwa 5 cm<sup>2</sup> große Feld ist mit etwa 10-30 Millionen Riechzellen (Mücke & Lemmen, 2010) ausgestattet und bildet die einzige Stelle im menschlichen Organismus, an der das zentrale Nervensystem in direktem Kontakt mit der Außenwelt steht (Albrecht & Wiesmann, 2006). Geruchsstoffe können sich aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit in der Schleimhaut lösen. Ihre Fettlöslichkeit sowie eine spezifische dreidimensionale Struktur ermöglichen es ihnen, sich an die Riechzellen zu binden. Die Riechzellen sind Sinneszellen, die als bipolare Nervenzellen einen chemischen Reiz, der durch einen Geruchsstoff an den Dendriten ausgelöst wird, in ein elektrisches Signal umwandeln und dieses über ihren Zellkörper als elektrische Erregung in der Nervenfasern (Axon) weiterleiten. Neben den eigentlichen Riechzellen besteht die Riechschleimhaut aus Stützzellen zur Stabilisierung der Schleimhaut und Basalzellen, welche die Riechzellen, die nur etwa einen Monat existieren, erneuern. Spüldrüsen sorgen dafür, dass Geruchsstoffe wieder durch abfließenden Schleim von der Schleimhaut entfernt werden können (Schünke & Faller, 2016). Abbildung 3-1 zeigt den Aufbau des Riechepithels und die Weiterleitung des olfaktorischen Reizes zum zentralen Nervensystem.

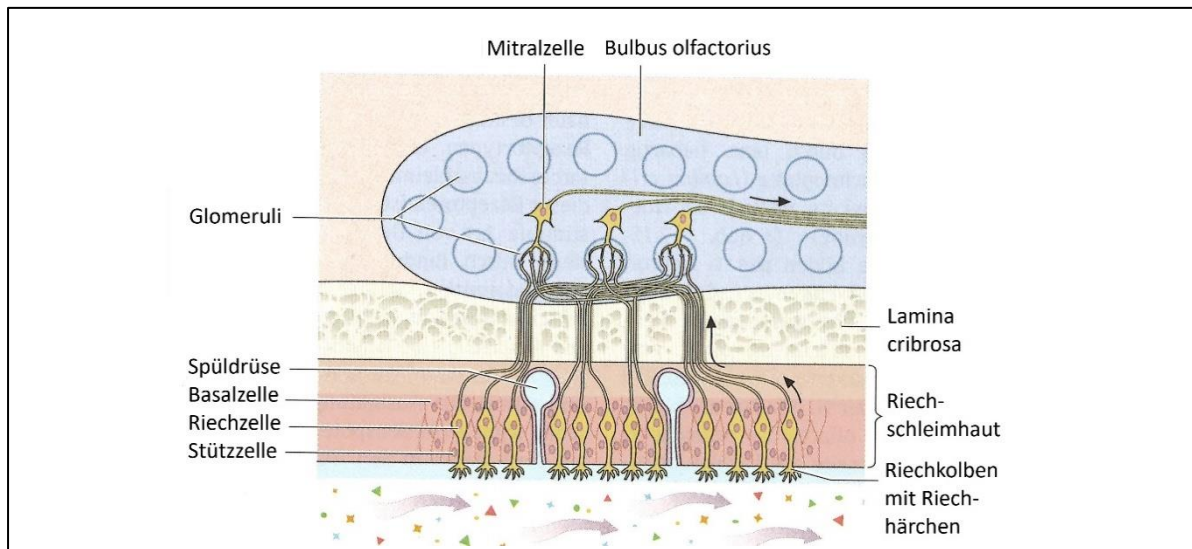


Abbildung 3-1: Aufbau der Riechschleimhaut und Weiterleitung der olfaktorischen Signale zum Bulbus olfactorius (Schünke & Faller, 2016)

An der Oberfläche des Riechepithels enden die Dendriten der Riechzelle. Auf ihnen sind feine Riechhärchen (Cilien) verteilt, an deren Membranaußenseite die Geruchsstoffrezeptoren verankert sind, wobei jede Riechzelle in der Regel genau einen speziellen Rezeptor synthetisiert. Durch die Bindung von Geruchsstoffen mit bestimmter chemischer Struktur an den Rezeptor wird dieser aktiviert und löst eine Signalkaskade aus, durch welche die Ionenkanäle in der Membran geöffnet werden, Natrium- und Calciumionen einströmen können und ein Aktionspotenzial in der Riechzelle entstehen lassen. Bereits kleine Geruchsstoffkonzentrationen und die damit verbundene Aktivierung nur eines Rezeptors reicht zur Auslösung des Aktionspotenzials aus (Albrecht & Wiesmann, 2006; Mücke & Lemmen, 2010).

Schätzungen gehen davon aus, dass der Mensch über etwa 360 Typen von funktionstüchtigen Geruchsrezeptoren verfügt, die zufällig über die Schleimhaut verteilt sind, womit er in der Lage ist, etwa 10 000 verschiedene Geruchstoffmoleküle (Albrecht & Wiesmann, 2006) wahrzunehmen. Dies wird ermöglicht, weil ein Geruchstoff nicht nur einen Rezeptor aktiviert, sondern eine große Anzahl an Rezeptoren mit unterschiedlicher Intensität. Umgekehrt kann ein Rezeptor von funktionellen Gruppen verschiedener Geruchsstoffe aktiviert werden. Gerüche entstehen meist aus einer komplexen Mischung verschiedener Geruchsstoffe und aktivieren unterschiedliche Kombinationen von Rezeptoren, wodurch ein charakteristisches Muster an Nervenaktivitäten entsteht. Bei einem Alltagsgeruch, der aus vielen Geruchsstoffen besteht - so setzt sich z. B. das Aroma von Kaffee aus bis zu 800 Geruchsstoffen zusammen - wird etwa die Hälfte der Rezeptortypen aktiviert (Albrecht & Wiesmann, 2006).

Die Axone der Riechzellen führen gebündelt durch die Löcher des Siebbeins (Lamina cribrosa) in den Schädel und enden oberhalb der Nasenwurzel in einer Verdickung des Riechnervs, dem Riechkolben (Bulbus olfactorius). Im Riechkolben, der bereits Teil des Gehirns ist, befinden sich etwa 1000 – 2000 Zellknäuel (Schünke & Faller, 2016), die Glomeruli, welche als Sammelstellen für die Signale eines Rezeptortyps fungieren und diese über synaptische Verschaltungen mit Mitralzellen in höhere Zentren des Gehirns als Aktivitätsmuster weiterleiten. Die Zusammenführung der Signale auf wenige Glomeruli ermöglicht die Identifikation von Gerüchen im Gehirn.

Die Signale werden im Großhirn zu einem bestimmten Geruch zusammengesetzt und gelangen so ins Bewusstsein. Das limbische System verarbeitet den Geruch und bewertet ihn, z. B. ob dieser angenehm oder unangenehm ist, und verknüpft ihn mit Erinnerungen und Gefühlen (Schünke & Faller, 2016). Verschiedene Hirnareale (insbesondere die sehr alten Areale im Hirnstamm) bilden die Grundlage für ein Netzwerk für hervorgerufene Einflüsse auf das Verhalten, endokrine Regulationen, autonome Systeme (Nahrungsaufnahme), die Emotionen und die Bildung von Erinnerungen (Albrecht & Wiesmann, 2006).

Im Riechkolben entsteht also ein charakteristisches räumliches und zeitliches Aktivitätsmuster für jeden Geruchsstoff (Waldeck & Frings, 2005), aus dem der zugrundeliegende Geruch vom Gehirn wahrscheinlich abgeleitet wird. Wie allerdings das Aktivitätsmuster des Bulbus olfactorius auf die weiteren Strukturen des Riechhirns übersetzt wird, also wie die Verarbeitung zum Geruchseindruck erfolgt, ist noch nicht geklärt (Mücke & Lemmen, 2010).

Die Prozesse der Geruchswahrnehmung und insbesondere die Verarbeitung im zentralen Nervensystem sind bislang erst teilweise aufgeklärt. Erst 2004 erhielt eine Gruppe von Neurowissenschaftlern den Nobelpreis für neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Forschung zur olfaktorischen Wahrnehmung. Der Aufsatz zeigt auf, dass es schon viel Wissen über die räumlichen Projektionen, die Geruchsstoffe im zentralen Nervensystem abbilden, gibt, jedoch herrscht weiterhin große Unklarheit darüber wie das Gehirn das Geruchsbild auswertet. „*Wie wird die räumliche Anordnung von Datenpunkten mit elektrischer Information im Gehirn entschlüsselt, um einen Geruch wahrzunehmen?*“ ist eine der formulierten Schlussfragen des Autors (Axel, 2005).

Nahezu alle Geruchsstoffe wirken neben dem Bulbus olfactorius auch auf den Trigeminierv, welcher Reize wie Schmerz, Temperatur, Berührung und Druck im Bereich des Gesichtes an das Gehirn weiterleitet. Auch auf der Riechschleimhaut und über die Nasenhöhle verteilt befinden sich trigeminale Nervenfasern, womit Geruchsstoffe sensorische Reizwirkungen hervorrufen können, die eher eine Schmerz- als eine Geruchswahrnehmung auslösen (Altenburger et al., 2016). Das trigeminale System hat die Aufgabe durch die Auslösung von Reflexen (z. B. Atem anhalten, Augenlider schließen) vor Schmerzen zu schützen (Mücke & Lemmen, 2010).

Die Sinneswahrnehmung von Gerüchen weist gemäß DIN EN 13725 (DIN, 2022a) die vier Hauptdimensionen Wahrnehmungsschwelle, Intensität, Qualität und Hedonik auf. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

- Die Wahrnehmungsschwelle ist festgelegt als die theoretische Mindestkonzentration eines Geruchsstoffes, welche bei einer Gruppe von Testpersonen mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % eine Geruchsempfindung auslöst. Eine Erkennung, um welchen Geruch es sich handelt, ist meist erst bei Konzentrationen möglich, die um den Faktor 2 bis 3 höher liegen (LfU, 2020).
- Die Intensität, also die Stärke der Geruchsempfindung, nimmt mit steigenden Konzentrationen zu, wobei es auch Ausnahmen gibt (Mücke & Lemmen, 2010). Der Zusammenhang zwischen der Stärke eines Reizes und der wahrgenommenen Intensität im 19. Jahrhundert wurde messtechnisch erstmalig von Weber untersucht (Schmidt et al., 1997). Er konnte für unterschiedliche Sinneswahrnehmungen zeigen, dass die

Wahrnehmung eines Reizes sich erst ändert, wenn die Reizstärke um einen bestimmten Bruchteil des Ausgangsreizes angestiegen ist. Diese notwendige Zunahme der Reizstärke ist im großen Bereich der mittleren Reizstärken konstant und beträgt je nach Art des Sinnes zwischen 7 und 12 % (Bitter et al., 2008). Fechner entwickelte diesen Zusammenhang weiter und veröffentlichte 1860 mit dem Weber-Fechner-Gesetz einen mathematischen Zusammenhang, der aussagt, dass eine lineare Zunahme der Reizstärke zu einer logarithmischen Zunahme der Empfindungsstärke führt (Bitter et al., 2008).

- Die Geruchsqualität sagt aus, wonach ein Geruchsstoff riecht. Es gibt viele Systeme, die versuchen eine Klassifizierung von Gerüchen durch ihre verbale Beschreibung vorzunehmen, wobei die Einteilung der Grundgerüche nach Amoore häufig benannt wird. Dieses unterteilt Gerüche in die sieben Primärgerüche kampferartig, moschusartig, blumig, minzig, ätherisch, schweißig und faulig, wobei alle anderen Gerüche Mischungen daraus sein sollen (Amoore et al., 1964). Bei jedem Versuch einer Klassifizierung gibt es jedoch die Schwierigkeit, eine Geruchswahrnehmung in Sprache zu übersetzen. Eine klare und eindeutige Klassifizierung konnte bis heute nicht erreicht werden (Mücke & Lemmen, 2010). Bei der Beschreibung von Gerüchen kann man sich nur z. B. mit der Angabe der Geruchsquelle oder durch Vergleichen mit bekannten Gerüchen behelfen. Der Geruchssinn kann deutlich besser unterscheiden, als dass dies mit Worten ausgedrückt werden kann. Dennoch sind solche Klassifizierungen hilfreich, um der Qualität eines Geruchs und seiner möglichen Belästigungswirkung auf den Grund zu gehen. Die Firma Olfasense hat zu diesem Zweck ein Geruchsrads entwickelt, mit dessen Hilfe Geruchsprüfende unterstützt werden, den Charakter eines Geruches beschreiben zu können (Olfasense GmbH, o.J.). Insgesamt 64 Gerüche werden darin beschrieben und stehen als Geruchsstifte (Sniffing Sticks) zum Vergleich mit Raumluchtgerüchen zur Verfügung. Für die Beurteilung von Innenräumen stellt die Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e. V. (AGÖF) dar, dass die Beschreibung der Gerüche bei der Ursachenfindung bei Geruchsbeschwerden hilft, um diese beseitigen zu können (Braun et al., 2013).
- Mit der Hedonik (von altgriechisch *hedone* = Freude, Lust) wird beschrieben, ob ein Geruch als angenehm oder unangenehm empfunden wird. Ihre Bewertung nehmen Menschen durch den Vergleich mit früher wahrgenommenen Gerüchen und der damit verbundenen emotionalen Wirkung vor, wodurch sie stark von persönlichen und kulturellen Erfahrungen abhängt (Bitter et al., 2008; Mücke & Lemmen, 2010). Weil unangenehme Gerüche häufiger belästigend wirken als angenehme (LfU, 2020), spielt die Hedonik eine große Rolle bei der Beurteilung von Gerüchen.

Das Riechvermögen kann durch vielfältige Auslöser vorübergehend oder dauerhaft gestört werden (Speth et al., 2022). Dazu zählen das Alter (ältere Menschen haben häufiger Riechstörungen), Erkrankungen im Nasenbereich oder den Nasennebenhöhlen, akute Infektionen der Nasenhöhle, neurologische Erkrankungen, Umweltfaktoren und Medikamente. Riechstörungen sind weit verbreitet: etwa 3 bis 5 % der allgemeinen Bevölkerung haben ihren Geruch komplett verloren (Anosmie) und etwa 15 bis 25 % leben mit einem verminderten oder veränderten Riechvermögen durch eine teilweise Einschränkung des Riechsinnnes (Hyposmie).

Bei einer andauernden Stimulierung der Riechzellen durch einen Geruchsreiz kommt es zur Adaptation. Die Reizschwelle für den Reiz steigt an und die Empfindlichkeit der Wahrnehmung nimmt ab (Schmidt et al., 1997). Bei lang anhaltenden und intensiven Reizen kann die Wahrnehmung des Geruchsreizes sogar vollständig verschwinden, wobei dieser Effekt nach einer gewissen Erholungszeit, wieder nachlässt (Mücke & Lemmen, 2010).

Die Feuchte und die Temperatur der umgebenden Luft haben einen Einfluss auf die Geruchswahrnehmung. So konnte gezeigt werden, dass die Akzeptanz einer Luftprobe mit steigender Enthalpie, unabhängig davon, ob durch die relative Luftfeuchte oder Temperatur, sinkt (Böttcher, 2003; Fang et al., 1998). Auch auf die Wahrnehmung der Intensität besteht ein Einfluss. Sie wird bei hoher Luftfeuchte als weniger stark empfunden (Böttcher, 2003). Temperatur und Feuchte haben damit einen Einfluss auf das Ergebnis sensorischer Messungen und sollten daher in einem vorgegebenen Bereich erfolgen.

## **3.2 Sensorische Messungen**

### **3.2.1 Entwicklung**

Dieses Kapitel beschreibt die Meilensteine in der Entwicklung sensorischer Messverfahren und der Messgrößen zur Bestimmung der Luftqualität in Innenräumen, die letztendlich zur Normung des seit 2012 gültigen Verfahrens DIN ISO 16000-28 geführt haben (KAPITEL 3.2.2), welches für die Messungen in dieser Arbeit verwendet wird.

Um etwa Mitte des 19. Jahrhunderts führte der Hygieniker Pettenkofer erste Raumluftmessungen durch. Er war der Ansicht, dass schlechte Luft in Wohnungen die Widerstandsfähigkeit des Menschen schwächt und nahm an, dass der Mensch die Hauptverunreinigungsquelle ist und Kohlendioxid als Leitindikator für die Beseitigung von Gerüchen dienen kann. Aus seinen Untersuchungen schloss er, dass Luft als tauglich betrachtet werden kann, wenn eine maximale Konzentration von 1000 ppm Kohlendioxid in der Raumluft eingehalten wird (Pettenkofer, 1858). Diese Konzentration, bekannt als Pettenkofer-Zahl, wird bis heute als Leitwert zur Beurteilung der Luftqualität für natürlich belüftete Innenräume verwendet, bei deren Überschreitung eine Belüftung empfohlen wird (Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumluftthygiene, 2008).

In den 1930er Jahren führten Yaglou et al. die ersten Messungen mit Personengruppen durch, um die wahrnehmbare Qualität der Raumluft zu ermitteln (Yaglou et al., 1936; Yaglou & Witheridge, 1937). Das Ziel ihrer Untersuchungen war es, Anforderungen an die minimale Belüftung von Innenräumen zu finden. Es wurde festgestellt, dass die Kenntnis über die Kohlendioxidkonzentration allein nicht ausreicht, um die erforderliche Außenluftzufuhr für bewohnte Räume zu bestimmen. Die Messungen zeigten, dass die Geruchsintensität nicht auf ein moderates Maß reduziert werden konnte.

Erstmalig wurde eine Intensitätsskala für die Bewertung von Körpergerüchen in Räumen verwendet, die von 0 (kein wahrnehmbarer Geruch) bis 5 (überwältigend, Übelkeit erregend) reichte. Stufe 2 wurde als moderater Geruch definiert und als akzeptabel erachtet. Die Messungen zeigten, dass bei schlechter Raumluftqualität mehr Menschen unzufrieden waren als bei guter Raumluftqualität. Yaglou et al. stellten fest, dass die wahrgenommene Intensität von Körpergeruch umgekehrt logarithmisch mit der Versorgung mit frischer Außenluft

zusammenhängt, wodurch ihre Ergebnisse mit dem Weber-Fechner-Gesetz (KAPITEL 3.1) übereinstimmen.

Bislang wurde unbeachtet gelassen, dass neben dem Menschen auch andere Quellen die Raumluft verunreinigen können (KAPITEL 3.1). In den 1980er Jahren wurde von Fanger eine Methode entwickelt, die jede Verunreinigungsquelle berücksichtigen und quantifizieren kann (Fanger, 1988a, 1988b). Zur Bestimmung der Stärke einer Luftverunreinigungsquelle führte er die Einheiten „Olf“ und „Dezipol“ ein. Das Olf (lat. olfactus = Geruchssinn) bezeichnet die Geruchsstärke einer Verunreinigung, die von einer definierten Standardperson ausgeht. Ein Olf entspricht der Luftverunreinigung durch eine Standardperson. Alle anderen Verunreinigungsquellen können entsprechend der Anzahl an Standardpersonen quantifiziert werden. Um auch die Lüftungsrate zu berücksichtigen, definierte Fanger das Dezipol (lat. polutio = Verschmutzung), wobei ein Dezipol der Verschmutzung entspricht, die durch eine Standardperson (1 Olf) bei einer Ventilationsrate von 10 l/s mit frischer Luft verursacht wird. Somit kann mit dem Dezipol die wahrgenommene Luftverunreinigung quantifiziert werden.

In seinen Arbeiten ließ Fanger auch die Akzeptanz unterschiedlicher Luftqualitäten ermitteln (Fanger, 1988a, 1988b). Die befragten Personen sollten dabei entscheiden, ob sie die Luft in einem Raum direkt nach dem Betreten als akzeptabel oder unakzeptabel empfinden. Aus den Ergebnissen dieser Befragung lässt sich der prozentuale Anteil der Personen ermitteln, die mit der Luftqualität unzufrieden sind. Um die Akzeptanz genauer bestimmen zu können, wurde kurze Zeit später die Akzeptanzskala entwickelt, mit der durch eine differenzierte Betrachtung der Grad der Zufriedenheit ermittelt werden kann (Bitter et al., 2008). Es entwickelten sich unterschiedliche Skalen, die entweder kontinuierlich oder gestuft sind (Bitter et al., 2008). Einige Skalen erlauben eine neutrale Bewertung, bei der ein Geruch weder als akzeptabel noch unakzeptabel eingestuft werden kann, während andere die prüfenden Personen auffordern, zu entscheiden, ob die Luft als akzeptabel oder unakzeptabel empfunden wird. Die Ergebnisse der Messungen hängen von der Art der Skala ab, weshalb eine Umrechnung in eine andere Skala nicht möglich ist.

Sowohl die Ermittlung der Akzeptanz durch den prozentualen Anteil der mit der Luftqualität unzufriedenen Personen als auch die Bestimmung des Grades der Unzufriedenheit mithilfe einer Akzeptanzskala erfolgen im Rahmen der Bewertung von Bauproduktgerüchen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021). Die Durchführung der Akzeptanzbestimmung nach Norm wird in KAPITEL 3.2.2.1 beschrieben.

Die Akzeptanz eines Geruchs ist eng mit seiner Hedonik, also wie angenehm oder unangenehm ein Geruch empfunden wird, und mit seiner Intensität verbunden. Sehr unangenehme Gerüche werden bereits bei niedriger Intensität als unakzeptabel empfunden, während angenehme Gerüche erst bei höherer Intensität eine unakzeptable Bewertung erhalten können (Bitter et al., 2008).

Für die Bewertung der Hedonik wurde das Verfahren entwickelt, das in der *VDI-Richtlinie 3882 Blatt 2* (VDI, 1994) angewendet wird. Es nutzt die in Abbildung 3-2 dargestellte Kategorienskala. Diese Skala ist bipolar, 9-stufig und mittig sowie an ihren Enden semantisch belegt. Sie wird auch heute noch in der DIN ISO 16000-28 (2021) angewendet, wobei dort anstelle der dargestellten Kästen eine Skala verwendet wird (KAPITEL 3.2.2.3, Abbildung 3-5).

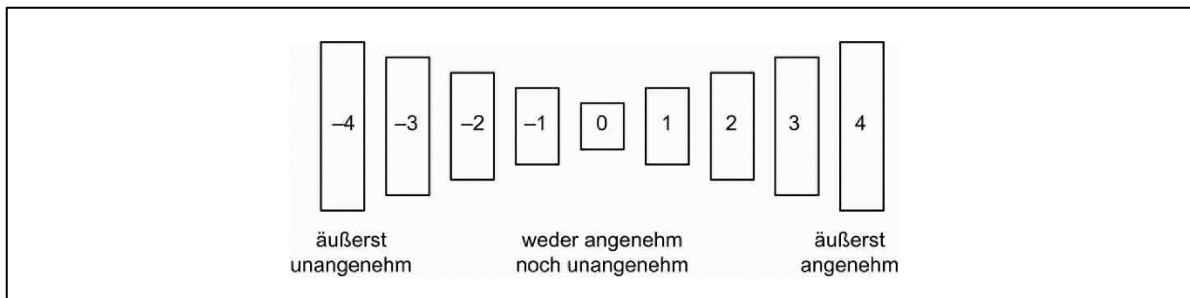


Abbildung 3-2: Kategorienskala für die Bestimmung der Hedonik (VDI, 1994)

Die Hedonik ist als alleinige Beurteilungsgröße der Luftqualität nur bedingt geeignet, da das Vorhandensein unangenehmer Gerüche nicht zwangsläufig auf eine schlechte Luftqualität hinweisen muss (Bitter et al., 2008). Sie wird daher oft als zusätzliche Messgröße verwendet, um die Kenntnis über die Geruchseigenschaften zu erweitern (B. Müller et al., 2016; B. Müller et al., 2011).

Aufgrund der engen Verknüpfung mit der Hedonik ist die Akzeptanz eines Geruchs eine sehr subjektive Größe. Um den Einfluss individueller Bewertungen auf das Ergebnis der Messung zu minimieren, muss die Anzahl der befragten Personen hoch sein. In den Untersuchungen von Fanger zum Zusammenhang zwischen dem Prozentsatz unzufriedener Personen und der wahrgenommenen Luftqualität wurden beispielsweise 168 Personen befragt (Fanger, 1988a).

In den 90er Jahren wurde ein neuer Ansatz gezeigt, um die Bewertung von Gerüchen zu objektivieren und damit die Größe der Personengruppen zu reduzieren. Dabei wurde ein Vergleichsmaßstab entwickelt, an dem die Referenzsubstanz Aceton (2-Propanon) in unterschiedlichen Acetonkonzentrationen angeboten wurde. Die Personen wurden darauf geschult, den Dezipolwert, also die empfundene Luftqualität, dieser vorgegebenen Konzentrationen zu ermitteln (Blyussen & Fanger, o.J.) Durch die Schulung waren die Personen in der Lage, den Dezipolwert verschiedener Luftproben (menschlicher Ausdünstungen und Bauprodukte) durch Vergleich mit dem Aceton zu ermitteln, woraus wiederum Rückschlüsse auf die Akzeptanz und die Anzahl unzufriedener Personen gezogen wurden. In dem von ihnen untersuchten Bereich stellten sie einen linearen Zusammenhang zwischen der Acetonkonzentration und der empfundenen Luftqualität fest.

Ein weiterer Vorteil der Verwendung einer Vergleichssubstanz liegt darin, dass diese in ihrer Art des Geruchs und ihrer Konzentration reproduzierbar ist. Im Gegensatz dazu hatte man bisher Körperausdünstungen von Personen als Vergleich herangezogen. Diese bestehen aus einer Vielzahl von Substanzen und sind sehr individuell.

Aceton wurde aufgrund verschiedener positiver Eigenschaften gewählt. Es ist günstig, leicht verfügbar und ein den Menschen bekannter Geruch. Außerdem ist es leicht zu detektieren sowie in den genutzten Konzentrationen nicht giftig, explosiv oder gefährlich.

In den 1990er Jahren war längst bekannt, dass VOC-Emissionen aus Bauprodukten in Innenräumen einen Einfluss auf Gesundheit und Wohlbefinden haben. Es wurden viele Fälle über gesundheitliche Beschwerden von Bewohnern in Gebäuden, in denen sie sich aufhielten, gemeldet und die Probleme wurden dem Sick Building Syndrom zugeordnet. Daher gab es in verschiedenen europäischen Ländern Bestrebungen, diese Emissionen hinsichtlich ihrer gesundheitlichen Effekte messen und bewerten zu können, um Herstellern Hinweise zur

Entwicklung ihrer Produkte zu geben und Verbrauchern durch die Kennzeichnung von emissionsarmen Produkten bei der Auswahl zu unterstützen. Von Anfang an wurden dabei sensorische Aspekte mit in Bezug genommen (AgBB, 2003; ECA, 1997). Nun ging es auch darum, neben der Bestimmung der empfundenen Luftqualität in Innenräumen Bauprodukte zu bewerten und somit die Möglichkeit zu haben, Gerüche schon durch die Auswahl der Produkte zu vermeiden.

Gegen Ende der 1990er Jahre gab es verschiedene sensorische Methoden, die beschrieben wurden, wobei noch keine bestimmte sensorische Methode empfohlen werden konnte. Um den Geruch von Baumaterialien zu charakterisieren, wurden häufig Beziehungen zwischen der Konzentration von Schadstoffen und der Bestimmung der Wirkung des Geruchs über die Bestimmung der Akzeptanz oder der Intensität aufgestellt (Nordtest, 1998).

Die von Fanger et al. eingeführten Einheiten Olf und Dezipol erwiesen sich in den 2000er Jahren als ungültig. Mit der Quellstärke Olf wurde davon ausgegangen, dass sich alle Geruchsstoffe gleich verhalten in Bezug auf ihren Zusammenhang zwischen empfundener Luftqualität und der Konzentration eines Geruchs. Untersuchungen am Hermann-Rietschel-Institut (HRI) zeigten jedoch, dass ausgehend von einer gleich empfundenen Luftqualität unterschiedliche Verdünnungsstufen für unterschiedliche Stoffe erforderlich waren, um die empfundene Luftqualität bis zur Wahrnehmungsschwelle zu reduzieren (D. Müller et al., 2004). In Abbildung 3-3 wird dieser Zusammenhang gezeigt. Aceton in einer Konzentration von  $300 \text{ mg/m}^3$  wurde von den Probanden in einer Intensität von 30 Dezipol wahrgenommen. Bis zum Erreichen der Wahrnehmungsschwelle musste es 15-fach verdünnt werden. Die Emissionen aus einem Klebstoff, die ebenfalls mit 30 Dezipol wahrgenommen wurden, mussten hingegen 70-fach verdünnt werden, bis die Wahrnehmungsschwelle erreicht wurde. Dieses unterschiedliche Verdünnungsverhalten kann mit der stoffunabhängigen Quellstärke Olf nicht dargestellt werden und aus diesem Grund wurde ein zweistufiges Verfahren zur Messung der empfundenen Intensität und der Hedonik entwickelt.

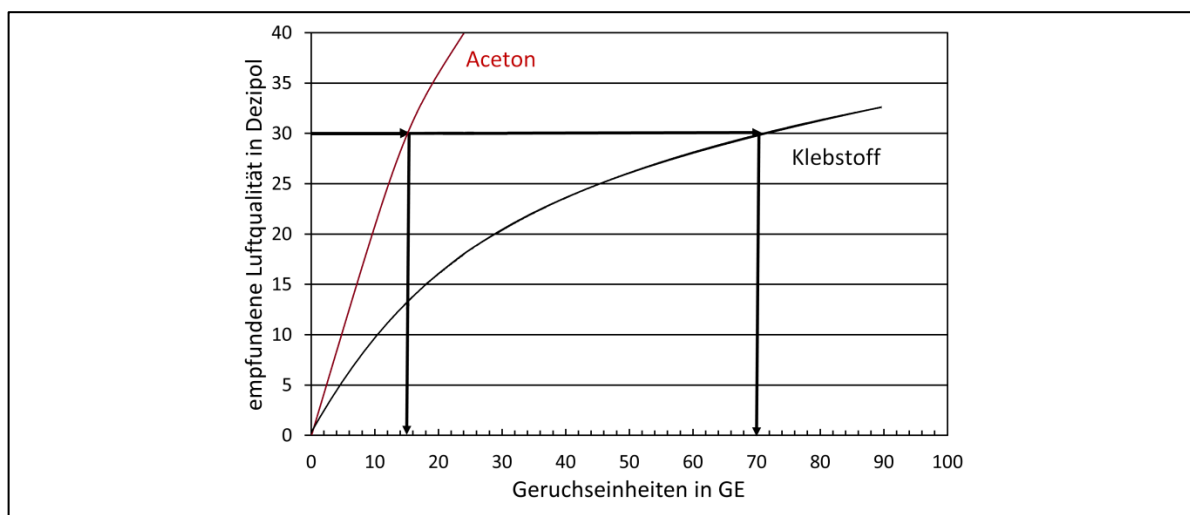


Abbildung 3-3: Zusammenhang zwischen der empfundenen Luftqualität in Dezipol und Geruchseinheiten in GE (D. Müller et al., 2004)

Der Vorteil der Messung der empfundenen Intensität besteht darin, dass die Akzeptanz eines Geruchseindrucks in den Hintergrund rückt und bei der Bewertung nicht mehr abgefragt wird. Mit der empfundenen Intensität wird nur noch die Empfindlichkeit der Nase auf einen

Geruchseindruck abgefragt. Durch die ergänzende Abfrage nach der Hedonik, wird die angenehme oder unangenehme Wirkung auf die Prüfenden ermittelt.

Im Verfahren, das 2004 entwickelt wurde, bewerten 8 bis 12 geschulte Prüfende die empfundene Intensität  $I$  einer Bauproduktprobe in  $p_i$  (perceived intensity), wobei wie bei Bluysen & Fanger (o.J.) die Referenzsubstanz Aceton verwendet wird. Das Aceton wird linear in Bezug auf die Konzentration am Vergleichsmaßstab dargeboten.

In einigen wissenschaftlichen Untersuchungen wurden Zweifel am linearen Zusammenhang zwischen der Konzentration des Aceton und der empfundenen Intensität geäußert (Salthammer, Schulz, Stolte & Uhde, 2016; Wargocki & Fanger, 1999). Außerdem wird diskutiert, dass Aceton möglicherweise nur eingeschränkt geeignet sei, da dessen Wahrnehmung eher trigeminal erfolgt als über den Geruchssinn, was eine andere Art der Verarbeitung im Gehirn bewirken kann (Brosig, 2018; Savic et al., 2002). Trotz dieser Kritikpunkte zeigen einige Studien, dass der Zusammenhang im untersuchten Bereich ausreichend linear ist und Aceton als Vergleichssubstanz geeignet ist. Die Linearität der Skala des Acetons ist bis  $380 \text{ mg/m}^3$  nachgewiesen (B. Müller et al., 2019). Es wurde bisher keine andere Vergleichssubstanz gefunden, und selbst bei der Anwendung der Messmethode der aktuellen Norm DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) wird nur Aceton als geeignete Vergleichssubstanz für die Untersuchung von Bauproduktgerüchen verwendet.

Die von D. Müller et al. (2004) entwickelte Methode zur Ermittlung der empfundenen Intensität und der Hedonik wurde 2012 zusammen mit der Bestimmung der Akzeptanz in die neu entwickelte Norm DIN ISO 16000-28 (DIN, 2012a) überführt. Im Jahr 2021 wurde die Norm aktualisiert, wobei die Verwendung von Probenbehältern zur Darbietung der Probenluft als Standardverfahren für die Geruchsbewertung und die direkte Bewertung als alternatives Verfahren festgelegt wurde. Die Verfahren standen bislang gleichberechtigt nebeneinander, jedoch wurde festgestellt, dass der Abluftvolumenstrom der Emissionsprüfkammern bei vielen Messungen nicht groß genug ist, um eine direkte Bewertung vornehmen zu können (KAPITEL 3.2.3.2). Außerdem wurde bei der Überarbeitung die empfohlene Anzahl geschulter Prüfender zur Ermittlung der empfundenen Intensität von 8 auf mindestens 12 bis 15 erhöht, um nach Ausschluss derjenigen Prüfenden, die sich nicht qualifizieren, mindestens 10 bewertbare Messergebnisse zu erzielen. Damit sollte die Genauigkeit der Messungen erhöht werden (KAPITEL 2.2).

Die Ermittlung der Messgrößen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) wird im folgenden KAPITEL 3.2.2 beschrieben.

### **3.2.2 Messgrößen**

Gerüche aus Bauprodukten können auf verschiedene Weise ermittelt werden. Mit dem in dieser Dissertation verwendeten Verfahren der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) kann der Geruch mithilfe der Messgrößen Akzeptanz, empfundene Intensität oder Hedonik bestimmt werden. Deren Ermittlung wird in diesem Kapitel beschrieben.

Sollen mehrere Messgrößen eines Geruchs erfasst werden, müssen diese, um Störungen zu vermeiden, in separaten Prüfzyklen ermittelt werden. Die Messgrößen unterscheiden sich in

ihrer Abhängigkeit von der subjektiven Empfindung der einzelnen Prüfenden voneinander, weshalb die Größe der Prüfergruppe variiert.

Eine weitere in diesem Kapitel beschriebene Messgröße ist die Zumutbarkeit, welche nicht Teil der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ist. Sie ist in Deutschland jedoch eine verwendete Messgröße, um die belästigende Wirkung eines Geruchs zu ermitteln.

### 3.2.2.1 Akzeptanz

Zur Ermittlung der Akzeptanz (KAPITEL 3.1) einer Luftprobe wird den Prüfenden folgende Frage gestellt: „Stellen Sie sich vor, Sie wären diesem Geruch im Alltag ausgesetzt. Würden Sie den Geruch als akzeptabel empfinden?“ (DIN, 2021).

Die Probenluft wird mithilfe der in Abbildung 3-4 dargestellten Skala von "klar akzeptabel" (-1) bis "klar unakzeptabel" (1) bewertet. Die einzelnen Skalenteile sind in Schritten von 0,05 eingeteilt, was für die Prüfenden nicht sichtbar ist. Eine neutrale Bewertung (0) ist möglich und nur die Enden der Skala sowie die Skalenteile direkt neben der 0 sind semantisch belegt.

Die Auswertung der Ergebnisse kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Eine Variante ist es, aus den Antworten den Prozentsatz der unzufriedenen Personen (PD) anhand der Anzahl der Bewertungen im negativen Bereich mithilfe der Formel 1 zu ermitteln. Die zweite Variante besteht darin, dass aus den abgegebenen Einzelwerten der Grad der Unzufriedenheit durch Berechnung des arithmetischen Mittels angegeben werden kann (Abbildung 3-4).

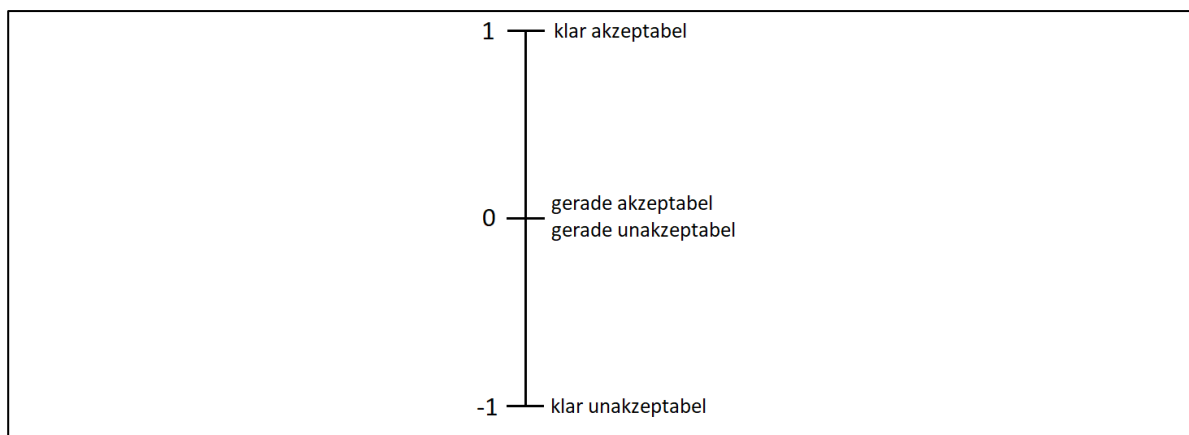


Abbildung 3-4: Akzeptanzskala; modifiziert nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021)

Formel 1: Berechnung des PD-Wertes zur Ermittlung der Akzeptanz nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021)

$$PD = \frac{n_d}{n} \cdot 100 \%$$

- mit: PD    Prozentsatz unzufriedener Personen  
n<sub>d</sub>    Anzahl der unzufriedenen Prüfenden (Bewertungen im negativen Bereich)  
n        Gesamtzahl der Prüfenden

Die Akzeptanz ist eine rein subjektive Messgröße. Um eine gewisse statistische Sicherheit zu erreichen, wird eine Gruppe von mindestens 15 bis bestenfalls 25 Prüfenden benötigt, die für diese Aufgabe nicht geschult werden müssen. Durch die hohe Prüferzahl lassen sich Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit ermitteln (KAPITEL 3.2.3.3). Eine kleinere Prüfergruppe darf verwendet werden, wenn diese für die Ermittlung der empfundenen Intensität geschult wurde (KAPITEL 3.2.2.2) und wenn die Akzeptanz nur als zusätzliche Information zur empfundenen Intensität genutzt wird.

### **3.2.2.2 Empfundene Intensität**

Die empfundene Intensität  $I_i$  mit der Einheit  $p_i$  zur Ermittlung der Stärke einer Geruchsempfindung, die ein Geruchsreiz auslöst, wird mittels einer Referenz von einer eigens dafür geschulten Prüfergruppe bewertet. Dazu werden an einem Vergleichsmaßstab unterschiedliche Acetonkonzentrationen dargeboten, deren Intensität mit der Intensität der dargebotenen Probenluft des Bauproduktes verglichen und dann bewertet wird. In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die Messung mit dem Vergleichsmaßstab und die Prüfergruppenschulung beschrieben.

#### **Messung mit dem Vergleichsmaßstab**

Am Vergleichsmaßstab werden mindestens sechs unterschiedliche Acetonkonzentrationen in Luft gemischt und den Prüfenden in aufsteigender Reihenfolge präsentiert. Die Acetonkonzentrationen entsprechen jeweils unterschiedlich empfundenen Intensitäten der in Innenräumen vorkommenden Bauproduktgerüche.

Eine Acetonkonzentration von  $20 \text{ mg/m}^3$  wird als empfundene Intensität von  $0 p_i$  definiert und entspricht ungefähr der Wahrnehmungsschwelle (KAPITEL 3.1) für Aceton. Die Wahrnehmungsschwelle stellt die geringste einzustellende Konzentration dar. Der Maßstab wurde linear festgelegt in Bezug auf die Konzentration. Eine Steigerung von  $1 p_i$  entspricht dabei einem Anstieg der Konzentration um  $20 \text{ mg/m}^3$  der Referenzsubstanz Aceton. Die weiteren einzustellenden Stufen sind  $3 p_i$ ,  $6 p_i$ ,  $9 p_i$ ,  $12 p_i$  und  $15 p_i$ . Die Intensität von  $15 p_i$  entspricht einer Konzentration von  $320 \text{ mg/m}^3$ . Die eingestellten Intensitäten decken den Intensitätsbereich der meisten Bauprodukte ab. Da es vereinzelt Bauprodukte gibt, die stärker riechen, können für den Vergleich auch höhere empfundene Intensitäten bis  $20 p_i$  eingestellt werden.

Die eingestellten Konzentrationen des Acetons müssen über den gesamten Prüfzeitraum konstant bleiben. Dabei ist bis zu einer empfundenen Intensität von  $10 p_i$  ( $220 \text{ mg/m}^3$ ) eine Abweichung von  $\pm 0,5 p_i$  ( $\pm 10 \text{ mg/m}^3$ ) und ab  $11 p_i$  ( $240 \text{ mg/m}^3$ ) eine Abweichung von  $\pm 1 p_i$  ( $\pm 20 \text{ mg/m}^3$ ) zulässig. Die Konzentrationen sollten mit einem geeigneten und auf Aceton kalibriertem Detektor vor und während der Messung überprüft werden. Der an der HTW Berlin verwendete photoakustische Detektor wird in KAPITEL 3.6 beschrieben.

An jedem Messtag wird die Riechfähigkeit der einzelnen Prüfenden in einer Leistungsprüfung ermittelt, indem diese zu Beginn die empfundene Intensität von zwei unbekanntem Acetonintensitäten ermitteln müssen. Weichen die Ergebnisse um nicht mehr als  $\pm 2 p_i$  von der eingestellten Acetonintensität ab, so hat sich die Prüferin oder der Prüfer für die Messung qualifiziert. Ist die Abweichung eines Wertes oder beider Wert größer als  $\pm 2 p_i$ , so darf die Prüfung einmal wiederholt werden. Weicht mindestens eine der Wiederholungsmessungen

um mehr als  $\pm 2 p_i$  ab, ist die Person an diesem Messtag von der Prüfung ausgeschlossen. Erst nach dem Leistungstest ermitteln die Prüfenden die empfundene Intensität der Probenluft durch Vergleich mit den vorgegebenen Intensitäten am Vergleichsmaßstab.

Durch die Verwendung einer Referenz wird die Beurteilung genormt und Abweichungen der Bewertung der unbekannt Proben reduziert. Für die Messung wird daher eine im Vergleich zur Ermittlung der Akzeptanz kleinere Prüfergruppengröße von 12 bis 15 Personen empfohlen. Nach Durchführung des Leistungstestes, durch welchen es zum Ausschluss von Prüfenden kommen kann, sollen dann mindestens 10 bewertbare Messergebnisse vorliegen, womit die geforderte Genauigkeit der Bewertung (KAPITEL 3.2.3.3) voraussichtlich erreicht werden kann.

### **Prüfergruppenschulung**

Für die Bestimmung der empfundenen Intensität ist eine fünftägige Schulung der Prüfenden notwendig, in der ihnen die Verhaltensvorschriften und Handlungsanweisungen zum korrekten Prüfablauf beigebracht werden. Sie lernen mittels des Vergleichsmaßstabes, ihnen unbekannte Acetonintensitäten im Bereich von 2 bis 15  $p_i$  zu ermitteln sowie die empfundene Intensität unbekannter Gerüche einzuordnen.

Bei der Ermittlung unbekannter Acetonintensitäten können an den einzelnen Schulungstagen bis zu acht Acetonkonzentrationen am Vergleichsmaßstab angeboten werden. Zu Lernzwecken informiert die Prüfleitung die Prüfenden nach jeder Messung über die tatsächlich vorgegebene Acetonintensität und diese können mit der Kenntnis dieses Wertes erneut einen Vergleich vornehmen. An den beiden letzten Schulungstagen wird der Schulungserfolg bewertet.

Die zweite Art der Übung in der Schulung ist die Ermittlung unbekannter empfundener Intensitäten von Bauproduktgerüchen mit dem Vergleichsmaßstab.

Um die Leistung der Prüfenden regelmäßig einschätzen zu können, müssen einmal im Jahr Auffrischungsschulungen durchgeführt werden und sobald Prüfende mehr als drei Monate nicht an Messungen teilgenommen haben oder bei drei aufeinanderfolgenden Beurteilungen nicht bestehen.

Die Anforderungen der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) an die Prüfergruppe werden in KAPITEL 3.2.3.5 und die genaue Durchführung der Prüferschulung sowie die Bewertung des Schulungserfolges für Messungen im Luftqualitätslabor der HTW Berlin in KAPITEL 5.1.5 beschrieben.

### **3.2.2.3 Hedonik**

Zur Bewertung der Hedonik wird die folgende Frage gestellt: „*Stellen Sie sich vor, Sie würden mehrere Stunden täglich der Luft aus der Emissionsprüfkammer ausgesetzt. Wie angenehm ist die Luftqualität?*“ (DIN, 2021).

Die Bewertung erfolgt anhand der in Abbildung 3-5 dargestellten neunstufigen, bipolaren Skala mit dimensionslosen Zahlen von -4 (äußerst unangenehm) bis 4 (äußerst angenehm), wobei die Endpunkte und die Mitte semantisch belegt werden. An der HTW Berlin haben die Prüfenden allerdings die Möglichkeit, die Hedonik in 0,5er Schritten zu bewerten, um eine höhere Genauigkeit der Bewertung zu erreichen.

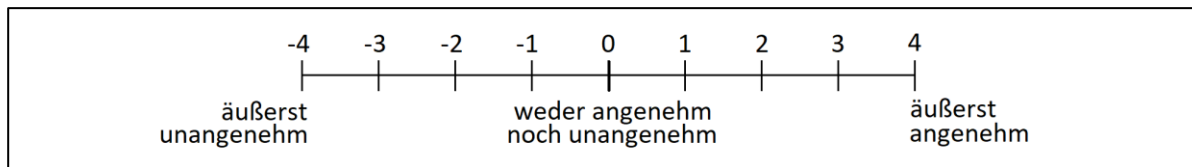


Abbildung 3-5: Skala zur Ermittlung der Hedonik

Für die Messung sollte eine Prüfergruppe von mindestens 15 Personen zur Verfügung stehen. Zum Erreichen der geforderten Genauigkeit (KAPITEL 3.2.3.3) werden 25 Personen empfohlen. Es kann auch die für die empfundene Intensität geschulte, kleinere Prüfergruppe (KAPITEL 3.2.2.2) eingesetzt werden, wenn die Hedonik als zusätzliche Information mitbewertet werden soll. Wichtig ist, dass die Prüfung nicht gleichzeitig mit der Ermittlung der empfundenen Intensität erfolgt.

#### 3.2.2.4 Zumutbarkeit

Die Zumutbarkeit eines Geruchs wird bei (B. Müller et al., 2011) erstmalig wie folgt beschrieben: Sie „... beschreibt die Höhe an noch tolerierbaren Belastungen, die eine Person von einem Geruch erfährt.“ (B. Müller et al., 2011). Der Begriff wird im Baurecht als Grundlage der Bewertung unzumutbarer Belästigungen durch Gebäude verwendet, um gebäudenutzende Personen zu schützen. Die sensorische Bewertung von Bauprodukten anhand der Zumutbarkeit wird in KAPITEL 4.2.1 beschrieben.

Im Rahmen des Forschungsprojekts von (B. Müller et al., 2011) wurde eine Gruppe von 17 bis 25 Personen ungeschulter Prüfender befragt. Diese mussten sich entscheiden, ob sie eine ihnen dargebotene Luftprobe als tägliche Arbeitsumgebung als zumutbar empfinden oder nicht. Ihnen wurde dabei folgender Satz vorgegeben: „Ich halte die Luftqualität als tägliche Arbeitsumgebung für unzumutbar“. Wenn die Prüfenden der Aussage folgen können, dann bestätigen sie die Aussage durch ankreuzen.

Die Zumutbarkeit wird gemäß Formel 2 prozentual aus dem Quotienten der Anzahl positiver Antworten (das heißt die Aussage wurde nicht bestätigt und die Luftprobe wird damit als zumutbar bewertet) zur Anzahl aller Antworten ermittelt.

Die Zumutbarkeit kann nicht mit der Akzeptanz gleichgesetzt werden (KAPITEL 4.2.1).

Formel 2: Berechnung der Zumutbarkeit (B. Müller et al., 2011a)

$$\text{Zumutbarkeit} = \frac{\text{Anzahl der positiven Antworten}}{\text{Anzahl aller Antworten}} \cdot 100 \%$$

### 3.2.3 Bestimmung von Geruchsemissionen

In diesem Kapitel wird das Verfahren der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) beschrieben, da ihre Anwendung Grundlage der Messungen dieser Arbeit ist und Vorschläge für eine Weiterentwicklung erarbeitet werden sollten. Einige Vorgaben der Norm werden in der Richtlinie VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) konkretisiert, worauf jeweils verwiesen wird.

Die Geruchsmessung erfolgt unter den in der DIN EN ISO 16000-9 (DIN, 2008) und DIN EN 16516 (DIN, 2020) festgelegten Bedingungen für Emissionsprüfkammerverfahren (KAPITEL 3.4).

Einen Einfluss auf das Emissionsverhalten haben die Entnahme von Prüfstücken vom zu untersuchenden Produkt, ihre Verpackung, ihr Transport zum Labor und ihre Lagerung. Die Vorbereitung der Prüfstücke ist von Bedeutung, um sicherzustellen, dass nur die dem Raum zugewandte Oberfläche in der Emissionsprüfkammer Emissionen freisetzen kann. Die DIN EN ISO 16000-11 (DIN, 2006) stellt daher Anforderungen an die Probenahme und die Vorbereitung der Prüfstücke, welche bei der Durchführung der Geruchsprüfung gemäß der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) einzuhalten sind.

Für die Bewertung von Gerüchen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) wird das zu untersuchende Prüfstück unter festgelegten Bedingungen bezüglich Temperatur ( $23\text{ °C} \pm 3\text{ K}$ ) und relativer Luftfeuchte ( $50\% \pm 10\%$ ) in eine Emissionsprüfkammer eingebracht. Ein festgelegtes Emissionsszenario muss bei der Messung eingehalten werden, um die Verhältnisse in einem Innenraum möglichst realistisch wiederzugeben und die Messungen auch untereinander vergleichbar zu machen (KAPITEL 3.4). Am gewünschten Tag der Geruchsprüfung wird die Prüfkammerabluft einer Prüfergruppe zur Bewertung dargeboten. Dazu wird ein Trichter entweder direkt an den Abluftstutzen der Emissionsprüfkammer angebracht oder es werden Probenbehälter gefüllt, die der Prüfergruppe in einem geeigneten System dargeboten werden. Diese bewertet die zu ermittelnde Messgröße Akzeptanz, empfundene Intensität oder Hedonik. Es kann auch mehr als eine Messgröße ermittelt werden, sofern eine getrennte Erfassung der Größen erfolgt und die Prüfergruppe die Anforderung an die Prüfung erfüllt. Eine für die Prüfung verantwortliche Prüfleitung legt den Messablauf fest, beaufsichtigt die Prüfergruppe während der Messungen und ist verantwortlich für deren ordnungsgemäße Durchführung.

Dieses Kapitel beschreibt die Anforderungen der Norm an die Räume und die Prüfausrüstungen (KAPITEL 3.2.3.1), die Darbietung der Probe (KAPITEL 3.2.3.2) sowie die statistische Auswertung der ermittelten Einzelwerte der Messgrößen Akzeptanz, empfundene Intensität und Hedonik (KAPITEL 3.2.3.3). Darüber hinaus werden die Anforderungen an die Versuchsleitung und an die Prüfergruppe beschrieben (KAPITEL 3.2.3.4 UND 3.2.3.5).

### **3.2.3.1 Anforderungen an die Räume und Prüfausrüstungen**

Die für die Messung verwendeten Räume und die Prüfausrüstungen dürfen die Geruchsprüfung möglichst nicht beeinflussen, weshalb besondere Anforderungen gestellt werden.

Für die Prüfung müssen grundsätzlich ein Erholungsraum und ein Prüfraum zur Verfügung stehen. Im Erholungsraum halten sich die Prüfenden mindestens fünf Minuten vor der Prüfung und zwischen den einzelnen Messungen auf, wodurch sie sich akklimatisieren können. Im Prüfraum wird die Geruchsprobe für die Bewertung zur Verfügung gestellt. Beide Räume müssen so beschaffen sein, dass sie die Messung nicht durch Gerüche stören. Ihre Gestaltung sollte unauffällig sein und die Raumluft nicht durch die verwendeten Bauprodukte und Einrichtungen kontaminiert werden. Die Bedingungen in Bezug auf Temperatur und relative Feuchte im Prüfraum sollten nahe an denen der Emissionsprüfkammer liegen. Er

muss mit ausreichend neutraler Frischluft versorgt werden und die Luft muss über den Trichtern direkt abgesaugt werden. Direktes Sonnenlicht und störende Lichtquellen sowie Geräuschquellen sind zu vermeiden. Zum Nachweis der Geruchsarmut sind beide Räume hinsichtlich ihrer Akzeptanz und empfundenen Intensität zu beurteilen, wobei die Akzeptanz  $\geq 0,6$  und die empfundene Intensität  $\leq 4$  pi betragen muss.

Die Prüfausrüstungen umfassen die Emissionsprüfkammern (KAPITEL 3.4), die Trichter, die luftführenden Leitungen und Armaturen, den Vergleichsmaßstab (KAPITEL 3.2.2.2) und die Systeme zur Darbietung von Luft mit Probenbehältern (KAPITEL 3.2.3.2). Sie müssen aus Glas oder poliertem Edelstahl beschaffen sein, jedoch bei den Darbietungssystemen und beim Vergleichsmaßstab darf zudem Polytetrafluorethylen (PTFE) zum Einsatz kommen. Die ausgewählten Materialien haben selbst geringe Eigenemissionen und es findet keine signifikante Adsorption an ihren Oberflächen statt, wodurch sie die Probenluft weitgehend nicht beeinflussen. Auch die Prüfausrüstung ist auf ihren Hintergrundgeruch zu prüfen und muss eine Akzeptanz von  $\geq 0,8$  und eine empfundene Intensität  $\leq 3$  pi erreichen.

Um eine geruchliche Verunreinigung der Luft im Prüfraum zu vermeiden, muss die Luft über den Trichtern abgesaugt werden. Für die Konstruktion des Trichters sind die in Abbildung 3-6 angegebenen Maße vorgegeben, um ein gleichmäßiges Ausströmen von Probenluft zu gewährleisten und eine Vermischung der Probenluft mit Umgebungsluft durch entstehende Turbulenzen bei Strömungsabriss zu vermeiden.

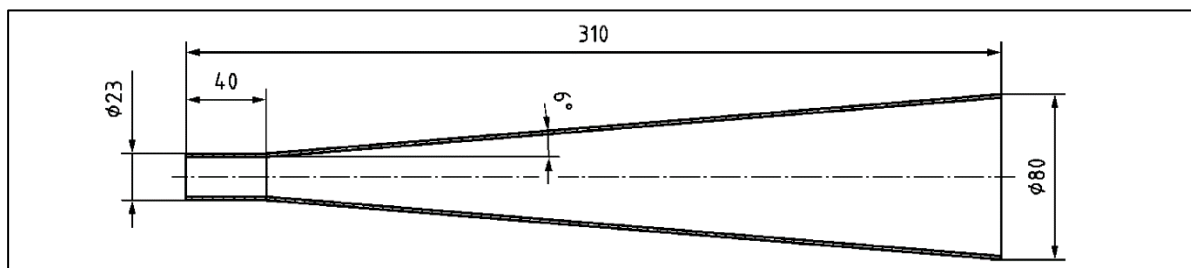


Abbildung 3-6: Schema eines Standardtrichters (DIN, 2021)

### 3.2.3.2 Probendarbietung

Neben der Konstruktion des Trichters muss der an diesem dargebotene Luftvolumenstrom ausreichend groß sein, um beim Riechen ein Ansaugen von Umgebungsluft zu vermeiden. Bei körperlicher Ruhe atmet der Mensch etwa 15 Mal pro Minute und pro Atemzug werden etwa 0,5 Liter Luft eingeatmet (VDI, 2015). Um sicherzustellen, dass der am Trichter dargebotene Luftvolumenstrom ausreichend groß ist, gibt die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) vor, dass ein konstanter Luftvolumenstrom zwischen 0,6 bis 1,0 l/s zur Verfügung gestellt werden muss. Gemeinsam mit den Vorgaben zur Trichterkonstruktion wird so ein Vermischen von Proben- und Umgebungsluft vermieden.

Die Probendarbietung darf auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Mit dem Standardverfahren, bei dem Probenbehälter zur Beurteilung der Probe verwendet werden, und alternativ mit dem direkten Verfahren, bei welchem ein Trichter am Auslass der Emissionsprüfkammer angebracht wird. Die Verfahren werden in den Zielsetzungen dieser Arbeit (KAPITEL 2.1, Abbildung 2-1) schematisch dargestellt.

Nur wenn die Anforderung an den Luftvolumenstrom von mindestens 0,6 l/s am Auslass der Emissionsprüfkammer erfüllt ist, kann dort ein Trichter für die direkte Bewertung der Probenluft angebracht werden. Zudem muss gemäß DIN EN 16516 (DIN, 2020) eine Luftwechselrate von 0,25 bis 2,0 h<sup>-1</sup> in der Emissionsprüfkammer eingehalten werden, da höhere Luftwechselraten Einfluss auf das Emissionsverhalten der Proben haben können (KAPITEL 3.4).

Tabelle 3-1 zeigt, welcher Volumenstrom am Auslass unterschiedlich großer Emissionsprüfkammern bei vier verschiedenen zulässigen Luftwechselraten erreicht wird, um darzustellen, welche Kammergrößen sich für eine direkte Bewertung eignen. Der Volumenstrom berechnet sich durch Multiplikation des Volumens der Emissionsprüfkammer mit der Luftwechselrate. Unter den Bedingungen in den blau markierten Feldern wird der Luftvolumenstrom von 0,6 l/s erreicht und eine direkte Messung ist möglich.

Die Tabelle stellt eine Auswahl der üblicherweise verwendeten Prüfkammern dar. Außerdem wird eine Prüfkammer mit einem Volumen von 1080 l aufgeführt, da dieses Volumen den Grenzfall der Anwendung des direkten Verfahrens kennzeichnet. Auch bei Einstellung der höchstens zulässigen Luftwechselrate, wäre eine Prüfkammer dieses Volumens zu wählen, um eine direkte Messung durchführen zu können. Es ist jedoch nicht bekannt, ob es solche Prüfkammern gibt und für die meisten Untersuchungen mit Bauprodukten werden geringere Luftwechselraten als 2,0 h<sup>-1</sup> gewählt. Insgesamt werden häufig kleinere Prüfkammern verwendet, weshalb die Anwendung von Probenbehältern in den meisten Fällen erforderlich ist.

Tabelle 3-1: Luftvolumenstrom am Auslass typischer Emissionsprüfkammern unterschiedlicher Größe bei verschiedenen Luftwechselraten (blaue Felder: der Luftvolumenstrom von 0,6 l/s wird erreicht und eine direkte Messung ist zulässig)

Volumen der Emissionsprüfkammer	Luftvolumenstrom am Trichter in l/s bei unterschiedlichen Luftwechselraten			
	$n = 0,25 \text{ h}^{-1}$	$n = 0,5 \text{ h}^{-1}$	$n = 1,0 \text{ h}^{-1}$	$n = 2,0 \text{ h}^{-1}$
20 m <sup>3</sup>	1,39	2,78	5,56	11,11
4,7 m <sup>3</sup>	0,33	0,65	1,31	2,61
3 m <sup>3</sup>	0,21	0,42	0,83	1,67
<b>1080 l</b>	0,08	0,15	0,30	0,60
1000 l	0,07	0,14	0,28	0,56
270 l	0,02	0,04	0,08	0,15
250 l	0,02	0,03	0,07	0,14
240 l	0,02	0,03	0,07	0,13
125 l	0,01	0,02	0,03	0,07
24 l	0,00	0,00	0,01	0,01

Die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) enthält weitere Anforderungen an das Standardverfahren und die Probenbehälter, was im Folgenden beschrieben wird.

Beim Standardverfahren bewertet die Prüfergruppe die Probenluft mithilfe eines Darbietungssystems, dessen Schema in Abbildung 3-7 gezeigt wird. In diesem System wird ein mit Probenluft gefüllter Probenbehälter aus Folienmaterial in einem luftdichten Gehäuse mit seiner Öffnung zu einem Trichter für die Bewertung platziert. Zum Entleeren wird durch einen Ventilator Überdruck im Gehäuse erzeugt, sodass der Probenbehälter zusammengedrückt wird und die Probenluft über den Trichter mit dem geforderten Luftvolumenstrom von 0,6 bis 1,0 l/s konstant ausströmt. Die Konstruktion muss also erlauben, dass der geforderte Luftvolumenstrom eingestellt werden kann.

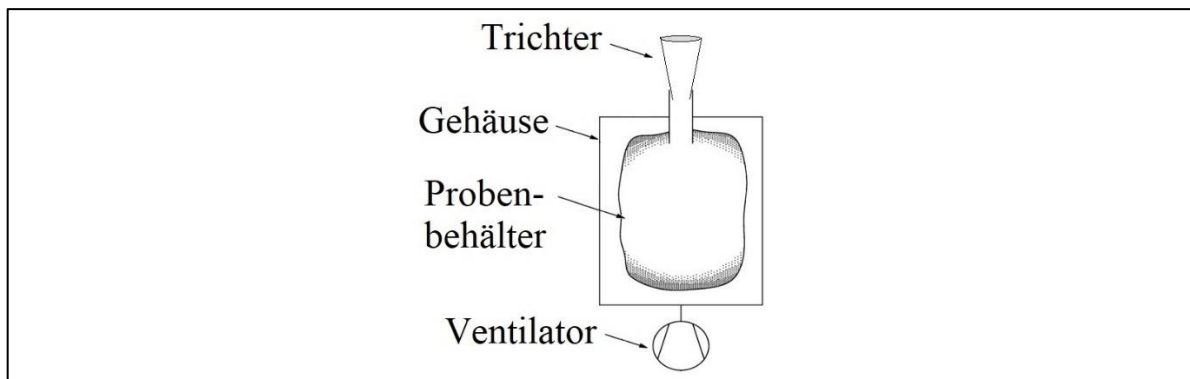


Abbildung 3-7: Schema des Darbietungssystems; modifiziert nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021; B. Müller, 2002)

In Probenbehältern kann Probenluft auch transportiert und aufbewahrt werden. Sie werden damit nicht nur verwendet, wenn die Luftgeschwindigkeit am Ausgangsstutzen der Emissionsprüfkammer geringer als 0,6 l/s beträgt, sondern auch, wenn die Umgebung der Emissionsprüfkammer nicht als Prüfraum für die Geruchsbewertung geeignet ist. Prüfraum und Prüfkammer sind dann räumlich voneinander getrennt. Die Anforderungen an den Prüfraum werden in KAPITEL 3.2.3.1 beschrieben.

Die verwendeten Probenbehälter müssen luftdicht sein, weshalb sie vor ihrer Verwendung auf Risse und Beschädigungen zu überprüfen sind. Zudem ist mindestens eine Probe jeder Charge der Probenbehälter für mindestens zwei Stunden mit sauberer Luft zu lagern und auf ihren Hintergrundgeruch zu prüfen, welcher die in KAPITEL 3.2.3.1 angegebenen Anforderungen an die Prüfausrüstung einhalten muss.

Die Materialien der Behälter müssen diffusionsdicht (undurchlässig) und nicht adsorptiv sein, um falsche zu niedrige Ergebnisse bei den Geruchsmessungen zu vermeiden. Zur Testung ihrer Zulassung wird in der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ein Validierungsverfahren beschrieben, nach welchem die Emission des Materials beurteilt wird. Zum einen in Bezug auf die Sensorik, wobei die Materialien die Anforderungen an den Hintergrundgeruch erfüllen müssen, und zum anderen werden in VOC-Untersuchungen die Diffusionsdichtheit und das Adsorptionsverhalten beurteilt. Für die VOC-Untersuchungen müssen vorgegebene VOCs verschiedener Substanzklassen zeigen, dass im Vergleich zur Emissionsprüfkammer eine hohe Wiederfindungsrate von mindestens 80 % nach sechsständiger Lagerung der Probenbehälter erreicht werden kann. In einem weiteren Test zur Prüfung der Diffusionsdichtheit wird ein Behälter mit derselben VOC-Mischung gefüllt und in eine Emissionsprüfkammer gegeben, welche auf einen Anstieg der Konzentrationen dieser VOC

analytisch geprüft wird. Steigen alle VOCs in der Emissionsprüfkammer an, so liegt eine Leckage vor. Sind es nur einige der Substanzen, so liegt ein Hinweis auf Diffusion vor.

Als Behältermaterialien sind Polyethylenterephthalat (PET, Nalophan® der Kalle GmbH) und Polyvinylfluorid (PVF, Tedlar® der Firma DuPont) zugelassen, da diese Materialien die Luftprobe erwiesenermaßen kaum verändern. Die Materialien sowie die Anforderungen an die Herstellung, Vorbehandlung und Handhabung der Probenbehälter werden im Folgenden näher beschrieben.

### **Nalophan®**

Probenbehälter aus Nalophan® bestehen aus Schlauchfolie mit einer Dicke von 20 µm, die in der gewünschten Länge vom Schlauch abgeschnitten und an den Enden mit Klemmen oder Kabelbindern verschlossen werden. Die Schläuche weisen einen Umfang von 92 cm auf. Um die Dichtheit der Behälter sicherzustellen, muss das Verschließen mit besonderer Sorgfalt erfolgen, da das Verschlusssystem den gesamten Umfang des Schlauches umfassen muss. Die Behälter sind für den einmaligen Gebrauch vorgesehen.

Vor dem Befüllen sind die Behälter mindestens durch einen dreifachen Luftaustausch zu spülen, indem sie dreimal mit Probenluft aus der Emissionsprüfkammer vollständig gefüllt und wieder entleert werden. Es ist auch möglich die Behälter über Nacht mit der Abluft der Emissionsprüfkammer zu verbinden und sie so zu spülen. Der mehrfache Luftaustausch soll bewirken, dass an der inneren Oberfläche ein Gleichgewichtszustand zwischen Ad- und Desorption erreicht wird. Erst nach dem Spülen werden sie mit Probenluft gefüllt und für den Transport oder auch für die Lagerung beidseitig verschlossen. Zur Einbringung in das Darbietungssystem wird eine der Seiten geöffnet und am System befestigt.

### **Tedlar®**

Probenbehälter aus Tedlar® werden durch Schweißen des Folienmaterials hergestellt. Zunächst wird die 25 bis 50 µm dicke Folie in einem 80 °C warmen Ofen für 12 Stunden ausgeheizt. Gemäß VDI 4302-1 werden dadurch die stark riechenden Stoffe Phenol und Dimethylacetamid entfernt. Dann erfolgen das Schweißen und ein erneutes Ausheizen mit 80 °C heißer Luft für drei Stunden zu Reinigungszwecken. Die so hergestellten Behälter können wieder verwendet werden, wobei sie vor jedem Gebrauch erneut auf die angegebene Weise ausgeheizt werden müssen.

In der VDI 4302-1 wird das Schweißen der Folie in Form von Kissen empfohlen. Hierbei werden jeweils zwei Stücke gleicher Form und gleichen Maßes aus der Folie geschnitten und an den Rändern zusammengeschweißt. Beim Zuschneiden werden an zwei gegenüberliegenden Seiten auch gleich zwei Hälse angebracht, die 140 mm breit und 100 mm lang sind und an ihren Enden nicht zusammengeschweißt werden. Beim Einbringen in das Darbietungssystem wird dann einer der Hälse genutzt, um den Behälter am System zu befestigen. Die Kissenform hat sich als geeignet erwiesen (B. Müller, 2002). Andere Formen haben Probleme bei der Verarbeitung oder in ihnen kann keine gute Luftdurchmischung erfolgen.

Die Menge der gesammelten Probenluft ist so zu bemessen, dass für die gesamte Prüfergruppe Probenluft zur Verfügung steht. Es können zwei oder mehrere Behälter verwendet werden. Das Darbietungssystem wird anhand der Größe der Probenbehälter konstruiert. Übliche Behältergrößen reichen von 50 bis 300 Liter.

Die Geruchsprüfung mit den gefüllten Probenbehältern muss so schnell wie möglich nach dem Befüllen erfolgen, aber höchstens sechs Stunden danach abgeschlossen sein, um möglichst geringe zeitabhängige Veränderungen der Probenluft, wie Adsorption, Diffusion und chemische Reaktionen, zu erreichen. Die gefüllten Behälter sind möglichst unter den gleichen Bedingungen der Emissionsprüfkammern hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchte zu lagern.

### **3.2.3.3 Statistische Auswertung**

Für die Auswertung der mit dem Verfahren der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ermittelten Daten Akzeptanz, empfundene Intensität und Hedonik wird von einer Normalverteilung ausgegangen. Damit kann aus den ermittelten Einzelwerten der Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt werden.

Eine Geruchsmessung mit einer Prüfergruppe entspricht einer Stichprobe, welche Teil einer Grundgesamtheit ist. Der Mittelwert ist damit ein geschätzter Mittelwert. Die Messung gilt als ausreichend genau, wenn der geschätzte Mittelwert mit 90 %-iger Wahrscheinlichkeit im Bereich des effektiven Mittelwertes liegt, der durch die Gesamtpopulation ermittelt werden würde. Dieser Bereich wird 90 %-Vertrauensbereich genannt und liegt beidseitig um den geschätzten Mittelwert. Unter Annahme einer Normalverteilung und bei unbekannter Standardabweichung der Population wird als Wahrscheinlichkeitsrechnung die t-Verteilung genutzt, um den zufälligen Vertrauensbereich einer Messung zu ermitteln.

Eine Bewertung gilt als ausreichend genau, wenn der 90 %-Vertrauensbereich für die Akzeptanz bei höchstens  $\pm 0,2$ , für die empfundene Intensität bei  $\pm 2,0$  pi und für die Hedonik bei  $\pm 1$  liegt. Diese Abweichungen vom Mittelwert werden aufgrund der Messunsicherheiten des Verfahrens toleriert.

Wird die Anforderung an den 90 %-Vertrauensbereich in einer Messung nicht erreicht, muss dies im Prüfbericht dokumentiert werden.

### **3.2.3.4 Anforderungen an die Versuchsleitung**

Die Versuchsleitung hat die Verantwortung für die Prüfenden, welche durch sie ausgewählt, ausgebildet, geleitet und während der Prüfung beaufsichtigt werden, um sicherstellen, dass die Verhaltensvorschriften eingehalten werden. Sie muss vor jeder Prüfung das Untersuchungsziel erläutern und den Zeitrahmen darlegen. Während der Geruchsmessung muss sie die sorgfältige Durchführung der Geruchsprüfung durch die Prüfergruppe überwachen. Darüber hinaus muss sie jede Kommunikation, die das Ergebnis beeinflussen könnte, unterbinden und dafür Sorge tragen, dass die Messung nicht gestört wird. Bei Verstößen gegen die Verhaltensvorschriften (KAPITEL 3.2.3.5) müssen die betroffenen Prüfenden vom aktuellen Prüfdurchlauf oder dauerhaft ausgeschlossen werden.

Vor jeder Prüfung sind die Bedingungen im Prüf- und Erholungsraum hinsichtlich ihres Hintergrundgeruchs und den Bedingungen zu Temperatur und Luftfeuchte (KAPITEL 3.2.3.1) zu überprüfen und falls erforderlich, anzupassen.

Gemäß VDI 4302-1 muss die Versuchsleitung sicherstellen, dass die Trichter hygienisch einwandfrei sind. Nach direktem Kontakt mit einer Prüferin oder einem Prüfer sind die Trichter zu reinigen oder auszutauschen.

Zur Bewertung der empfundenen Intensität muss die Prüfleitung sicherstellen, dass der Vergleichsmaßstab die gewünschten Acetonkonzentrationen darbietet, was beispielsweise mittels photoakustischer Spektroskopie (KAPITEL 3.6) gemessen werden kann. Sie muss auch prüfen, ob die Prüfenden die Kriterien der Leistungsprüfung zur Ermittlung der empfundenen Intensität (KAPITEL 3.2.2.2) erfüllen.

Die Versuchsleitung ist selbst kein Teil der Prüfergruppe. Sie sollte nicht anosmisch sein, um zum Beispiel störende Gerüche, die durch einzelne Prüfende eingebracht werden, zu erkennen.

Sie muss die Entwicklung der Prüfenden beobachten, um Veränderungen des Geruchssinnes der Prüfenden zu erkennen und darauf z. B. durch Schulungen zu reagieren.

### **3.2.3.5 Anforderungen an die Prüfergruppe**

Die Prüfenden dürfen grundsätzlich keine Geruchsstörung, z. B. durch Anosmien oder andere Einschränkungen bei der Geruchsempfindung, beispielsweise durch eine Erkältung, eine Nasennebenhöhlenentzündung oder einen Unfall, haben.

Für sie gelten die folgenden Verhaltensvorschriften, welche von der Versuchsleitung zu überwachen sind:

- Sie müssen für einen längeren Zeitraum für die Teilnahme an Messungen verfügbar sein.
- Die Geruchsprüfung ist von ihnen präzise auszuüben.
- Während der Messungen müssen sie Tätigkeiten vermeiden, die ihre Konzentration beeinflussen.
- Ab mindestens 30 bis 60 Minuten vor der Prüfung und dann bis zum Ende der Prüfung dürfen sie nicht rauchen, essen oder etwas anderes als Wasser trinken.
- Sie dürfen ihre eigene Wahrnehmung oder die Wahrnehmung anderer Prüfender im Prüf- und Erholungsraum nicht durch störende Körpergerüche aller Art (Körperhygiene, Parfüms, Pflegeprodukte, Waschmittel, Rauchgeruch) beeinflussen.
- Bei Erkältungen oder anderen Faktoren, die die Geruchswahrnehmung beeinträchtigen, dürfen sie nicht teilnehmen.
- Ein Austausch über den empfundenen Geruch und die Messergebnisse untereinander ist nicht zulässig.
- Die Nase muss beim Riechvorgang immer direkt in den Luftstrom über dem Trichter positioniert werden, sodass keine Umgebungsluft eingeatmet wird.
- Zur Beurteilung der Geruchsproben dürfen sie mehrmals an der Geruchsprobe riechen, wobei sie zwischendurch den Geruch immer auf sich wirken lassen sollen.

Folgende ergänzende Vorschriften gelten für die geschulte Prüfergruppe:

- Sie müssen fähig sein, Geruchsintensitäten zu unterscheiden, was in der Prüfergruppenschulung (KAPITEL 3.2.2.2) vermittelt wird.
- Zur Verhinderung von Adaptationseffekten in Bezug auf das Aceton müssen sie zwischendurch an frischer Luft riechen.

- Nehmen sie Unterschiede in der Wahrnehmung der Intensität des Acetons im Vergleich zu vorherigen Prüfdurchläufen wahr, so müssen sie die Versuchsleitung informieren.

### 3.2.4 Bewertung nach dem AgBB-Schema

In Deutschland wird die Eignung von Bauprodukten zur Anwendung im Innenraum unter Anwendung des AgBB-Schemas gemessen und bewertet (AgBB, 2021). Dieses umfasst sowohl die Prüfung und Bewertung der VOC-Emissionen als auch der Sensorik. Das Vorgehen wird im Folgenden beschrieben und in Abbildung 3-8 schematisch dargestellt.

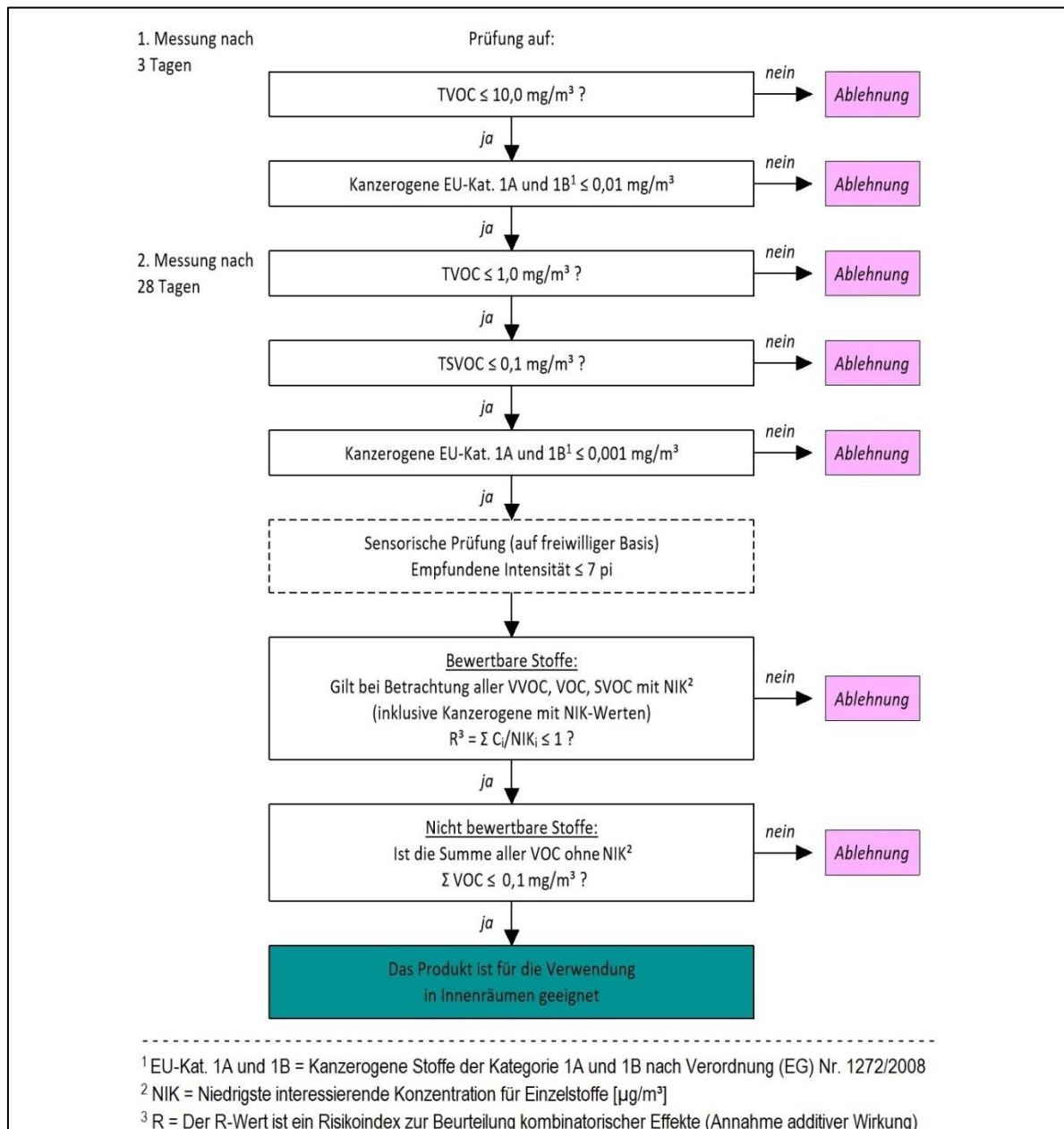


Abbildung 3-8: Schema zur gesundheitlichen Bewertung der Emissionen aus Bauprodukten, modifizierte Darstellung (AgBB, 2021)

Die VOC-Emissionen der Produkte werden in Tests mit Emissionsprüfkammern unter vorgegebenen Prüfbedingungen erfasst (KAPITEL 3.4). Die gesundheitliche Bewertung der Ergebnisse dieser Messungen umfasst die Berechnung und Begrenzung von Summenwerten

und die Begrenzung gesundheitlich kritischer Einzelstoffe. Es wird sowohl das Kurzzeit- als auch das Langzeitverhalten der Emissionen geprüft, indem am 3. und am 28. Tag nach Beladung der Emissionsprüfkammer eine Messung und Bewertung erfolgt.

An beiden Messtagen erfolgt die Ermittlung und Bewertung der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) und der Summe der kanzerogenen Verbindungen. Am 28. Messtag werden zusätzlich die Summe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen (TSVOC) sowie Einzelstoffe bewertet. Dabei erfolgt eine Unterteilung der identifizierten Stoffe in bewertbare und nicht bewertbare Stoffe. Die bewertbaren Stoffe sind Stoffe, für die eine niedrigste interessierende Konzentration (NIK-Wert) abgeleitet wurde, die in einer NIK-Liste im AgBB-Schema veröffentlicht ist. Um nachteilige gesundheitliche Wirkungen zu vermeiden, wird für alle bewertbaren Stoffe, einschließlich leicht flüchtiger (VVOC) und schwer flüchtiger organischer Verbindungen (SVOC) das Verhältnis ihrer gemessenen Konzentration ( $C_i$ ) zu ihrem NIK-Wert gebildet und die Summe dieser Verhältnisse darf einen Wert von eins nicht überschreiten. Es handelt sich dabei um den sogenannten Risikoindex (R-Wert) zur Beurteilung kombinatorischer toxikologischer Effekte unter Annahme einer additiven Wirkung. Für die nicht bewertbaren Stoffe existiert kein NIK-Wert. Bei diesen Stoffen wird die Summe ihrer Konzentration im Retentionsbereich der VOC-Verbindungen berechnet und begrenzt.

Die Gruppierung der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC, TSVOC, VVOC, VOC, SVOC) ist im AgBB-Schema definiert.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die VOC-Emissionen nach den im AgBB-Schema vorgegebenen Prüfbedingungen der DIN ISO 16000-6 (DIN, 2012b) und DIN EN 16516 (DIN, 2020) gemessen (KAPITEL 3.3). Sie werden jedoch nicht nach den Vorgaben des Schemas bewertet.

Um das Emissionsverhalten eines Bauproduktes vollständig zu erfassen, ist auch die sensorische Prüfung im AgBB-Schema integriert. Dabei wird die empfundene Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) in Verbindung mit der VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) gemessen und bewertet (KAPITEL 3.2.2.2).

Zur Beurteilung möchte der AgBB unzumutbare Belästigungen vermeiden, welche er für gegeben hält, wenn mehr als 30 % einer nicht geschulten, großen Gruppe von Befragten den Geruch eines Bauproduktes als unzumutbar bewertet. Da die Zumutbarkeit keine in der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) beschriebene Messgröße ist, leitet der AgBB aufgrund der Erkenntnisse eines Forschungsvorhabens ab, dass eine unzumutbare Belästigung ab einer Geruchsintensität von 7 pi gegeben ist (B. Müller et al., 2011). Dieser Bewertungsmaßstab wird vorläufig festgelegt und die Messungen sind freiwillig, da es insgesamt noch zu wenige Messungen gibt. Die Herleitung dieses Bewertungsmaßstabes wird in KAPITEL 4.2.1 beschrieben.

### **3.3 Ermittlung der VOC-Emissionen**

Die Bestimmung der VOCs im Rahmen dieser Arbeit erfolgt gemäß DIN ISO 16000-6 (DIN, 2012b) und DIN EN 16516 (DIN, 2020).

Für die Probenahme (KAPITEL 3.3.1) wird ein genau bestimmtes Volumen an Probenluft über ein mit einem Adsorbens gefülltes Sorptionsrohr geführt und die VOCs darauf zurückgehalten. Bei der anschließenden Analyse werden die VOCs mit einem inerten Trägergasstrom vom Rohr thermisch desorbiert und in einer Kühlfalle noch einmal fokussiert (KAPITEL 3.3.2). Von dort aus werden sie in einen Gaschromatographen injiziert, wo sie mithilfe der Kapillarsäule einzeln aufgetrennt werden (KAPITEL 3.3.3). Die einzelnen VOCs können dann mit dem Massenspektrometer als Detektor identifiziert und quantifiziert werden (KAPITEL 3.3.4).

### ***3.3.1 Probenahme***

Die Probenahme der organischen Luftinhaltsstoffe für die Thermodesorption erfolgt mit Sorptionsrohren aus Glas, die mit dem Adsorbens Tenax® gefüllt sind. Tenax® zeigt gute Adsorptionseigenschaften für die meisten VOCs im gewünschten Bereich und ist bis etwa 300 °C temperaturstabil, was für die thermische Desorption wichtig ist.

Übliche Probenvolumina liegen im Bereich von ein bis fünf Litern. Dabei sollte das gewählte Volumen an die zu erwartenden VOC-Konzentrationen angepasst und die Eignung getestet werden. Zu hohe Volumina können dazu führen, dass VOCs in hohen Konzentrationen nur teilweise vom Tenax® adsorbiert werden und somit durchbrechen, was zu einem falsch negativen Ergebnis führen kann. Zu hohe VOC-Konzentrationen können auch zu einer zu hohen Beladung der chromatographischen Säule führen, wodurch es zu Messungen außerhalb des kalibrierten Bereichs oder zur Überladung des Systems kommen kann. Eine genaue Quantifizierung ist in diesem Fall nicht möglich. Dahingegen kann bei zu geringen Volumina im Zusammenhang mit niedrigen VOC-Konzentrationen die Empfindlichkeit der Analytik nicht ausreichend hoch sein, was dazu führen kann, dass Substanzen gar nicht gefunden werden oder die Analytik im Bereich der Bestimmungsgrenze erfolgt, was hohe Messunsicherheit mit sich bringt.

### ***3.3.2 Thermodesorption***

Die Analyse der Sorptionsrohre im Labor beginnt mit der Thermodesorption. Diese erfolgt in zwei Stufen, wobei die Rohre zunächst in einem inerten Heliumgasstrom eines Desorptionsofens erhitzt werden und die Substanzen durch Temperatursteigerung desorbiert und im Gasstrom in eine Kühlfalle (Kaltaufgabesystem) überführt werden. Sie werden dort durch Stickstoffkühlung gesammelt (kryofokussiert), bis alle Substanzen desorbiert sind. Dann wird die Kühlfalle schnell aufgeheizt und die Substanzen so gemeinsam auf die Trennsäule überführt.

### ***3.3.3 Gaschromatographie***

Das Substanzgemisch tritt gasförmig mit dem Trägergasstrom als mobile Phase in die Trennsäule des Gaschromatographen ein, die von innen mit einer stationären Phase aus unbeweglichen, zähflüssigen Polyorganosiloxanen belegt ist. Die Säule ist in einem gut regelbaren Ofen eingebaut, um eine zeitlich gesteuerte Temperaturerhöhung auf die gewünschte konstante Temperatur zu ermöglichen und die für den Prozess gewünschten Bedingungen einstellen zu können.

Je nach ihrer Polarität und ihrem Dampfdruck gehen die Substanzen unterschiedlich stark in Wechselwirkung mit der stationären Phase, wobei Verteilungs-, Ad- und Desorptionsprozesse stattfinden. Die Substanzen verweilen dadurch unterschiedlich lange an der stationären Phase und das Gemisch wird so in einzelne chemische Verbindungen zerlegt. Diese eluieren dann am Ende der Säule getrennt zu unterschiedlichen Zeiten (Retentionszeiten) und werden dort durch das Massenspektrometer detektiert.

### ***3.3.4 Massenspektrometrie***

Massenspektrometer bestehen aus einer Ionenquelle, einem Massenanalysator und einem Detektor.

Zunächst werden in der Ionenquelle aus den eintretenden Substanzen Ionen erzeugt. Die Ionisation kann durch verschiedene Methoden erfolgen, wobei die Elektronen-Stoß-Ionisation (EI) am häufigsten zum Einsatz kommt (Lumitos AG, 2024; Universität zu Köln, o.J.) Dabei treffen zuvor in die Gasphase überführte Probenmoleküle auf einen ionisierenden Elektronenstrahl, dessen Elektronen bei Zusammenstößen mit den Molekülen in Wechselwirkung treten, was zu verschiedenen Reaktionen führt. Die häufigste Reaktion ist die Bildung positiver Molekülionen, die vollständig oder teilweise zu geladenen Massenfragmenten zerfallen. Bei den Ionen handelt es sich um ionisierte Atome, Cluster, Moleküle, Bruchstücke oder Molekülverbände (Assoziate). Jede Substanz fragmentiert dabei in ein spezifisches Ionenmuster.

Die Ionen werden beschleunigt und zu einem Strom gebündelt zum Massenanalysator weitergeleitet. Dieser trennt die Ionen durch Ablenkungskräfte in elektrischen oder magnetischen Feldern (je nach Art des Analysators) nach ihrem Masse-zu-Ladungsverhältnis auf (Wolff, 2021).

In einem computergestützten Detektor wird dann das Masse-zu-Ladungsverhältnis für jedes eintretende Ion gemessen. Die Signale werden in Form eines Massenspektrometers dargestellt, das die Intensität der Signale (Abundance) über dem Masse-zu-Ladungsverhältnis grafisch zeigt. Damit entsteht für jede Substanz ein spezifisches Massenspektrometer. Durch Abgleich des Massenspektrums mit einer Datenbank, die die Signale bekannter Substanzen enthält, wird die Identifikation erlaubt. Die Intensität der Signale ist im linearen dynamischen Bereich auch proportional zur Konzentration der Substanzen, wodurch eine Quantifizierung der Substanz erfolgen kann.

Die substanzspezifische Quantifizierung jeder einzelnen Substanz aus dem Stoffgemisch der Probe kann aus dem Signal des GC/MS-Systems abgelesen werden, indem ein Vergleich mit Standardsubstanzen erfolgt. Dazu wird das System zuvor mit den zu untersuchenden oder den zu erwartenden Substanzen kalibriert, wobei Standards mit unterschiedlichen Konzentrationen dieser Substanzen in Lösung hergestellt und auch in das GC/MS-System injiziert werden.

Mit den Ergebnissen kann daraus die Konzentration in der Luft berechnet werden. Die Information über die Konzentration der Substanz wird durch die Fläche unter dem Peak bereitgestellt, während Peak für Peak anhand der Retentionszeit durchgegangen wird.

Das GC/MS erzeugt ein Total-Ionenchromatogramm (TIC) und registriert die relative Häufigkeit (Response) der einzelnen Verbindungen zu ihren Retentionszeiten. Diese werden

mit den bekannten Massenspektren der reinen Verbindungen oder mit Massenspektrenbibliotheken verglichen.

Gemäß DIN ISO 16000-6 (DIN, 2012b) soll die Analyse möglichst vieler Verbindungen erfolgen, wobei die zehn größten Peaks und die, die in einer Massenkonzentration von mehr als  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  vorliegen, ausgewertet werden.

Das GC/MS-System wird dazu mit den zu bestimmenden Substanzen kalibriert, wobei die verwendeten Standards mit mindestens drei verschiedenen Konzentrationen ( $\text{ng}/\mu\text{l}$ ) hergestellt werden sollen. Die BAM, die die Messungen im Rahmen dieser Arbeit durchführt, nimmt eine Kalibrierung an sieben Punkten vor. Die Ergebnisse (Signal zu Gehalt) sollten jeweils eine Gerade ergeben, sodass eine Kalibrierung über dem linearen Bereich möglich ist. Die unbekannte Masse der Substanzen kann über die Geradengleichung ermittelt werden, denn die Peakflächen der einzelnen VOCs im Chromatogramm sind proportional zur injizierten Masse der Verbindung.

Stehen Verbindungen nicht als Vergleichs-Standard zur Verfügung oder können nicht identifiziert werden, erfolgt deren Quantifizierung über das Toluol-Äquivalent. Anhand des Toluol-Responsefaktors ist die Fläche in Toluol-Masseneinheiten umzuwandeln und die TVOC-Massenkonzentration der Probe zu berechnen. Die Angaben in Toluol-Äquivalenten sind halbquantitativ, da einzelne Verbindungen in der Mischung Responsefaktoren aufweisen können, die stark von dem des Toluols abweichen können (DIN, 2012b).

Die Messunsicherheit wird von der BAM im Bereich zwischen 10 und 20 % angegeben und ist abhängig von der Probenahme und der Analytik. Die Bestimmungsgrenzen werden ausgehend von den kleinsten Kalibrierstandards abgeschätzt und weisen für die meisten untersuchten Substanzen um  $1 \text{ ng}/\mu\text{l}$  auf, was in etwa auch einer Konzentration von 1 bis  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entspricht. Auch Verbindungen mit höheren Bestimmungsgrenzen können bei Erhöhung des Probenahmenvolumens diesen Bereich erreichen. Nur wenige meist polare Verbindungen erreichen höhere Bestimmungsgrenzen.

### **3.4 Emissionsprüfkammern**

Mithilfe von Emissionsprüfkammern werden die Prüfstücke der Bauprodukte in Bezug auf ihr Emissionsverhalten unter genau definierten Bedingungen untersucht, um sowohl ihre sensorischen Eigenschaften (KAPITEL 3.2.3) als auch die VOC-Emissionen zu ermitteln (KAPITEL 3.3). Die Anforderungen an Emissionsprüfkammern und die Messbedingungen für die Bestimmung der VOCs werden in der DIN EN ISO 16000-9 (DIN, 2008) und der DIN EN 16516 (DIN, 2020) festgelegt und hier beschrieben. Die Geruchsprüfung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) muss unter den gleichen Bedingungen erfolgen, wodurch ermöglicht wird, dass im Rahmen einer Messung sowohl die VOCs als auch der Geruch bestimmt werden kann.

Emissionsprüfkammern sind geschlossene Behältnisse, in denen Prüfstücke der zu untersuchenden Bauprodukte möglichst mittig positioniert und gleichmäßig mit reiner Luft überströmt werden können. Diese reichert sich dadurch mit den aus den Proben emittierenden VOCs an und wird so über eine Abluftvorrichtung wieder aus der Prüfkammer abgeführt. Luftdurchmischungssysteme sorgen dafür, dass überall in der Prüfkammer die gleichen VOC-

Konzentrationen herrschen. Um die Emissionen der Prüfstücke zu ermitteln, wird die Konzentration der VOCs in der Prüfkammerluft dann durch Probenahme auf Sorptionsrohren an Probenahmestellen ermittelt. Diese sind an geeigneten Stellen der Prüfkammer oder im Abluftvolumenstrom positioniert. Die Probenahme ist Teil der VOC-Analytik und wird in KAPITEL 3.3.1 beschrieben.

Die Emissionsprüfkammern bestehen größtenteils aus Glas und Edelstahl, um Senkeneffekte an den Wandungen, wie eine Adsorption von Substanzen, und damit fehlerhafte Messungen zu vermeiden. Die Edelstahloberflächen können zusätzlich inertisiert werden, indem sie elektropoliert werden. Die Zuluft muss staub- und VOC-frei sein und vor Beginn jeder Messung müssen die Prüfkammern immer gereinigt werden, um mögliche Verunreinigungen vorangegangener Messungen zu entfernen. Um eine möglichst geringe Hintergrundbelastung der Prüfkammer zu erreichen, werden die VOC-Konzentrationen der Zuluft begrenzt. Gemäß DIN EN ISO 16000-9 (DIN, 2008) darf sie in Bezug auf die Summe der VOC-Konzentrationen, die zwischen n-Hexan und n-Hexadecan eluieren, nicht mehr als  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  VOCs enthalten. Einzelne VOCs dürfen nicht in Konzentrationen höher als  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auftreten. Um aus der ermittelten VOC-Konzentration auf die zu erwartende Situation in Innenräumen schließen zu können, müssen die Emissionsprüfkammern unter Simulation realer Raumluftbedingungen betrieben werden. Zu diesem Zweck definiert die DIN EN 16516 (DIN, 2020) einen Referenzraum und ein Emissionsszenario.

### **Referenzraum:**

In einer Emissionsprüfkammer wird die Raumluftsituation in einem kleineren Maßstab abgebildet. Da alle Räume unterschiedlich sind, ist die Festlegung eines standardisierten Raumes (Referenzraum) erforderlich. Auch lassen sich so die Ergebnisse verschiedener Messungen vergleichbar machen. Der Raum gilt stellvertretend als Standard für europäische Innenräume und entspricht mit einer Fläche von  $12 \text{ m}^2$  und einem Volumen von  $30 \text{ m}^3$  einem kleinen Wohnraum. Durch die Angabe weiterer Vorgaben, z. B. befinden sich im Raum eine Tür und ein Fenster mit vorgegebenen Abmaßen, wird dieser genau definiert. Aus den vorgegebenen Abmessungen lassen sich für jeden Produkttyp (z. B. Bodenbelag, Wandpaneel, Dichtstoff) aus dem Quotienten der Produktoberfläche A und des Raumvolumens V Beladungsfaktoren L errechnen (Formel 3). Davon ausgehend, dass z. B. der Fußboden vollständig mit einem Belag ausgelegt wird, ergibt sich eine Fläche von  $12 \text{ m}^2$  für das Produkt. Für den  $30 \text{ m}^3$  großen Referenzraum ergibt sich damit der Produktbeladungsfaktor L von  $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Bei der Beladung der Emissionsprüfkammer mit Prüfstücken muss der jeweilige Produktbeladungsfaktor dann immer berücksichtigt werden.

*Formel 3: Berechnung des Produktbeladungsfaktors*

$$L = \frac{A}{V} \text{ in } \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

mit: A      Produktoberfläche im Referenzraum oder Probenlufttraum in  $\text{m}^2$   
V      Volumen des Referenzraumes oder des Probenlufttraumes in  $\text{m}^3$

### **Emissionsszenario:**

Um die Raumluftsituation vollständig wiedergeben zu können, wird zusätzlich zum Referenzraum und den Produktbeladungsfaktoren das Emissionsszenario durch die Festlegung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte sowie der Lüftung (Luftwechselrate und –geschwindigkeit) vorgegeben. Diese Größen beeinflussen das Emissionsverhalten der Probe. Sie werden auf die zu erwartenden Bedingungen in einem europäischen Innenraum angeglichen. Der Betrieb der Emissionsprüfkammer erfolgt bei einer konstanten Temperatur  $T$  von  $23\text{ °C}$  ( $\pm 1\text{ K}$ ) und einer konstanten relativen Luftfeuchte  $rF$  von  $50\%$  ( $\pm 5\%$ ). Finden keine VOC-Messungen, sondern nur sensorische Messungen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) statt, so sind die Toleranzen mit  $\pm 3\text{ K}$  für die Temperatur und  $\pm 10\%$  für die relative Luftfeuchte etwas größer. Bei der Luftwechselrate  $n$  wird für den Referenzraum von  $0,5\text{ h}^{-1}$  ausgegangen, wobei diese bei den Messungen in den Emissionsprüfkammern etwas angepasst und gemäß DIN EN 16516 (DIN, 2020) zwischen  $0,25$  und  $2,0\text{ h}^{-1}$  liegen darf. Zudem ist eine Luftgeschwindigkeit von  $0,1$  bis  $0,3\text{ m/s}$  über dem Prüfstück einzuhalten.

Um die Ergebnisse der ermittelten VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer mit dem Referenzraum vergleichbar zu machen, muss die flächenspezifische Luftdurchflussrate  $q_A$ , die das Verhältnis der Luftwechselrate  $n$  zum Produktbeladungsfaktor  $L$  ausdrückt, in der Prüfkammer und im Referenzraum eingehalten werden (Formel 4).

*Formel 4: Berechnung der flächenspezifischen Luftdurchflussrate  $q_A$*

$$q_A = \frac{n}{L} \text{ in } \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

mit:	$q_A$	flächenspezifische Luftdurchflussrate in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
	$n$	Luftwechselrate in $\text{h}^{-1}$
	$L$	Produktbeladungsfaktor in $\text{m}^2/\text{m}^3$

Emissionsprüfkammern können unterschiedlich groß sein und für eine Messung je nach Produkttyp, Probengröße oder Untersuchungsziel ausgewählt werden. TABELLE 3-1 (KAPITEL 3.2.3.2) zeigt typische Volumina für Emissionsprüfkammern.

Speziell für sensorische Prüfungen wurde von Gunnarsen (1994) die sogenannte CLIMPAQ, die „Chamber for Laboratory Investigations of Materials, Pollution and Air Quality“, entwickelt. Diese Prüfkammer wurde 1998 in der Nordtest Methode (Nordtest, 1998) beschrieben.

In dieser kleinen Prüfkammer aus Glas und Edelstahl mit einem Prüfraumvolumen von damals 51 Litern werden Proben der zu untersuchenden Bauprodukte so platziert, dass nur ihre Oberfläche der Prüfkammerluft ausgesetzt ist. Die Betriebsbedingungen der Prüfkammer sind mit einer Temperatur von etwa  $23\text{ °C}$  und einer relativen Luftfeuchte von etwa  $50\%$ ,

ähnlich den Bedingungen, die auch in der Innenraumluft zu erwarten sind. Die flächenspezifische Luftdurchflussrate  $q_A$ , die die Oberfläche des untersuchten Produktes, das Volumen der Prüfkammer oder des Modellraumes und die Luftwechselrate berücksichtigt, sollte in der Prüfkammer und in einem definierten Modellraum, der repräsentativ für einen realen Innenraum gilt, identisch sein.

CLIMPAQs werden für VOC-Messungen und sensorischen Messungen für das finnische Prüfzeichen M1 zur Emissionsklassifizierung von Baumaterialien verwendet (Rakennustieto, 2017). Im Luftqualitätslabor der HTW Berlin werden CLIMPAQs eingesetzt, die in ihrer Bauweise nur geringfügig abgewandelt sind (KAPITEL 5.1.1).

Seit der Überarbeitung der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ist die Anwendung von CLIMPAQs nicht mehr empfohlen, da die Luftwechselrate in der Kammer zu hoch ist. Aufgrund der damit verbundenen zu hohen Luftgeschwindigkeit, wird ein Einfluss auf die Emissionsrate der Proben vermutet. Ihre Vergleichbarkeit mit Emissionsprüfkammern konnte jedoch in Ringversuchen und Forschungsprojekten gezeigt werden (Horn, 2022; Horn et al., 2007). Ergebnisse von VOC-Messungen und sensorischen Bewertungen zeigen, dass mit der CLIMPAQ ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Ihre Verwendung im Rahmen dieser Promotion ist darüber hinaus erforderlich, um sensorische Vergleichsmessungen mit dem direkten Bewertungsverfahren zu ermöglichen. Vergleichsmessungen wären sonst nur unter Verwendung von Emissionsprüfkammern ab einem Volumen von  $3 \text{ m}^3$  möglich. Über solche Prüfkammern verfügt das Luftqualitätslabor der HTW Berlin nicht.

### **3.5 Hitzdrahtanemometer**

Bei den Geruchsmessungen ist eine genaue Einstellung des erforderlichen Luftvolumenstroms über den Beurteilungstrichtern und am Vergleichsmaßstab von Bedeutung. Die Ermittlung des Volumenstroms am Trichter für die sensorische Bewertung erfolgt mithilfe eines Hitzdrahtanemometers. Mit diesem wird die Strömungsgeschwindigkeit erfasst, woraus der Volumenstrom ermittelt werden kann. Der spezielle Versuchsaufbau wird in KAPITEL 5.1.4 beschrieben. In diesem Abschnitt wird das Prinzip des Hitzdrahtanemometers dargestellt.

Hitzdrahtanemometer erfassen die Strömungsgeschwindigkeit mithilfe eines Halbleiters. Dieser hat die Eigenschaft, dass sein Widerstand mit steigender Temperatur fällt, wodurch seine elektrische Leitfähigkeit steigt. Wird bei einer Messung ein Gas- oder Luftstrom am Halbleiter vorbeigeführt, so würde sich dieser abkühlen. Der Halbleiter wird jedoch kontinuierlich elektrisch aufgeheizt und durch eine Regelung auf einer konstanten Temperatur gehalten (AMR, o.J.). Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und damit einhergehender stärkerer Kühlung, muss der Strom erhöht werden, um den Halbleiter auf konstanter Temperatur zu halten. Dieser Regelstrom ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und wird gemessen.

### **3.6 Photoakustische Spektroskopie**

Die Ermittlung der Acetonkonzentration am Vergleichsmaßstab erfolgt mithilfe eines photoakustischen Detektors. Bei der photoakustischen Spektroskopie (PAS), welche unter anderem bei (Wolff, 2021) beschrieben wird, wird ein Teil der elektromagnetischen Energie, die durch eine gepulste infrarote Strahlung erzeugt wird, von der zu untersuchenden Gasprobe absorbiert und in eine messbare Schallwelle umgewandelt. Die von einer Substanz absorbierte

Wellenlänge ist spezifisch, wodurch dessen Identifizierung ermöglicht wird. Die Menge der Energie, die absorbiert wird, ist proportional zur erzeugten Druckerhöhung und zur Menge des absorbierenden Gases, was die Ermittlung der Gaskonzentration ermöglicht.

Der schematische Aufbau der PAS im Gasmonitor INNOVA ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Der Ablauf einer Messung wird durch den Hersteller wie folgt beschrieben (AE, 2020). Das Gerät arbeitet halbkontinuierlich, wobei alle 40 Sekunden eine Acetonkonzentration gemessen werden kann. Vor jeder Messung fördert eine Pumpe die alte Probe aus den Probenleitungen und der Messzelle hinaus und die neue Probe hinein. Durch Schließen der Ein- und Auslassventile wird die Probe in der Messzelle verschlossen und die Messung beginnt. Die infrarote Strahlungsquelle wird eingeschaltet, ein Parabolspiegel konzentriert das Licht und fokussiert es in Richtung der Messzelle. Auf dem Weg dorthin passiert das Licht ein Zerkhackerrad, wodurch die Weiterleitung einer genau definierten Modulationsfrequenz ermöglicht wird. Dann gelangt es noch zum Filterkarussell, welches den ausgewählten optischen Filter in den Lichtweg positioniert, sodass nur Licht der gewünschten Wellenlänge in die Messzelle mit der Gasprobe gelangt. In der Messzelle bewirkt die Absorption von Strahlung eine Erhöhung der inneren Energie der entsprechenden Moleküle. Stoßen diese dann gegen andere Moleküle, so wird die absorbierte Energie in kinetische Energie der Stoßpartner umgewandelt, was eine Temperaturerhöhung im betroffenen Volumen bewirkt, die eine Ausdehnung und damit eine Druckerhöhung zur Folge hat. Wird die Einstrahlung unterbrochen, kommt es sehr schnell zu einer Ableitung der Wärme über die Messzellenwände und zu einer Reduzierung des Druckes auf den Ausgangswert. Die Modulation der Einstrahlung ermöglicht damit eine schallartige Druckwellenerhöhung in der gleichen Modulation wie die Lichtimpulse. Das entstehende akustische Signal wird mit den Mikrofonen detektiert und ausgewertet.

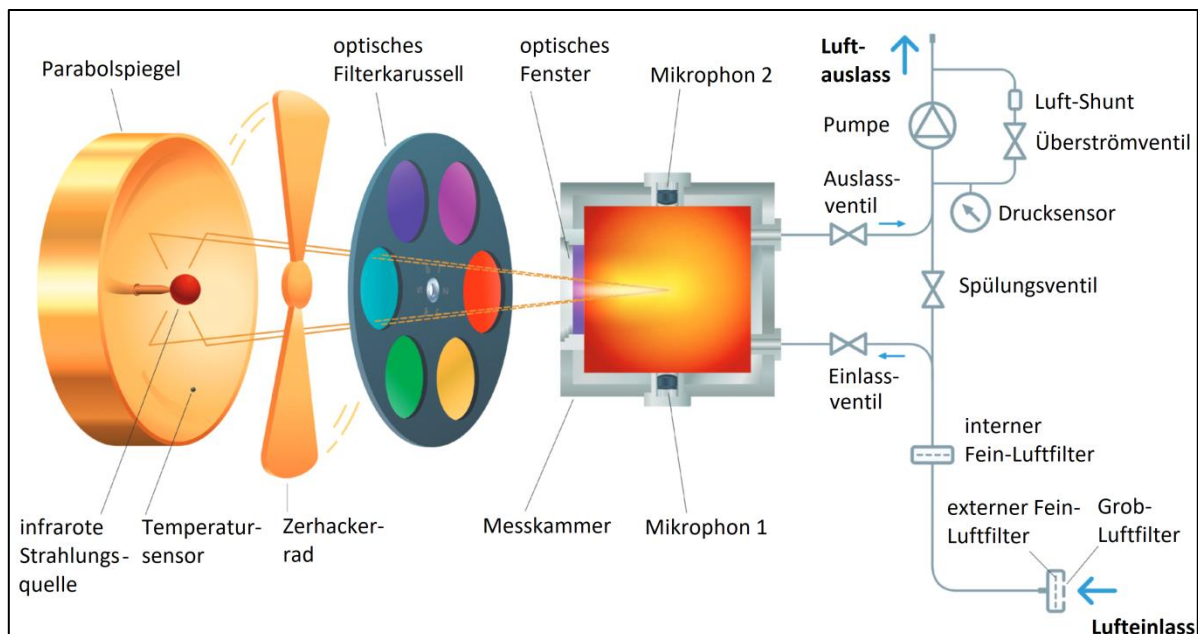


Abbildung 3-9: Schematischer Aufbau der PAS in den INNOVA Gasmonitoren der Firma LumaSense Technologies A/S (AE, 2020)

Das Filterkarussell ist mit fünf optischen Filtern ausgerüstet, womit in einer Messung bis zu fünf Komponenten gemessen werden könnten. Ein weiterer Filter misst die

Wasserdampfkonzentration, um Störungen durch Feuchtigkeit in der Gasprobe auszugleichen. Wasser absorbiert bei den meisten Wellenlängen infrarotes Licht und trägt damit zum akustischen Signal bei, weshalb mögliche Interferenzen daher für eine genaue Messung berechnet und ausgeglichen werden müssen.

## 4 Aktueller Forschungsstand

Die Zielsetzungen dieser Arbeit sollten die Weiterentwicklung der Probendarbietung und die Untersuchung einer vereinfachten Bewertung der empfundenen Intensität sein (KAPITEL 2).

In diesem Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand zu diesen Zielsetzungen beschrieben, wobei in KAPITEL 4.1 der Stand der Probendarbietung dargelegt wird und in KAPITEL 4.2 die Forschung zur Geruchsbewertung der empfundenen Intensität.

### 4.1 Probendarbietung

Gemäß den Vorgaben der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) erfolgt die Probendarbietung zur Geruchsbewertung standardgemäß durch die Verwendung von Probenbehältern und alternativ durch direkt an einem an der Emissionsprüfkammer angebrachten Trichter (KAPITEL 3.2.3.2). In KAPITEL 4.1.1. werden Messungen aus der Literatur gezeigt, in denen die Verfahren miteinander verglichen wurden.

Vor der Überarbeitung der DIN ISO 16000-28 in 2021 war die Bewertung zudem mithilfe einer Maske möglich, mit der ein kleines Volumen Probenluft aus der Emissionsprüfkammer gesammelt wurde und welche als Schnittstelle für die Prüfenden zur Geruchsbeurteilung verwendet wurde (DIN, 2012a). Die Maske wird in KAPITEL 4.1.2 vorgestellt.

#### 4.1.1 Vergleich der Verfahren zur Geruchsbewertung

Die Darbietung von Probenluft unter Verwendung von Probenbehältern ermöglicht eine Bewertung von Probenluft bei der Verwendung kleiner Emissionsprüfkammern (KAPITEL 3.2.3.2). Es ist bekannt, dass es dabei durch Permeations- und Adsorptionseffekte zum Verlust geruchsrelevanter Substanzen kommt (Horn et al., 2007; B. Müller, 2002). Die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) berücksichtigt diesen Umstand, indem im Rahmen des Validierungsverfahrens für die Zulassung von Behältermaterialien, eine Wiederfindungsrate von 80 % für zehn VOCs nach sechsständiger Untersuchungsdauer festgelegt wird und Anforderungen an die Vorbehandlung der Probenbehälter sowie an den Umgang mit ihnen gestellt werden (KAPITEL 3.2.3.2). Trotz der weitreichenden Bemühungen lassen sich VOC-Verluste also nicht ganz vermeiden. Die Frage ist, ob und inwieweit sich diese Verluste auf die Ergebnisse der sensorischen Prüfung auswirken. Naheliegend ist, dass die mit Probenbehältern ermittelte empfundene Intensität geringer ist als bei direkter Messung, da auch geruchsaktive Substanzen verloren gehen. Auch die Bewertung der Hedonik könnte dadurch zu einem anderen Ergebnis führen.

In diesem Kapitel werden vier in der Literatur dargestellte Untersuchungen vorgestellt, in denen der Einfluss der Probenahme auf das Ergebnis einer Geruchsbewertung untersucht wurde. Die Auswertung dieser Untersuchungen soll dabei helfen, die Leistung des in dieser Arbeit zu entwickelnden Adapters beurteilen zu können.

##### 4.1.1.1 Projektergebnisse des Hermann-Rietschel-Institutes (2011)

Eine Vergleichsmessung zu den beiden Verfahren der Probendarbietung zeigt eine Untersuchung des Hermann-Rietschel-Instituts (HRI) der TU Berlin und der BAM im Auftrag des Umweltbundesamtes. In dieser wurden am HRI und bei der BAM je eine CLIMPAQ mit

einer Fugenmasse und einem Fußbodenbelag aus Polyvinylchlorid (PVC) sowie bei der BAM zusätzlich eine Emissionsprüfkammer mit einem Volumen von 24 Litern unter Einhaltung der gleichen flächenspezifischen Luftdurchflussrate  $q_A$  parallel beladen. An insgesamt vier Messtagen erfolgte die sensorische Bewertung der empfundenen Intensität mit einer Prüfergruppe beim HRI. Die Hedonik wird nicht beurteilt. An der am HRI beladenen CLIMPAQ erfolgte eine direkte Bewertung und die Probenluft der aus den Kammern der BAM wurde durch Verwendung von Behältern aus Tedlar® zum HRI für die Bewertung transportiert. Die Behälter wurden vor ihrer Nutzung in einem Ofen bei 80 °C ausgeheizt, bis zu fünf Stunden gefüllt und vor ihrer Bewertung über einen Zeitraum von höchstens vier Stunden transportiert und gelagert.

Die Messungen erfolgten vor dem Erscheinen der DIN ISO 16000-28 in 2012, allerdings wurden sie bereits nach dem in der Norm beschriebenen Verfahren unter Verwendung des Vergleichsmaßstabes durchgeführt, welcher 2004 am HRI der TU Berlin entwickelt wurde (KAPITEL 3.2.1). Ein Leistungstest der Prüfenden (KAPITEL 3.2.2.2) findet dabei zwar noch nicht statt, jedoch beginnen die Prüfenden die Messung immer, indem sie unterschiedliche Acetonkonzentrationen ermitteln, um sich an die Umgebung und den Versuch zu gewöhnen.

Abbildung 4-1 zeigt die Ergebnisse. Die empfundene Intensität wird, außer am 15. Tag bei der Fugenmasse und am 2. Tag beim PVC-Belag, in allen Untersuchungen ähnlich bewertet und liegt mit Abweichungen um bis zu  $\pm 2,0$  pi voneinander im Bereich der Messunsicherheit des heute gültigen Verfahrens der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021). Die Ergebnisse der empfundenen Intensität bei direkter Beurteilung sind sowohl etwas größer als auch kleiner als die Ergebnisse der Bewertung mit Probenbehältern oder sie liegen genau zwischen der Bewertung der Probenluft aus der 24 L-Prüfkammer und der CLIMPAQ der BAM.

Im Projekt wurden vier weitere Produkte auf diese Weise beurteilt, deren Ergebnisse jedoch nicht dargestellt wurden. Es wird beschrieben, dass eines der Produkte ähnliche wie die hier dargestellten Ergebnisse aufweist und drei Produkte Unterschiede in der Bewertung der empfundenen Intensität von bis zu 4 pi aufweisen, wobei nicht geschrieben wird, ob eine der Bewertungsarten dabei tendenziell zu höheren oder niedrigeren Ergebnissen führt.

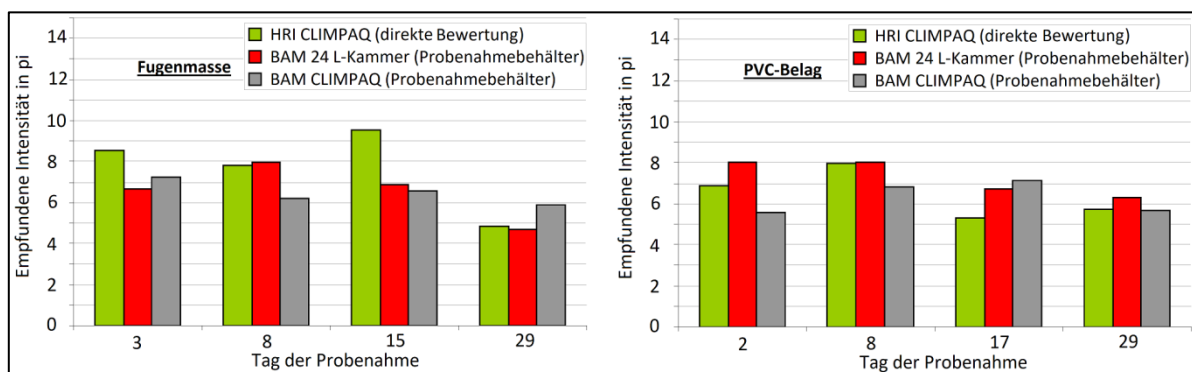


Abbildung 4-1: Vergleich der Bewertungen hinsichtlich der empfundenen Intensitäten mittels direkter Bewertung mit der CLIMPAQ und unter Verwendung von Probenbehältern aus Tedlar (B. Müller et al., 2011)

#### 4.1.1.2 Projektergebnisse des Fraunhofer WKI (2016)

In einem Projekt des Fraunhofer Institutes für Holzforschung (Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI) zur Evaluierung der Methode der DIN ISO 16000-28 wurde die empfundene Intensität von zwei Bauprodukten an mehreren Messtagen vergleichend durch direkte Bewertung und Verwendung von Probenbehältern ermittelt (Salthammer, Schulz, Stolte, Uhde & Bartsch, 2016). Eine Bewertung der Hedonik erfolgte nicht.

Das WKI untersuchte im Projekt auch den Einfluss unterschiedlicher Trichterformen und -größen. Im Rahmen dieser Dissertation werden nur die Ergebnisse der seit 2021 festgelegten Trichterform (KAPITEL 3.2.3.1) der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) gezeigt.

Es fanden zwei Messreihen statt. In der ersten Messreihe wurde die Probenluft einer Emissionsprüfkammer mit einem Volumen von 3 m<sup>3</sup> im direkten Verfahren und mit Behältern aus Nalophan® bewertet. Die Behälter wurden kurz vor der Messung drei Mal mit Probenluft aus der Prüfkammer gespült und dann gefüllt. Die Lagerungszeit wurde damit so kurz wie möglich gehalten. Abbildung 4-2 stellt die Ergebnisse der Messungen dar, wobei auf der X-Achse die Ergebnisse der empfundenen Intensität bei einer Verwendung von Probenbehältern (das WKI bezeichnet diese als indirekte Messung) und auf der Y-Achse bei direkter Messung gezeigt wird. Würde bei beiden Messungen der gleiche Wert erreicht werden, so lägen die Punkte der Bewertung an der diagonal eingetragenen (schwarz gestrichelten) Linie. Die Ergebnisse zeigen, dass alle 14 durchgeführten Vergleichsmessungen mit Probenbehältern aus Nalophan® zu niedrigeren Ergebnissen führen, wobei die Abweichungen zwischen 1 und 4 pi liegen.

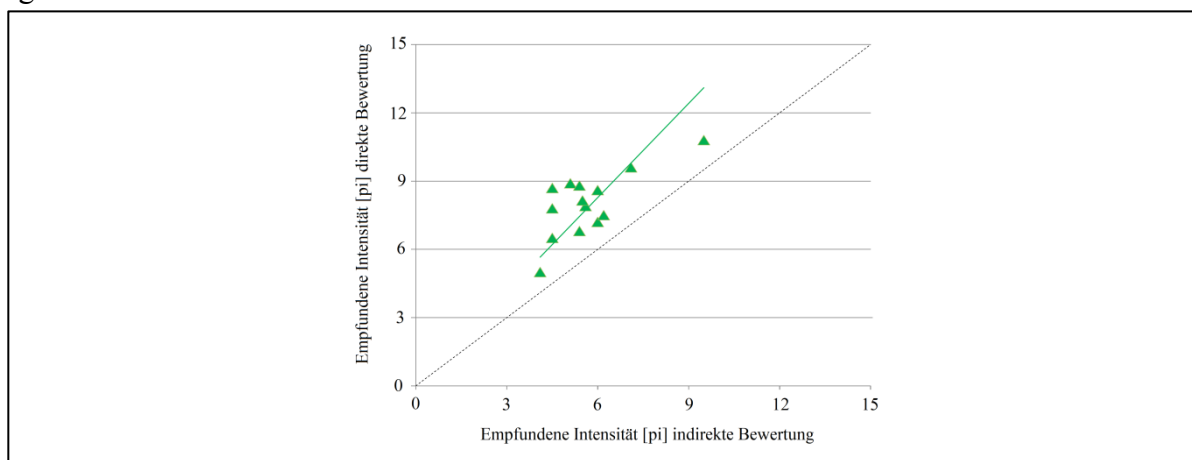


Abbildung 4-2: Vergleich der Bewertungen der empfundenen Intensität mit Probenbehältern aus Nalophan® (indirekt genannt) und im direkten Verfahren durch das WKI (Salthammer, Schulz, Stolte, Uhde & Bartsch, 2016)

In der zweiten Messreihe wurde ein Vergleich der Materialien der Probenbehälter vorgenommen. Die empfundene Intensität eines Bauproduktes (BP5) wurde an drei Messtagen (3, 14, 28) direkt und jeweils mit einem Probenbehälter aus Nalophan® und aus Tedlar® bewertet. Auch hier wurden die Behälter kurz vor der Messung drei Mal mit Probenluft aus der Emissionsprüfkammer gespült und gefüllt. Eine Vorbehandlung der Behälter aus Tedlar® durch Ausheizen wird im Bericht nicht beschrieben. Die in Abbildung 4-3 dargestellten Messungen zeigen den Mittelwert und die Standardabweichung der empfundenen Intensität. Mit dem direkten Verfahren wurden die höchsten empfundenen Intensitäten erreicht, gefolgt von Behältern aus Nalophan® und dann mit Tedlar® mit den

niedrigsten empfundenen Intensitäten. Die Bewertungen mit Behältern aus Nalophan® liegen im Vergleich zur direkten Bewertung mit etwa 1 pi niedriger zwar im Rahmen der Messunsicherheit des Verfahrens von  $\pm 2,0$  pi, aber in ihrer Tendenz immer niedriger. Die Bewertungen mit Behältern aus Tedlar® sind mit Abweichungen von etwa 2 bis 4 pi deutlich niedriger als bei der Bewertung im direkten Verfahren. Eine Erklärung für die niedrigen Befunde mit Behältern aus Tedlar® ist im Bericht des WKI nicht angegeben.

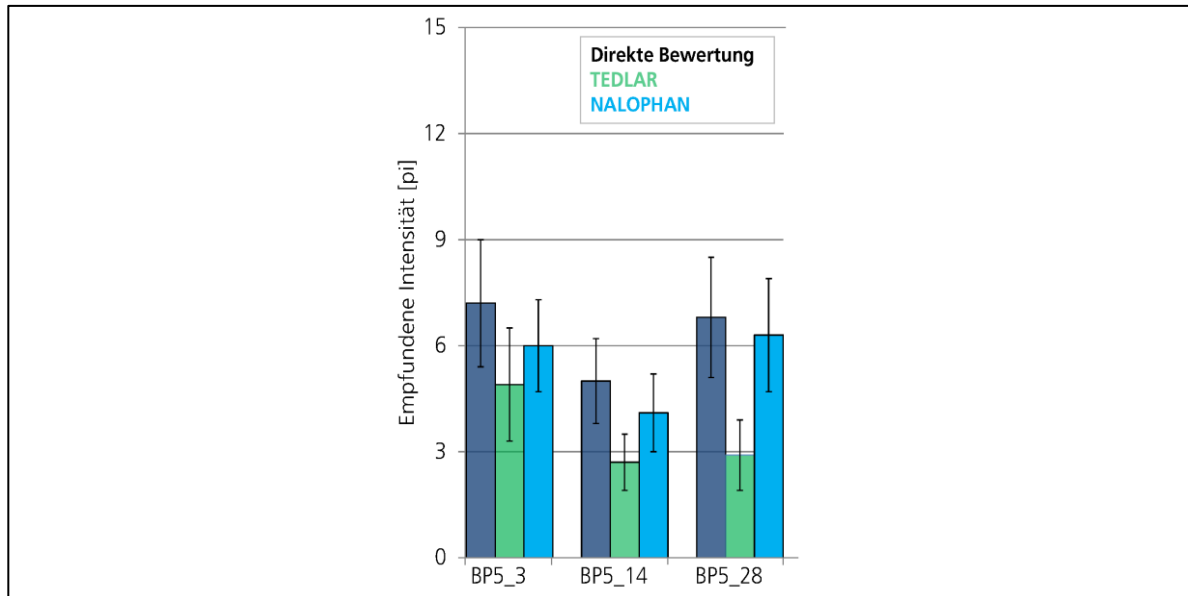


Abbildung 4-3: Vergleich der Bewertungen der empfundenen Intensität im direkten Verfahren und mit Probenbehältern aus Tedlar® und Nalophan® durch das WKI (Salthammer, Schulz, Stolte, Uhde & Bartsch, 2016)

#### 4.1.1.3 Projektergebnisse der HTW Berlin, BAM und RWTH Aachen (2017)

Die HTW Berlin und die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH) führten gemeinsam mit der BAM im Rahmen eines Forschungsprojektes des Umweltbundesamtes (B. Müller et al., 2019) Untersuchungen durch, bei denen die empfundene Intensität und die Hedonik fünf textiler Bodenbeläge gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2012a) gleichzeitig an den beiden Hochschulen ermittelt wurden. Ziel dieser Untersuchungen war es zu prüfen, ob die Bewertungsmethoden zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Dabei führte die HTW Berlin eine direkte Bewertung direkt an CLIMPAQs (KAPITEL 3.4) durch und die RWTH verwendete Probenbehälter aus Tedlar®. Die Probenbehälter wurden mit Probenluft aus Emissionsprüfkammern beim Teppichforschungsinstitut (TFI) in Aachen gefüllt. Diese hatten eine Größe von 250 Liter, waren mit einer Produktfläche von 0,1 m<sup>2</sup> beladen und wurden mit Probenluft gefüllt zur RWTH transportiert. Die Vorbehandlung der Behälter wird im Bericht nicht beschrieben. Die Bewertungen sind in Abbildung 4-4 dargestellt, wobei die grünen Balken die direkte Bewertung durch die HTW Berlin und die blauen Balken die Bewertung mit Probenbehältern durch die RWTH zeigen.

Insgesamt wurden in Bezug auf die empfundene Intensität zwei Proben bei direkter Bewertung höher, zwei Proben niedriger und eine Probe fast identisch bewertet. Bis auf eine Probe (WE 0891) liegen alle Bewertungsunterschiede zwischen HTW Berlin und RWTH Aachen im Rahmen der Messunsicherheit des Verfahrens von  $\pm 2,0$  pi. Die Hedonik von vier

Proben wurde unangenehm und eine Probe angenehm bewertet, wobei alle Proben sehr ähnlich in beiden Verfahren bewertet wurden. Ein Einfluss der Art der Probendarbietung ist bei der Bewertung der Hedonik nicht festzustellen.

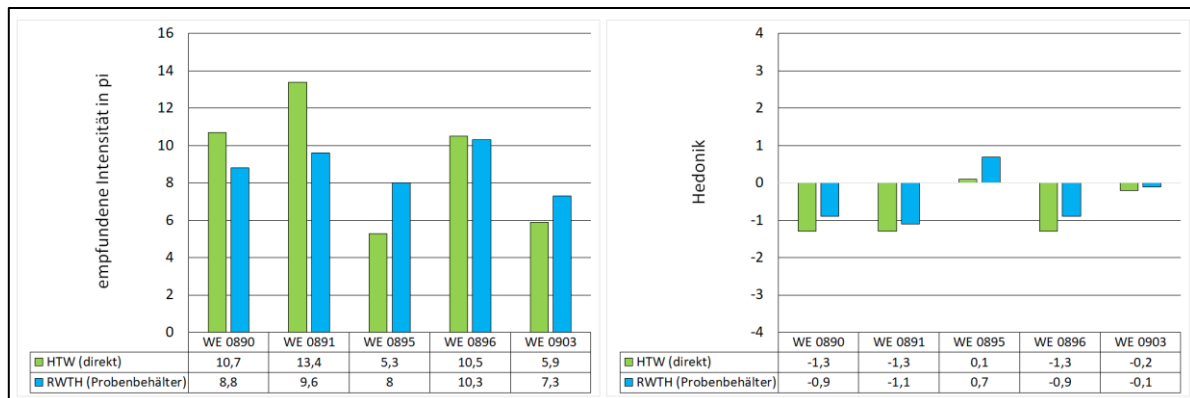


Abbildung 4-4: Vergleich der Bewertungen der ermittelten empfundenen Intensität (links) und Hedonik (rechts) von fünf textilen Bodenbelägen durch direkte Bewertung an der HTW Berlin und Verwendung von Probenbehältern aus Tedlar® an der RWTH Aachen (B. Müller et al., 2019)

#### 4.1.1.4 Ergebnisse aus einem Ringversuch der BAM (2018)

Die BAM führt seit 2012 alle zwei Jahre einen Ringversuch durch, in denen die beteiligten Labore eine Referenzprobe zur Verfügung gestellt bekommen, um die VOC-Emissionen gemäß DIN EN ISO 16000-9 (DIN, 2008) und den Geruch gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2012a) zu ermitteln. Im Ringversuch 2018 (BAM, 2018) haben zehn Prüflabore in insgesamt 19 Messungen die empfundene Intensität und die Hedonik eines Lackes durch Verwendung von Probenbehältern und im direkten Messverfahren ermittelt. Aus dem Bericht des Ringversuches geht nicht hervor, welche Art von Probenbehältern (Nalophan® oder Tedlar®) verwendet wurde.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-5 dargestellt, wobei auf der X-Achse eine dreistellige Zahl als Laborkennung angegeben ist, um die Labore zu anonymisieren. Ist daran eine Ergänzung hinter einen Bindestrich gefügt, so wurden mehrere Beurteilungen durchgeführt. Die Rauten zeigen die durch die Labore ermittelten Mittelwerte der empfundenen Intensität (primäre Y-Achse) und die Quadrate die Hedonik (sekundäre Y-Achse). Die Standardabweichung der empfundenen Intensität wird mit einer schwarzen Linie dargestellt. Der Mittelwert aller durch die Labore ermittelten Mittelwerte beider Messgrößen wird durch eine gestrichelte Linie angezeigt. Zudem wird die Anzahl der Prüfenden bei den einzelnen Messungen angegeben.

Bei der Bewertung der empfundenen Intensität zeigt sich, dass die Beurteilung der gemeinsamen Referenzprobe mit Probenbehältern häufig intensiver wahrgenommen wird als bei direkter Bewertung. Die Werte liegen meist oberhalb des Mittelwertes aller Messungen von 10,7 pi. Alle direkten Beurteilungen liegen unterhalb des Mittelwertes bis auf einen Wert bei 10,8 pi, der sehr nah am Mittelwert liegt.

Nun erfolgt eine Auswertung mit Blick auf die einzelnen teilnehmenden Labore, um zu prüfen, ob eine Aussage darüber möglich ist, wie die Beurteilungen ausfallen, wenn die Messbedingungen eines Labors gelten (interne Messungen).

Sieben der zehn Labore führten zwei Messungen und ein Labor drei Messungen durch. Von diesen sieben Laboren führten vier Labore ihre beiden Bewertungen mit Probenbehältern durch, zwei Labore ausschließlich mit dem direkten Verfahren und ein Labor wendete beide Verfahren an. Das Labor mit drei Beurteilungen führte eine mit direkter Bewertung und zwei mit Probenbehältern durch. Es führen also zwei Labore (Laborkennung 114 und 609) beide Verfahren durch, sodass hier ein Vergleich bezogen auf das Labor erfolgen kann. Im Labor 114 lag der direkt ermittelte Wert für die empfundene Intensität bei 8,8 pi und damit genau zwischen den mit Probenbehältern ermittelten Werten von 8 pi und 9,5 pi. Im Labor 609 lag der im direkten Verfahren ermittelte Wert bei 10,8 pi und im Verfahren mit Probenbehältern bei 8,8 pi. Die Ergebnisse liegen jeweils innerhalb der Messunsicherheit des Verfahrens bei  $\pm 2,0$  pi.

In Bezug auf die Hedonik wird die Probe in allen Messungen als unangenehm beurteilt. Beim Labor mit der Kennung 910 ist zwar eine Hedonik von 0 dargestellt, jedoch geht aus dem Prüfbericht (BAM, 2018) hervor, dass dieses Labor die Hedonik nicht bewertet hat. Die zwei angenehmsten hedonischen Bewertungen mit -0,3 und -0,4 erfolgten in direkter Beurteilung und die unangenehmsten Bewertungen mit Werten von größer -3 erfolgten mit Probenbehältern. Die meisten Bewertungen liegen im Bereich zwischen -2 und -3.

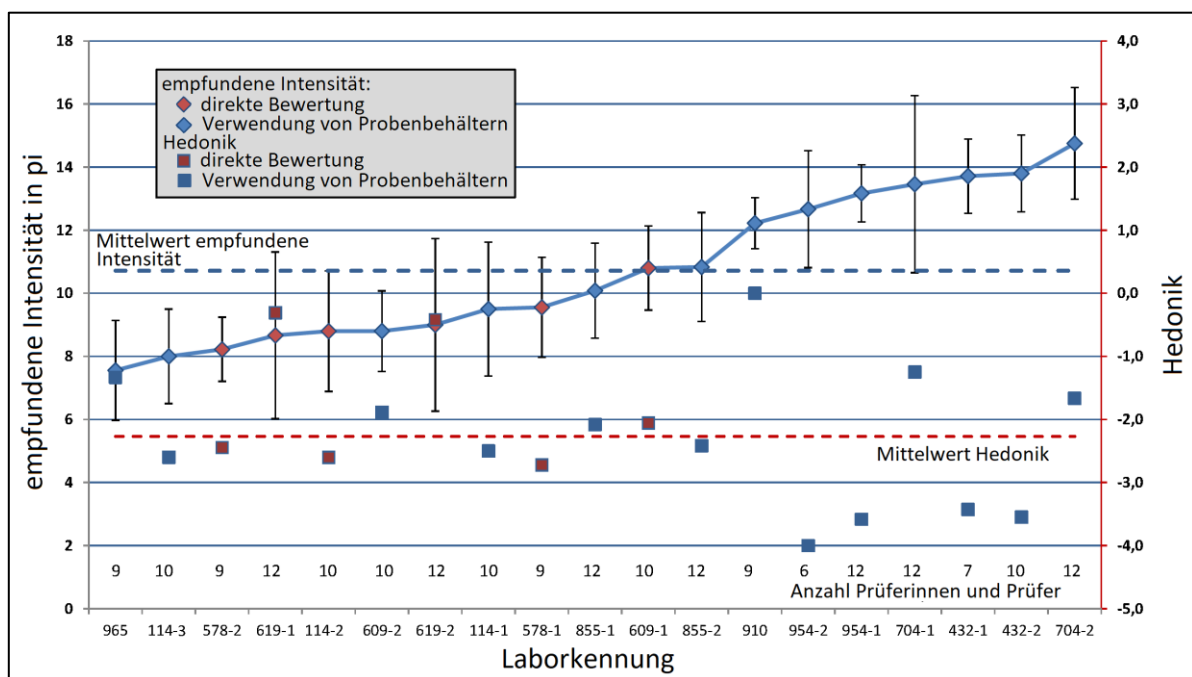


Abbildung 4-5: Empfundene Intensität und Hedonik sowie Anzahl der Prüfenden der teilnehmenden Labore im Ringversuch der BAM in 2018 (Horn et al., 2018)

#### 4.1.1.5 Gesamtauswertung der Projektergebnisse aus der Literatur

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass das Standardverfahren im Vergleich zum direkten Verfahren sowohl zu vergleichbaren empfundenen Intensitäten (1. HRI und 3. HTW), als auch zu höheren (3. HTW Berlin) oder zu niedrigeren empfundenen Intensitäten (2. WKI) führen kann. Die Hedonik wurde in zwei Projekten bewertet (3. HTW Berlin und 4. BAM), wobei vergleichbare Ergebnisse erzielt wurden mit einer Tendenz zu einer eher unangenehmeren Bewertung beim Standardverfahren in einem Projekt (4. BAM).

Obwohl also bei einer Verwendung von Probenbehältern von einem Verlust geruchsaktiver Substanzen auszugehen ist, heißt dies nicht, dass die ermittelte empfundene Geruchsintensität damit grundsätzlich niedriger ist; es bestehen aber Abweichungen bei der Verwendung der unterschiedlichen Verfahren. Eine Erklärung könnte sein, dass sich die Gerüche einzelner Verbindungen in einem Gemisch gegenseitig maskieren (KAPITEL 3.1). Dies würde auch dazu führen, dass bei einer geringer werdenden Konzentration einer Substanz, z. B. durch Adsorption an Behältermaterialien, der Geruch einer anderen Substanz intensiver hervortritt.

Insgesamt gab es bei der Durchführung große Unterschiede, die die Vergleichbarkeit der Messungen einschränken:

- Die Bewertung nach dem Standardverfahren und dem direkten Verfahren fand meist in unterschiedlichen Laboren und damit unter Verwendung unterschiedlicher Prüfergruppen statt. Nur in einem Institut (2. WKI) konnten beide Verfahren getestet werden. Trotz genauer Beschreibung von Messabläufen in der Norm bestehen Unterschiede zwischen den Laboren. So müssen diese bei den Messungen einer einheitlichen Vorgehensweise bei der Behälterkonditionierung folgen (z. B. muss Tedlar® vor jedem Gebrauch ausgeheizt werden). Auch muss der Volumenstrom an den Trichtern konstant und im Bereich von 0,6 bis 1,0 l/s liegen (KAPITEL 3.2.3.2) und die Einstellung der Acetonkonzentration am Vergleichsmaßstab muss präzise durchgeführt werden. Diese Randbedingungen sind in der DIN ISO 16000-28 zwar formuliert, jedoch konnte in einem Ringversuch der BAM (Brosig et al., 2014) gezeigt werden, dass es damit Schwierigkeiten gibt. Die Gründe für Messabweichungen, vor allem außerhalb der Messunsicherheit des Verfahrens von über  $\pm 2,0$  pi, können also auch andere sein, die sich vielleicht durch Präzisierung von Messabläufen reduzieren lassen.
- Die DIN ISO 16000-28 wurde 2012 zum ersten Mal veröffentlicht, weshalb die Durchführungsbestimmungen im Projekt des HRI (KAPITEL 4.1.1.1) nicht vollumfänglich berücksichtigt werden konnten. Die Durchführung erfolgte jedoch in sehr ähnlicher Weise, da das Projekt zum Ziel hatte, die Norm zu entwickeln (B. Müller et al., 2011).

Es gibt insgesamt nur wenige Messungen, die einen Vergleich der Verfahren zeigen. Im Rahmen der Leistungsprüfung des Adapters ist es daher wichtig, zunächst im Luftqualitätslabor der HTW Berlin eigene Messungen zur Verwendung von Probenbehältern durchzuführen, um den Vergleich spezifisch für das Labor durchzuführen und damit eine Bewertungsbasis zu schaffen (KAPITEL 6.1).

#### **4.1.2 Verwendung von Masken**

Neben den Verfahren mit Probenbehältern und der direkten Bewertung konnten gemäß der vorangegangenen Fassung der DIN ISO 16000-28 von 2012 zur Durchführung von Geruchsbewertungen Masken verwendet werden, wenn der geforderte Luftvolumenstrom von 0,6 bis 1,0 l/s am Trichter nicht erreicht werden konnte (DIN, 2012a). Der Ausgangsstutzen der Emissionsprüfkammer wurde dazu mit einer Maske aus den inerten Materialien Glas oder Edelstahl verbunden. Diese wurde damit kontinuierlicher mit Luft aus der Emissionsprüfkammerluft durchströmt. Ihr Mindestvolumen musste 1,5 Liter betragen, um drei tiefe Atemzüge von je 0,5 Liter zu erlauben. Abbildung 4-6 zeigt ein Foto der Maske, welche der HTW Berlin freundlicherweise von Eurofins in Finnland zur Verfügung gestellt

wurde. Die Emissionsprüfkammer wird am unteren Rohrstutzen angeschlossen und am oberen Ende wird die überströmende Luft abgesaugt, um eine Kontamination des Prüfraums zu vermeiden. Bei der Geruchsbeurteilung positionieren die Prüfenden ihre Nase in der dreieckigen Aussparung.



Abbildung 4-6: Maske für Geruchsbewertungen gemäß der alten Fassung der DIN ISO 16000-28 von 2012

Die DIN ISO 16000-28 in ihrer alten Fassung forderte auch, dass die Ergebnisse der Bewertung mit dem Verfahren der Maske im Vergleich zum direkten Verfahren validiert sein müssen (DIN, 2012a). In der Recherche für diese Dissertation konnte dahingehend nur eine Forschungsarbeit gefunden werden, die Vergleichsmessungen zeigt. Darin wurde die Akzeptanz fünf verschiedener Fußbodenbeläge und einer Gipswand mit einer Prüfergruppe einer Größe von 7 bis 12 Personen an zwei Messtagen ermittelt, sodass insgesamt 12 Vergleichsmessungen durchgeführt wurden (Tirkkonen et al., 2004). Die Messungen erfolgten an einer 100 Liter großen Emissionsprüfkammer mit einem Trichter und an einer 5 m<sup>3</sup> Prüfkammer mit der Maske. An der 100 L-Prüfkammer wurde ein Trichtervolumenstrom von 0,9 l/s eingestellt, sodass eine direkte Messung möglich war. Da die Luftwechselrate in der großen Prüfkammer 0,5 h<sup>-1</sup> betragen sollte, konnte hier am Ausgang der Emissionsprüfkammer nur ein Luftvolumenstrom von 0,7 l/s statt der gewünschten 0,9 l/s erreicht werden, weshalb die Maske verwendet wurde. Die Bewertung erfolgte mittels einer kontinuierlichen Akzeptanzskala von -1 (klar unakzeptabel) bis +1 (klar akzeptabel), wobei nicht die Möglichkeit einer neutralen Bewertung bestand (Skala mit Lücke). Aus den ermittelten Einzelwerten wurde der Mittelwert der Akzeptanz gebildet. Bei fünf von sechs Produkten bzw. in 10 von 12 Messungen wurde die Akzeptanz positiv bewertet. Bei der Messung mit der Maske wurde etwas besser als bei der Messung mit Trichter bewertet. Bei der Messung der Gipswand wurde die Akzeptanz negativ bewertet und dabei mit der Maske etwas schlechter als bei der Messung mit dem Trichter. Die Studie schlussfolgert, dass die Bewertungsunterschiede insgesamt als gering angesehen werden.

Dass in der Literatur keine weiteren Messungen gefunden werden können und dass die Maske in der heute geltenden Norm DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) nicht mehr zugelassen ist, legt die Vermutung nahe, dass es Schwierigkeiten mit der Vergleichbarkeit der Messungen gab. Ursache dafür könnte sein, dass sich ein dichter Abschluss zwischen Nase und Maske nicht

realisieren ließ und beim Riechen damit Umgebungsluft nachströmen konnte. Auch aus hygienischer Sicht ist eine Maske ungünstig, da die Maske nicht ohne weiteres (wie ein Trichter) ausgetauscht oder gereinigt werden kann, wenn die Nase diese berührt.

Die Maske stellte im Grunde auch einen Adapter dar. Mit ihr konnte trotz kleinen Volumenstroms direkt an der Prüfkammer gemessen werden. Die Idee wird daher für den Bau des im Rahmen dieser Promotion entwickelten Adapters aufgegriffen (KAPITEL 6).

## 4.2 Geruchsbewertung

Zur Bewertung der sensorischen Eignung von Bauprodukten für den Innenraum legte der AgBB einen Schwellenwert von 7 pi fest. Die Überschreitung dieser Intensität führt zu einer Belästigung, bei der der Geruch von über 30 % der Prüfenden als unzumutbar eingestuft wird. Die Herleitung der sensorischen Bewertung von Bauprodukten nach dem AgBB Schema anhand ihrer Zumutbarkeit in einem Forschungsprojekt wird in KAPITEL 4.2.1 beschrieben.

In KAPITEL 4.2.2 werden anhand einer Untersuchung zu Geruchszonen Zusammenhänge zwischen den Messgrößen Akzeptanz, empfundene Intensität, Hedonik und Zumutbarkeit dargestellt, die für die spätere Auswertung der in dieser Arbeit erhobenen Messdaten Orientierung geben.

### 4.2.1 Bewertung von Bauprodukten anhand der Zumutbarkeit

Gemäß der europäischen Bauproduktenverordnung muss ein Bauwerk „... *derart entworfen und ausgeführt sein, dass es während des gesamten Lebenszyklus weder die Hygiene noch die Gesundheit und Sicherheit von Arbeitnehmern, Bewohnern oder Anwohnern gefährdet [...] insbesondere durch [...] Emissionen von gefährlichen Stoffen, flüchtigen organischen Verbindungen ...*“ (BauPVO, 2011). Damit dürfen in nationalen Regeln der europäischen Mitgliedstaaten Anforderungen gestellt werden, die die Gesundheit der Raumnutzer schützen (AgBB, 2021). In Deutschland verwendet die Musterbauordnung, auf welcher die Landesbauordnungen basieren, dazu im § 13 „Schutz gegen schädliche Einflüsse“ den Begriff „unzumutbare Belästigung“ und legt fest, dass bauliche Anlagen so errichtet sein müssen, dass unter anderem durch „*chemische, physikalische oder biologische Einflüsse Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen*“ (MBO, 2002). Dazu zählen auch Gerüche aus Bauprodukten, die zu Belästigungen führen und gesundheitliche Auswirkungen haben können (KAPITEL 3.1).

Aus den Vorgaben des Baurechts leitet sich ab, dass die Zumutbarkeit auch bei der sensorischen Bewertung von Bauprodukten im Rahmen des AgBB-Schemas erfolgen muss. Die Bestimmung der Zumutbarkeit ist jedoch keine Messgröße gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021), weshalb nach der ersten Veröffentlichung der Norm in 2012 die Frage bestand, wie die Zumutbarkeit mithilfe der Messgrößen der Norm ermittelt werden kann. In einem Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes (B. Müller et al., 2011) wurde die Zumutbarkeit daher zunächst definiert und ihre Messung beschrieben (KAPITEL 3.2.2.4). Darüber hinaus wurden in sensorischen Messungen neben der Befragung nach der Zumutbarkeit auch die Messgrößen der Norm (Akzeptanz, empfundene Intensität, Hedonik) ermittelt, um Zusammenhänge zwischen den Messgrößen zu finden und zu prüfen, wie die Zumutbarkeit indirekt über die durch die Norm gegebenen Messgrößen ermittelt werden kann. Ziel des

Forschungsprojektes war es, eine Methode für die sensorische Bewertung und Grenzwerte für das AgBB-Schema und auch für die Vergabegrundlagen des Blauen Engels zu finden, auf Grundlage der Messung der empfundenen Intensität und Hedonik. Dabei sollte das AgBB-Schema die Mindestanforderungen an den Geruch von Bauprodukten festlegen und der Blaue Engel darüber hinaus gehende Anforderungen an Produkte definieren, die als geruchsarm ausgezeichnet werden können.

Insgesamt wurden 40 Bauprodukte in CLIMPAQs sensorisch untersucht. An vier Messtagen wurde die empfundene Intensität durch eine geschulte Prüfergruppe von 15 Personen untersucht, von denen an den Messtagen immer zwischen 9 bis 14 Personen zur Verfügung standen. Eine Leistungsprüfung der Prüfenden erfolgte damals noch nicht, weshalb alle Prüfergebnisse in die Auswertung einbezogen wurden. Die Ermittlung der Hedonik erfolgte ebenfalls mit dieser Gruppe. An den meisten darauffolgenden Tagen erfolgte eine Bewertung durch eine große Gruppe ungeschulter Prüfender von ca. 50 Personen, von denen jeweils zwischen 17 und 25 Personen zur Verfügung standen. Sie ermittelten die Akzeptanz und die Zumutbarkeit der dargebotenen Probenluft. Abbildung 4-7 zeigt die Oberfläche der Datenerfassungssoftware, die die ungeschulten Prüfenden für die Bewertung der Proben nutzen sollten.

Abbildung 4-7: Oberfläche der Datenerfassungssoftware für ungeschulte Prüfende (B. Müller et al., 2011)

Abbildung 4-8 zeigt die Ergebnisse der jeweils ermittelten Mittelwerte der empfundenen Intensität durch die geschulte Prüfergruppe im Zusammenhang mit dem Prozentsatz der Zumutbarkeit, der durch die ungeschulte große Prüfergruppe am Folgetag ermittelt wurde. Es ist deutlich, dass die Zumutbarkeit einer Geruchsprobe mit steigender Intensität linear sinkt.

Auch ein Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität und der Hedonik konnte ermittelt werden. Die Ergebnisse in Abbildung 4-9 zeigen, dass die Hedonik meist negativ bewertet wird, wobei Bauprodukte mit steigender Intensität immer unangenehmer wahrgenommen werden. In der Darstellung erfolgte eine Aufschlüsselung nach einzelnen

Produktgruppen. Nur Parkette und PVC-Beläge wurden auch häufig angenehm und niedrig in ihrer empfundenen Intensität wahrgenommen.

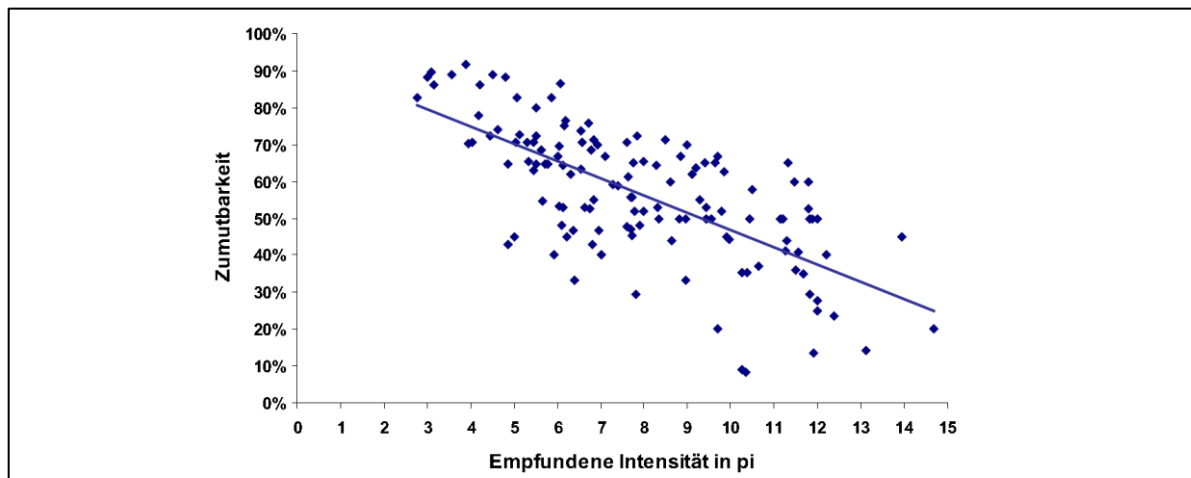


Abbildung 4-8: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität und Zumutbarkeit (B. Müller et al., 2011)

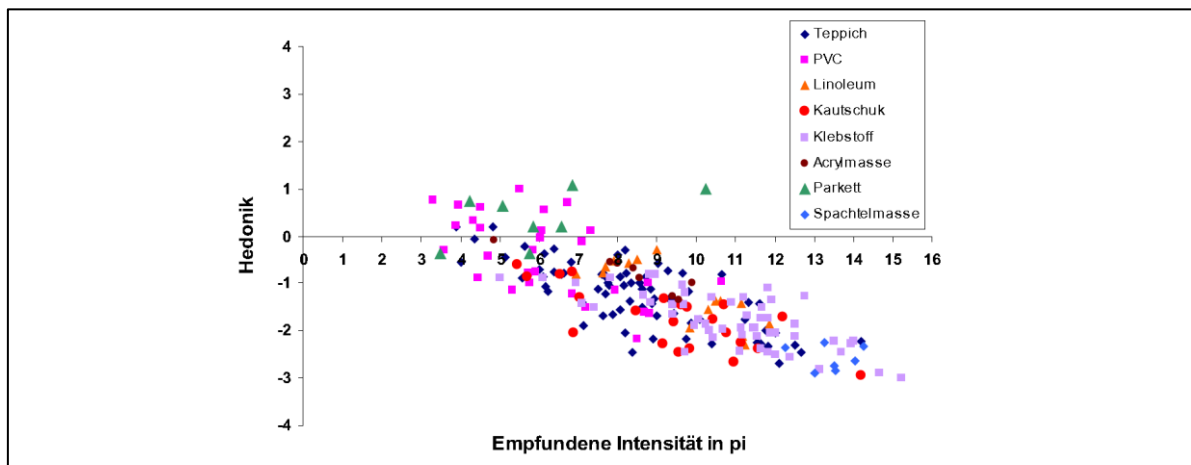


Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität und Hedonik (B. Müller et al., 2011)

Den PD-Wertes der Akzeptanz (KAPITEL 3.2.2.1), ermittelt aus den Ergebnissen der ungeschulten Prüfergruppe, im Zusammenhang mit der Zumutbarkeit zeigt Abbildung 4-10. Ähnlich wie bei der empfundenen Intensität besteht ein linearer Zusammenhang. Je höher der Anteil der Prüfenden, die einen Geruch als unakzeptabel bewerten, desto niedriger wird dessen Zumutbarkeit. Dabei zeigt sich auch, dass die Akzeptanz eine andere Bewertung ergibt als die Frage nach der Zumutbarkeit. Die in Abbildung 4-10 dargestellten Beispiele verdeutlichen dies. Im ersten Beispiel ist ein PD-Wert von 30 % markiert, was bedeutet, dass 70 % der Prüfenden die Luftprobe als tägliche Arbeitsumgebung akzeptieren. Bei diesem Wert empfinden 75 % der Prüfenden die Luftprobe als tägliches Arbeitsumfeld als zumutbar. Im zweiten Beispiel mit einem PD-Wert von 80 %, also einer Akzeptanz von 20 %, bewerten 45 % der Prüfenden die Probenluft als zumutbar. Es wird deutlich, dass die Zumutbarkeit im Vergleich zur Akzeptanz ein strengeres Kriterium darstellt. Ein Geruch, der als unakzeptabel bewertet wird, kann dennoch zumutbar sein. Aufgrund dieser Unterscheidung schließt der AgBB die Akzeptanz als Bewertungskriterium in Deutschland aus (Ilvonen et al., 2015).

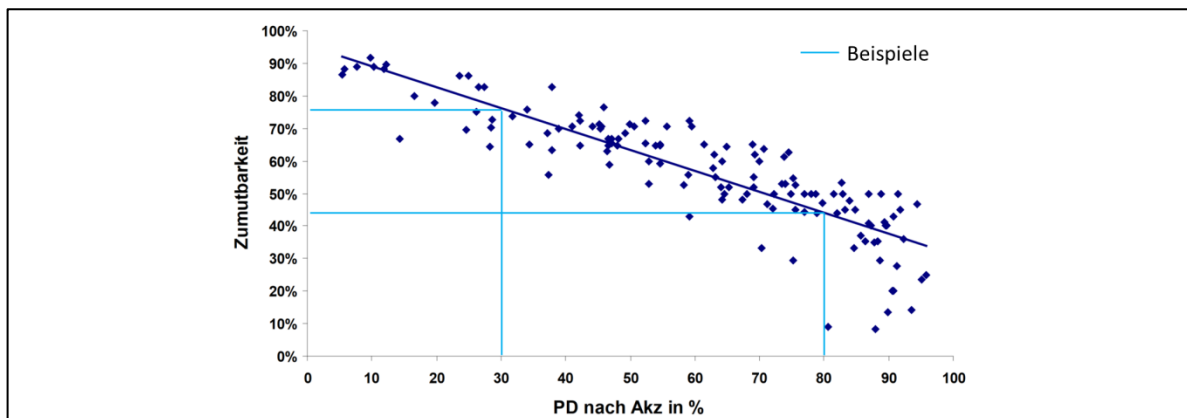


Abbildung 4-10: Zusammenhang zwischen Zumutbarkeit und dem Prozentsatz Unzufriedener (PD-Wert) (nach (B. Müller et al., 2011) Beispiele hinzugefügt)

Für die Zulassung von Bauprodukten wurden die Ermittlung der empfundenen Intensität und der Hedonik am 28. Tag nach Beladung der Emissionsprüfkammer vorgeschlagen. Dabei wurden im Projekt (B. Müller et al., 2011) unterschiedliche Vorschläge für das AgBB-Schema und den Blauen Engel erarbeitet.

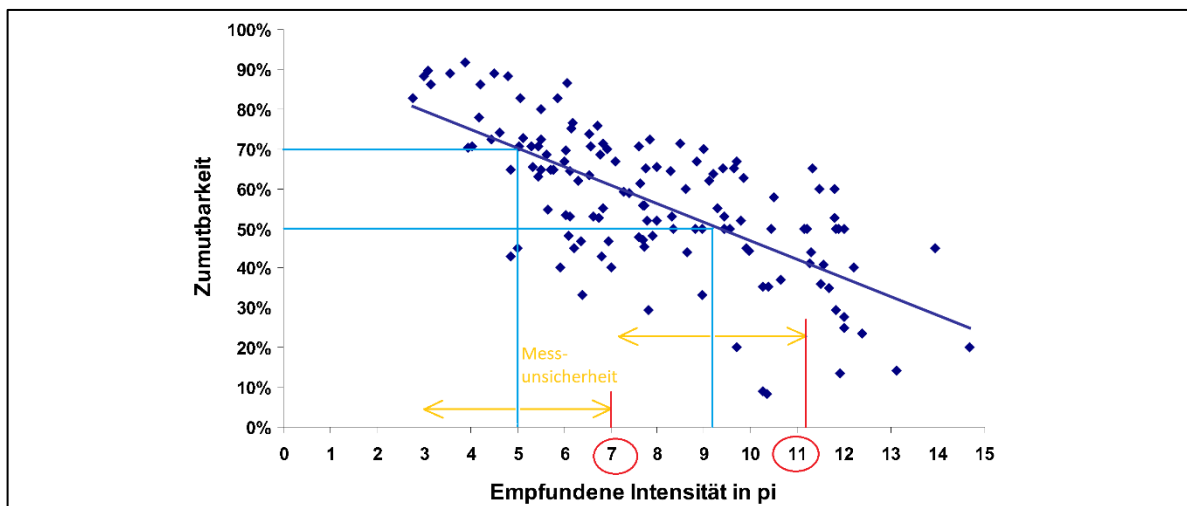


Abbildung 4-11: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität und Zumutbarkeit (B. Müller et al., 2011) mit Eintrag der Vorschläge für die Bewertung beim Blauen Engel (7 pi) und beim AgBB-Schema (11 pi)

Für die Vergabe des Blauen Engels wurde vorgeschlagen, eine Zumutbarkeit von 70 % für geruchsarme Bauprodukte zu erreichen. Dies entspricht nach Abbildung 4-8 einer empfundenen Intensität von 5 pi. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Vorschläge in einer erweiterten Abbildung dargestellt (Abbildung 4-11). Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit des Verfahrens (KAPITEL 3.2.3.3) von  $\pm 2,0$  pi ergibt sich eine empfundene Intensität von 7 pi. Zur Zulassung von Bauprodukten im Rahmen des AgBB-Schemas wurde eine Zumutbarkeit von 50 % vorgeschlagen, was einer empfundenen Intensität von 9 pi entspricht und unter Berücksichtigung der Messunsicherheit eine empfundene Intensität von 11 pi.

Um die Hedonik einzubeziehen, wurde für den Blauen Engel vorgeschlagen, dass die Proben nicht unangenehmer als -1 bewertet werden dürfen und für das AgBB-Schema nicht unangenehmer als -2. Die Vorschläge für Intensität und Hedonik sind für den Blauen Engel in Abbildung 4-12 dargestellt und für das AgBB-Schema in Abbildung 4-13.

Der AgBB lehnte den Vorschlag ab, wonach nur 50 % der Befragten eine Probe als zumutbar bewerten müssen, um das Produkt als zumutbar zu klassifizieren. Stattdessen folgte er dem Vorschlag für den Blauen Engel und betrachtet eine Belastung als unzumutbar, wenn mehr als 30 % einer großen, nicht geschulten Befragtengruppe einen Bauproduktgeruch als unzumutbar empfinden. Wie in KAPITEL 3.2.4 beschrieben, führte der Ausschuss einen vorläufigen Beurteilungsmaßstab für die sensorische Bewertung in Höhe von 7 pi ein, ohne dabei die Beurteilung der Hedonik zu berücksichtigen.

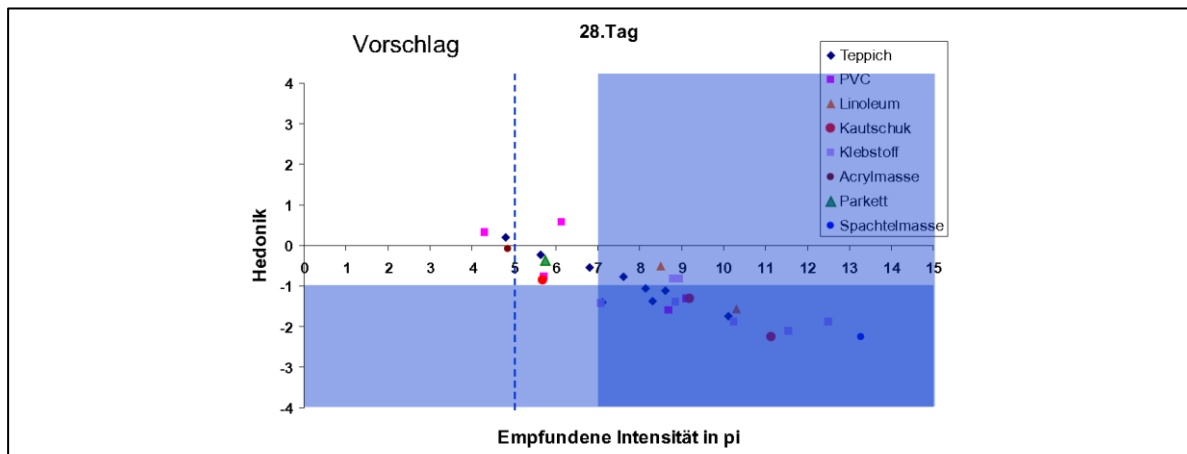


Abbildung 4-12: Vorschlag für die Bewertung von Bauprodukten mit dem Blauen Engel (B. Müller et al., 2011)

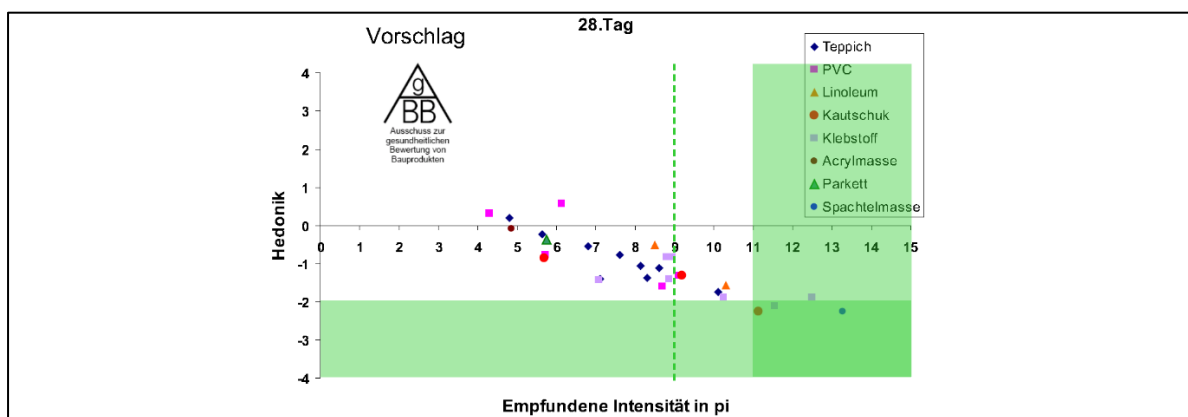


Abbildung 4-13: Vorschlag für die Bewertung gemäß AgBB-Schema (B. Müller et al., 2011)

Die Prüfung ist gemäß AgBB-Schema freiwillig, da das Messverfahren der Norm und die Bewertungsmethodik weiter zu präzisieren sind und bislang nur wenige Untersuchungen vorliegen (AgBB, 2021) So heißt es in einer Bekanntmachung des Umweltbundesamtes: „Bei der Ermittlung von Geruchsparametern wie Intensität, Hedonik und Akzeptanz können in Bezug auf die verwendeten Skalen erhebliche Fehlerbreiten auftreten. Dass teilweise auch in der ISO 16000-28 und in der VDI 4302 große Fehlerbereiche zugelassen sind, erschwert eine regulatorische Anwendung.“ (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte, 2014).

Im Rahmen der Zulassung für Bauprodukte und auch Einrichtungsgegenstände mit dem Blauen Engel ist die sensorische Prüfung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) in Verbindung mit der VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) in einer Reihe von Vergabekriterien (DE-UZ) vorgesehen.

Tabelle 4-1 zeigt, dass die sensorische Prüfung unterschiedlich stark verankert ist. Bei acht Vergabekriterien ist eine optionale Geruchsprüfung vorgesehen und bei fünf ist sie verpflichtend, wobei nur die Vergabekriterien für textile Bodenbeläge (DE-UZ 128) eine Anforderung an die einzuhaltende empfundene Intensität stellen.

Tabelle 4-1: Sensorische Prüfung nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) in den Vergabekriterien des Blauen Engels für emissionsarme Produkte (Stand: Dezember 2023)

Vergabekriterien (DE-UZ)	sensorische Prüfung	Anforderung an das Ergebnis bzw. weitere Formulierung
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 102 Emissionsarme Wandfarben</li> <li>➤ DE-UZ 120 Elastische Bodenbeläge</li> </ul>	nein	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 76 Emissionsarme plattenförmige Werkstoffe (Bau- und Möbelplatten) für den Innenausbau</li> <li>➤ DE-UZ 176 Emissionsarme Bodenbeläge, Paneele und Türen aus Holz und Holzwerkstoffen für Innenräume</li> </ul>	optional	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 12a Emissions- und schadstoffarme Lacke</li> <li>➤ DE-UZ 113 Emissionsarme Bodenbelagsklebstoffe und andere Verlegewerkstoffe</li> <li>➤ DE-UZ 123 Emissionsarme Dichtstoffe für den Innenraum</li> <li>➤ DE-UZ 156 Emissionsarme Verlegeunterlagen für Bodenbeläge</li> <li>➤ DE-UZ 198 Umweltfreundliche Innenputze</li> </ul>	optional	Die Auslobung „geruchsarm“ auf dem Gebinde ist möglich, wenn $\Pi \leq 7$ pi am 28. Tag.
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 132 Emissionsarme Wärmedämmstoffe und Unterdecken für Innenanwendungen</li> </ul>	optional	$\Pi \leq 7$ pi am 28. Tag. Eine Wiederholungsprüfung am Folgetag ist möglich, wenn bereits 8 pi erreicht werden.
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 38 Emissionsarme Möbel und Lattenroste aus Holz und Holzwerkstoffen</li> </ul>	verbindlich <i>alternativ</i> RAL-GZ 430 <sup>2</sup>	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 148 Umweltfreundliche Leder</li> </ul>	verbindlich	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 117 Emissionsarme Polstermöbel</li> <li>➤ DE-UZ 119 Matratzen</li> </ul>	verbindlich <i>alternativ</i> RAL-GZ 430 <sup>2</sup>	Ein Zielwert für $\Pi$ von 5 bis 7 pi wird diskutiert und angestrebt.
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DE-UZ 128 Emissionsarme textile Bodenbeläge</li> </ul>	verbindlich <i>alternativ</i> GUT <sup>3</sup>	$\Pi \leq 7$ pi am 28. Tag. Eine Wiederholungsprüfung am Folgetag ist möglich, wenn bereits 8 pi erreicht werden.

<sup>1</sup> Quellenangabe der Vergabekriterien: DE-UZ 102, 2019; DE-UZ 120, 2011; DE-UZ 76, 2016; DE-UZ 176, 2013; DE-UZ 12a, 2011; DE-UZ 113, 2019; DE-UZ 123, 2019; DE-UZ 156, 2019; DE-UZ 198, 2019; DE-UZ 132, 2020; DE-UZ 38, 2022; DE-UZ 148, 2015; DE-UZ 117, 2018; DE-UZ 119, 2018; DE-UZ 128, 2016

<sup>2</sup> RAL-GZ 430: Allgemeine Güte- und Prüfbestimmungen für Möbel – Gütesicherung 2022 (RAL e.V., 2022)

<sup>3</sup> GUT: Geruchsprüfung der Gemeinschaft umweltfreundlicher Teppichböden e.V. GUT-Geruchsprüfung (GUT, 2020) in Anlehnung an die Schweizer Norm SNV 195651 (SNV, 1968)

## 4.2.2 Untersuchung zum Vergleich sensorischer Messgrößen

In einer Dissertation und einer Studie wurde untersucht, ob eine Korrelation zwischen unterschiedlichen olfaktorischen Messgrößen besteht und ob sich damit aus einer ermittelten Messgröße, weitere Messgrößen berechnen lassen (Panašková, 2012; Panašková & Müller, 2015). Ziel war es durch die Berechnung, olfaktorische Messungen zu vereinfachen.

In den Untersuchungen von Bauprodukten der Messgrößen Akzeptanz, empfundene Intensität, Hedonik und Zumutbarkeit zeigte sich eher eine Tendenz zur Bildung von Zonen, anstatt z. B. linearen Trends zwischen den Messgrößen. Es ist daher nicht möglich aus einer oder zwei olfaktorischen Messgrößen den Wert einer dritten Messgröße zu berechnen. Allerdings können die in Abbildung 4-14 dargestellten Geruchszonen festgelegt werden, die durch olfaktorische Messgrößen beschrieben werden.

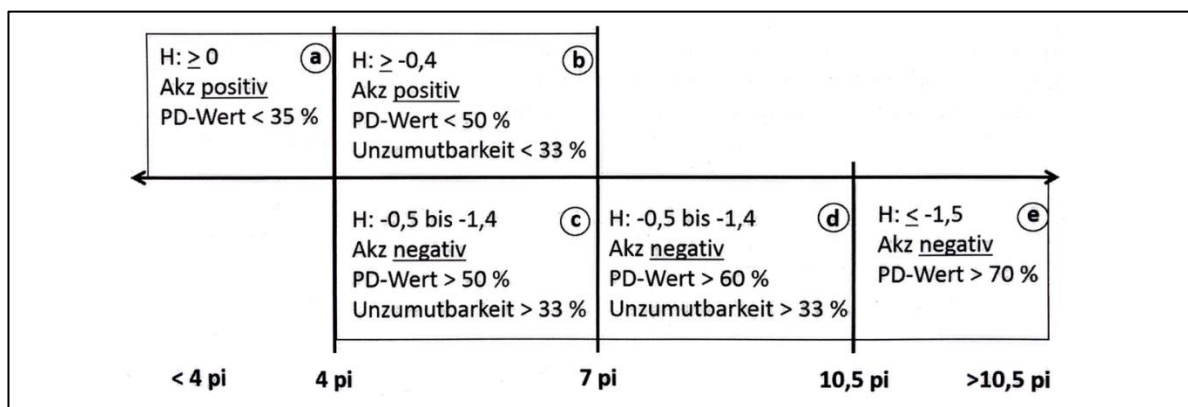


Abbildung 4-14: Vorschlag zur Festlegung von Geruchszonen; H = Hedonik, Akz = Akzeptanz, PD-Wert = Prozentsatz Unzufriedener (Panašková & Müller, 2015)

Der Vorschlag zur Festlegung von Geruchszonen zeigt, dass Bauprodukte, die sehr gering in ihrer empfundenen Intensität wahrgenommen werden, in ihrer Akzeptanz oft positiv und mit kleinem PD-Wert sowie in ihrer Hedonik häufig angenehm bewertet werden. Intensiv riechende Bauprodukte erreichen hingegen eine negative Akzeptanz, verbunden mit einem hohen PD-Wert und einer sehr unangenehmen Hedonik. Deutlich ist, dass bei einer empfundenen Intensität kleiner 7 pi mehr als 33 % der Befragten die Proben als unzumutbar bewerten, wenn die Proben mit einer Hedonik von  $\leq -0,5$  beurteilt werden. Mit einer besseren Hedonik ( $\geq -0,4$ ) bewerten weniger als 33 % die Probenluft als unzumutbar. Es besteht demnach nicht nur ein Zusammenhang zwischen Intensität und Zumutbarkeit (KAPITEL 4.2.1), sondern auch zwischen Hedonik und Zumutbarkeit.

Ein Vorschlag, der aus den Untersuchungen abgeleitet wurde, war, dass bei einer vereinfachten Geruchsprüfung mit geschulten Prüfenden zur Bestimmung der empfundenen Intensität nur drei Acetonintensitäten von 4 pi, 7 pi und 11 pi dargeboten werden (Panašková & Müller, 2015). Die Prüfenden müssen lediglich angeben, in welche Geruchzone sie die Intensität einstufen, wobei die Hedonik zusätzlich ermittelt werden muss.

Die Untersuchung zeigt auch eine Übereinstimmung zum in KAPITEL 4.2.1 dargestellten Zusammenhang zwischen empfundener Intensität und Zumutbarkeit, wonach bei einer empfundenen Intensität von größer als 7 pi der Geruch von mehr als 30 % der Befragten als unzumutbar bewertet wird.

## **5 Versuchsaufbau und -durchführung**

Für die Erreichung der Zielsetzungen dieser Promotion werden sensorische Messungen sowie VOC-Messungen durchgeführt. Dieses Kapitel beschreibt den allgemeinen Aufbau und die Durchführung der Versuche. Die Beschreibung spezieller Versuchsaufbauten und Durchführungshinweise erfolgen jeweils in KAPITEL 6 zur Weiterentwicklung der Probendarbietung mit einem Adapter und in KAPITEL 7 zur vereinfachten Bewertung der empfundenen Intensität.

### **5.1 Sensorische Messungen**

Die sensorischen Messungen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) werden im Luftqualitätslabor der HTW Berlin durchgeführt. Im Folgenden werden zunächst der Aufbau des Labors einschließlich der verwendeten Prüfkammern (KAPITEL 5.1.1) und des Vergleichsmaßstabes (KAPITEL 5.1.2) beschrieben sowie die Messung der Acetonkonzentration (KAPITEL 5.1.3) und die Ermittlung des Volumenstroms an den Trichtern (KAPITEL 5.1.4) erläutert. Anschließend wird die Durchführung der Versuche erläutert, welche die Prüferauswahl und Prüferschulung (KAPITEL 5.1.5), die Vorbereitung der Proben und Beladung der Prüfkammern (KAPITEL 5.1.6), die Vorbehandlung der Probenbehälter (KAPITEL 5.1.7), die Durchführung der Messungen (KAPITEL 5.1.8) sowie die Auswertung der erhobenen Daten (KAPITEL 5.1.9) umfassen.

#### ***5.1.1 Laboraufbau und –ausstattung***

Das Luftqualitätslabor der HTW Berlin verfügt über eine regelbare, raumluftechnische Vollklimaanlage, die Außenluft mit einem Ventilator ansaugt und diese über einen Kompaktfilter reinigt. Der Filter besteht aus einem Feinstaubfilter und einer Aktivkohleschicht zur Entfernung fester und gasförmiger Verunreinigungen. Die Klimaanlage bringt die angesaugte Luft auf die standardisierten Bedingungen einer Temperatur von 23 °C ( $\pm 3$  K) und relativen Luftfeuchte von 50 % ( $\pm 10$  %), wie in der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) festgelegt. Sämtliche Rohrleitungen und Armaturen der Klimaanlage bestehen aus Edelstahl, um Gerüche und Verunreinigungen in der Zuluft zu vermeiden. Die Klimaanlage versorgt einen im Labor befindlichen Prüfraum, die Prüfkammern und den Vergleichsmaßstab. Der Grundriss des Luftqualitätslabors ist in Abbildung 5-1 dargestellt und ein Foto mit Blick in den Prüfraum in Abbildung 5-2.

Der Prüfraum, dessen Wände aus Glas und Edelstahl bestehen, wird über eine Quelläftung mit leichtem Überdruck aus der Klimaanlage versorgt, um das Eindringen von Umgebungsluft zu verhindern. Im Prüfraum stehen in zwei Probendarbietungsbereichen jeweils fünf Trichter zur Bewertung der Probenluft zur Verfügung, ein Vergleichsmaßstab mit acht Trichtern und ein Trichter mit sauberer Luft aus der Klimaanlage. Alle Trichter entsprechen den in der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) festgelegten Maßen. Über den Probenlufttrichtern und den Trichtern des Vergleichsmaßstabes ist eine Absaugvorrichtung platziert. Der Volumenstrom an sämtlichen Trichtern beträgt 0,9 l/s. Er wird mithilfe eines Hitzdrahtanemometers, welches zur Erfassung des vollständigen Luftstroms in ein Rohr eingebaut ist, ermittelt (KAPITEL 5.1.4) und über Volumenstromregler in der Klimaanlage eingestellt und regelmäßig überprüft.

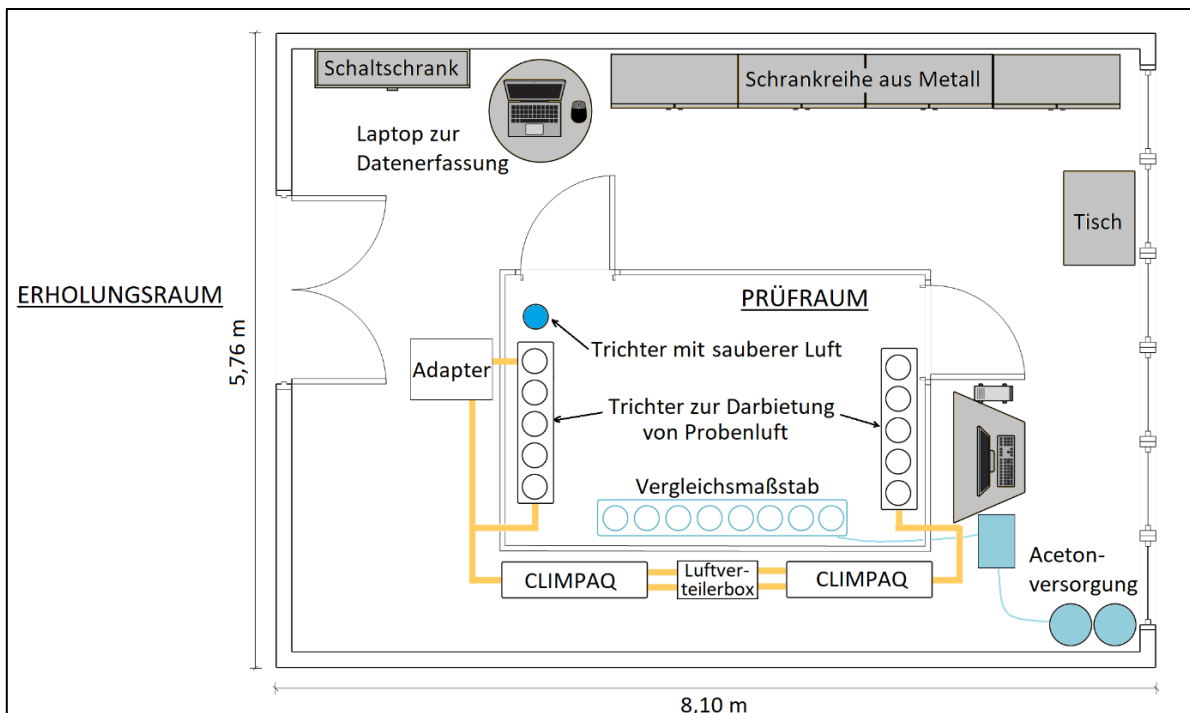


Abbildung 5-1: Grundrisskizze des Luftqualitätslabors der HTW Berlin



Abbildung 5-2: Blick in das Luftqualitätslabor vom Eingang aus fotografiert: Prüfraum mit Trichtern zur Probenluftdarbietung und Vergleichsmaßstab (links), Adapter (vorn) und CLIMPAQs (rechts)

Außerhalb des Prüfraums befinden sich außerhalb der Sicht der Prüfenden die Prüfkammern vom Typ CLIMPAQ. Ihre Luftversorgung erfolgt über dieselbe Klimaanlage, die auch den Prüfraum versorgt. Somit werden gleiche Bedingungen hinsichtlich der Temperatur und der relativen Feuchte gewährleistet. Ein Teil der Luft aus der Klimaanlage wird zunächst in eine Verteilerbox aus Edelstahl geführt und von dort auf die angeschlossenen CLIMPAQs verteilt, wobei bis zu zehn Stück angeschlossen werden können. Die CLIMPAQs bestehen aus Edelstahl mit abnehmbaren Deckeln aus Glas und weisen Volumina von 40 l, 120 l und 240 l auf. Die CLIMPAQs sind quaderförmig, wobei der Luftstrom von der Zuluft zur Abluft

parallel zur langen Seite geführt wird. Die Zuluft wird an einer Lochblechplatte abgebremst und so über den gesamten Querschnitt der Prüfkammer verteilt, um sicherzustellen, dass die Prüfstücke gleichmäßig mit Luft überströmt werden. Über biegbare, gewellte Edelstahlrohre wird die Probenluft zu den Trichtern im Prüfraum geführt. Sämtliche Bauteile, die mit Probenluft in Berührung kommen, sind aus Edelstahl. Auf innenliegende Dichtungen wird verzichtet, um Geruchsstoffemissionen gering zu halten und die Substanzadsorption zu vermeiden.

Wahlweise kann die Probenluft am Abluftstutzen der CLIMPAQs direkt zu einem Trichter geführt oder zum Füllen von Probenbehältern genutzt werden. Die Probendarbietung erfolgt in diesem Fall mit dem in der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) beschriebenen System (KAPITEL 3.2.3.2). Im Rahmen der Arbeiten für diese Promotion wird die Probenluft zudem zum Adapter geführt (KAPITEL 6).

Direkt vor dem Luftqualitätslabor befindet sich im Flurbereich der Erholungsraum für die Prüfenden.

### ***5.1.2 Beschreibung des Vergleichsmaßstabes***

In Abbildung 5-3 ist der Vergleichsmaßstab zur Ermittlung der empfundenen Intensität dargestellt. Er besteht aus Edelstahl und Glas sowie Schläuchen aus Aceton zur Dosierung des Acetons.

Über eine Luftführung wird Luft aus der Klimaanlage zugeführt und über eine Box mit einem Lochblech gleichmäßig auf insgesamt acht Trichter verteilt.

Die Dosierung des Acetons in den Luftstrom erfolgt direkt oberhalb der Box einzeln in die Leitungen, die zu den Trichtern führen. Dadurch kann sich das Aceton über eine Leitungslänge von 50 cm gleichmäßig im Luftstrom verteilen, bevor es zum Trichter gelangt. Die Einstellung von Acetonkonzentrationen zwischen 20 und 420 mg/m<sup>3</sup> erfolgt über feine Nadelventile an jedem einzelnen Trichter. Die Messung der Acetonkonzentration wird im folgenden KAPITEL 5.1.3 beschrieben.

In einer Gaswaschflasche wird für den gesamten Zeitraum einer Messung ein Acetonvorrat bereitgestellt. Um das Aceton im Luftstrom zu verteilen, wird die Flasche an ihrer gaszuführenden Leitung an eine Druckgasflasche mit synthetischer Luft angeschlossen. Diese fördert einen konstanten Druck, der zwischen 0,034 und 0,038 bar eingestellt wird, durch das Aceton, wodurch dieses sich im Luftstrom löst. Die Gaswaschflasche ist in einer Kühlbox platziert und wird auf etwa 10 °C ± 2 K temperiert. Die Förderung des Acetons bei dem vorgegebenen konstanten Druck und der Temperatur hat sich als praktikabel erwiesen, um eine ausreichende, regelbare und konstante Menge an Aceton zu dosieren.

An sechs Trichtern des Vergleichsmaßstabes werden Acetonintensitäten von 0, 3, 6, 9, 12 und 15 pi eingestellt. Diese Trichter sind mit der vorgegebenen Acetonintensität beschriftet und stellen die Vergleichsskala dar. Die zwei weiteren Trichter werden genutzt, um die für die Leistungsprüfung erforderlichen unbekanntenen Acetonintensitäten einzustellen. Benötigen Prüfende für den Vergleich von Proben höhere Acetonintensitäten, so werden Vergleichskonzentrationen im linearen Bereich bis 20 pi (420 mg/m<sup>3</sup>) bereitgestellt.

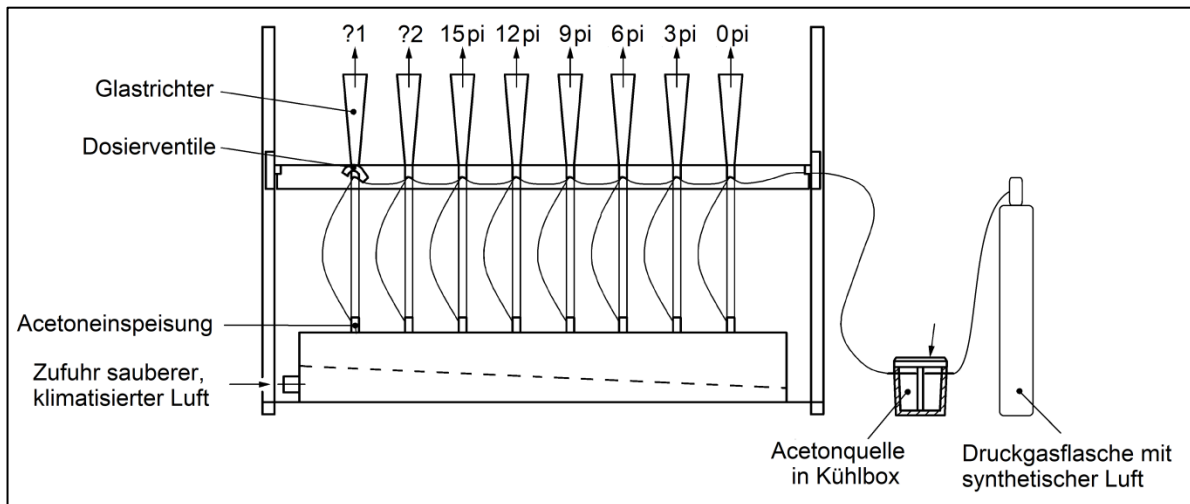


Abbildung 5-3: Aufbau des Vergleichsmaßstabes der HTW Berlin; modifiziert (DIN, 2021)

### 5.1.3 Messung der Acetonkonzentration am Vergleichsmaßstab

Die Messung der Acetonkonzentration an den Trichtern des Vergleichsmaßstabes erfolgt durch PAS mit dem Gasmonitor INNOVA-1412i der Firma LumaSense Technologies A/S (KAPITEL 3.6). Um eine automatische Korrektur der Messwerte für Aceton durch die PAS zu ermöglichen, erfolgt gleichzeitig die gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) vorgegebene Wasserdampfmessung.

Für die Messung wird, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, der Ansaugschlauch des Lufteinlasses des Gasmonitors im Trichter positioniert. Es ist wichtig, die Konzentration an der Stelle zu messen, wo die Prüfenden ihre Nase für die Geruchsmessung platzieren und auch möglichst immer an der gleichen Stelle im Trichter. Um dies zu ermöglichen wird für den Ansaugschlauch eine Befestigung mit einem 3D-Drucker konstruiert und hergestellt. Diese besteht aus einem Ring, der auf den Trichter aufgesetzt wird, und in dem mittig der Schlauch durchgeführt werden kann.



Abbildung 5-4: Ansaugschlauch des Gasmonitors über einem Trichter des Vergleichsmaßstabes zur Messung der Acetonkonzentration

### 5.1.4 Ermittlung des Luftvolumenstroms in den Trichtern

Der an den Trichtern dargebotene Volumenstrom wird mit einem Messaufbau ermittelt, der im Rahmen einer Arbeit von Brosig (2018) zur Optimierung sensorischer Messungen entwickelt wurde. Ein in ein Rohr eingebautes Hitzdrahtanemometer (KAPITEL 3.5) ermöglicht es, den Luftstrom am Trichter vollständig zu erfassen. Aus der so gemessenen Strömungsgeschwindigkeit wird der Volumenstrom ermittelt.

Für die Messungen wird das Anemometer FVA935TH4 von der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH mit einem Messbereich zwischen 0,08 und 2 m/s verwendet. Dieses wird mit einem ALMEMO® Datenlogger 2690 betrieben (AMR, 2011).

In Abbildung 5-5 wird der verwendete Messaufbau während der Messung eines Trichters gezeigt. Das Rohr aus Aluminium weist einen Außendurchmesser von 40 mm und eine Länge von 400 mm auf und ermöglicht, dass die durchgeführte Strömung laminarisiert wird (Brosig, 2018). Am unteren Ende des Rohres ist außen ein Dichtring aufgebracht, der eine Abdichtung zum Trichter ermöglicht, wodurch der Luftstrom vollständig erfasst werden kann. Auf einer Höhe von 335 mm ist das Hitzdrahtanemometer seitlich über eine Bohrung mit Verbindungsstücken so eingebracht, dass der Hitzdraht senkrecht zur Strömungsrichtung steht. Dieses wird damit vollständig umströmt, wodurch mögliche auftretende Messfehler weitgehend reduziert werden.

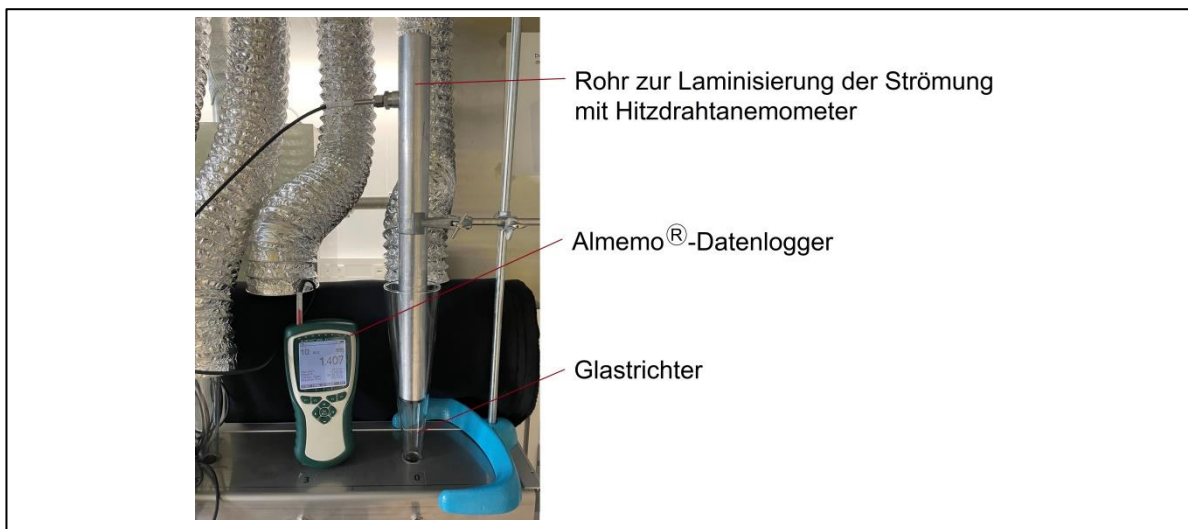


Abbildung 5-5: Messung der Strömungsgeschwindigkeit am Trichter mit dem Hitzdrahtanemometer eingebaut in ein Rohr zur Laminarisierung der Strömung

Um aus der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit den Volumenstrom zu ermitteln, wird der Messaufbau kalibriert. Dies erfolgt mithilfe einer Gasuhr der Firma GMT GmbH aus Groß-Gerau, mit der das Gasvolumen  $\Delta V$  über einen festgelegten Messzeitraum  $t$  erfasst werden kann. Die Gasuhr wird auf der Seite ihres Eingangs an eine vorhandene Druckluft angeschlossen und auf der Seite ihres Ausgangs wird ein Trichter befestigt, in dem das Strömungsrohr mit dem Hitzdrahtanemometer positioniert wird.

Formel 5: Berechnung des Trichtervolumenstroms bei der Kalibrierung mit einer Gasuhr

$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{t} \cdot F$$

mit:	$\dot{V}$	Volumenstrom am Trichter in l/s
	$\Delta V$	Volumendifferenz der Gasuhr zwischen Ende und Anfang der Messung in l
	F	Korrekturfaktor der Gasuhr
	t	Dauer der Messung in s

Die Kalibrierung wird im Bereich von Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,6 bis 1,9 l/s an insgesamt neun Messpunkten vorgenommen. Dazu erfasst der Datenlogger für jeden gewählten Messpunkt über einen Zeitraum von etwa 15 Minuten sekundlich die Geschwindigkeit, woraus der Mittelwert gebildet wird. Zum Beginn und zum Ende jeder Messung wird der Zählerstand der Gasuhr notiert und daraus die Differenz ermittelt. Für jede gemessene Strömungsgeschwindigkeit wird der Volumenstrom  $\dot{V}$  nach Formel 5 unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors F der Gasuhr (0,98) ermittelt.

Zwischen der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit und dem ermittelten Volumenstrom kann eine lineare Funktion aufgestellt werden. Mithilfe dieser Funktion kann der Volumenstrom bei jeder Geschwindigkeit im kalibrierten Bereich genau ermittelt werden.

### **5.1.5 Prüferauswahl und Schulung**

Die Prüfleitung der sensorischen Messungen im Rahmen dieser Arbeit erfolgt durch die Promovendin, die von einer studentischen Hilfskraft unterstützt und vertreten wird.

Zur Erfüllung der Zielstellungen dieser Arbeit, stehen Messungen der empfundenen Intensität mit einer geschulten Prüfergruppe im Mittelpunkt. Im Folgenden werden die Prüferauswahl und die Schulung dieser Gruppe beschrieben. Im Rahmen der Untersuchungen zur vereinfachten Messung der empfundenen Intensität finden auch Messungen mit einer ungeschulten Prüfergruppe statt. Die spezielle Durchführung der Versuche mit dieser Gruppe wird in KAPITEL 7.1.2 beschrieben.

Um die Prüfenden auszuwählen finden jährlich Schulungen statt. Zunächst wird die Riechfähigkeit der Prüfenden mit einfachen Mitteln getestet. Sie werden befragt, ob bei ihnen Anosmien bekannt sind oder ob sie dahingehend Auffälligkeiten aus ihrem Alltag kennen. Ihnen werden zusätzlich verschiedene allgemein bekannte Kräuter dargeboten, wobei sie gebeten werden anzugeben, ob sie etwas riechen und benennen können, worum es sich handelt. Nach der Covid-Pandemie werden die Prüfenden gebeten, bei einer wahrgenommenen Veränderung des Geruchssinns nicht teilzunehmen. Prüfende mit Auffälligkeiten werden von vornherein von der Schulung ausgeschlossen.

Im Schulungsverlauf werden die Prüfenden genau darüber informiert, was im Luftqualitätslabor gemacht wird und welche Aufgabe sie haben. Die in Kapitel 3.2.3.5 dargestellten Verhaltensregeln werden vermittelt. Die Prüfenden werden darüber in Kenntnis gesetzt, dass die dargebotenen Geruchsproben ausschließlich Produkte vom Markt sind, die eine Zulassung haben. Sie werden darüber informiert, dass die von Ihnen ermittelten Werte ausschließlich anonymisiert und in Form einer statistischen Auswertung weiterverarbeitet werden.

Die Prüfenden lernen in der fünftägigen Schulung vor allem, ihnen unbekannt Acetonintensitäten im Bereich von 2 bis 15 pi mithilfe des Vergleichsmaßstabes zu ermitteln. Der gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) festgelegte Ablauf zur Messung der empfundenen Intensität ist in KAPITEL 3.2.2.2 beschrieben.

An den letzten beiden Prüftagen wird der Erfolg der Schulung anhand der letzten acht ermittelten Acetonintensitäten bewertet. Dies erfolgt mithilfe eines in der Norm vorgegebenen Toleranzfeldes, in dem die Abweichung der Prüfergebnisse von der vorgegebenen Acetonintensität grafisch dargestellt werden kann.

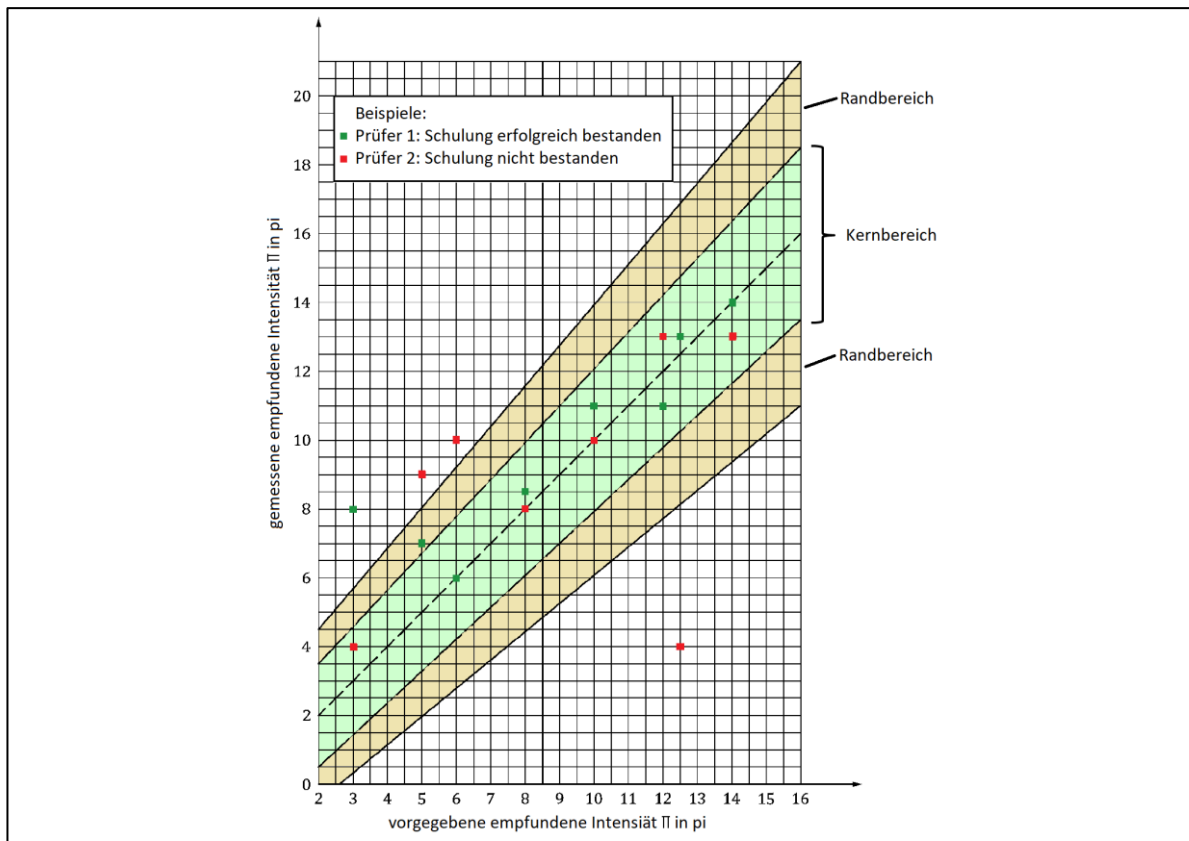


Abbildung 5-6: Toleranzfeld für die gemessene empfundene Intensität mit Beispielen für Bewertungen durch zwei Prüfende; modifiziert nach DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021)

Abbildung 5-6 zeigt das Toleranzfeld, bei dem auf der X-Achse die am Vergleichsmaßstab eingestellte Acetonintensität und auf der Y-Achse die durch die Prüfenden ermittelte Acetonintensität dargestellt sind. Es können empfundene voreingestellte Intensitäten ab  $2 p_i$  bewertet werden. Ermitteln die Prüfenden exakt den vorgegebenen Wert, so liegt dieser auf der gestrichelten Linie. Das grüne Feld, das diese Linie einfasst, ist als Kernbereich definiert und die orangefarbene Felder als Randbereich. Das Toleranzfeld weitet sich mit steigender Intensität etwas auf. Bei der Ermittlung höherer Intensitäten sind damit größere Abweichungen zulässig.

Für die Auswertung müssen von insgesamt acht zu ermittelnden Acetonkonzentrationen mindestens fünf im Kernbereich und zwei bis drei dürfen im Randbereich liegen. Maximal eine Messung darf außerhalb der Bereiche liegen. Abbildung 5-6 zeigt auch Beispiele von zwei Prüfenden, von denen eine die Prüfung bestanden hat, und für die Bewertung der empfundenen Intensität geeignet ist, und eine nicht.

In den Schulungen lernen die Prüfenden auch, die empfundene Intensität ihnen unbekannter Bauproduktgerüche einzuordnen. Dabei wird ihnen nach jeder Messung der durch die Gruppe ermittelte geschätzte Mittelwert mitgeteilt. Damit können sie gegebenenfalls einen erneuten Vergleich durchführen.

Neben den Schulungen für neue Prüfende finden halbjährlich Auffrischungsschulungen für alle statt, bei denen sie an zwei Tagen jeweils zwischen sechs und acht Acetonintensitäten ermitteln müssen.

Prüfende werden aus der Prüfergruppe ausgeschlossen, wenn sie in Auffrischungsschulungen nicht bestehen oder häufig bei der Leistungsprüfung einer Messung auch beim zweiten Versuch nicht die korrekte pi-Stufe bestimmen können.

### **5.1.6 Probenauswahl, Probenvorbereitung und Beladung**

Die Untersuchungen dieser Promotion knüpfen an Untersuchungen im Rahmen eines Projektes des Umweltbundesamtes an, dass in Kooperation durch die HTW Berlin und die BAM ausgeführt wird. Im Projekt mit dem Titel „Geruchs- und emissionsarme Produkte für eine gesunde Innenraumlufte“ werden elastische Bodenbeläge und holzbasierte Produkte in Bezug auf ihre sensorische Eignung für den Innenraum und auf ihr Emissionsverhalten hin untersucht und gemäß den Vorgaben des AgBB-Schemas und des Blauen Engels bewertet (B. Müller et al., im Druck). Bei den meisten holzbasierten Produkten handelt es sich ebenfalls um Bodenbeläge, mit Ausnahme eines Wand- und Deckenpanels. Die im Projekt untersuchten Produkte werden auch für die Messungen im Rahmen dieser Promotion verwendet.

Darüber hinaus werden wasserbasierte Lacke untersucht, denen VOC-Substanzen hinzugefügt wurden, die aus dem Produkt emittieren und auch einen Geruch aufweisen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Probenauswahl, die Probenvorbereitung und Beladung für die elastischen Bodenbeläge und holzbasierten Produkte beschrieben (KAPITEL 5.1.6.1), anschließend für die Lacke (KAPITEL 5.1.6.2).

#### **5.1.6.1 Elastische Bodenbeläge und holzbasierte Produkte**

Die Produkte werden im Baumarkt erworben oder von Herstellern zur Verfügung gestellt. Die sensorischen Untersuchungen erfolgen gemäß der standardisierten Probenahme, Lagerung der Proben und Vorbereitung der Prüfstücke gemäß DIN EN ISO 16000-11 (DIN, 2006).

Nach ihrer Ankunft im Luftqualitätslabor der HTW Berlin werden die Produkte entweder direkt weiterbearbeitet oder in Aluminiumfolie luftdicht verschweißt und zum Schutz vor Licht und Hitze bis zum Beginn der Untersuchungen im Keller eingelagert.

Direkt vor Beginn der Untersuchungen erfolgt die Entnahme der Prüfstücke, indem bei der Meterware elastischer Bodenbeläge zunächst mittig aus dem Produkt die für die Messung erforderliche Fläche entnommen wird. Diese Fläche wird angepasst an die Größe der zu beladenden CLIMPAQ und in einzelne Prüfstücke geschnitten.

Bei der Vorbereitung der Prüfstücke holzbasierter Produkte müssen die Fugenteile gemäß den Vorgaben des Laborhandbuches des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt, 2015) eingehalten werden. Dieses legt dazu eine Standardanordnung fest, die das Verhältnis des Fugenteils zur umlaufenden Fläche des Prüfstückes auf 2,5:1 festgelegt, so dass dieses an die Bedingungen im Referenzraum angepasst ist. In Abbildung 5-7 werden die empfohlene Standardanordnung sowie der entsprechende Zuschnitt eines Prüfstückes dargestellt.

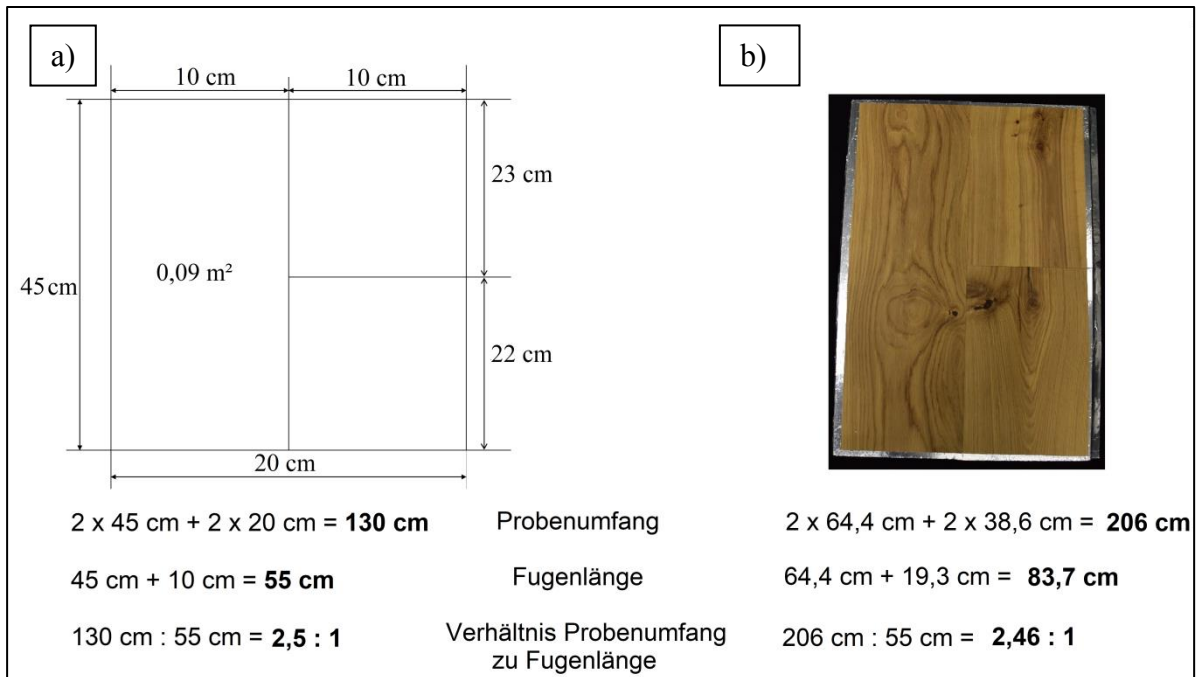


Abbildung 5-7: Zuschnitt holzbasierter Prüfstücke mit Fugenanteilen: a) empfohlene Standardanordnung starrer Bodenbelägen mit Beispielmaßen (DIBt, 2015), b) Foto eines zugeschnittenen Prüfstücks mit Angabe der Maße

Jeweils zwei zugeschnittene Prüfstücke werden Rücken an Rücken gebracht und die Schnittkanten mit emissionsarmem Aluminiumklebeband verklebt. Damit wird ausschließlich die dem Innenraum zugewandte Seite während der Messung mit Luft überströmt und so die Bedingungen wie in einem Innenraum simuliert.

Die Prüfstücke werden beim Beladen der CLIMPAQs längs zur Strömungsrichtung positioniert. Um eine Luftströmung über allen Oberflächen der Prüfstücke zu ermöglichen, werden geruchs- und emissionsarme Abstandshalter (kleine mit Aluminiumfolie umklebte Teile) zwischen die einzelnen Prüfstücke gesetzt.

Die Prüfstücke verbleiben während des gesamten Messzeitraums in den CLIMPAQs, in denen die gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) vorgegebenen Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchte eingehalten werden.

Bei der Wahl der Beladung werden die Bedingungen des gemäß DIN EN 16516 (DIN, 2020) vorgegebenen Referenzraumes auf die Bedingungen in der CLIMPAQ übertragen (KAPITEL 3.4):

- Die Bodenbeläge werden bei einer vorgegebenen Beladung  $L$  von  $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$  mit einer flächenspezifischen Luftdurchflussrate  $q_A$  von  $1,25 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  untersucht. Es ergibt sich eine luftumströmte Fläche des Prüfstückes von  $2,6 \text{ m}^2$ .
- Für das holzbasierte Wand- und Deckenpanel ist eine Beladung  $L$  von  $1,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$  vorgegeben. Hier ergibt sich eine flächenspezifische Luftdurchflussrate  $q_A$  von  $0,28 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Die Einhaltung dieser Rate würde eine große erforderliche luftumströmte Fläche ergeben, die nicht einmal in die größte verfügbare CLIMPAQ mit einem Volumen von  $240 \text{ l}$  passen würde. Um die vorgegebene Rate einhalten zu können, wird der Luftvolumenstrom daher von  $0,9$  auf  $0,3 \text{ l/s}$  reduziert, womit eine luftumströmte Fläche von  $3,8 \text{ m}^2$  verwendet werden kann. Damit ergibt sich allerdings die Schwierigkeit, dass

es für die Messungen im Rahmen dieser Promotion erforderlich ist, auch direkte sensorische Prüfungen vorzunehmen, was beim gewählten Luftvolumenstrom von 0,3 l/s nicht mehr möglich ist. Um dennoch eine direkte Messung zu ermöglichen, wird der Volumenstrom jeweils nur zum Zeitpunkt der Messung auf 0,9 l/s erhöht. Dies ist möglich, da es im Rahmen der Promotion nicht um die Eignungsprüfung von Produkten für den Innenraum geht, sondern um die Durchführung vergleichender Messungen zur Beurteilung der Eignung des Adapters oder des vereinfachten Messverfahrens der empfundenen Intensität. Beide Messungen erfolgen mit dem Volumenstrom von 0,9 l/s.

Die Messungen und Bewertungen für das Projekt des Umweltbundesamtes erfolgen immer an den Tagen 3, 7, 14 und 28 nach der Beladung der CLIMPAQ. An diesen Tagen werden auch die Messungen im Rahmen dieser Promotion durchgeführt. Zusätzlich erfolgen Messungen an weiteren Tagen, wozu die Prüfstücke entweder in der Prüfkammer verbleiben oder erneut eingebracht werden. Bei der Zwischenlagerung werden die Prüfstücke wieder in Aluminiumfolie luftdicht verpackt und licht- sowie hitzegeschützt eingelagert.

#### **5.1.6.2 Lacke**

Bei dem ausgewählten Lack handelt es sich um ein wasserbasiertes Produkt, das in GC/MS-Messungen der BAM keine Emissionen aufweist. Durch das Hinzufügen von Substanzen ist es möglich, Emissionen im analytischen Messbereich des verwendeten GC/MS-Verfahrens nachzuweisen und diese durch die Verwendung von Standards quantifizieren zu können (KAPITEL 3.3.3). Außerdem können die Lacke dadurch geruchlich wahrgenommen und in sensorischen Messungen bewertet werden.

Die präparierten Proben werden in Petrischalen gefüllt und über Nacht bei 23 °C und 50 % Luftfeuchte getrocknet und ausgehärtet. Für die Messungen im Rahmen dieser Promotion werden insgesamt drei Lacke verwendet, die Lack A, B und C genannt werden. Die hinzugefügten Substanzen können der Tabelle 5-1 entnommen werden. Diese sind nach ihren Retentionszeiten sortiert.

Die Lacke A und B werden in VOC-Messungen untersucht und die Lacke B und C in sensorischen Messungen. Für den untersuchten Lack C, der im Rahmen eines Ringversuches der BAM bereitgestellt wird (Horn, 2022), war die Zusammensetzung bei der Durchführung der Experimente nicht bekannt.

Tabelle 5-1: Hinzugefügte Komponenten in den untersuchten Lacken

<b>Produkt</b>	<b>Komponente (CAS-Nummer)</b>	
Lack A	Toluol (108-88-3)	
	Propylenglykol (57-55-6)	
	Butylacetat (123-86-4)	
	Styrol (100-42-5)	
	Camphen (79-92-5)	
	Benzaldehyd (100-52-7)	
	Decan (124-18-5)	
	Acetophenon (98-86-2)	
	n-Butylacetat (123-86-4)	
Lack B	Styrol (100-42-5)	
	Octanal (124-13-0)	
	3-Caren (13466-78-9)	
	Methylpyrrolidon (872-50-4)	
	p-Cresol (106-99-5)	
	Dodecan (112-40-3)	
	Adipinsäuredimethylester (627-93-0)	
	Lack C	Toluol (108-88-3)
		Styrol (100-42-5)
1,3-Dichloro-2-propanol (96-23-1)		
Decan (124-18-5)		
Octanal (124-13-0)		
R(+)-Limonene (5989-27-5)		
Octanol (111-87-5)		
Decamethylcyclopentasiloxan (541-02-6)		
Benzothiazol (95-16-9)		
2,4,6-Trichloranisol (87-40-1)		
Dimethylphthalat (131-11-3)		
3,5-Di-tert-butyl-4-Hydroxytoluol (128-37-0)		

Für die Beladung der CLIMPAQs wird der Empfehlung des Ringversuches der BAM gefolgt und pro einem Luftdurchfluss von 100 l/h eine Petrischale verwendet. Bei einem Volumenstrom von 0,9 l/s, was 3240 l/h entspricht, werden die CLIMPAQs mit 32 Petrischalen für die sensorischen Messungen beladen.

Die Lackproben werden bis zu ihrer Verwendung in Aluminiumfolie luftdicht verpackt und unter klimatisierten Bedingungen gelagert.

### **5.1.7 Vorbehandlung der Probenbehälter**

Im Rahmen der Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Probendarbietung mit einem Adapter wird das Standardverfahren der Geruchsbewertung, also mit Verwendung von Probenbehältern, durchgeführt. Es werden Behälter aus Nalophan verwendet®. Diese werden etwa zwei Stunden mit Probenluft aus den CLIMPAQs gespült und vor der Messung damit gefüllt. Ihre Lagerungszeit bis zum Beginn der Messung beträgt etwa eine Stunde.

Zudem werden für den zu entwickelnden Adapter Probenbehälter benötigt (KAPITEL 6.3). Dabei werden sowohl Behälter aus Nalophan® als auch aus Tedlar® verwendet. Vor sämtlichen Versuchen werden die Behälter mit Probenluft gespült, wobei ein kontinuierliches Spülen über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden erfolgt.

Wie in KAPITEL 3.2.3.2 beschrieben, müssen Probenbehälter aus Tedlar® zudem zunächst thermisch vorbehandelt werden, um geruchsaktive Substanzen wie Phenol und Dimethylacetamid zu entfernen.

Für das Ausheizen steht bei der BAM ein Ofen mit einem würfelförmigen Raumvolumen von etwa 1,8 m<sup>3</sup> zur Verfügung. Dieser entnimmt mithilfe eines Wärmeregisters Zuluft mit einem Volumenstrom von 6 l/s aus einem sauberen und VOC-freien Raum. Die Luft strömt mittig von oben in den Ofen ein. An der Rückwand des Ofens ist eine zusätzliche Beheizung in der Wandung und mithilfe eines innenliegenden Ventilators wird eine gleichmäßige Verteilung der Wärme durch Umluft erzeugt, wobei eine Solltemperatur von 80 °C eingestellt ist. Die zuströmende Luft wird über Rohre mit einem Durchmesser von 40 mm auf vier Anschlüsse verteilt. Die Wände des Ofens, der Ventilator und die Leitungen bestehen aus Edelstahl.

Zunächst werden die einzelnen Lagen des zugeschnittenen Folienmaterials über 12 Stunden bei 80 °C ausgeheizt. Das Zusammenschweißen zu einem Behälter (in sauberer Umgebung) erfolgt erst im Anschluss, da die Ecken der Behälter sich ansonsten schlecht ausheizen lassen (B. Müller, 2002). Dann erfolgt ein erneutes Ausheizen über drei Stunden, um auch die Schweißnähte zu säubern, wobei die zwei gegenüberliegenden Hälse ein Durchspülen der Behälter ermöglichen. Nach ihrer Verwendung werden die Behälter für eine erneute Benutzung ausgeheizt. Abbildung 5-8 zeigt den Innenraum des Ofens mit der Luftverteilung und vier Behältern aus Tedlar, die an den Anschlüssen befestigt sind.



Abbildung 5-8: Foto des Ofeninnenraumes mit Probenbehältern aus Tedlar® zum Ausheizen

Bei der Herstellung und Vorbehandlung der Behälter wird ein sorgsamer Umgang gewährleistet, um Leckagen zu vermeiden. Die Behälter werden vor jeder Benutzung auf Leckagen geprüft, indem Material und Schweißnähte begutachtet werden. Die während der Versuche durchgeführten Hintergrundmessungen zu VOC-Emissionen bestätigen den Reinigungserfolg des Ausheizens. Es werden keine qualitativen und quantitativen Unterschiede der VOC-Konzentrationen zwischen Emissionsprüfkammern und Behältern gefunden (KAPITEL 6.3.3.3 UND 6.5.1).

### **5.1.8 Durchführung der Messungen**

Im Folgenden wird die Durchführung der mit dem Einsatz von geschulten Prüfenden am häufigsten stattfindenden Messungen beschrieben. Im Rahmen der Prüfung der Methode zur Ermittlung der vereinfachten empfundenen Intensität werden auch ungeschulte Prüfende genutzt, die zudem die Hedonik, die Akzeptanz und die Zumutbarkeit von Luftproben ermitteln. Dieser spezielle Messablauf wird in KAPITEL 7.1.2 beschrieben.

Im gesamten Zeitraum der Messungen für diese Promotion von April 2020 bis Juli 2023 stehen insgesamt 32 Prüfende zur Verfügung, an den einzelnen Messtagen jeweils zwischen 5 und 15.

Die hohe Zahl der Prüfenden insgesamt lässt sich damit erklären, dass die Prüfenden meist Studierende sind, die oft nicht langfristig planen können. Einige Prüfende sind seit 10 Jahren an den Messungen beteiligt, während andere nur für ein halbes Jahr teilnehmen. Die Corona-Pandemie und die vorübergehende Schließung der Hochschule führten zu zusätzlicher Fluktuation und dem Aufbau einer fast vollständig neuen Prüfergruppe nach der Wiederaufnahme des Hochschulbetriebes. Dies erklärt auch die teilweise niedrige Zahl der Prüfenden bei einzelnen Messungen.

Am Messtag ist die Prüfleitung mindestens 1,5 Stunden vor Beginn der Messungen vor Ort, um diese vorzubereiten, den Vergleichsmaßstab einzustellen und die Bereitstellung der Probenluft sowie das Geruchsbewertungs-equipment zu prüfen. Die Messungen sind für einen Zeitraum zwischen zwei und 2 ½ Stunden angesetzt. Zu den vereinbarten Terminen treffen die Prüfenden im Erholungsraum ein, wo sie sich vor Beginn der Messung etwa fünf bis zehn Minuten aufhalten sollen, um sich an die Umgebungsluft zu gewöhnen. Die Prüfleitung begrüßt die Prüfenden und informiert sie über das Ziel und den Ablauf der für den Tag festgelegten Messungen. Sie kann diesen Zeitpunkt auch nutzen, um in regelmäßigen Abständen oder bei Bedarf wiederholt auf die Verhaltensregeln hinzuweisen (KAPITEL 3.2.3.5). Auch besteht hier bereits die Möglichkeit zu prüfen, ob gegebenenfalls Prüfende dabei sind, die einen Geruch in den Raum tragen (z. B. kalter Zigarettenrauch, Parfüm) oder erkältet sind. Gegebenenfalls müssen diese Personen von den Messungen ausgeschlossen werden.

Zwischen den einzelnen Messungen halten sich die Prüfenden ebenfalls immer mindestens fünf Minuten im Erholungsraum auf. Im Prüfraum befindet sich immer nur eine prüfende Person. Auch die Prüfleitung selbst ist nicht im Prüfraum und betritt diesen nur bei Rücksprachebedarf oder wenn die Acetonkonzentrationen am Vergleichsmaßstab durch eine Messung mit dem Gasmonitor geprüft werden müssen (KAPITEL 5.1.3).

Zunächst riechen die Prüfenden die sechs Trichter des Vergleichsmaßstabes mit den vorgegebenen Intensitäten zwischen 0 und 15 pi und geben der Prüfleitung gegebenenfalls Rückmeldungen über Auffälligkeiten oder bestätigen die Wahrnehmung der aufsteigenden Konzentrationen. Melden mehrere Prüfende Auffälligkeiten, so hat die Prüfleitung dann die Gelegenheit, die Einhaltung der vorgegebenen Acetonkonzentrationen durch eine Messung mit dem Gasmonitor zu überprüfen.

Dann erfolgt die Bewertung von zwei unbekanntem Acetonintensitäten im Rahmen der Leistungsprüfung (KAPITEL 3.2.2.2). Die Prüfenden riechen hierbei zunächst an der unbekanntem Probe und entscheiden sich, in welchem Intensitätsbereich sich die Unbekannte befindet. Sie riechen dann an der vorgegebenen Intensität, die sie als gleich oder etwas weniger intensiv einschätzen. Halten sie ihre Einschätzung für richtig, so riechen sie zudem an der nächsthöheren Konzentration, um den genauen Wert der Acetonintensität zu ermitteln. Falls sie ihre Einschätzung für falsch halten, beginnen die Prüfenden erneut damit, zunächst die unbekanntem Probe zu riechen und das Vorgehen zu wiederholen, bis sie in der Lage sind, sich für einen Wert zu entscheiden. Zwischendurch steht ihnen immer ein Trichter mit sauberer Luft aus der Klimaanlage zur Verfügung, um Adaptationseffekte weitgehend vermeiden zu können.

Die Ermittlung der unbekanntem Intensität muss nach einem Zeitraum von 90 Sekunden abgeschlossen sein. Können die Prüfenden in dieser Zeit keine Ermittlung vornehmen, erhalten sie nach einer Erholungszeit von mindestens fünf Minuten erneut die Möglichkeit. Weicht der abgegebene Wert um mehr als 2 pi vom vorgegebenen Wert ab, so erhalten die Prüfenden die Möglichkeit einer Wiederholungsprüfung.

Prüfende, die sich an einem Messtag nicht für die Prüfung qualifizieren, nehmen zu Übungszwecken trotzdem weiter an der Messung teil. Die von ihnen ermittelten Werte im weiteren Verlauf der Messung werden jedoch nicht für die Auswertung berücksichtigt.

Nach der Leistungsprüfung führen die Prüfenden die am Messtag festgelegten Messungen durch. Es werden immer bis zu vier Proben bewertet, wobei die Erfassung einzelner Messgrößen getrennt voneinander erfolgt. Den Prüfenden steht zur Akklimatisierung immer die saubere, klimatisierte Luft an einem Trichter zur Verfügung und sie werden regelmäßig daran erinnert diese zu nutzen. Zwischen den einzelnen Messungen ist für die Prüfenden immer eine Pause von mindestens fünf Minuten im Erholungsraum einzuhalten.

Im Rahmen dieser Arbeit handelt es sich um folgende Messungen mit geschulten Prüfenden:

- Ermittlung der Hedonik und der empfundenen Intensität durch direkte Bewertung mit dem Standardverfahren (Probenbehälter) und mit dem Adapter
- Ermittlung der empfundenen Intensität mit der vereinfachten Methode

Es erfolgt eine Bewertung von Probenluft, die vor der Messung in Probenbehältern gesammelt wird.

Am Ende eines Messtages werden die Trichter immer mit dem 96 %-igem Ethanol gereinigt. Sind die Messungen mit einem Produkt nach mehreren Messtagen beendet, so werden die CLIMPAQs entladen und ebenfalls mit dem Ethanol gereinigt. Die CLIMPAQs werden auch zwischen den Messungen weiter mit der sauberen Luft aus der Klimaanlage versorgt, um deren Kontamination mit Substanzen in der Luft zu vermeiden.

Mit der Corona-Pandemie stiegen die Anforderungen an die bei den Messungen einzuhaltenen Hygiene, weshalb die Prüfenden eigene Einsätze für die Trichter erhielten. Diese werden für die Geruchsprüfung auf den Trichter gesetzt und vermeiden den Hautkontakt mit dem Trichter, um eine gegenseitige Ansteckung möglichst zu vermeiden. Die Einsätze wurden in eigener Anfertigung aus dünnem Aluminiumblech anhand eines entwickelten Musters

zugeschnitten. Sie sind genau auf die Größe der Trichter angepasst, um das Strömungsprofil der Luft nicht zu beeinflussen. Durch die Fertigung eines Griffes können sie leicht in den nächsten Trichter gesetzt werden, wodurch die notwendige Flexibilität der Prüfenden beim Riechen an unterschiedlichen Trichtern nicht beeinflusst wird.



Abbildung 5-9: Foto eines Trichtereinsatzes als hygienische Maßnahme während der Corona-Pandemie

### 5.1.9 Auswertung der Daten

Zur Erfassung und Auswertung der ermittelten Daten geben die Prüfenden ihre ermittelten Werte direkt in einen Laptop ein, der mit dem Programm Labview ausgestattet ist. Die Daten werden so in Form von Excel-Dateien gespeichert. Aus den Einzelwerten werden für die Messgrößen der empfundenen Intensität und der Hedonik der Mittelwert, die Standardabweichung und der 90 %-Vertrauensbereich berechnet (KAPITEL 3.2.3.3).

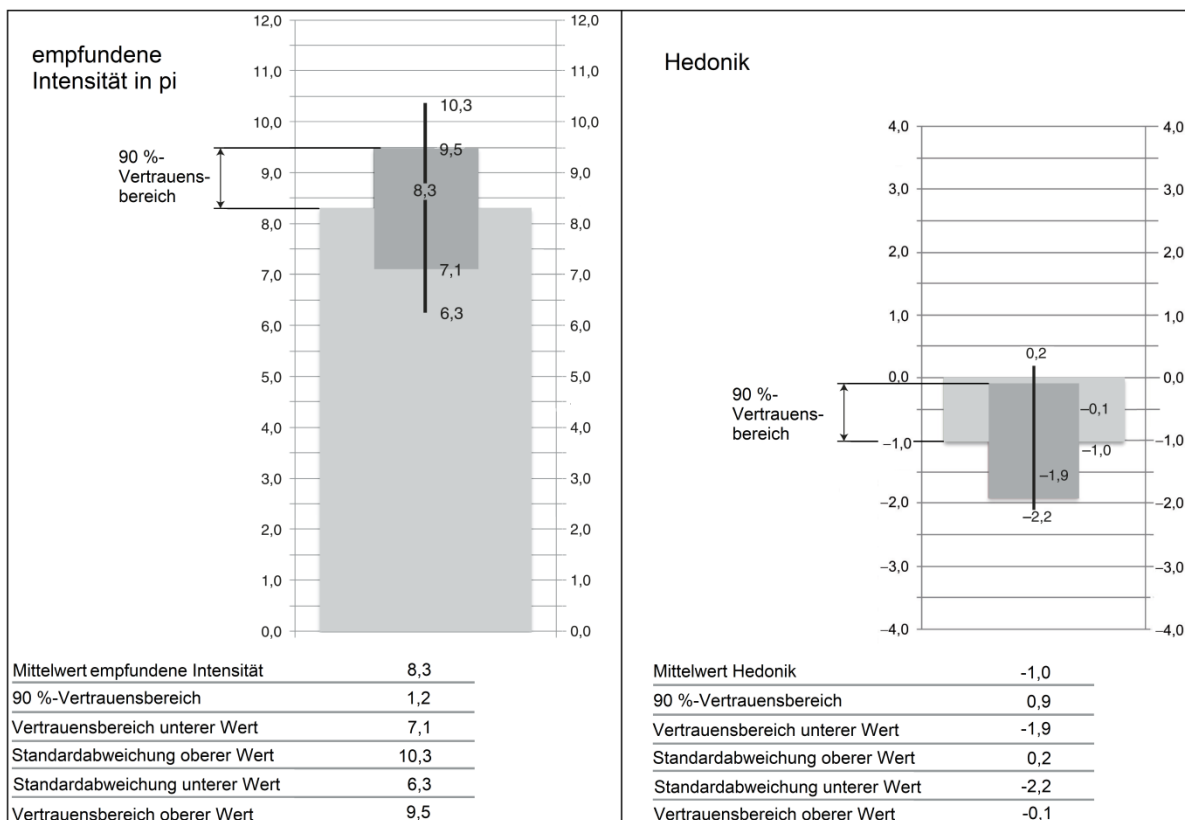


Abbildung 5-10: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Geruchsmessung für die empfundene Intensität und die Hedonik in Anlehnung an die VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015)

Die grafische Darstellung der ermittelten Werte erfolgt wie in Abbildung 5-10 beispielhaft dargestellt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4302 Blatt 1 (VDI, 2015). Auf der X-Achse

ist der Messtag aufgetragen und auf der Y-Achse die jeweiligen Werte der empfundenen Intensität und Hedonik, wobei der Mittelwert direkt auf der Achse abgelesen werden kann. Der Kasten zeigt die Breite des 90 %-Vertrauensbereiches und die dargestellten Linien die Standardabweichung vom Mittelwert. In der Wertetabelle werden der Mittelwert, der 90 %-Vertrauensbereich und jeweils die unteren und oberen Werte des 90 %-Vertrauensbereiches und der Standardabweichung angegeben.

### **Datentabellen in ANHANG A**

Die Datentabellen der Untersuchungen zur Entwicklung des Adapters sind im ANHANG A dargestellt. Neben den ermittelten Messgrößen umfassen diese auch die Daten der Acetonleistungsprüfung, wobei jeweils zwei Acetonintensitäten zu ermitteln waren. Folgende Ergebnisse der Leistungsprüfung werden im Anhang dargestellt:

- Anzahl Prüfender nach bestandener Leistungsprüfung (entspricht gleichzeitig der Anzahl der gültigen Prüfergebnisse der Messung der empfundenen Intensität und Hedonik)
- Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung
- Anzahl ausgeschlossener Prüfer (jeweils für die beiden vorgegebenen Werte und als Gesamtanzahl)
- vorgegebene Acetonwerte (sortiert als jeweils niedrigerer und höherer Wert)
- Die ermittelten Einzelwerte der Acetonintensitäten durch die Prüfenden werden statistisch ausgewertet. Dabei werden nur die Werte der Prüfenden berücksichtigt, die die Leistungsprüfung bestehen. Bei Wiederholungsprüfungen wird der Wert aus der Wiederholungsprüfung berücksichtigt. Aus den Einzelwerten werden der Mittelwert, die Standardabweichung und der 90 %-Vertrauensbereich gebildet. Durch die gewählte Methode der Auswertung können Standardabweichung und 90 %-Vertrauensbereich nur Werte von maximal  $2 \pi$  erreichen. Für die Auswertung der Ergebnisse der Leistungsprüfung gibt es in der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und der VDI 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) keine Vorgaben. Die gewählte Auswertung erfolgt in Anlehnung an die Auswertung des letzten stattgefundenen Ringversuchs der BAM (Horn, 2022).

### **Datentabellen in ANHANG B**

Die Daten der Untersuchungen zur vereinfachten Messung der empfundenen Intensität sind im ANHANG B dargestellt. Diese umfassen auch Angaben über die Anzahl der Prüfenden und die Anzahl ausgeschlossener Prüfer. Die grafische Darstellung ist sehr spezifisch für die unterschiedlichen Messungen und wird an der jeweiligen Stelle in KAPITEL 7.2 beschrieben.

## **5.2 VOC-Messungen**

Zur Erreichung des Ziels der Weiterentwicklung der Probandarbeitung mit dem Adapter (KAPITEL 2.1) in dieser Promotion werden die VOC-Konzentrationen in der Probenluft ermittelt.

Die Untersuchungen finden in den Laboren des Fachbereiches 4.2 „Material-Mikrobiom Wechselwirkungen“ der BAM statt. Dort werden Emissionsprüfkammern mit einem Volumen von  $1 \text{ m}^3$  und 270 l mit Produktproben beladen. Zum Zeitpunkt der Untersuchung erfolgt die Probenahme mit Sorptionsrohren, die mit Tenax® gefüllt sind. Die Analyse der VOCs durch

eine Analytikerin erfolgt durch Thermodesorption und Gaschromatographie mit Massenspektrometer (GC/MS-System) (KAPITEL 3.3).

Die folgende Abschnitte beinhalten die Auswahl der Proben, ihre Vorbereitung und Beladung der Prüfkammern (KAPITEL 5.2.1), die Bedingungen der Probenahme mit dem Sorptionsrohr (KAPITEL 5.2.2), die Analyse der VOC-Konzentrationen (KAPITEL 5.2.3) und die Auswertung der erhobenen Daten (KAPITEL 5.2.4)

### **5.2.1 Probenauswahl, Probenvorbereitung und Beladung**

Insgesamt werden vier Proben hinsichtlich ihrer VOC-Emissionen analysiert:

- Eine Probe eines Bodenbelags aus Kautschuk.
- Eine Probe mit verschiedenen Prüfstücken aus Kautschuk und Linoleum. Dabei wird die Emissionsprüfkammer gleichzeitig mit Prüfstücken beider Bodenbeläge beladen, um ein breites Spektrum an Analyten zu erhalten.
- Zwei Lackproben, denen zuvor VOCs hinzugefügt wurden.

Für die VOC-Messungen werden die gleichen Proben verwendet wie bei den sensorischen Messungen. Die Probenauswahl sowie ihre Vorbereitung werden in den KAPITELN 5.1.6.1 für die Bodenbeläge und 5.1.6.2 für die Lacke beschrieben. Bei den zwei untersuchten Lackproben handelt es sich um Lack A und B.

Im Gegensatz zu den sensorischen Messungen wird bei der Wahl der Beladung nicht das Referenzraumszenario der DIN EN 16516 (DIN, 2020) beachtet. Es ist vielmehr wichtig, dass eine ausreichend große Menge an VOCs im Messbereich des GC/MS-Verfahrens nachweisbar ist. So werden Vergleichsmessungen der Zusammensetzung der Probenluft bei direkter Probenahme und mit dem Adapter ermöglicht, wodurch seine Eignung überprüft werden kann. Die gewählte Beladung ist daher immer auf den Versuch angepasst und wird als spezielle Versuchsdurchführung in KAPITEL 6.3.3.3 UND 6.5.1 angegeben. Abbildung 5-11 zeigt Fotos der 270 l-Emissionsprüfkammer beladen mit Proben bei der BAM.

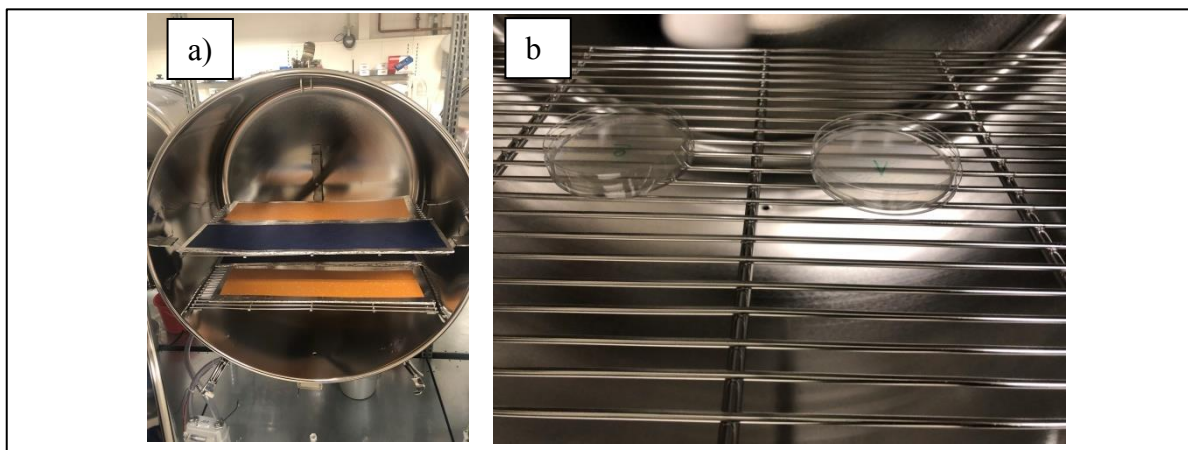


Abbildung 5-11: Fotos der 270 l-Emissionsprüfkammer beladen mit Prüfstücken: a) Linoleum und Kautschuk, b) Lackprobe

### 5.2.2 Probenahme

Für die Probenahme zur Bestimmung der VOC-Emissionen werden mit Tenax® gefüllte Sorptionsrohre aus Glas verwendet. Diese haben einen Innendurchmesser von etwa 4 mm, eine Länge von 179 mm und sind mit 200 mg Tenax® gefüllt. Tenax® ist ein poröses Polymer mit Partikelgrößen von 0,2 bis 0,5 mm auf Basis von 2,6-Diphenylenoxid. Die Rohre werden bei der BAM selbst mit Tenax® gefüllt. Die verwendeten Leerrohre sind mit einer Fritte versehen, worauf das Tenax® aufgebracht werden kann. Darüber kommt zur Fixierung ein feines Gewebe aus Edelstahl. Zu ihrem Schutz werden die Rohre in Containern mit Schraubkappen mit integriertem Dichtkonus aus PTFE gelagert und transportiert.

Vor der Probenahme werden die Sorptionsrohre mit jeweils 20 µg D8-Naphthalin und D34-Hexadecan in 1 µl Methanol als internem Standard beaufschlagt, um den Erfolg der Analytik zu prüfen.

Mithilfe der Sorptionsrohre wird, je nach zu erreichendem Versuchsziel, Probenluft an folgenden unterschiedlichen Probenahmestellen gesammelt:

- Probenahmestutzen der Emissionsprüfkammer
- Trichter am Abluftstutzen der CLIMPAQ
- Probenbehälter
- Trichter des Adapters

Die Probenahme erfolgt, wenn sichergestellt ist, dass nach der Beladung der Emissionsprüfkammer oder CLIMPAQ ein weitgehender Austausch aller Luftkompartimente stattgefunden hat. Das bedeutet, dass eine gleichmäßige Verteilung der Konzentrationen der emittierten Verbindungen erreicht ist. Gemäß DIN EN 16516 (DIN, 2020) wird dies üblicherweise nach einem fünfmaligen Luftwechsel erreicht. In den Untersuchungen beträgt das maximale Volumen der verwendeten Emissionsprüfkammern 1 m<sup>3</sup> und die minimal gewählte Luftwechselrate 0,5 h<sup>-1</sup>. Damit wird ein fünfmaliger Austausch spätestens zehn Stunden nach Beladung erreicht. Die Probenahme erfolgt in den meisten Versuchen einen Tag nach Beladung.

Für die Probenahme wird das Sorptionsrohr mit einem flexiblen Schlauch aus Silikon oder Fluorkautschuk an eine Probenahmepumpe (SKC Pocket-Touch) angeschlossen. Das andere Ende des Rohres wird an der Probenahmestelle angebracht, wobei darauf zu achten ist, die auf dem Rohr angegebene Strömungsrichtung einzuhalten, sodass die Seite mit dem Adsorbens auf der Seite der Probenahmestelle liegt. Die Pumpe wird mit dem gewünschten Probenahmevervolumenstrom und der Probenahmedauer eingestellt und gestartet. Das Probenahmevervolumen wird in Abhängigkeit von der erwarteten Höhe der VOC-Konzentrationen mit ein oder zwei Liter gewählt. Der gewählte Volumenstrom der Probenahme beträgt 100 ml/min.

Zum Nachweis der Reinheit der Emissionsprüfkammern und Probenbehälter wird die Hintergrundkonzentration der analysierten Stoffe bei einem Probenahmevervolumen von drei Litern ermittelt. Diese müssen gemäß DIN EN ISO 16000-9 (DIN, 2008) in ihrer Summe kleiner als 20 µg/m<sup>3</sup> sein und für jede einzelne VOC-Verbindung kleiner als 2 µg/m<sup>3</sup>. Diese Zielwerte werden in den Messungen erreicht.



Abbildung 5-12: Foto eines Sorptionsrohrs neben seinem Container sowie Probenahmepumpe mit Schlauch

Bei den meisten Messungen können die gemäß DIN EN 16516 (DIN, 2020) geforderten Doppelbestimmungen durchgeführt werden. Dabei werden zwei Luftproben entweder gleichzeitig unter Verwendung einer zweiten Pumpe entnommen oder kurz hintereinander. Aus den Doppelproben werden nach der Analyse jeweils die mittleren Konzentrationen ermittelt.

Bei der Ermittlung der VOC-Konzentrationen während der Lagerung von Probenbehältern ist eine Doppelbestimmung nicht möglich (KAPITEL 6.3.3.3). Im Versuch werden die VOC-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Lagerungszeit ermittelt, wobei kurze Zeitabstände zwischen 30 Minuten und einer Stunde gewählt werden. Eine Vorrichtung zur gleichzeitigen Entnahme bei doppelter Beprobung ist nicht verfügbar und die Zeit für zwei Entnahmen direkt nacheinander hätte insgesamt den gewünschten Zeitpunkt der Untersuchung überschritten.

Um Veränderungen der Proben zu vermeiden, werden diese immer so schnell wie möglich mit dem GC/MS-Verfahren analysiert. Erfolgt die Probenahme bei der BAM, kann die Analyse meist am gleichen Tag erfolgen und bei der Probenahme an der HTW Berlin innerhalb einer Woche. Die Anforderung der DIN ISO 16000-6 (DIN, 2012b), Proben innerhalb von vier Wochen zu analysieren, wird damit erfüllt.

### **5.2.3 Analyse mit dem GC/MS-System**

Die Desorption der Substanzen von den Sorptionsrohren erfolgt mit einem Thermodesorber der Firma Gerstel (TDS 2).

Die Rohre werden zunächst langsam im Desorptionsofen erhitzt. Um sämtliche Substanzen vollständig zu desorbieren und das Adsorberbett effektiv zu durchdringen, verwendet die BAM das nachstehende Ofenprogramm: Ausgehend von einer Ausgangstemperatur von 30 °C erfolgt eine gleichmäßige Erwärmung mit 30 K/min auf 300 °C. Zwischenzeitlich wird die Temperatur bei 260 °C für fünf Minuten konstant gehalten und zum Ende erfolgt eine zehnminütige Temperaturerhaltung bei 300 °C.

Die desorbierten Substanzen werden in ein tiefkaltes Kaltaufgabesystem (Gerstel KAS – 4) überführt. Im Kaltaufgabesystem kühlt flüssiger Stickstoff die Stoffe auf -120 °C ab, wodurch

sie kondensieren. Ein deaktiviertes Glasrohr mit Glas- oder Quarzfällung fungiert als Liner zur Sammlung dieses Kondensats. Durch schnelles Aufheizen auf 300 °C für drei Minuten werden sämtliche Substanzen isotherm bei 300 °C verdampft und gleichzeitig in die Säule des Gaschromatographen injiziert.

Die Analysen erfolgen mit dem GC-System 6890 der Firma Agilent, wobei Helium von hoher Reinheit als Trägergas fungiert. Dieses durchströmt die Trennsäule mit einer stabilen Strömungsgeschwindigkeit von 1,4 ml/min (Säulenfluss). Als Trennsäule kommt eine Säule der Firma Agilent (Typ DB5 UI MS) zum Einsatz, die mit einer stationären Phase aus Dimethylpolysiloxan (Polyimid fused silica) ausgestattet ist. Die Säule besitzt eine Länge von 60 m, einen Innendurchmesser von 0,25 mm und eine Filmdicke von 0,25 µm.

Um eine präzise Trennung der Verbindungen zu erzielen und sicherzustellen, dass sämtliche Substanzen die Säule vollständig passieren, kommt der GC-Ofen zum Einsatz. Dieser wird zunächst für acht Minuten bei 40 °C betrieben, anschließend erfolgt eine Erwärmung mit einem Temperaturgradienten von 10 K/min auf 150 °C, wo die Temperatur für eine Minute gehalten wird. Nachfolgend wird eine weitere Erwärmung mit dem gleichem Temperaturgradienten auf 300 °C durchgeführt und dort wird die Temperatur für fünf Minuten konstant gehalten. Die Gesamtlänge des gaschromatographischen Laufs beträgt 30 Minuten.

Als Massenspektrometer wird das MSD 5973 System der Firma Agilent verwendet, das mittels EI bei 70 eV arbeitet und mit einem Quadrupoldetektor ausgestattet ist. Um optimale Analysebedingungen zu gewährleisten, sind die Temperaturen um den Quadrupoldetektor auf 150 °C und im Bereich der Ionisationsquelle 230 °C eingestellt. Nach Beginn der Messung startet die Analyse der Probe nach fünf Minuten (Solvent-Delay). Ionenmoleküle mit einem Masse-zu-Ladungs-Verhältnis bzw. einer atomaren Masseneinheit von 25 bis 550 u werden erfasst. Zur Identifizierung der Substanzen dient die Massenspektrenbibliothek NIST-16. Die Quantifizierung erfolgt mit dem Programm Agilent Open Lab.

Die Auswertung der Massenspektrometren erfolgt substanzspezifisch, das heißt, die identifizierten VOCs werden mithilfe von Vergleichsstandards quantifiziert, die aus der jeweiligen Reinsubstanz hergestellt werden. Nicht exakt identifizierbare VOCs werden über Toluoläquivalente ausgewertet. Hierbei werden die anderen VOCs anhand der Fläche und Kalibrierung von Toluol ausgewertet.

#### **5.2.4 Auswertung der Daten**

In dieser Arbeit werden die in den Experimenten ermittelten VOC-Konzentrationen der Substanzen in µg/m<sup>3</sup> tabellarisch aufgeführt. Die Substanzen sind in den Zeilen und die Probenahmestellen (z. B. Emissionsprüfkammer, Probenbehälter) in den Spalten dargestellt. Die Konzentrationen sind auf ganze Zahlen gerundet und bei Doppelproben als Mittelwerte angegeben (KAPITEL 5.2.2). Beispielhaft wird auf Tabelle 6-5 in KAPITEL 6.3.2.2 verwiesen.

Zusätzlich werden bei den meisten Experimenten die Wiederfindungsraten der Einzelsubstanzen relativ dargestellt, wobei diese jeweils auf die in der Emissionsprüfkammer ermittelten Konzentrationen normiert werden. Die Substanzen sind auf der X-Achse und die prozentualen Anteile auf der Y-Achse aufgetragen. Der Bereich der Y-Achse reicht von 50 %

bis 120 % für eine vergrößerte Darstellung. Ein Beispiel für die grafische Darstellung findet sich in Abbildung 6-6 in KAPITEL 6.3.2.2.

Die Messunsicherheit des GC/MS-Verfahrens beträgt laut BAM zwischen 10 und 20 % (KAPITEL 3.3.4). Bei Konzentrationen nahe der Bestimmungsgrenze von  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ist die Quantifizierung unsicher. Daher werden die Wiederfindungsraten für diese Substanzen nicht ermittelt. Grafische Darstellungen erfolgen erst bei Konzentrationen über  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dies führt dazu, dass in zwei Fällen keine grafische Darstellung erfolgt (KAPITEL 6.3.2.2 und 6.3.3.3: jeweils VERSUCH A mit einem Bodenbelag aus Kautschuk). In einem Fall werden Substanzen unter  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in der Tabelle grau hinterlegt und in der relativen Darstellung nicht berücksichtigt (KAPITEL 6.5.1.1: Tabelle 6-10 und ABBILDUNG 6-21).

Die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) legt Anforderungen an die Wiederfindungsrate von VOCs in Probenbehältern im Vergleich zur Emissionsprüfkammer fest, wobei nach 6-stündiger Lagerung mindestens 80 % erreicht werden müssen (KAPITEL 3.2.3.2). Für die Prüfung der Probenbehälter für den Adapter wird in dieser Forschungsarbeit abgeleitet, dass die Probenluft zum Zeitpunkt der sensorischen Messung ebenfalls eine Wiederfindungsrate von mindestens 80 % aufweisen sollte.

## 6 Weiterentwicklung der Probendarbietung mit einem Adapter

Um das in KAPITEL 2.1 vorgestellte Ziel der Weiterentwicklung der Probendarbietung zu erreichen, wird ein Adapter entwickelt, gebaut und optimiert.

Der Bedarf eines Adapters leitet sich aus den in KAPITEL 4.1.1 beschriebenen sensorischen Vergleichsmessungen im Standardverfahren (Probendarbietung mit Probenbehältern) und dem alternativen direkten Verfahren ab. Die Anwendung der unterschiedlichen Verfahren kann bei sensorischen Messungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

In KAPITEL 4.1.2 wird eine Methode vorgestellt, bei der mit einer speziellen Maske auch bei kleinen Volumenströmen am Ausgang einer Emissionsprüfkammer eine direkte Bewertung durch Sammlung von Probenluft durchgeführt wurde. Diese Idee wird bei der Entwicklung des Adapters erneut aufgegriffen: Ein Luftsammelgefäß wird zwischen Emissionsprüfkammer und Trichter positioniert. Durch das Durchströmen und gleichzeitige Sammeln der Probenluft durch dieses Gefäß kann die Bewertung ähnlich wie bei einer direkten Messung erfolgen.

In Abbildung 6-1 wird die Vorgehensweise dargestellt, die von der Idee zur Entwicklung des Adapters bis hin zu seiner Fertigstellung verfolgt wurde. Entsprechend dieser Vorgehensweise ist auch dieses Kapitel gegliedert.

Zunächst werden in KAPITEL 6.1 eigene Messungen zum Vergleich der Probenahme und -darbietung im Standardverfahren und im direkten Verfahren dargestellt. Die Messungen wurden durchgeführt, um die Eignung des Adapters nach seiner Fertigstellung prüfen zu können.

In KAPITEL 6.2 werden die Anforderungen formuliert, die der Adapter erfüllen soll. Diese werden in zwei Kategorien unterteilt: Anforderungen an die Probenbehälter, als zentrales Element des Adapters, und an die Peripherie, also die unterstützende Technik, die zur gewünschten Funktionsweise führt.

KAPITEL 6.3 beschreibt die Untersuchungen und Überlegungen, die zur Entwicklung des Adapters nach den formulierten Anforderungen erforderlich waren. Auch hierbei erfolgt die Einteilung in die Kategorien „Probenbehälter“ und „Peripherie“. In Bezug auf die Probenbehälter wird zunächst deren erforderliches Volumen berechnet, wobei basierend auf dem ermittelten Wert auch die Größe der Emissionsprüfkammern, die für die Anwendung des Adapters geeignet sind, festgelegt wird (KAPITEL 6.3.1). Vor dem Bau des Adapters ist es zudem notwendig zu wissen, welche Art von Probenbehältern geeignet ist, also ob diese eine flexible oder eine feste Form aufweisen sollen, da dies die Konstruktion des Adapters vor allem bestimmt (KAPITEL 6.3.2). Da die Verwendung flexibler Behälter (Nalophan® und Tedlar®) Stand der Technik ist und damit von einer grundsätzlichen Eignung ausgegangen werden kann, wird allein die Eignung fester Behälter mithilfe eines Glasgefäßes in analytischen und sensorischen Messungen überprüft. Diese Messungen zeigen, dass feste Behälter ungeeignet sind, was zur Auswahl flexibler Behälter führt. Schließlich wird die Herstellung der flexiblen Behälter und ihre Eignung VOC-Messungen überprüft (KAPITEL 6.3.3). Anhand der Auswahl der Probenbehälter wird die Peripherie geplant (KAPITEL 6.3.4).

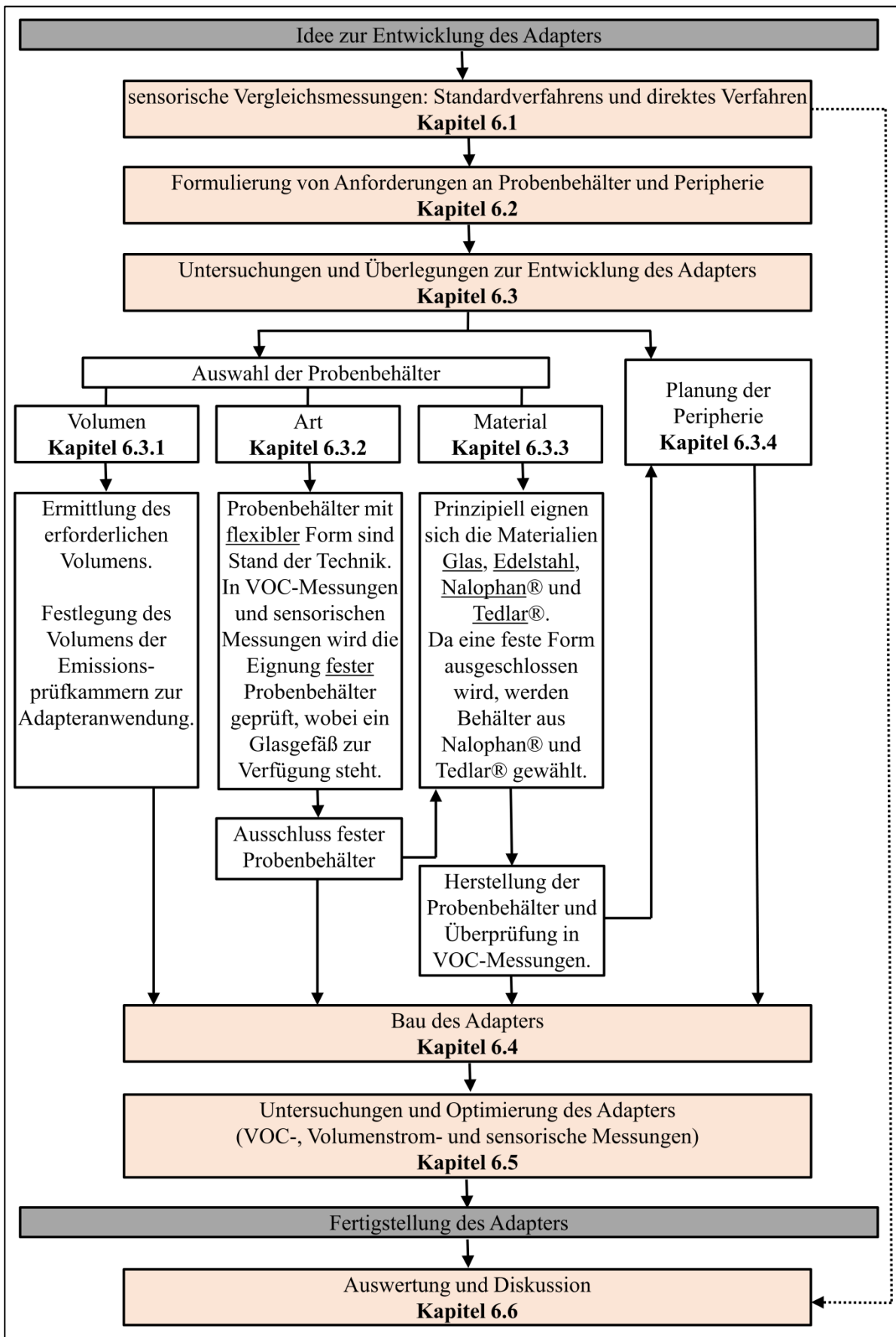


Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Entwicklung, dem Bau und der Optimierung des Adapters

Der Bau des Adapters wird in KAPITEL 6.5 dargestellt, wobei die Auswahl der Bauteile und eine Betriebsanleitung dargestellt werden.

Durch VOC-, Volumenstrom- und sensorische Messungen wird die Funktionsfähigkeit des Adapters überprüft, wobei sich Optimierungsbedarf ergibt, der konstruktiv umgesetzt wird (KAPITEL 6.5).

Das KAPITEL 6.6 umfasst die Auswertung und Diskussion zum Adapter.

Die Auswahl der Probenbehälter und die Funktionsweise des Adapters werden hauptsächlich durch Vergleichsmessungen der Probenluft im Hinblick auf ihre VOC-Konzentrationen und sensorischen Eigenschaften überprüft (KAPITEL 6.3.2, 6.3.3 und 6.5). Dabei werden die VOC-Konzentrationen der Probenluft des Adapters mit denen der Probenluft in den verwendeten Emissionsprüfkammern verglichen, um die Wiederfindungsraten in Bezug auf die Konzentrationen in der Prüfkammer zu ermitteln. Ziel ist es, dass diese möglichst hoch sind. Des Weiteren werden die empfundene Intensität und die Hedonik gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) sowohl in direkter Bewertung als auch mittels Adapter gemessen, wobei die Ergebnisse möglichst übereinstimmen sollten.

## **6.1 Messungen zum Vergleich der Verfahren zur Geruchsbewertung**

Zunächst erfolgen sensorische Messungen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021), wobei die empfundene Intensität und die Hedonik der Probenluft sowohl mit dem Standardverfahren der Geruchsbewertung mit Probenbehältern als auch durch das direkte Verfahren ermittelt werden. Diese Messungen dienen als Grundlage für die spätere Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Adapters (KAPITEL 6.6).

Die Messungen werden im Luftqualitätslabor der HTW Berlin nach der in KAPITEL 5.1 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die Nutzung von CLIMPAQs ermöglicht die Durchführung des direkten Verfahrens, da am Trichter ein Volumenstrom von 0,9 l/s bereitgestellt werden kann.

Insgesamt werden neun Vergleichsmessungen, jeweils im Standardverfahren und im direkten Verfahren, mit elastischen Bodenbelägen bei einer flächenspezifischen Luftdurchflussrate  $q_A$  von  $1,25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  durchgeführt. Es stehen sechs bis neun Prüfende für die Messungen zur Verfügung, wobei im Rahmen einer Vergleichsmessung immer die gleichen Prüfenden, also auch jeweils in gleicher Anzahl, an der Messung teilnehmen. Beim Standardverfahren werden Probenbehälter aus Nalophan® verwendet. Tedlar® konnte nicht getestet werden, da zum Zeitpunkt der Messungen der Ofen für das notwendige Ausheizen der Folien (KAPITEL 3.2.3.2) noch nicht zur Verfügung stand.

Abbildung 6-2 zeigt die Messergebnisse der empfundenen Intensität und Abbildung 6-3 der Hedonik. Die Einzelergebnisse der Prüfenden einschließlich der Ergebnisse der Acetonleistungsprüfung sind im ANHANG A in TABELLE A1 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der empfundenen Intensitäten liegen im Bereich zwischen etwa 2 pi und 15 pi. Der 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0 \text{ pi}$  kann bei zwei der neun Messungen für beide Verfahren nicht ganz eingehalten werden (Messung 6 und 9) und bei einer Messung wird er nur im direkten Verfahren erreicht (Messung 5). Die Hedonik reicht von etwa -2,5 bis 0,5.

Der 90 %-Vertrauensbereich von 1 wird bei zwei Messungen mit dem direkten Verfahren nicht erreicht (Messung 1 und 6) und bei einer Messung im Standardverfahren (Messung 9).

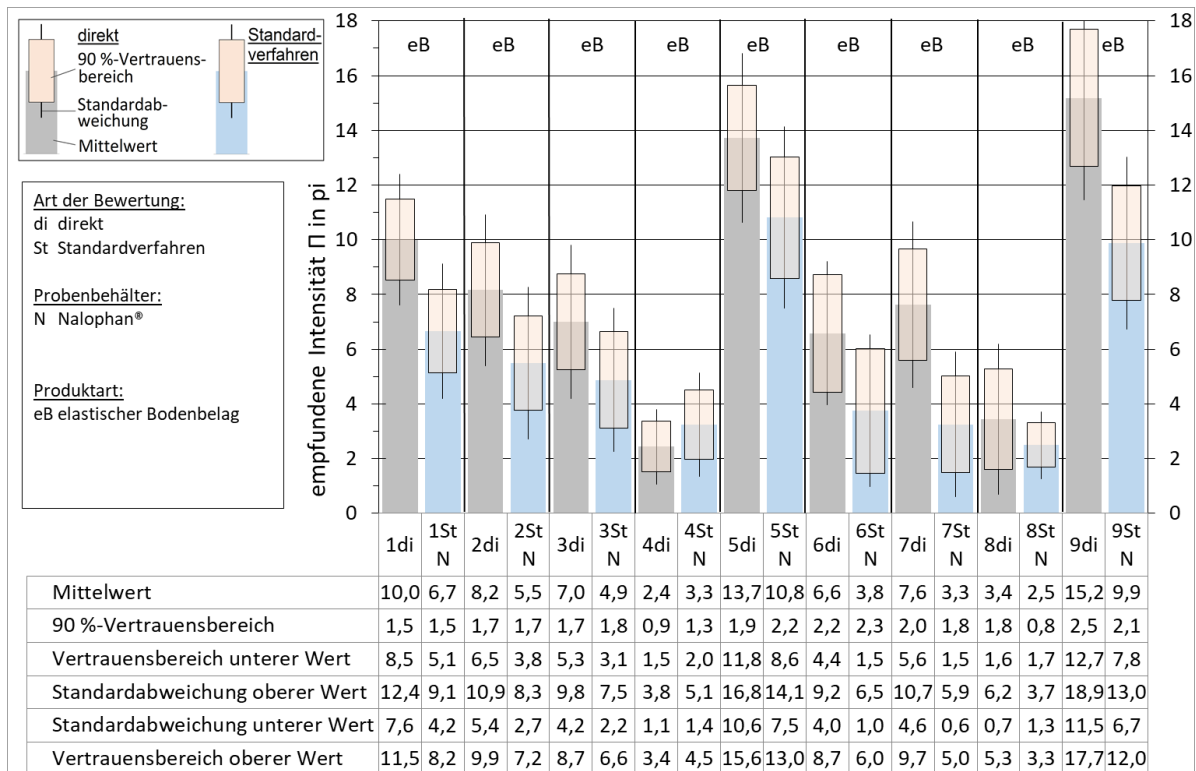


Abbildung 6-2: Empfundene Intensität elastischer Bodenbeläge (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und dem Standardverfahren (St) der Geruchsbewertung mit Behältern aus Nalophan® (N)

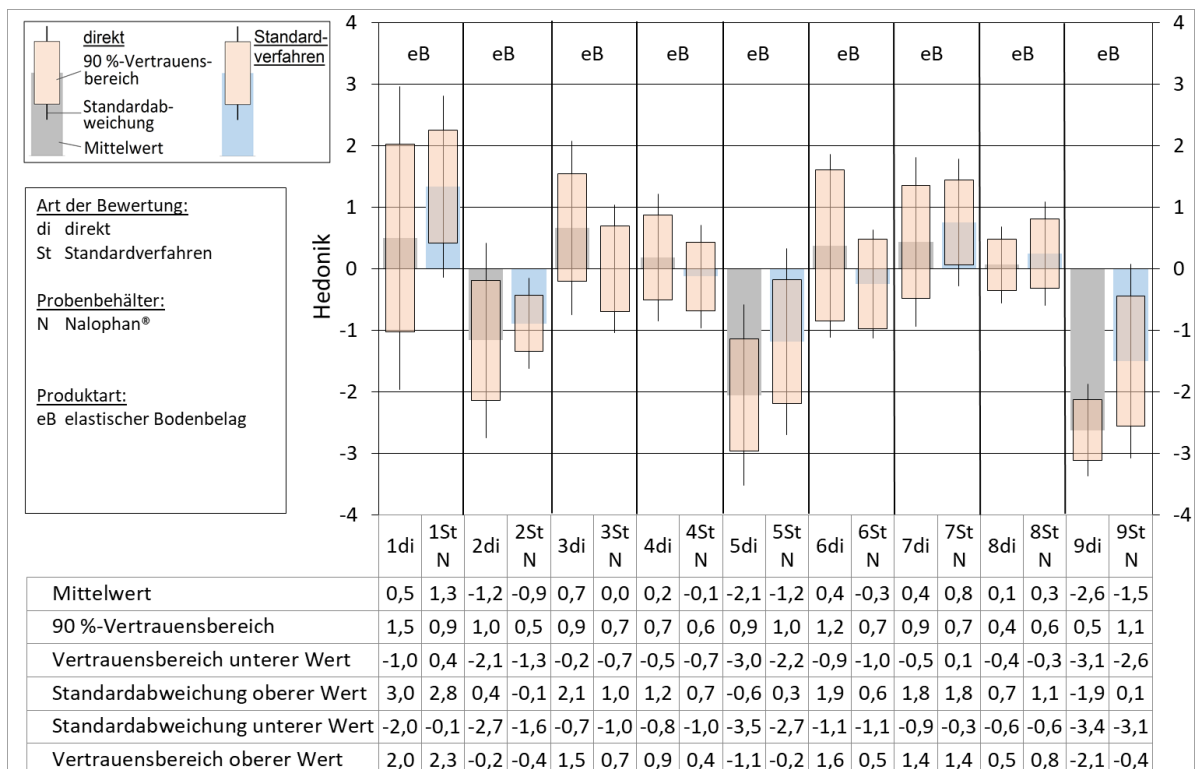


Abbildung 6-3: Hedonik elastischer Bodenbeläge (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und dem Standardverfahren (St) der Geruchsbewertung mit Probenbehältern aus Nalophan® (N)

Für die weitere Interpretation der Ergebnisse werden die Mittelwerte der Messungen der empfundenen Intensität sowie ihre Differenz („Mittelwert des Standardverfahren“ minus „Mittelwert des direkten Verfahrens“) in Tabelle 6-1 dargestellt. Insgesamt zeigt der Vergleich, dass die mit dem Standardverfahren ermittelten Intensitäten (Abbildung 6-2) in acht der neun Messungen um 0,9 bis 5,3 pi geringere Werte im Vergleich zum direkten Verfahren aufweisen. Bei sieben Messungen beträgt der Unterschied mehr als 2 pi, was außerhalb der geforderten Messgenauigkeit des Verfahrens von  $\pm 2,0$  pi liegt und damit signifikant ist. Im Mittel beträgt die Abweichung -2,6 pi.

Wie oben beschrieben wird festgestellt, dass in drei Vergleichsmessungen der vorgegebene 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0$  pi knapp verfehlt wurde (Messung 5, 6 und 9). Trotz dieser Abweichung bleibt die Schlussfolgerung bestehen, dass die Intensitäten, die mit dem Standardverfahren ermittelt werden, geringer sind.

Aufgrund der Corona-Pandemie war die Wiederholung von Messungen nicht möglich, um Messungen im vorgegebenen Vertrauensbereich zu erhalten

Tabelle 6-1: Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und dem Standardverfahren der Geruchsbeurteilung sowie Differenzen der Mittelwerte

Messung	empfundene Intensität [] in pi		
	Standardverfahren	direktes Verfahren	Differenz: „Standardverfahren“ - „direktes Verfahren“
1	6,7	10,0	-3,3
2	5,5	8,2	-2,7
3	4,9	7,0	-2,1
4	3,3	2,4	0,8
5	10,8	13,7	-2,9
6	3,8	6,6	-2,8
7	3,3	7,6	-4,4
8	2,5	3,4	-0,9
9	9,9	15,2	-5,3
			<u>Mittelwert: -2,6</u>

Die Ergebnisse der Hedonik zeigen, dass die mit dem Standardverfahren ermittelten Mittelwerte in sieben der neun Messungen geringfügig besser bewertet werden (Abbildung 6-3). Dies kann damit erklärt werden, dass auch die empfundene Intensität mit dem Standardverfahren etwas geringer bewertet wird als mit dem direkten Verfahren. Wie in KAPITEL 4.2.1, Abbildung 4-9 dargelegt, wird damit auch die Hedonik tendenziell angenehmer wahrgenommen.

## 6.2 Anforderungen an den Adapter

Mit dem Adapter soll Probenluft abwechselnd gesammelt und dargeboten werden, wodurch eine Veränderung dieser Luft weitgehend vermieden werden soll. Im Vergleich zum üblicherweise angewandten Standardverfahren wird ihre Lagerzeit verkürzt. Auf diese Weise soll mit dem Adapter eine ähnliche sensorische Bewertung wie bei einer direkten Messung

erzielt werden, wobei nun auch die Verwendung von Emissionsprüfkammern mit geringerem Volumen ermöglicht wird (KAPITEL 3.2.3.2).

Das Konzept des Adapters ist darauf ausgerichtet, dass dieser zentral ein Luftsammelgefäß enthalten soll, das mit Probenluft kontinuierlich durchströmt wird und zum Zeitpunkt der sensorischen Messung in der Lage ist, Probenluft für mindestens eine prüfende Person bereitzustellen. Er dient damit als Puffer zwischen Emissionsprüfkammer und Trichter und soll eine wechselseitige Sammlung und Darbietung der Probenluft ermöglichen.

Der Adapter muss des Weiteren die in KAPITEL 3.2.3.2 beschriebenen Vorgaben zur Probendarbietung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) erfüllen.

In Tabelle 6-2 sind die Anforderungen an den Adapter beschrieben. Sie betreffen sowohl Anforderungen an das Volumen, die Art und das Material des Probenbehälters als auch an die Peripherie, also die Technik, mit der die gewünschte Funktionsweise des Adapters gewährleistet wird.

Tabelle 6-2: Anforderungen an den Adapter (Probenbehälter und Peripherie)

<b>Komponente</b>	<b>Anforderungen</b>
Probenbehälter: <i>Volumen</i> KAPITEL 6.3.1	Der Probenbehälter muss eine ausreichende Menge an Probenluft für eine prüfende Person bereitstellen können. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass der Behälter nicht zu groß ist, um die Zeit für die Befüllung nach einer Probenahme so zu begrenzen, dass sie noch in den Messablauf passt. Das bedeutet, dass die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Darbietungen nicht zu lang sein dürfen. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, das <i>Mindestvolumen von Emissionsprüfkammern</i> zu bestimmen, die für die Anwendung des Adapters geeignet sind.
Probenbehälter: <i>Art</i> KAPITEL 6.3.2	Grundsätzlich stehen zwei Arten von Probenbehältern zur Auswahl: feste Probenbehälter, die eine definierte Form aufweisen, und flexible Behälter mit veränderbarer Form. Die Wahl der Behälterart hat grundlegende Auswirkungen auf die Konstruktion des Adapters, da die Probenluftführung zur Nase abhängig von der Behälterart zu gestalten ist. Aus diesem Grund ist zunächst eine Entscheidung über die Art des Probenbehälters zu treffen.
Probenbehälter: <i>Material</i> KAPITEL 6.3.3	Das Material des Probenbehälters sollte so beschaffen sein, dass die Adsorption und Desorption von Substanzen an der Behälterwandung möglichst gering sind. Für den Kontakt mit Probenluft stehen die gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) zugelassenen Materialien Glas, polierter Edelstahl, Nalophan® und Tedlar® zur Verfügung
Peripherie KAPITEL 6.3.4	Die Peripherie muss den Einbau zwischen Emissionsprüfkammer und Trichter ermöglichen und gleichzeitig das wechselnde Sammeln und Darbieten von Probenluft.  Um den Probenbehälter zu spülen, muss die Möglichkeit der Durchströmung gegeben sein.

<p>Fortsetzung Peripherie KAPITEL 6.3.4</p>	<p>Die Probenluft, die durch den Adapter strömt, muss anschließend zur Ablufteinrichtung des Labors geführt werden, um ihre Ansammlung in der Umgebungsluft zu verhindern.</p> <p>Der Adapter muss im Raum aufgestellt werden, wozu die Entwicklung eines Tisches vorgesehen ist.</p> <p>Bei der Darbietung von Probenluft muss durch einen ausreichend hohen Volumenstrom (0,6 bis 1,0 l/s) eine Vermischung mit Umgebungsluft vermieden werden. Grundsätzlich stehen als Schnittstelle zwischen dem Probenluftauslass des Adapters und der Nase der prüfenden Person, ein Trichter, eine Maske oder ein abnehmbarer Deckel zur Wahl.</p> <p>Eine Vermischung von Probenluft mit Umgebungsluft ist zu vermeiden. Zu diesem Zweck muss die Dichtheit des Darbietungssystems sichergestellt werden.</p> <p>Die Sammlung und Darbietung von Probenluft darf keinen Einfluss auf die Druckverhältnisse in der Emissionsprüfkammer haben und damit das vorgegebene Emissionsszenario verändern.</p>
-----------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 6.3 Untersuchungen zur Entwicklung des Adapters

In diesem Kapitel werden die Entwicklung und die Untersuchungen der in Tabelle 6-2 (KAPITEL 6.2) genannten Adapterkomponenten beschrieben. Dabei wird in den KAPITELN 6.3.1 bis 6.3.3 auf die Auswahl der Probenbehälter eingegangen und in KAPITEL 6.3.4 auf die Entwicklung der Peripherie.

#### 6.3.1 Volumen der Probenbehälter und Emissionsprüfkammern

Wie in Tabelle 6-2 (KAPITEL 6.2) beschrieben, sollte das minimale Volumen des Probenbehälters ausreichend groß sein, um Probenluft für die Geruchsbewertung durch eine prüfende Person bereitzustellen. Zu diesem Zweck wird zunächst berechnet, wieviel Probenluft eine Person für eine Bewertung benötigt.

In Beobachtungen von Prüfenden bei der Durchführung nach dem Verfahren der direkten Bewertung wird beobachtet, dass einzelne Personen höchstens drei Mal an der Probenluft über eine Zeitdauer von jeweils vier Sekunden riechen. Damit muss rein rechnerisch etwa über die Dauer von 12 Sekunden Probenluft bereitgestellt werden. Das erforderliche minimale Volumen eines Probenbehälters für eine einzelne Geruchsbewertung ergibt sich aus dieser Zeitdauer multipliziert mit dem Volumenstrom. Beim gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) geforderten Volumenstrom von 0,6 bis 1,0 l/s ergibt sich ein Behältervolumen von 7,2 bis 12,0 Liter.

Es ist vorgesehen, die Probenluft abwechselnd zu sammeln und darzubieten. Daher wird davon ausgegangen, dass ein Teil der Probenluft für die Einstellung dieses wechselnden Betriebes benötigt wird. Zusätzlich ist es bei der Geruchsprüfung unerwünscht, den

Probenbehälter vollständig zu entleeren, um sicherzustellen, dass bis zum Ende der Probenahme ausreichend Probenluft vorhanden ist. Aus diesen Gründen wird eine Behältergröße von etwa 20 Litern geplant. Ein größeres Volumen, das zum Beispiel mehrere Geruchsbewertungen ohne erneute Befüllung ermöglichen würde, ist nicht vorgesehen, da dies die Lagerzeit von Probenluft verlängern würde, was für den Adapter unerwünscht ist.

Basierend auf dem berechneten Volumen von 20 Litern wird ermittelt, welches Volumen Emissionsprüfkammern haben können, um mit einem Adapter verbunden zu werden. Dabei wird die Zeitdauer zur Befüllung des Behälters ermittelt. Diese sollte nicht zu lang sein, da sie auch das erforderliche Zeitintervall zwischen den Darbietungen an die einzelnen Prüfenden bestimmt. Der Adapter muss eine Geruchsbewertung mit 12 bis 15 Prüfenden innerhalb eines Messzeitraumes von etwa einem Arbeitstag ermöglichen.

Abhängig von der gemäß DIN EN 16516 (DIN, 2020) festgelegten Luftwechselrate zwischen 0,25 und 2,0 h<sup>-1</sup> in der Emissionsprüfkammer (KAPITEL 3.2.3.2) ergeben sich unterschiedliche Luftvolumenströme für Prüfkammern mit verschiedenen Volumina. Die Dauer für die Befüllung ergibt sich gemäß Formel 6 aus dem Verhältnis des Volumens der Emissionsprüfkammer V<sub>EPK</sub> zum Produkt, aus dem Volumen des Probenbehälters V<sub>PB</sub> und der Luftwechselrate n.

*Formel 6: Ermittlung der Dauer für die Befüllung von Probenbehältern*

$$t = \frac{V_{PB}}{V_{EPK} \cdot n}$$

mit:	t	Dauer für die Befüllung in s
	V <sub>EPK</sub>	Volumen der Emissionsprüfkammer in l oder m <sup>3</sup>
	V <sub>PB</sub>	Volumen des Probenbehälters in l oder m <sup>3</sup>
	n	Luftwechselrate in h <sup>-1</sup>

In Tabelle 6-3 sind die Befülldauern für Emissionsprüfkammern unterschiedlicher Volumina bei verschiedenen Luftwechselraten aufgeführt.

Tabelle 6-3: Berechnete Zeitdauern zur Befüllung eines 20 l großen Probenbehälters bei unterschiedlichen Luftwechselraten und Emissionsprüfkammern unterschiedlicher Volumina

Volumen der Emissionsprüfkammer	Befülldauer bei unterschiedlichen Luftwechselraten			
	$n = 0,25 \text{ h}^{-1}$	$n = 0,5 \text{ h}^{-1}$	$n = 1,0 \text{ h}^{-1}$	$n = 2,0 \text{ h}^{-1}$
20 m <sup>3</sup>	14,4 s	7 s	4 s	2 s
4,7 m <sup>3</sup>	1 min 1 s	31 s	15 s	8 s
3 m <sup>3</sup>	1 min 36 s	48 s	24 s	12 s
<b>1080 l</b>	4 min 27 s	2 min 13 s	1 min 7 s	33 s
1000 l	4 min 48 s	2 min 24 s	1 min 12 s	36 s
270 l	14 min 47 s	8 min 53 s	4 min 27 s	2 min 13 s
250 l	19 min 12 s	9 min 36 s	4 min 48 s	2 min 24 s
240 l	20 min	10 min	5 min	2 min 30 s
125 l	38 min 24 s	19 min 12 s	9 min 36 s	4 min 48 s
24 l	3 h 20 min	1 h 40 min	50 min	25 min

Wie in KAPITEL 3.2.3.2, TABELLE 3-1 beschrieben, wäre die Anwendung des Adapters bei Emissionsprüfkammern ab einem Volumen von 1080 l unter Einhaltung der höchsten zulässigen Luftwechselrate von  $2,0 \text{ h}^{-1}$  nicht erforderlich, da eine direkte Messung durchgeführt werden kann.

Für kleinere Prüfkammern mit einem Volumen von einem Kubikmeter werden bis zu 2,5 Minuten zur Befüllung des Probenbehälters benötigt. Angenommen, es erfolgt eine Bewertung durch 15 Prüfende und der Behälter wird für jede Person vollständig neu gefüllt, entspricht dies einer Gesamtzeitdauer zur Befüllung von 37,5 Minuten. Die Planung einer Geruchsmessung an der HTW Berlin sieht eine Zeitdauer von zwei Stunden vor (KAPITEL 5.1.7). Plant man die Zeit der Befüllung zusätzlich mit ein, ergibt sich ein Messzeitraum von etwa 2,5 Stunden, was für einen Messtag angemessen ist.

Bei Prüfkammern zwischen 240 und 270 Litern beträgt die maximale Befülldauer bei der niedrigsten Luftwechselrate 10 Minuten. Das entspricht einer Gesamtzeitdauer zur Befüllung von 150 Minuten oder 2,5 Stunden, was dann einem Messzeitraum von bis zu 4,5 Stunden entsprechen würde. Der Einsatz des Adapters ist für diese Prüfkammern möglich, um eine sensorische Prüfung an einem Tag durchzuführen. Auch wenn Messungen eventuell wiederholt werden müssen, weil es zu Störungen kommt, ist der Einsatz des Adapters möglich. Es wird empfohlen, die Prüfenden über den Tag verteilt einzeln oder in kleineren Gruppen zur Messung zu bestellen, um lange Wartezeiten zu vermeiden.

Bei der Anwendung des Adapters bei Emissionsprüfkammern mit einer Größe von 125 Litern ergibt sich eine Befülldauer von bis zu etwa 40 Minuten bei der niedrigsten Luftwechselrate von  $0,25 \text{ h}^{-1}$ , was eine Gesamtzeitdauer für die Befüllung von zehn Stunden für 15 Prüfende bedeutet. Dies ist für einen Messtag zu lang. Die Prüfzeit kann jedoch durch Erhöhung der Luftwechselrate auf  $1,0$  und  $2,0 \text{ h}^{-1}$  verkürzt werden, sodass eine Messung mit diesen Prüfkammern möglich wäre.

Eine Geruchsmessung mit dem Adapter an den kleinsten bekannten Emissionsprüfkammern von 23 Litern ist bei einer Gesamtdauer von mindestens 6,5 Stunden zur Befüllung des Probenbehälters bei 15 Prüfenden bei der höchsten möglichen Luftwechselrate von  $2,0 \text{ h}^{-1}$  nicht möglich.

Insgesamt wird der Einsatz für den Adapter für Emissionsprüfkammern ab einem Volumen von 240 Liter bis zu einem Kubikmeter empfohlen. Geringere Volumina bis 125 Liter sind möglich, wobei eine Einstellung von Luftwechselraten zwischen  $1,0$  und  $2,0 \text{ h}^{-1}$  empfohlen wird. Prüfkammern mit geringeren Volumina erfordern eine zu lange Zeit zur Befüllung der Probenbehälter.

### **6.3.2 Art der Probenbehälter: Prüfung der festen Form**

In KAPITEL 6.2, TABELLE 6-2 wird beschrieben, dass Probenbehälter in ihrer Art eine feste oder eine veränderbare Form aufweisen können. Da diese Auswahl die Konstruktion des Adapters maßgeblich mitbestimmt, muss dies zunächst festgelegt werden.

Bei der Durchführung der sensorischen Messungen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) werden standardmäßig flexible Probenbehälter zur Sammlung und Darbietung von Probenluft verwendet. Das Prinzip des dafür verwendeten Darbietungssystems (KAPITEL 3.2.3.2, ABBILDUNG 3-7) ist auch für die Konstruktion des Adapters geeignet, weshalb die Eignung dieser Behälterart nicht geprüft werden muss. Mit den in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen wird geprüft, ob sich Probenbehälter mit fester Form eignen. Dabei wird das in KAPITEL 4.1.2 beschriebene Prinzip der Verwendung einer Maske aufgegriffen.

Gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) eignen sich die Materialien Glas und polierter Edelstahl für den Kontakt mit Probenluft (KAPITEL 3.2.3.1). Für die Messungen steht ein Gefäß aus Glas zur Verfügung. In diesem Kapitel werden zunächst das Gefäß (KAPITEL 6.3.2.1), die VOC-Messungen (KAPITEL 6.3.2.2) und die sensorischen Messungen (KAPITEL 6.3.2.3) beschrieben. Schlussfolgernd wird dargelegt, ob sich Behälter mit fester Form für den Adapter eignen (KAPITEL 6.3.2.4).

#### **6.3.2.1 Beschreibung des Glasgefäßes**

Abbildung 6-4 zeigt eine schematische Darstellung des verwendeten Glasgefäßes. Dieses wurde vormals für Untersuchungen des Permeationsverhaltens von Folien als Material zur Herstellung von Probenbehälter verwendet (B. Müller, 2002) und eignet sich aufgrund seines Aufbaus auch für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit. Es besteht aus einem 300 mm langen Rohr mit einem Innendurchmesser von 150 mm, welches auf beiden Seiten mit Planflanschdeckeln durch Schnellspanner luftdicht verschlossen ist, weshalb Dichtungen nicht erforderlich sind. An den Flanschdeckeln sind jeweils vier Stutzen angebracht, die für unterschiedliche Zwecke verwendet oder mit Stopfen aus Glas verschlossen werden können.

Das Gefäß hat ein Volumen von etwa 7 Litern, was zu klein ist, um als Probenbehälter für den Adapter zu dienen. Wie in KAPITEL 6.3.1 beschrieben, sollte der Behälter in etwa ein Volumen von 20 Litern aufweisen. Dennoch kann es für Untersuchungen zur Prüfung der prinzipiellen Eignung verwendet werden, da im Luftqualitätslabor der HTW Berlin ein hoher Probenluftvolumenstrom von  $0,9 \text{ l/s}$  zur Verfügung steht. Dies ermöglicht eine Befüllung des Behälters innerhalb weniger Sekunden, wodurch nach einer einmaligen Probenahme nach

sehr kurzer Zeit erneut Probenluft, entweder für dieselbe oder die nächste prüfende Person, zur Verfügung steht.

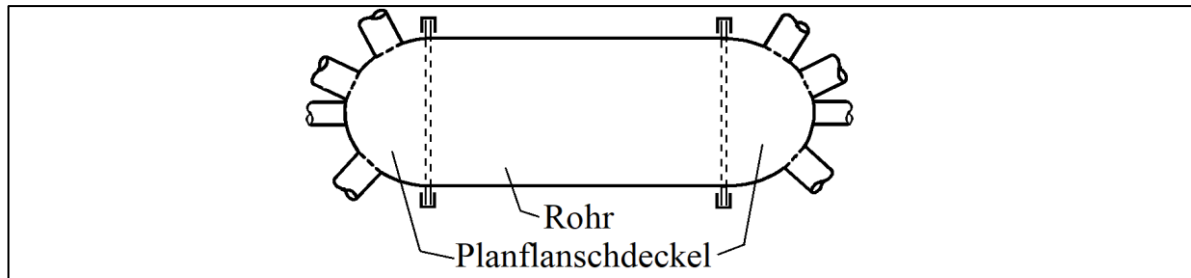


Abbildung 6-4: Schematische Darstellung des Glasgefäßes zur Verwendung als Adapter

### 6.3.2.2 VOC-Messungen

Um die Eignung des Glasgefäßes anhand von VOC-Messungen zu prüfen, werden zwei Versuche (im Folgenden Versuch A und B) bei der BAM durchgeführt. Dabei wird das Gefäß an die Abluft einer 270 l-Emissionsprüfkammer angeschlossen, die mit einer Probe beladen ist. Es werden zwei Versuche mit einer Bodenbelagsprobe aus Kautschuk (Versuch A) und einem Lack (Versuch B) durchgeführt.

Abbildung 6-5 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaus. Eine Edelstahlleitung mit einem Nenndurchmesser von 40 mm verbindet die Prüfkammer mit einem der Stutzen am Planflanschdeckel auf einer Seite des Sammelgefäßes. Am gegenüberliegenden Planflanschdeckel kann an einem der Stutzen die Probenahme mit dem Sorptionsrohr erfolgen. Alle nicht genutzten Stutzen werden mit Glasstopfen luftdicht verschlossen. Ein Kugelhahn zwischen Prüfkammer und Glasgefäß ermöglicht es, den Luftstrom zu öffnen oder zu schließen.

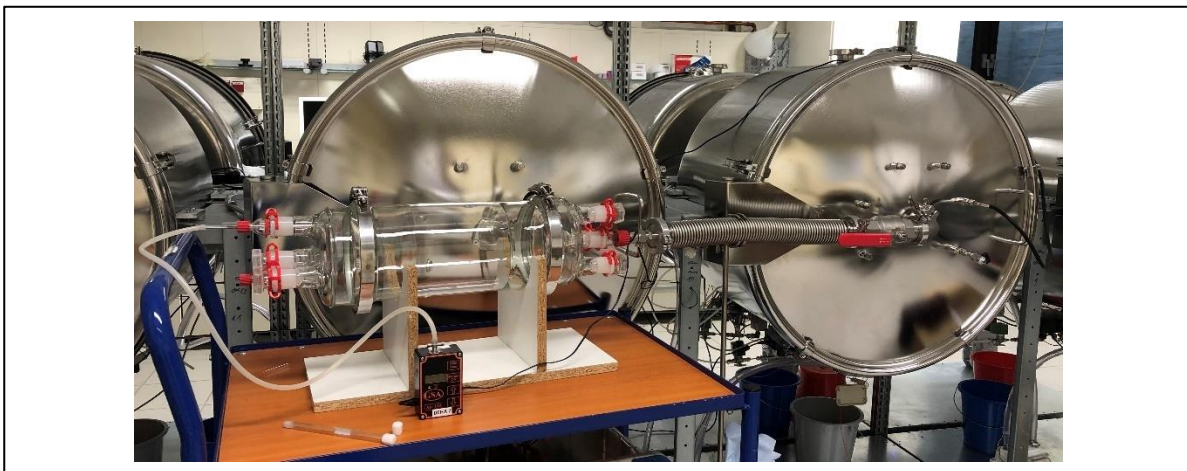


Abbildung 6-5: Foto des an die 270 l-Emissionsprüfkammer angeschlossenen Glasgefäßes und VOC-Probenahme bei der BAM

In den Versuchen wird durch Vergleich der VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im Sammelgefäß die Wiederfindungsrate ermittelt. In Versuch B werden zudem die VOC-Konzentrationen nach Lagerung der Luftprobe im Glasgefäß ermittelt.

Die Probenahme erfolgt gleichzeitig an der Emissionsprüfkammer und am Glasgefäß durch die Verwendung von zwei Probenahmepumpen. Für die Doppelbestimmung werden jeweils

zwei Sorptionsrohre innerhalb eines kurzen Zeitraums nacheinander verwendet. Bei einem Probenahmestrom der Pumpe von 100 ml/min werden jeweils 1 und 2 Liter Probenluft entnommen. Die Bestimmung der VOC-Verbindungen und ihrer Konzentrationen erfolgt gemäß der in KAPITEL 5.2 beschriebenen Durchführung. Dabei erfolgt die Ermittlung meist anhand von Standards und für einige Substanzen über das Toluoläquivalent.

Zunächst wird vor der Beladung die Hintergrundbelastung in der Emissionsprüfkammer und den Probenbehältern ermittelt. Im Ergebnis erfüllen die ermittelten VOC-Konzentrationen der Einzelsubstanzen und der Summenwert die Anforderungen der DIN EN ISO 16000-9 (DIN, 2008).

Nachfolgend werden die Durchführung und die Ergebnisse der Versuche A und B dargestellt.

### Versuch A: Bodenbelag aus Kautschuk

Die Emissionsprüfkammer wird mit einer Bodenbelagsprobe aus Kautschuk mit einer Fläche von 430 cm<sup>2</sup> beladen und bei einer Luftwechselrate von 1,1 h<sup>-1</sup> betrieben. Zwei Tage nach Beladung erfolgt die Probenahme. Es ergibt sich damit eine flächenspezifische Luftdurchflussrate  $q_A$  von 0,6 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h). Diese geringe Rate wird ausgewählt, um möglichst ausreichend hohe Substanzkonzentrationen zu ermitteln, die im Messbereich des GC/MS-Verfahrens liegen.

Der Kugelhahn an der Zuluft zum Glasgefäß ist während der Probenahme geöffnet, sodass eine Messung am durchströmten Gefäß erfolgt. Dies entspricht dem Prinzip der durchströmten Maske (KAPITEL 4.1.2). Im weiteren Verlauf der Messungen ist geplant, den Zustrom zu stoppen, um eine wechselnde Sammlung und Darbietung von Probenluft, wie beim Adapter vorgesehen, zu simulieren. Tabelle 6-4 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

Tabelle 6-4: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im Glasgefäß einer Probe aus Kautschuk

Komponente (CAS-Nummer)	VOC-Konzentrationen in µg/m <sup>3</sup>	
	Emissionsprüfkammer	durchströmtes Glasgefäß
<b>Direkt mit Standard:</b>		
Styrol (100-42-5)	1	1
Cyclohexanon (108-94-1)	10	10
Benzothiazol (95-16-9)	75	66
Phthalamid (88-96-0)	10	11
<b>Toluoläquivalente:</b>		
trans-1-Methyl-4-(1-methyl-ethyl)-cyclohexan(1678-82-6)	11	10
cis-1-Methyl-4-(1-methylethyl)-cyclohexan (6069-98-3)	8	8
Naphthalin (91-20-3)	3	3

Die Ergebnisse zeigen, dass dieselben Substanzen in der Emissionsprüfkammer und im Glasgefäß vorgefunden werden. Quantitativ gibt es nahezu keine Unterschiede zwischen der Probenluft aus der Emissionsprüfkammer und dem Glasgefäß. Diese hohe Übereinstimmung wurde so erwartet, da Glas ein inertes Material ist und gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und DIN EN 16516 (DIN, 2020) im Kontakt mit Probenluft eingesetzt werden darf. Zudem

wurde das Glasgefäß stets mit neuer Probenluft aus der Prüfkammer durchströmt. Die Konzentrationen der meisten Substanzen sind insgesamt sehr niedrig und liegen teilweise nah an der Bestimmungsgrenze von etwa  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , weshalb eine weitere Diskussion der Werte und eine relative Darstellung der Wiederfindungsrate nicht erfolgt, da die Messunsicherheiten des Verfahrens in diesem Bereich einen zu großen Einfluss haben (KAPITEL 5.2.4). Die Messungen werden mit einer anderen Probe (Versuch B) wiederholt.

### Versuch B: Vergleichsmessungen mit einem Lack

In diesem Versuch wird die Emissionsprüfkammer mit zwei Petrischalen beladen, die mit Lack B (KAPITEL 5.1.6.2) gefüllt sind. Die Prüfkammer wird mit einer Luftwechselrate von  $1,0 \text{ h}^{-1}$  betrieben und die Probenahme erfolgt einen Tag nach Beladung.

Die Ermittlung sämtlicher Konzentrationen der Komponenten mit der GC/MS-Methode erfolgt mit Standards. Im Rahmen dieses Versuches werden wieder die VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im durchströmten Glasgefäß ermittelt. Darüber hinaus werden weitere Messungen durchgeführt, um Aussagen über die Lagerfähigkeit von Probenluft im Glasgefäß zu treffen. Dazu wird direkt nach der ersten VOC-Messung der Probenluft in der Prüfkammer und im durchströmten Glasgefäß der Zustrom zum Gefäß mittels Kugelhahn gestoppt und eine zweite VOC-Messung der Probenluft im Gefäß vorgenommen. Anschließend wird das Gefäß erneut mit Probenluft aus der Prüfkammer gefüllt, der Kugelhahn geschlossen und nach einer Lagerungszeit von 30 Minuten eine dritte VOC-Messung vorgenommen. Mit dieser Versuchsdurchführung lässt sich die Zusammensetzung der Probenluft in der Emissionsprüfkammer (als Referenzwert) mit der Probenluft im Glasgefäß bei Durchströmung direkt nach der Befüllung und nach 30-minütiger Lagerungszeit vergleichen.

Tabelle 6-5 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

Tabelle 6-5: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im Glasgefäß einer Lackprobe (Lack B)

Komponente (CAS-Nummer)	VOC-Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Emissionsprüfkammer	Glasgefäß, durchströmt	Glasgefäß, gestoppter Zustrom	Glasgefäß, 30 Minuten gelagert
n-Butylacetat (123-86-4)	43	44	40	37
Styrol (100-42-5)	294	299	273	259
Octanal (124-13-0)	17	17	16	15
3-Caren (13466-78-9)	118	119	109	104
Methylpyrrolidon (872-50-4)	364	365	342	325
p-Cresol (106-99-5)	81	82	77	74
Dodecan (112-40-3)	99	101	94	89
Adipinsäuredimethylester (627-93-0)	214	215	203	196

In Abbildung 6-6 werden die Ergebnisse als relative Konzentrationen gezeigt, wobei die Konzentrationen auf die VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer normiert werden. In der Emissionsprüfkammer und im durchströmten Glasbehälter werden die gleichen Substanzen in gleichen Konzentrationen quantifiziert (graue Punkte und grüne Kreuze).

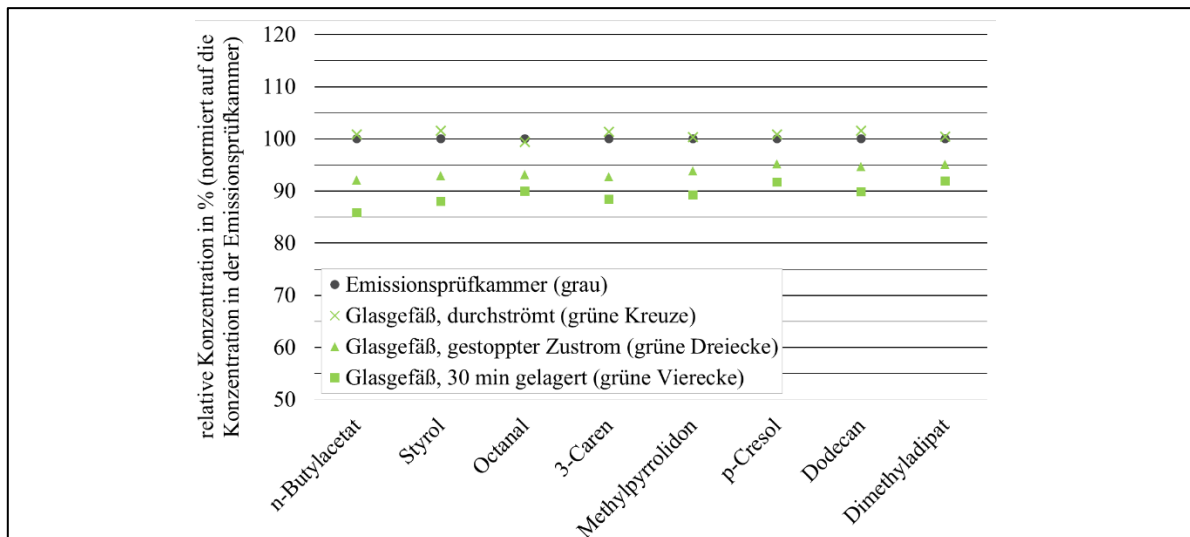


Abbildung 6-6: Relative VOC-Konzentrationen im durchströmten Glasgefäß, nach Zustromstopp und Lagerung normiert auf die Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer einer Lackprobe (Lack B)

Bei der Messung direkt nach dem Stoppen des Zustroms wird eine Wiederfindungsrate der Substanzen im Bereich von 92 bis 95 % ermittelt (grüne Dreiecke). Diese Messung simuliert den Zustand und den Zeitpunkt, zu dem Prüfende die Luft für eine sensorische Bewertung dargeboten bekommen würden. Nach einer Lagerung von 30 Minuten beträgt die Wiederfindungsrate zwischen 86 und 92 % (grüne Vierecke). Zustromstopp und Lagerung bewirken demnach eine Verringerung der Konzentrationen, wobei die ermittelten Werte im Rahmen der Messunsicherheit des GC/MS-Verfahrens von 10 bis 20% liegen.

Wie in KAPITEL 5.2.4 beschrieben, wird in dieser Arbeit grundsätzlich festgelegt, dass die Probenbehälter geeignet sind, wenn die Probenluft zum Zeitpunkt der sensorischen Messung eine Wiederfindungsrate der VOC-Konzentrationen von mindestens 80 % im Vergleich zur Emissionsprüfkammer aufweisen sollte. Dieser Versuch zeigt, dass diese Anforderung auch noch nach 30 Minuten Lagerungszeit im Glasgefäß erfüllt werden kann.

Es wird außerdem vermutet, dass die beobachtete Konzentrationsverringering unmittelbar nach dem Stoppen des Zustroms auf die Art der Probenahme zurückzuführen ist und nicht auf einen Substanzabbau oder Wandeffekte (also einer Veränderung der Probenluft). Eine mögliche Erklärung dieser Verringerung könnte sein, dass beim Entnahmevergange aus einem festen, geschlossenen Glasgefäß Umgebungsluft angesaugt wird, wodurch die Probenluft verdünnt wird. Dies geschieht vermutlich durch das Eindringen von Umgebungsluft über die Anschlüsse des Glasgefäßes. Bei der Entnahme von 1 bis 2 Litern Probenluft aus einem Gefäß von etwa 7 Litern kann dies einen Einfluss haben.

### 6.3.2.3 Sensorische Messungen

Die sensorischen Messungen im Luftqualitätslabor der HTW Berlin werden gemäß KAPITEL 5.1 und den in KAPITEL 3.4 beschriebenen CLIMPAQs mit einem Volumen von 40 Litern durchgeführt. Als Probe dient ein elastischer Bodenbelag aus Kautschuk und die flächenspezifische Luftdurchflussrate  $q_A$  beträgt  $1,25 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Am Abluftstutzen der Prüfkammer wird ein T-Stück angebracht, an dessen beiden Ausgängen jeweils ein Kugelhahn montiert wird. Über Edelstahlleitungen mit einem Nenndurchmesser von 40 mm

kann die Abluft damit entweder in Richtung eines Trichters für eine direkte Bewertung geführt werden oder zum angebrachten Glasgefäß.

Das Glasgefäß wird aufrecht positioniert und mit dem unteren Ende über einen Stutzen des Planflanschdeckels an das Edelstahlrohr von der CLIMPAQ kommend angeschlossen (Abbildung 6-7). Am oberen Ende kann die sensorische Prüfung erfolgen. Erfolgen keine Messungen, wird das Glasgefäß mit Probenluft durchströmt und eine Absaugung angebracht.

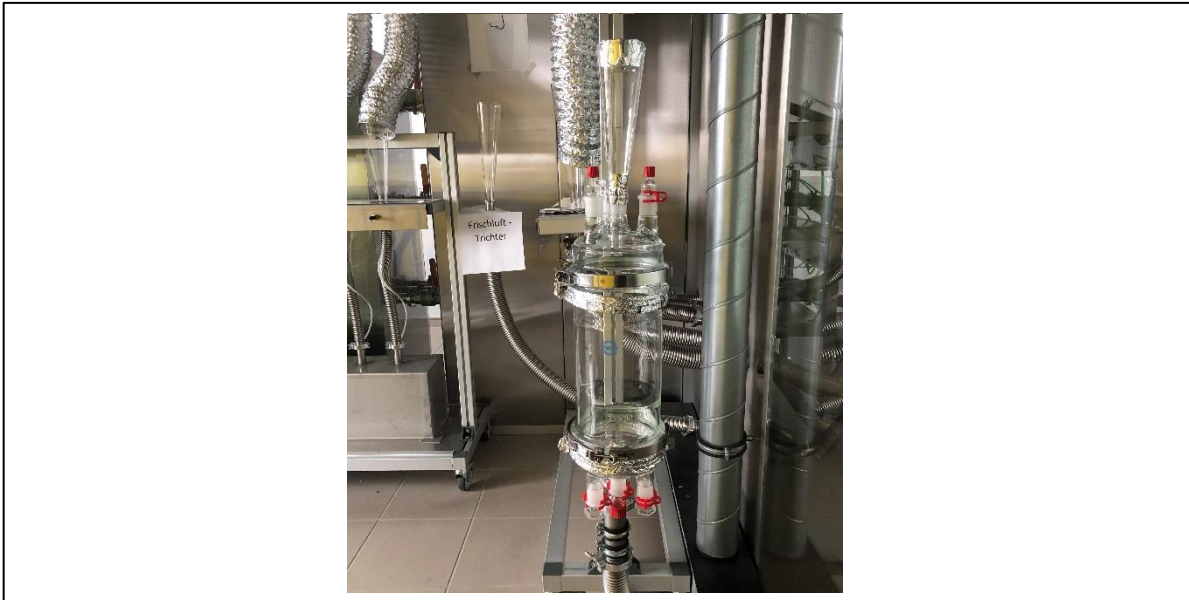


Abbildung 6-7: Foto des Glasgefäßes an der HTW Berlin mit Zustrom von Probenluft am unteren Ende und Bewertungstrichter am oberen Ende

Die Messungen erfolgen an drei Messtagen, wobei jeweils die empfundene Intensität und die Hedonik der Probenluft durch direkte Bewertung an der CLIMPAQ und am Glasgefäß durch geschulte Prüfende bewertet werden. Da auch geprüft werden muss, welche Darbietungsmöglichkeit sich bei der Bewertung am Glasgefäß eignet, werden zwei verschiedene Möglichkeiten getestet:

### **1. Darbietung mit einem abnehmbaren Deckel**

An zwei Messtagen wird der obere Planflanschdeckel abgenommen und durch eine Scheibe aus stabilen Karton mit einem Durchmesser von 150 mm, die mit emissionsarmer Alufolie kaschiert wurde, ersetzt. Die Prüfenden müssen diesen Deckel für die Bewertung kurz abnehmen. Der Zustrom von Probenluft zum Glasgefäß wird dabei nicht geschlossen, da wie bei der Verwendung von Masken (KAPITEL 4.1.2) das Glasgefäß wie ein Puffer am Ausgangsstutzen der Prüfkammer dienen soll.

### **2. Darbietung mit einem Bewertungstrichter**

Am dritten Messtag wird ein Trichter am Planflanschdeckel befestigt, der zwischen den einzelnen Bewertungen mit einem Stöpsel verschlossen werden kann (Abbildung 6-7). Bei der Bewertung wird der Zustrom zum Glasgefäß mithilfe des Kugelhahns gestoppt, um die abwechselnde Sammlung und Darbietung von Probenluft, wie sie für den Adapter geplant ist, zu simulieren. Die Prüfenden nehmen den Stöpsel für die Bewertung ab.

In Abbildung 6-8 ist die empfundene Intensität der Vergleichsmessungen mit dem direkten Verfahren und unter Verwendung des Glasgefäßes dargestellt. Die Daten der Messungen sind in ANHANG A2 aufgeführt.

Die empfundene Intensität bei direkter Bewertung ist an allen drei Messtagen konstant in einem Bereich von etwa 9 pi. Mit dem Glas werden deutlich niedrigere empfundene Intensitäten ermittelt: Bei der Bewertung mit abnehmbarem Deckel (Messung 10G und 11G) werden Mittelwerte von 6,9 und 5,6 pi erreicht und bei der Verwendung des Trichters (Messung 12 G) ein Mittelwert von 3,8 pi.

Der 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0$  pi wird bei fünf der insgesamt sechs durchgeführten Bewertungen der empfundene Intensität nicht eingehalten. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Messungen während der Covid-Pandemie stattfinden, weshalb einerseits die Zahl der Prüfenden bei einigen Messungen nicht ausreichend hoch ist und andererseits viele neue Prüfende mit wenig Praxiserfahrung teilgenommen haben.

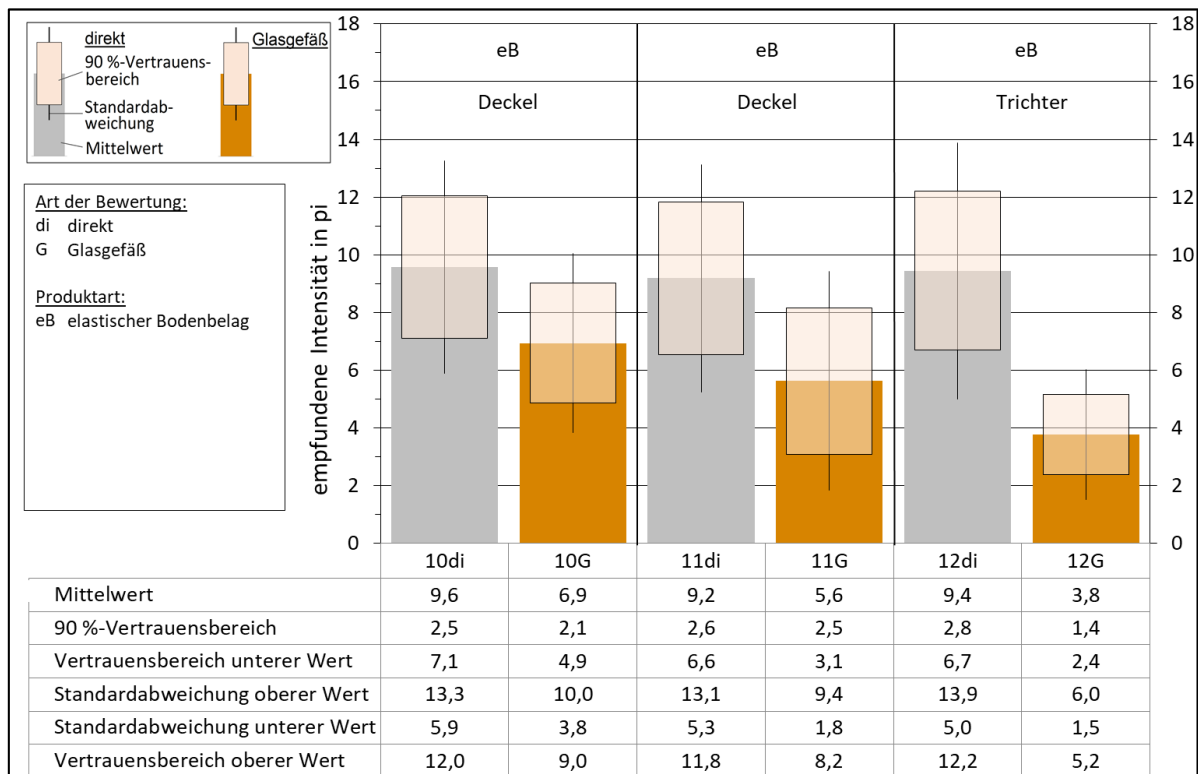


Abbildung 6-8: Empfundene Intensität eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Glasgefäßes (G) mit abnehmbarem Deckel und einem Trichter

Die Bewertung der Hedonik ist in Abbildung 6-9 dargestellt. Sie wird an allen Messtagen am Glasgefäß als angenehmer wahrgenommen, was damit begründet werden kann, dass die empfundene Intensität als deutlich geringer wahrgenommen wird.

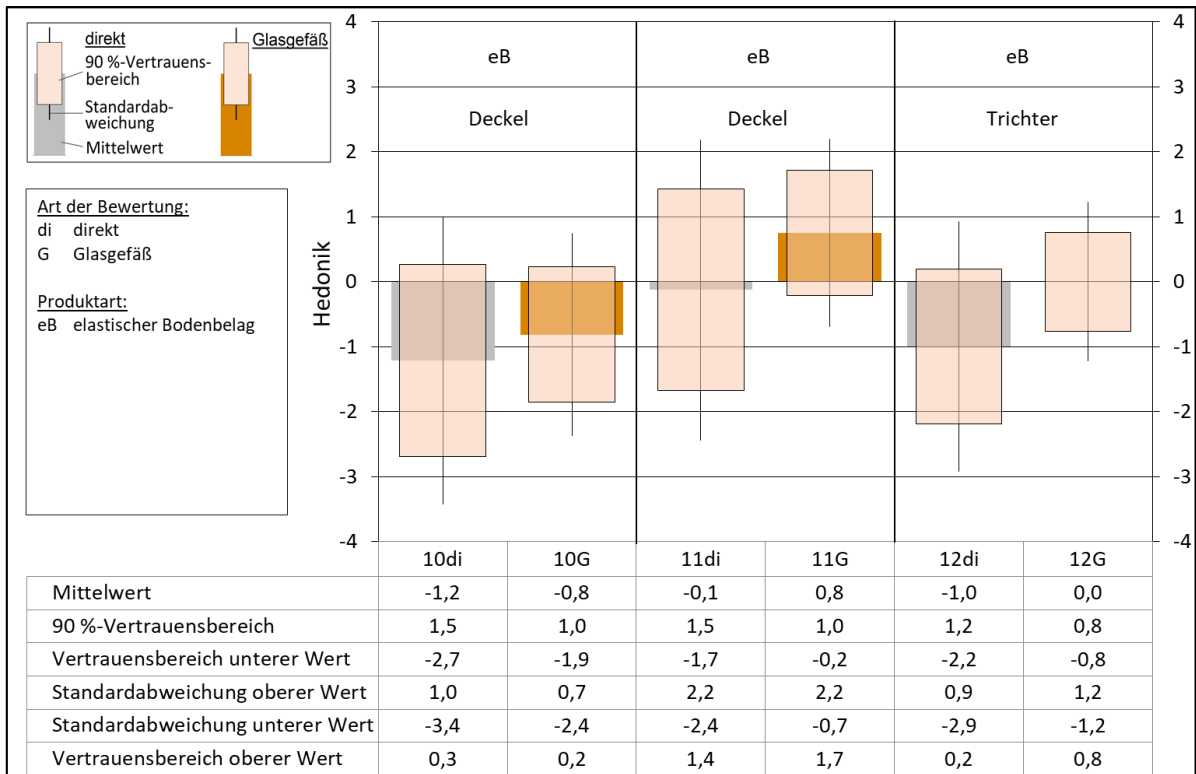


Abbildung 6-9: Hedonik eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Glasgefäßes (G) mit abnehmbarem Deckel und einem Trichter

Im Folgenden werden die Gründe für die geringeren empfundenen Intensitäten am Glasgefäß erläutert.

Bei der Verwendung eines abnehmbaren Deckels und ständiger Durchströmung des Glasgefäßes mit Probenluft (Messung 10G und 11 G) strömt die Probenluft über eine große Fläche (15 cm Durchmesser) aus. Sie kann sich jedoch beim Übergang vom Zuluftrohr in das Glasgefäß nicht gleichmäßig verteilen, wodurch sie sich beim Ausströmen mit Umgebungsluft vermischt, was zu einer geringeren wahrgenommenen Intensität führt. Zudem fehlt eine konkrete Anweisung für die Prüfenden, wo und in welcher Höhe über dem Glasgefäß sie ihre Nase positionieren sollten und wie der Deckel zu handhaben ist (vollständig abnehmen oder ankippen). Dies führte zu uneinheitlichen Durchführungen.

Da die Verwendung des Deckel nicht zielführend ist, wird dieser durch einen Trichter ersetzt, der den Anforderungen der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) entspricht. Gleichzeitig wird der Zustrom ins Glasgefäß während der Probenahme geschlossen, um die abwechselnde Sammlung und Darbietung von Probenluft des Adapters zu simulieren. Die in diesem Versuch ermittelten empfundenen Intensitäten sind noch einmal geringer. Dies liegt daran, dass die Probenluft die Nase nicht umströmt und bei der Probenahme Umgebungsluft eingeatmet wird.

Die Notwendigkeit einer ausreichenden Umströmung der Nase wird in den Versuchen offensichtlich. Weder der Deckel noch der Trichter können dies gewährleisten. Im Folgenden werden potenzielle technische Umsetzungsmöglichkeiten erörtert, die eine solche Umströmung der Nase sicherstellen könnten. Ihre praktische Anwendbarkeit wird jeweils diskutiert.

- Verwendung einer Maske: Es ist prinzipiell möglich, den Zustrom von Umgebungsluft zur Nase durch einen luftdichten Abschluss zu einer Maske zu vermeiden. Diese Option ist jedoch nicht praktikabel, weil das Einatmen über die Maske und das Ausatmen außerhalb erfolgen müsste, was sehr umständlich wäre. Zudem wären die Prüfenden bei der Verwendung des Acetonvergleichsmaßstabs nicht flexibel genug, um an mehreren Trichtern zu riechen. Hohe Hygieneanforderungen wären erforderlich, da jede prüfende Person eine eigene Maske benötigen würde. Eine frühere Studie (KAPITEL 4.1.2) zeigte Unterschiede in der sensorischen Bewertung mit und ohne Maske, und ihre Verwendung wurde bei der letzten Überarbeitung der DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ausgeschlossen.
- Verwendung eines Ventilators: Die Installation eines Ventilators im Glasgefäß, um Probenluft zur Nase zu führen, ist prinzipiell möglich. Diese Methode würde jedoch erfordern, dass Probenluft aus der Emissionsprüfkammer gesaugt wird, was die Luftwechselrate in der Prüfkammer stören und die flächenspezifische Emissionsrate des Prüfstückes beeinflussen könnte. Das Emissions- und Geruchsverhalten des Prüfstückes könnte sich dadurch verändern.
- Einsatz eines Kolbens: Ein Kolben im Glasgefäß könnte zum Zeitpunkt der Probenahme in Richtung Trichter geführt werden. Die Anforderungen an ein solches System wären jedoch zu komplex. Der Kolben müsste mit einem einzelnen Hub ausreichend Probenluft für die Bewertung bereitstellen und sich mit hoher Geschwindigkeit bewegen, um einen Volumenstrom von mindestens 0,6 l/s zu erreichen. Zudem müsste die Dichtheit des Kolbens zur Wand des Gefäßes gewährleistet sein, um das Einströmen von Umgebungsluft zu verhindern.

#### **6.3.2.4 Schlussfolgerung: Anwendung von Probenbehältern mit fester Form**

Um die Eignung fester Probenbehälter zu prüfen, wird ein Glasgefäß verwendet.

Die VOC-Messungen zeigen insgesamt die Eignung von Glas als Probenbehälter mit fester Form. Dies entspricht den Erwartungen, da Glas gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) als inerter Werkstoff für den Kontakt mit Probenluft zugelassen ist (KAPITEL 3.2.3.1).

Jedoch zeigen die Ergebnisse der sensorischen Prüfung, dass die Verwendung fester Probenbehälter im Vergleich zur direkten Darbietung zu einer deutlich niedrigeren empfundenen Intensität führt. Es ist nicht möglich, eine wechselseitige Sammlung und Darbietung von Probenluft zu ermöglichen und eine ausreichende Umströmung der Nase mit Probenluft kann nicht gewährleistet werden.

Aus diesen Gründen wird die Verwendung fester Probenbehälter für den Adapter ausgeschlossen und Probenbehälter mit flexibler Form werden ausgewählt.

### **6.3.3 Materialuntersuchung und Herstellung der flexiblen Probenbehälter**

Grundsätzlich können die Behältermaterialien Glas, Edelstahl, Nalophan® und Tedlar® für den Adapter eingesetzt werden. Nach Ausschluss von Probenbehältern mit fester Form (KAPITEL 6.3.2.4) bleibt die Verwendung von Nalophan® und Tedlar® übrig.

In diesem Kapitel wird zunächst die Herstellung der Probenbehälter dargestellt (KAPITEL 6.3.3.1). Anschließend erfolgt eine Untersuchung zur Ermittlung des Volumens der Behälter, um sicherzustellen, dass das in KAPITEL 6.3.1 ermittelte und erforderliche Volumen von etwa

20 Liter erreicht werden kann (KAPITEL 6.3.3.2). Abschließend werden die durchgeführten VOC-Messungen mit den Probenbehältern beschrieben (KAPITEL 6.3.3.3). Die Probenbehälter werden auch in sensorischen Messungen auf ihre Eignung getestet, die jedoch im Zusammenhang mit den Untersuchungen des Adapters durchgeführt und daher erst in KAPITEL 6.5.2 dargestellt werden.

### 6.3.3.1 Herstellung der Probenbehälter aus Folienmaterial

Zur Herstellung der Probenbehälter werden zunächst die erforderlichen Maße anhand der erwarteten geometrischen Form im gefüllten Zustand ermittelt, um ein Volumen von etwa 20 Liter zu erreichen. Da die Peripherie des Adapters parallel entwickelt wird (KAPITEL 6.3.4), werden dabei auch die Maße der Box, in die die Behälter eingebracht werden sollen, berücksichtigt (KAPITEL 6.4.1).

Aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Formen, die für die verschiedenen Behältermaterialien zu erwarten sind, werden im Folgenden separate Berechnungen für die Folienarten Nalophan® und Tedlar® durchgeführt. Abbildung 6-10 zeigt eine Zeichnung mit den Maßen der verwendeten Behälter und Abbildung 6-11 Fotos der Behälter, wie sie im Adapter eingebracht sind.

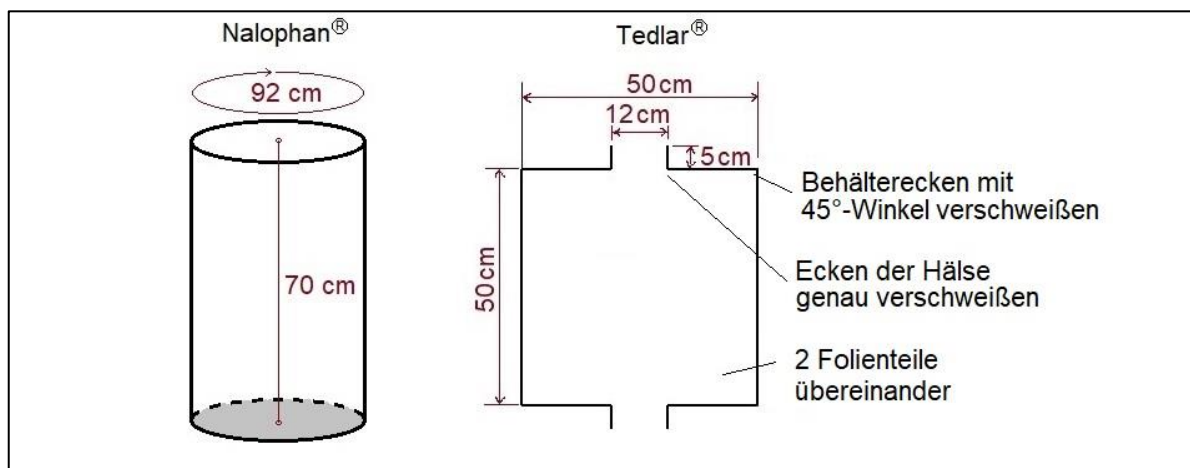


Abbildung 6-10: Maße zur Herstellung der Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar®

#### 1. Nalophan®

Das verfügbare Material liegt in Form eines Schlauches vor, von dem für den Behälter ein Stück in gewünschter Länge abgeschnitten wird (KAPITEL 3.2.3.2). Da sich beim Befüllen mit Probenluft in etwa eine zylindrische Form ergibt, wird zur Volumenberechnung ein Zylinder angenommen. Mit einem Umfang des Schlauchs bzw. Zylinders von 92 cm und einem benötigten Volumen von etwa 20 Litern ergibt sich eine erforderliche Zylinderhöhe von 30 cm. Um sicherzustellen, dass der Zylinder beidseitig im Adapter angeschlossen werden kann, wird für den Zuschnitt eine zusätzliche Länge von 20 cm berücksichtigt, was zu einer Gesamtlänge von 70 cm führt.

Die Oberfläche des Behälters, also die Mantelfläche eines Zylinders dieser Größe, beträgt etwa 0,64 m<sup>2</sup>. Als Oberfläche im Kontakt mit Probenluft wird eine etwas kleinere Fläche von 0,5 m<sup>2</sup> geschätzt, da Material zur Anbringung an die Stützen des Adapters benötigt wird (Abbildung 6-11).

## 2. Tedlar®

Behälter aus Tedlar® haben die Form eines Kissens (KAPITEL 3.2.3.2). Die gewählte Kissenform ist dadurch gekennzeichnet, dass sie eine rechteckige Grundfläche aufweist und bezüglich ihrer Höhe in der Mitte der Grundfläche am höchsten ist. Zu den Rändern hin nimmt die Höhe ab. Zur Berechnung des Volumens wird näherungsweise angenommen, dass ein Kissen in etwa die Hälfte des Volumens eines Quaders aufweist.

Bei der Herstellung werden zwei Folienteile gleicher Größe an den Rändern zusammenschweißt. Beim Zusammenfügen von zwei Folienteilen mit den Abmessungen von 50 x 50 cm und der Annahme, dass sich nach der Befüllung eine maximale Höhe von 20 cm ergibt (basierend auf Erfahrungswerten bei der Betrachtung großer Behälter), errechnet sich für einen Quader ein Volumen von 50 Litern. Für das Kissen berechnet sich das Volumen damit zu 25 Liter.

Um die Behälter in die Box des Adapters einzubringen (KAPITEL 6.3.4), werden auf beiden Seiten Hälse vorgesehen.

Die Oberfläche, welche in Kontakt mit Probenluft steht, ergibt sich aus der Fläche der 50 x 50 cm großen Folienteile mit etwa insgesamt 0,5 m<sup>2</sup>.

Die Herstellung erfolgt gemäß den folgenden Schritten:

1. Zuschneiden eines rechteckigen Folienteils mit den Abmessungen 60 x 105 cm.
2. Das Rechteck einmal quer falten und gegenüber der nun geschlossenen Seite verschweißen.
3. Die Hälse aus der nun doppelagigen Folie ausschneiden, jeweils 5 cm hoch und 12 cm breit.
4. Die übrigen Seiten (Seiten mit den Hälsen) verschweißen. Dabei werden an den Ecken der Hälse die Nähte ohne Überlappung (um ein Schmelzen zu vermeiden), aber genau aneinandergrenzend, verschweißt, um Undichtigkeiten zu vermeiden.
5. An den vier Ecken des Behälters einen kleinen 45°-Winkel schweißen, um Undichtigkeiten vorzubeugen, falls die Nähte nicht exakt aneinandergrenzen.

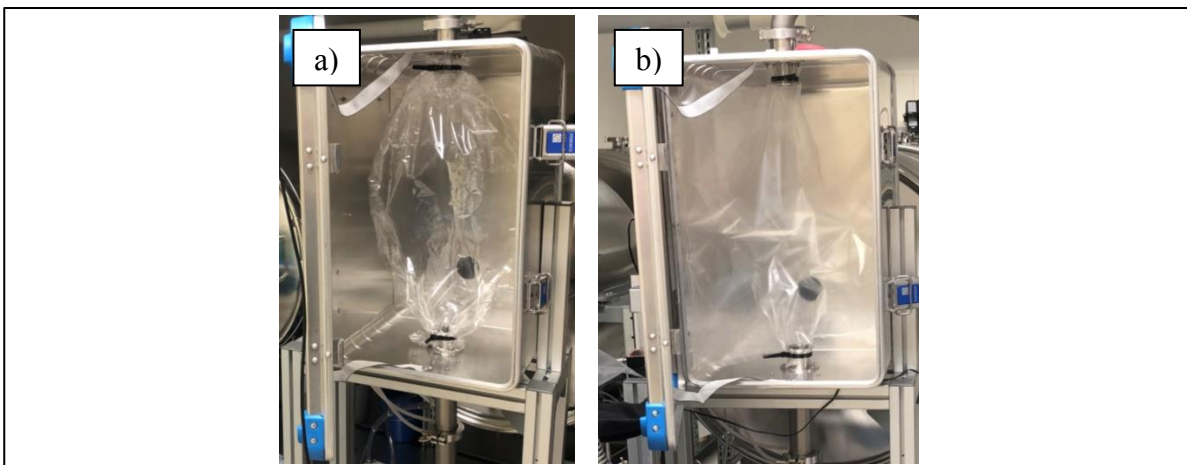


Abbildung 6-11: Probenbehälter im Adapter: a) Nalophan®; b) Tedlar®

### 6.3.3.2 Ermittlung des Volumens der Probenbehälter aus Folienmaterial

Im KAPITEL 6.3.3.1 werden die Maße zur Herstellung von Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® ermittelt, um das notwendige Volumen der Behälter von etwa 20 l zu erzielen. Diese Größe wird als geeignet gesehen (KAPITEL 6.3.1). Mithilfe einer Gasuhr wird nun das Volumen der auf diese Weise hergestellten Behälter gemessen. Diese Messung wird in diesem Kapitel dargestellt.

Für die Messungen wird eine Gasuhr der Firma GMT GmbH Gross Gerau mit einem vom Hersteller angegebenen Korrekturfaktor  $F$  von 0,98 und einem Zählerstand, der auf 0,2 Liter genau ablesbar ist, verwendet. An ihren Eingang wird eine regelbare Druckluftversorgung angeschlossen, die über einen Absperrhahn geöffnet und geschlossen werden kann. Die Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar® werden nacheinander an einer ihrer Öffnungen mithilfe von Schlauchverbindern an den Ausgang der Gasuhr angeschlossen.

Die Probenbehälter werden zu Beginn der Messung vollständig entleert und ihre noch offene Seite wird mit Klammern verschlossen. Nun wird der Zählerstand der Gasuhr notiert und der Absperrhahn zur Druckluftversorgung geöffnet, sodass die Luft in den Behälter einströmen kann. Sobald der Behälter gefüllt ist, wird der Absperrhahn geschlossen und der Zählerstand der Gasuhr erneut notiert. Jeder Behälter wird auf diese Weise insgesamt zehn Mal gemessen.

Das Volumen der Probenbehälter ( $V_{PB}$ ) ergibt sich gemäß nachfolgender Formel 7.

Formel 7: Berechnung des Luftvolumens in den Probenbehältern mithilfe einer Gasuhr

$$V_{PB} = \Delta V * F$$

mit:	$V_{PB}$	Volumen des Probenbehälters in l
	$\Delta V$	Volumendifferenz der Gasuhr zwischen Ende und Anfang der Messung in l
	$F$	Korrekturfaktor der Gasuhr

In ANHANG C werden die Ergebnisse der einzelnen Messungen dargestellt. Als Mittelwert und Standardabweichung werden folgende Werte berechnet:

- Nalophan®: 19,2 l (Standardabweichung: 0,9 l)
- Tedlar®: 19,3 l (Standardabweichung: 0,6 l)

Mit der Gasuhr wird für beide Behälter ein Volumen von etwa 19 Liter ermittelt, was sehr nah am erforderlichen Volumen von 20 Litern liegt (KAPITEL 6.3.1). Die Probenbehälter können somit in den ermittelten Maßen für den Adapter verwendet werden.

Beim Befüllen wird darauf geachtet, die Behälter nicht prall zu füllen, um in etwa dem Füllstand beim Befüllen mit Probenluft aus der Emissionsprüfkammer zu entsprechen. Jedoch besteht die Schwierigkeit bei der Messung mit der Gasuhr darin, dass der Füllstand nur geschätzt werden kann und die Behälter daher bei den einzelnen Messungen unterschiedlich stark gefüllt sein können. Die Durchführung von insgesamt zehn Messungen und die Bildung eines Mittelwertes sollen diesen Fehler ausgleichen. Die Standardabweichungen von 0,9 und

0,6 Litern sind für die Messung ausreichend genau, da das notwendige Volumen der Behälter von 20 Litern geschätzt wurde und die Praktikabilität in den sensorischen Messungen belegt werden muss.

### 6.3.3.3 VOC-Messungen von Probenbehältern aus Folienmaterial

Die Eignung der Probenbehälter wird durch den Vergleich der VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Behältern geprüft. Dabei wird erwartet, dass die Konzentrationen etwa gleich sind, da die verwendeten Behältermaterialien bereits im Rahmen der Zulassung als Probenbehälter gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) getestet wurden (KAPITEL 3.2.3.2). Die Überprüfung des Adapters erfolgt dennoch, da die Behälter in diesem Anwendungsfall ein geringeres Volumen aufweisen als die Probenbehälter der derzeit verwendeten Darbietungssysteme. Das Verhältnis der inneren Oberfläche zum Volumen ist größer, was bedeutet, dass beim Adapter mehr Probenluft im Kontakt mit dem Behältermaterial steht. Darüber hinaus sollen die Versuche zeigen, ob die Herstellung und Vorbehandlung der Behälter ausreichend sind, beispielsweise die Qualität der Schweißnähte und das Ausheizen der Behälter aus Tedlar®.

Die prinzipielle Durchführung der Versuche wird in Kapitel 5.2 und die Vorbehandlung der Behälter in KAPITEL 5.1.7 beschrieben. Es werden zwei Versuche mit einer Probe aus Kautschuk (Versuch A) und einem Lack (Versuch B) bei der BAM durchgeführt.

#### Versuch A: Bodenbelag aus Kautschuk

Die Untersuchungen der Behälter Nalophan® und Tedlar® erfolgen gleichzeitig mit den Untersuchungen zur Überprüfung der Eignung des Glasgefäßes. Die Versuchsdurchführung entspricht der in KAPITEL 6.3.2.2 beschriebenen Vorgehensweise und den dort für Versuch A angegebenen Bedingungen in der Emissionsprüfkammer. Auch die Messungen der Hintergrundbelastung werden entsprechend durchgeführt.

Die Abluft der 270 l-Emissionsprüfkammer wird nacheinander zur Befüllung und Durchströmung der beiden Probenbehälter genutzt. Die Probenluft wird dann nach einer Durchspülzeit von zwei Tagen sowohl an der Emissionsprüfkammer als auch im jeweiligen Probenbehälter bewertet. In Abbildung 6-12 ist der Anschluss der Probenbehälter an die Emissionsprüfkammer dargestellt und in Tabelle 6-6 sind die Messergebnisse aufgeführt.

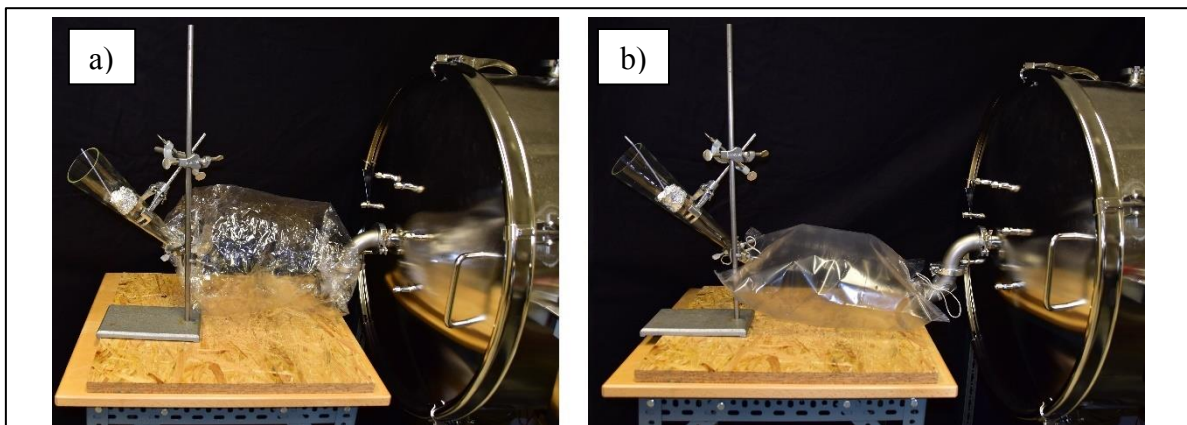


Abbildung 6-12: Anschluss der Probenbehälter an die 270 l-Emissionsprüfkammer: a) Nalophan®, b) Tedlar®

Tabelle 6-6: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® für eine Probe aus Kautschuk

Komponente (CAS-Nummer)	VOC-Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Emissionsprüfkammer	Nalophan®	Emissionsprüfkammer	Tedlar®
<b>Direkt mit Standard:</b>				
Styrol (100-42-5)	2	2	2	2
Cyclohexanon (108-94-1)	9	9	10	10
Benzothiazol (95-16-9)	67	65	75	77
Phthalamid (88-96-0)	19	14	16	10
<b>Toluoläquivalente:</b>				
trans-1-Methyl-4-(1-methylethyl)-cyclohexan (1678-82-6)	10	10	11	11
cis-1-Methyl-4-(1-methylethyl)-cyclohexan (6069-98-3)	8	8	8	8
Naphthalin (91-20-3)	3	3	3	3

Wie erwartet zeigen die Analyseergebnisse, dass nahezu keine Unterschiede zwischen der Probenluft aus der Emissionsprüfkammer und derjenigen aus den jeweiligen Probenbehältern bestehen. Da die VOC-Konzentrationen insgesamt sehr niedrig sind, werden die Werte nicht weiter diskutiert und es wird, wie im Versuch A in KAPITEL 6.3.2.2, auf eine relative Darstellung der Wiederfindungsrate, normiert auf die Emissionsprüfkammer, verzichtet. Die Messungen werden mit einer Lackprobe wiederholt.

#### **Versuch B: Lack**

Eine 1 m<sup>3</sup>-Emissionsprüfkammer wird mit vier Petrischalen beladen, die mit Lack A (KAPITEL 5.1.6.2) gefüllt sind. Die Prüfkammer wird mit einer Luftwechselrate von 1,0 h<sup>-1</sup> betrieben und die Probenahme erfolgt einen Tag nach Beladung.

Die VOC-Konzentrationen werden mithilfe von Standards ermittelt. Zusätzlich zu den Vergleichsmessungen zwischen der Emissionsprüfkammer und den Probenbehältern werden Messungen durchgeführt, um Aussagen über die Lagerfähigkeit von Probenluft in den Probenbehältern zu treffen. Die VOC-Konzentrationen im Behälter werden dazu direkt nach dem Befüllen sowie nach einer Lagerungszeit von 30, 60 und 180 Minuten ermittelt.

Tabelle 6-7 zeigt die Ergebnisse der Messungen für die Behälter aus Nalophan® und Tabelle 6-8 zeigt die Ergebnisse der Behälter Tedlar®. In Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 werden die Ergebnisse als relative Konzentrationen dargestellt, wobei die Konzentrationen auf die VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer normiert sind.

Tabelle 6-7: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® nach Lagerungszeit für eine Lackprobe (Lack A)

	Emissions- prüf- kammer	Nalophan® nach einer Lagerungszeit von			
		0 min	30 min	60 min	180 min
	VOC-Konzentrationen in µg/m³				
Komponente (CAS-Nummer)					
Toluol (108-88-3)	387	409	366	357	317
Propylenglykol (57-55-6)	6316	6591	6173	6272	5977
Butylacetat (123-86-4)	269	277	253	243	224
Styrol (100-42-5)	422	430	387	377	354
Camphen (79-92-5)	43	46	41	40	37
Benzaldehyd (100-52-7)	212	222	205	206	198
Decan (124-18-5)	99	103	92	88	80
Acetophenon (98-86-2)	204	212	196	197	187

Tabelle 6-8: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Tedlar® nach Lagerungszeit für eine Lackprobe (Lack A)

	Emissions- prüf- kammer	Tedlar® nach einer Lagerungszeit von			
		0 min	0 min	30 min	60 min
	VOC-Konzentrationen in µg/m³				
Komponente (CAS-Nummer)					
Toluol (108-88-3)	210	189	198	179	150
Propylenglykol (57-55-6)	4174	3648	3837	3696	3044
Butylacetat (123-86-4)	127	122	128	113	94
Styrol (100-42-5)	227	211	218	196	172
Camphen (79-92-5)	32	30	30	28	25
Benzaldehyd (100-52-7)	122	115	116	108	97
Decan (124-18-5)	59	54	56	50	44
Acetophenon (98-86-2)	124	119	119	109	98

Für den Behälter aus Nalophan® zeigen die Ergebnisse, dass direkt nach seinem Befüllen etwas höhere VOC-Konzentrationen gefunden werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Konzentrationen tatsächlich nicht höher sind, sondern auf die Messunsicherheiten zurückzuführen sind, welche für das Verfahren mit 10 bis 20 % angegeben werden (KAPITEL 5.2.3). Nach einer Lagerungszeit von 30 und 60 Minuten erreichen die Messungen für die meisten Substanzen eine Wiederfindungsrate von über 90 % und nach 180 Minuten wird eine Wiederfindungsrate zwischen 80 und 95 % erreicht. Tendenziell werden im Behälter damit etwas geringere Konzentrationen vorgefunden, die jedoch noch immer im Bereich der Messunsicherheit des gewählten Verfahrens liegen.

Bei den Behältern aus Tedlar® liegt die Wiederfindungsrate für die Substanzen direkt nach dem Befüllen und nach 30 Minuten Lagerung für die meisten Substanzen bei über 90 %. Nach 60 Minuten erreicht die Wiederfindungsrate Werte zwischen 85 und 90 % und nach 180

Minuten sinkt sie auf Werte zwischen 70 und 80 %. Damit enthalten auch diese Behälter tendenziell geringere Konzentrationen als die Emissionsprüfkammer. Diese liegen, bis auf die Messung nach 180 Minuten, im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens.

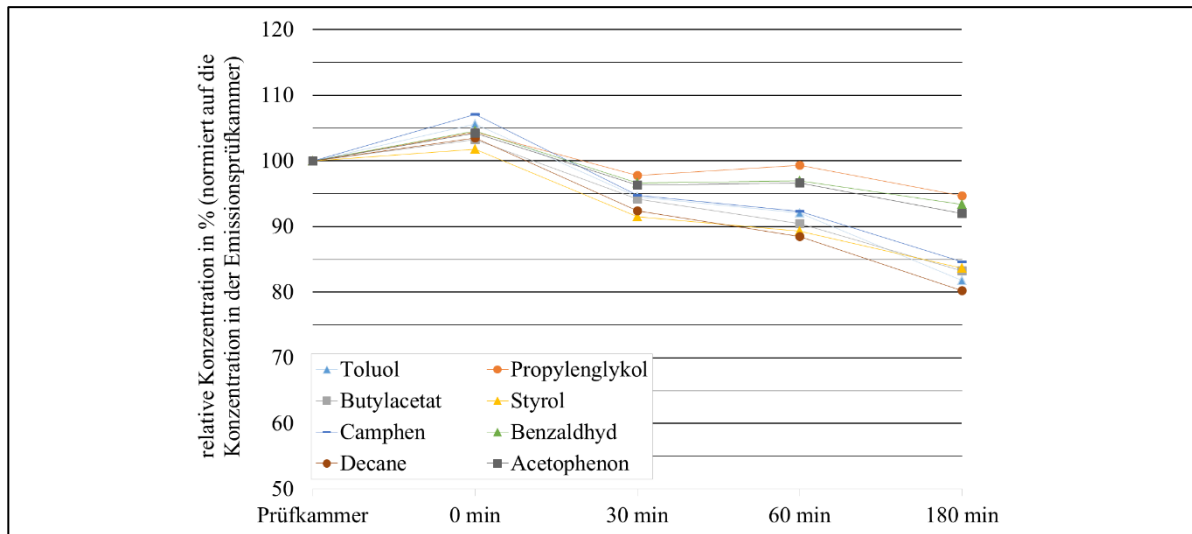


Abbildung 6-13: Vergleich der relativen VOC-Konzentrationen einer Lackprobe (Lack A) im Probenbehälter aus Nalophan® nach Befüllung und Lagerung normiert auf die Emissionsprüfkammer

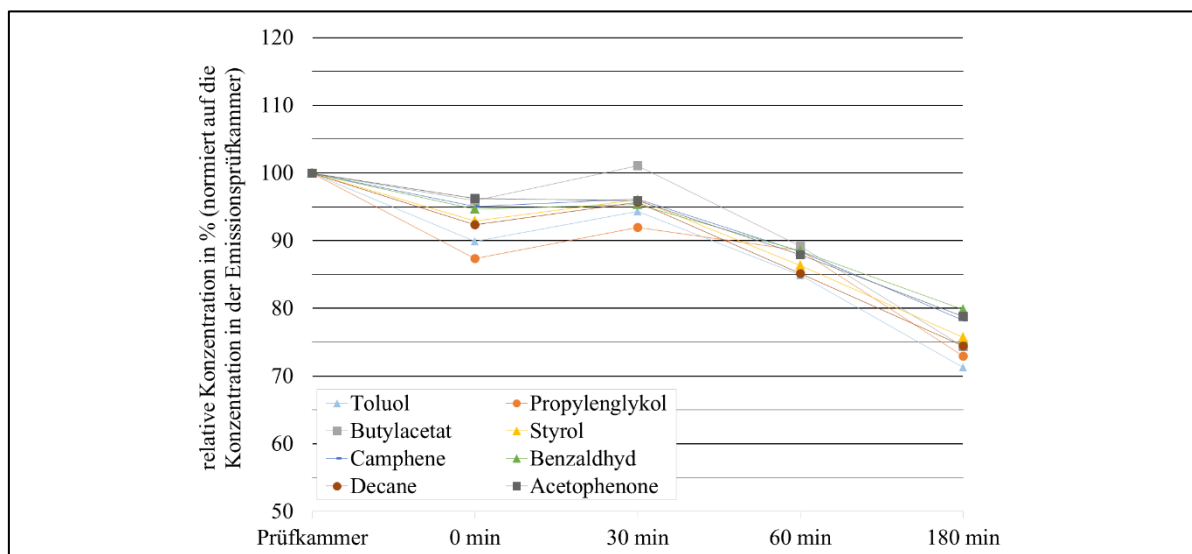


Abbildung 6-14: Vergleich der relativen VOC-Konzentrationen einer Lackprobe (Lack A) im Probenbehälter aus Tedlar® nach Befüllung und Lagerung normiert auf die Emissionsprüfkammer

In dieser Arbeit wird festgelegt (KAPITEL 5.2.4) dass Probenbehälter für die Anwendung im Adapter geeignet sind, wenn die Probenluft zum Zeitpunkt der sensorischen Messung eine Wiederfindungsrate der VOC-Konzentrationen von mindestens 80 % im Vergleich zur Emissionsprüfkammer aufweist. Die Ergebnisse dieses Versuches zeigen, dass diese Anforderung auch nach einer Stunde Lagerungszeit in den Probenbehältern erfüllt wird.

#### 6.3.3.4 Schlussfolgerungen zur Anwendung flexibler Probenbehälter

Für die Anwendung im Adapter werden Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar mit einem Volumen von etwa 20 l hergestellt. Ihre Eignung wird durch VOC-Messungen überprüft. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen, dass die Probenbehälter geeignet sind. In Bezug auf die VOC-Konzentrationen werden hohe Wiederfindungsraten im Probenbehälter im Vergleich

zur Emissionsprüfkammer erreicht. Dies weist darauf hin, dass ihre Herstellung und Vorbehandlung ausreichend effektiv sind.

Weitere VOC-Messungen nach Fertigstellung des Adapters, die ebenfalls die Eignung der Probenbehälter belegen, werden in KAPITEL 6.5.1 präsentiert. Auch die Eignung der Behälter für sensorische Messungen wird dort nachgewiesen.

### **6.3.4 Peripherie des Adapters**

Basierend auf den in den KAPITELN 6.3.1 bis 6.3.3 beschriebenen Untersuchungen und Überlegungen kann die Peripherie des Adapters geplant werden. Dieser soll für flexible Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar® mit einem Volumen von etwa 20 Litern geeignet sein. Ein Trichter soll als Schnittstelle für die sensorische Bewertung dienen. Zusätzlich müssen die in KAPITEL 6.2, TABELLE 6-2 beschriebenen Anforderungen beim Bau umgesetzt werden.

Ausgehend von den Anforderungen wird der in Abbildung 6-15 dargestellte Entwurf geplant. Die Probenbehälter werden in einer luftdichten Box positioniert. Zur Entleerung zum Zeitpunkt der Probenahme wird ein Ventilator vorgesehen. Eine Messblende soll die Drehzahl des Ventilators regeln, um den gewünschten Volumenstrom am Trichter zu ermöglichen. Dieser Aufbau hat sich bei den derzeit verfügbaren Probendarbietungssystemen bewährt (KAPITEL 3.2.3.2).

Die Probenluft strömt an einer Seite in den Probenbehälter ein und verlässt diesen an der gegenüberliegenden Seite zum Trichter für die sensorische Bewertung. Um die wechselnde Sammlung und Darbietung der Probenluft zu ermöglichen, werden vier Hähne geplant. Dabei ermöglichen die Ein- und Ausströmhähne die Befüllung und Entleerung des Probenbehälters in die gewünschte Richtung. Die Ablufthähne leiten nicht benötigte Probenluft zur Abluft. Dabei hat der Ablufthahn 1 die Aufgabe, einen Einfluss auf die Druckverhältnisse in der Emissionsprüfkammer zu vermeiden. Ist der Einströmhahn des Adapters geschlossen, so wird die Probenluft aus der Prüfkammer weiterhin abgeführt. Der Ablufthahn 2 hat die Aufgabe, während des Durchströmens eines gefüllten Probenbehälters, überschüssige Probenluft abzuführen und gleichzeitig einen ausreichend großen Widerstand darzustellen, damit der Probenbehälter mit Probenluft gefüllt ist.

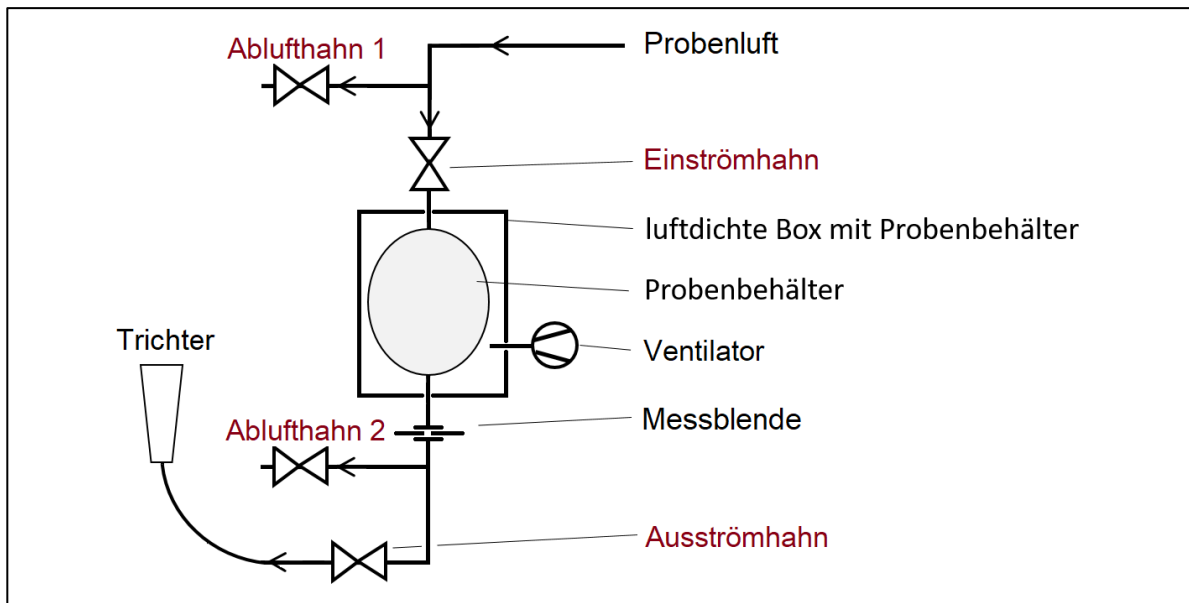


Abbildung 6-15: Entwurf des Adapters

Für die Betriebszustände der Sammlung und Darbietung von Probenluft ergeben sich die in Tabelle 6-9 dargestellten Hahnstellungen des Adapters.

Tabelle 6-9: Hahnstellungen des Adapters bei unterschiedlichen Betriebszuständen

Betriebszustand des Adapters	Ventilator	Hahnstellung
Sammlung von Probenluft bzw. Durchströmung des Probenbehälters	ausgeschaltet	Einströmhahn geöffnet Ablufthahn 1 geschlossen Ausströmhahn geschlossen Ablufthahn 2 geöffnet
Darbietung von Probenluft	eingeschaltet	Einströmhahn geschlossen Ablufthahn 1 geöffnet Ausströmhahn1 geöffnet Ablufthahn 2 geschlossen

Die Prüfenden starten den Ventilator durch Bedienung eines Tasters und leiten somit die Darbietung der Probenluft ein.

Bei der Bereitstellung von Probenluft für Geruchsmessungen muss den Prüfenden ein konstanter Luftvolumenstrom zwischen 0,6 und 1,0 l/s zur Verfügung gestellt werden (KAPITEL 3.2.3.2). Durch die Verwendung einer Druckmessblende und einer automatischen Regelung des Ventilators soll ein Luftvolumenstrom von 0,9 l/s bereitgestellt werden. Dies entspricht gleichzeitig dem Luftvolumenstrom, der im Luftqualitätslabor der HTW Berlin zur Verfügung gestellt wird (KAPITEL 5.1.1). Auf diese Weise können die Messungen vergleichbar mit direkten Messungen durchgeführt werden.

Der Bau des Adapters gemäß dem in Abbildung 6-15 dargestellten Entwurf ist grundsätzlich realisierbar und könnte entsprechend umgesetzt werden. Im Zuge der weiteren Planung

ergeben sich jedoch Anpassungen, die spezifisch auf die besonderen Gegebenheiten im Luftqualitätslabor der HTW Berlin abgestimmt sind. Diese Anpassungen ermöglichen es, auf die Ablufthähne zu verzichten und stattdessen die Laborabluft oberhalb der Probetrichter zu nutzen. Für die Umsetzung werden daher die folgenden Anpassungen vorgenommen:

- Der Ablufthahn 1 wird nicht benötigt, da Vergleichsmessungen zwischen der direkten Messung an CLIMPAQs und der Adaptermessung stattfinden sollen. Die Lösung besteht darin, den Einströmhahn als Dreibegehahn zu planen. Dadurch kann die Luft entweder direkt zu einem Trichter oder über den Adapter zu einem anderen Trichter strömen. Über beiden Trichtern ist eine Laborabluft installiert (Kapitel 5.1.1).
- Der Ablufthahn 2 wird als Bypass geplant, sodass auch die nicht benötigte Probenluft über den Trichter zur Abluft strömt.

Zunächst ist für den Ausströmhahn ein manueller Betrieb vorgesehen, was der in KAPITEL 6.5.3.1 untersuchten ersten Adapterversion entspricht. Es wird ab der zweiten Adapterversion, die in KAPITEL 6.5.3.2 beschrieben ist, der Ausströmhahn durch ein Magnetventil ersetzt.

Die Auswahl der Bauteile und der Bau des Adapters erfolgen damit gemäß Abbildung 6-16.

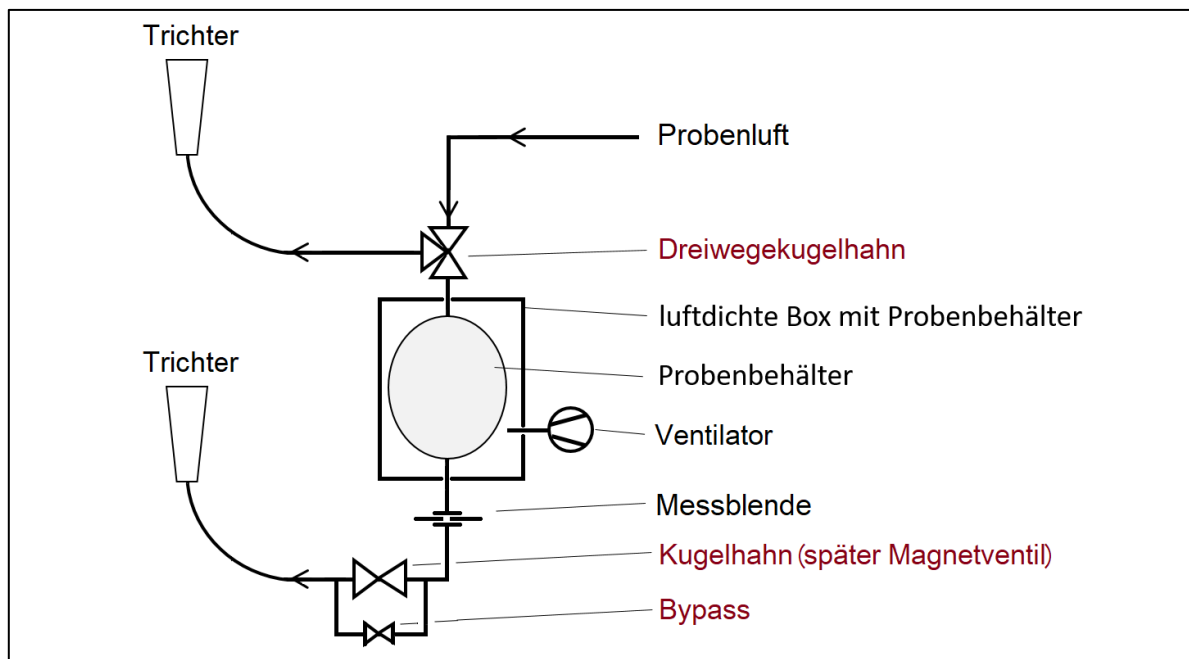


Abbildung 6-16: Schematische Darstellung des Adapters

## **6.4 Bau und Betrieb des Adapters**

Nach den in Kapitel 6.3 dargestellten Untersuchungen kann der Adapter nun gebaut werden. In diesem Kapitel werden die Bauteile des Adapters vorgestellt (KAPITEL 6.4.1) sowie der Betrieb und die Bedienung des Adapters (KAPITEL 6.4.2).

### **6.4.1 Auswahl der Bauteile**

Für den Bau des Adapters werden die im Folgenden beschriebenen Bauteile verwendet.

#### **Trichter**

Die im Luftqualitätslabor der HTW Berlin verwendeten Trichter mit den gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) vorgegebenen Maßen (KAPITEL 3.2.3.1) werden auch für den Adapter verwendet.

#### **Rohrleitungen**

Als Rohrleitungen werden die im Luftqualitätslabor der HTW Berlin verwendeten Edelstahlleitungen mit einem Innendurchmesser von 40 mm verwendet, um kompatibel mit den Anschlüssen der CLIMPAQ und zum Trichter zu sein.

#### **Aufstellung des Adapters mit Profilsystem**

Zur Montage des Adapters wird ein Aluminium-Profilsystem verwendet, das zu einem etwa einen Meter hohen Tisch aufgebaut wird. Damit kann die Box in der notwendigen Höhe positioniert und fixiert werden.

#### **Luftdichte Box**

Für die Positionierung des Probenbehälters wird eine Aluminiumbox mit einem Volumen von 60 Litern gewählt. Die Innenmaße der Box (550 mm x 350 mm x 310 mm) erlauben die Unterbringung der geplanten Probenbehälter sowie die Möglichkeit darin zu hantieren, um die Probenbehälter einbringen zu können.

Die Box wird so aufgestellt, dass sie sich an ihrer Vorderseite über ihren Deckel mit zwei Klappverschlüssen öffnen lässt. Die eingebrachte Deckeldichtung ermöglicht einen luftdichten Verschluss.

Zum Aufsetzen des Ventilators wird in die Rückwand eine kreisförmige Öffnung geschnitten. In die Ober- und Unterseite werden zwei weitere Öffnungen zum Anbringen von Stützen für die Zu- und Abluftleitungen geschnitten. Die eingebrachten Stützen aus Edelstahl mit einem Durchmesser von 40 mm dienen innerhalb der Box zum Anbringen der Probenbehälter und außerhalb der Box zum Anbringen an die Rohrleitungen. Abdichtungen aus Teflon dichten die Konstruktion ab.

#### **Dreiwegehahn (Einströmhahn)**

Es wird ein Dreiwegehahn aus Edelstahl mit einem Öffnungsquerschnitt von 40 mm verwendet. Dieser wird so eingebaut, dass die Luft aus der CLIMPAQ entweder zum Adapter oder direkt zu einem Trichter für die direkte Bewertung strömt.

### **Kugelhahn, später Magnetventil (Ausströmhahn)**

Zunächst wird ein manuell zu bedienender Kugelhahn aus Edelstahl mit einem Öffnungsquerschnitt von 40 mm eingesetzt, der von der Prüfleitung bedient wird. Da sich bei späteren Untersuchungen zum Volumenstrom zeigt, dass es zu Rückströmungen von Luft aus Richtung des Trichters in den Probenbehälter des Adapters kommt (KAPITEL 6.5.2.1), wird der Kugelhahn durch ein Magnetventil aus Edelstahl ersetzt. Das Magnetventil wird stromlos geschlossen, sodass eine Rückströmung verhindert wird. Bei der Bedienung des Tasters durch die Prüfenden öffnet sich das Ventil und gleichzeitig wird der Betrieb des Ventilators gestartet.

### **Ventilator**

Es wird ein Radialventilator mit einem Förderstrom von 14 m<sup>3</sup>/h und einer Nennspannung von 12 Volt verwendet. Durch die Verwendung einer Messblende wird die Drehzahl zur Darbietung der Probenluft auf etwa 0,9 l/s (3,24 m<sup>3</sup>/h) eingestellt.

### **Messblende**

In die ausströmende Rohrleitung wird eine Messblende aus Edelstahl eingebaut, um den Wirkdruck zu messen und zu regulieren. An diese Blende werden PTFE-Schläuche angeschlossen, die den gemessenen Druck übertragen. Die Druckmessung erfolgt mithilfe der Druckdose, während die Drehzahl des Ventilators entsprechend geregelt wird, um den gewünschten Wirkdruck aufrecht zu erhalten.

### **Bypass**

Eine Rohrleitung mit einem Durchmesser von 6 mm, die mit einem Kugelhahn aus Edelstahl geschlossen werden kann, wird parallel zum Magnetventil eingesetzt. Es ermöglicht als Bypass ein dauerhaftes Strömen von Probenluft durch den Probenbehälter des Adapters. Gleichzeitig bleibt dieser aufgrund des kleinen Durchmessers des Bypasses gefüllt.

### **Steuereinheit**

Um den Adapter zu bedienen, wird eine Steuereinheit mit einem Display und einem Encoder an die Box angebracht. Damit lässt sich der Adapter einschalten, die Messblende kalibrieren und die Regelparameter zur Einstellung des erforderlichen Volumenstroms bei Bedarf verändern. Während einer Messung wird auf dem Display der Volumenstrom angezeigt.

### **Taster als Bedieneinheit**

Die Steuereinheit wird über ein längeres Kabel mit einem Taster verbunden. Der Taster befindet sich neben dem Trichter und kann von den Prüfenden bedient werden. Beim Betätigen öffnet sich das Magnetventil und der Ventilator wird gestartet.

Abbildung 6-17 zeigt ein Foto des Adapters, aufgestellt im Luftqualitätslabor der HTW Berlin. Der Adapter ist außerhalb des Prüfraums positioniert. Die Luft wird in den Prüfraum an einen Bewertungstrichter geführt.

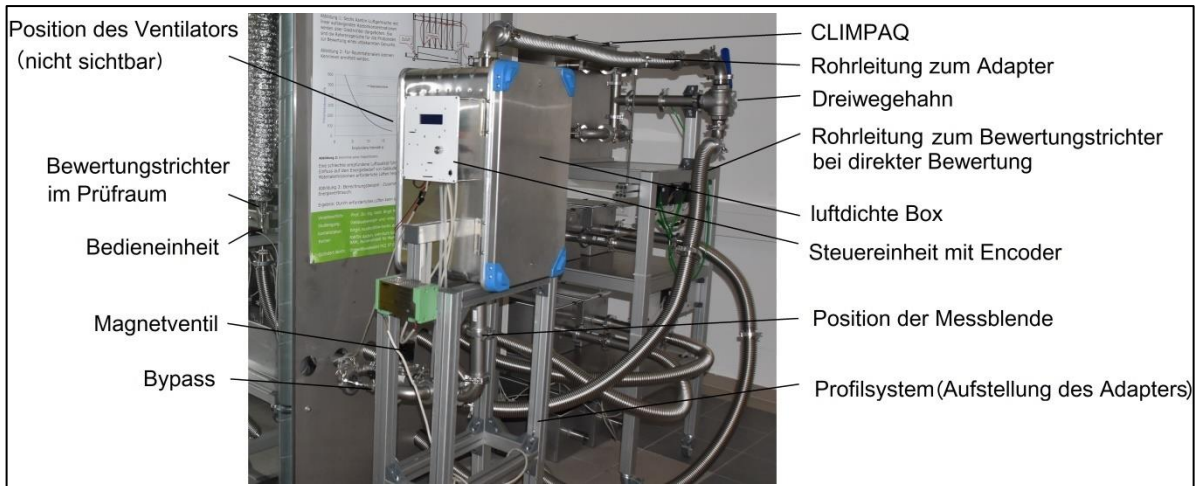


Abbildung 6-17: Foto des Adapters im Luftqualitätslabor der HTW Berlin

### 6.4.2 Betriebsanleitung des Adapters

In diesem Kapitel wird eine Anleitung zur Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung von Messungen mit dem Adapter beschrieben. Der Adapter wird in zwei Optimierungsschritten konstruktiv angepasst, wobei der manuelle Ausströmhahn durch ein Magnetventil ersetzt und die Abdichtung optimiert werden. Die Anpassungen ergeben sich aufgrund der Volumenstrommessungen in KAPITEL 6.5.2. Diese Anleitung bezieht sich auf den Adapter in seiner Endversion.

#### Vorbereitung von Messungen

Bevor der Adapter für eine sensorische Messung genutzt wird, sollte der Probenbehälter spätestens eine Stunde zuvor an die Rohrstützen in der Box angebracht werden. Alternativ ist es möglich, den Probenbehälter bereits einige Tage vor der Messung einzubringen und ihn durchströmen zu lassen. Die Befestigung kann mit wiederlösbaren Kabelbindern oder Rohrschellen erfolgen, wobei zwischen Behälter und Befestigung ein Dichtgummi aus Teflon zur Verbesserung der Dichtheit angebracht wird.

Um den Probenbehälter zu füllen und zu durchströmen, muss der Zustrom zum Adapter über die Einstellung des Dreiwegehahns ermöglicht und der Bypass geöffnet werden.

Kurz vor der Messung werden der Adapter und das Magnetventil über die Stromversorgung elektrisch angeschlossen. Die Kalibrierung des Drucksensors beginnt gleichzeitig mit der Stromversorgung. Die Schläuche der Messblende dürfen zu diesem Zeitpunkt nicht angeschlossen sein, um eine Kalibrierung unter atmosphärischem Druck und ohne Druckdifferenz zu gewährleisten. Die Kalibrierung des Sensors durch das Gerät erfolgt und das Display der Steuereinheit zeigt eine Druckdifferenz von Null Pascal an. Nach der Kalibrierung werden die Schläuche an die Messblende angeschlossen. Dabei ist die Strömungsrichtung zu beachten, wobei der Ausgang der Messdose, der mit „HI“ gekennzeichnet ist, in Strömungsrichtung vor der Messblende anzubringen ist und der Ausgang, der mit „LO“ gekennzeichnet ist, hinter die Messblende.

Der Soll-Volumenstrom ist auf 0,9 l/s eingestellt und kann bei Bedarf durch Bedienung des Encoders (Drehgeber) angepasst werden.

Zu Beginn der Messung sollte die Box noch einmal geöffnet werden, um zu prüfen, ob der Probenbehälter gefüllt ist. Anschließend ist die Box wieder zu verschließen.

### **Durchführung der Messung**

Zur Darbietung wird der Zustrom von Probenluft zum Adapter beendet, indem der Dreiwegehahn so umgestellt wird, dass die Probenluft aus der CLIMPAQ direkt zu einem anderen Bewertungstrichter geführt wird. Der Bypass des Magnetventils wird geschlossen.

Anschließend betätigt die prüfende Person einen Taster, durch den das Magnetventil geöffnet und der Ventilator gestartet werden. Die Person hält den Taster gedrückt und wartet einige Sekunden, bis eine grüne Diode leuchtet. Diese signalisiert, dass der erforderliche Volumenstrom erreicht ist und die Probenluft bewertet werden kann. Der Taster muss bis zum Ende der Probenahme durchgehend betätigt werden. Bei Bedarf kann durch erneute Bedienung des Tasters eine Wiederholung erfolgen.

Nach Abschluss einer Bewertung öffnet die Prüfleitung den Bypass und ermöglicht den Zustrom von neuer Probenluft aus der CLIMPAQ zum Adapter durch Betätigung des Dreiwegehahns. Aufgrund des hohen Volumenstroms am Ausgang einer CLIMPAQ beträgt die Zeitdauer der erneuten Befüllung des Probenbehälters nur wenige Sekunden. Um jedoch sicherzustellen, dass ausreichend neue Probenluft im Probenbehälter vorhanden ist, wartet die Prüfleitung etwa eine Minute, bevor die nächste Person eine Geruchsbewertung vornehmen kann.

### **Nachbereitung der Messungen**

Das Vorgehen nach einer Messung ist abhängig davon, ob weitere Messungen mit dem gleichen Produkt geplant sind. Falls dies der Fall ist, wird der Dreiwegehahn so eingestellt, dass die Probenluft bis zum nächsten Messtag teilweise durch den Adapter und teilweise direkt zum Trichter geführt wird. Dies dient dazu, sämtliche Leitungen und den Probenbehälter mit Probenluft zu spülen und eventuelle Kontaminationen zu vermeiden.

Nach Abschluss einer Messung mit einem Produkt wird die CLIMPAQ entladen und mit 96 %-igem Ethanol gereinigt. Zur Vermeidung einer Kontamination der CLIMPAQs und Rohrleitungen wird saubere Luft aus der Klimaanlage durch diese geführt. Der Probenbehälter wird aus der Adapterbox entfernt, und sowohl die Box als auch die Anschlussstutzen und Rohrleitungen werden ebenfalls mit Ethanol gereinigt.

Anschließend kann entweder ein sauberer Probenbehälter oder eine Rohrleitung aus Edelstahl in der Box angebracht werden. Es wird empfohlen, den Adapter so auch während Messpausen kontinuierlich durchströmen zu lassen, indem saubere, klimatisierte Luft aus der CLIMPAQ durch den Adapter geleitet wird.

## **6.5 Untersuchungen des Adapters**

Dieses Kapitel beschreibt die Überprüfung der Funktionsweise des Adapters. In KAPITEL 6.5.1 werden die durchgeführten VOC Messungen dargestellt, in KAPITEL 6.5.2 die Messungen zum Volumenstrom und in KAPITEL 6.5.3 die sensorischen Messungen. In den Volumenstrommessungen zeigt sich Optimierungsbedarf, der konstruktiv in zwei Schritten

umgesetzt wird. Die sensorischen Messungen werden daher mit drei Adapterversionen durchgeführt, um zu prüfen, ob die Anpassungen zu einer Verbesserung führen.

### **6.5.1 VOC-Messungen**

Die VOC-Messungen werden mit der ersten Version des Adapters durchgeführt, der über einen Kugelhahn aus Edelstahl als Ausströmhahn verfügt (KAPITEL 6.4). Die Versuche werden mit dem später verwendeten Magnetventil nicht wiederholt, da der Einfluss des Ventils auf die Qualität der Probenluft als vernachlässigbar gesehen wird. Das Magnetventil besteht wie der Kugelhahn aus Edelstahl und der Kontakt mit Probenluft ist von sehr kurzer Zeitdauer.

Eine Herausforderung der Messungen besteht darin, dass diese nicht auf die gleiche Weise durchgeführt werden können wie sensorische Messungen, bei denen die Probenluft während der Darbietung etwa 20 Sekunden lang durch den Trichter geführt wird. Diese kurze Zeitspanne reicht nicht aus, um eine Probenahme mit Sorptionsrohren über einen Zeitraum von mindestens zehn Minuten durchzuführen. Daher müssen alternative Möglichkeiten gefunden werden. Dabei sollten die VOC-Konzentrationen der Probenluft möglichst ähnlich denen am Trichter während einer Darbietung sein.

Insgesamt werden an drei Messstellen VOC-Messungen durchgeführt, die im Folgenden beschrieben und in Abbildung 6-18 grafisch dargestellt werden. Zusätzlich wird jeweils eine Probenahme direkt an der Emissionsprüfkammer durchgeführt, was in der Abbildung mit „X“ gekennzeichnet ist, um vergleichende Messungen zu erhalten.

1. Der Adapter wird bei geöffnetem Ein- und Ausströmhahn mit Probenluft aus der Emissionsprüfkammer durchströmt. Die VOC-Konzentrationen werden am dauerhaft durchströmten Trichter ermittelt. Dadurch lässt sich feststellen, ob der Adapter und die für den Bau verwendeten Materialien einen Einfluss auf die Probenluft haben. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in KAPITEL 6.5.1.1 dargestellt.
2. Der Zustrom von Probenluft aus der Emissionsprüfkammer zum Adapter wird durch Schließen des Einströmhahns gestoppt und die VOC-Konzentrationen im Probenbehälter werden gemessen. Dazu wird die Box des Adapters geöffnet, um den Probenbehälter zu beproben. Diese Messung ist notwendig, da bei einer sensorischen Messung ebenfalls der Zustrom für eine Darbietung unterbrochen wird, was zu einer kurzen Lagerung der Probenluft führt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in KAPITEL 6.5.1.2 beschrieben.
3. Der Probenbehälter im Adapter wird gefüllt, der Zustrom von Probenluft gestoppt und die Probenluft wird durch Bedienung des Ventilators am Trichter wie bei einer sensorischen Messung dargeboten. Über den Trichter wird ein weiterer Probenbehälter gestülpt, in dem die Probenluft für eine Probenahme gesammelt wird. Diese Messung simuliert die sensorische Messung vollständig und wird in KAPITEL 6.5.1.3 dargestellt wird.

Abbildung 6-19 zeigt je ein Foto zu den drei Versuchsreihen, wobei jeweils die Probenahme oder der Versuchsaufbau dargestellt werden.

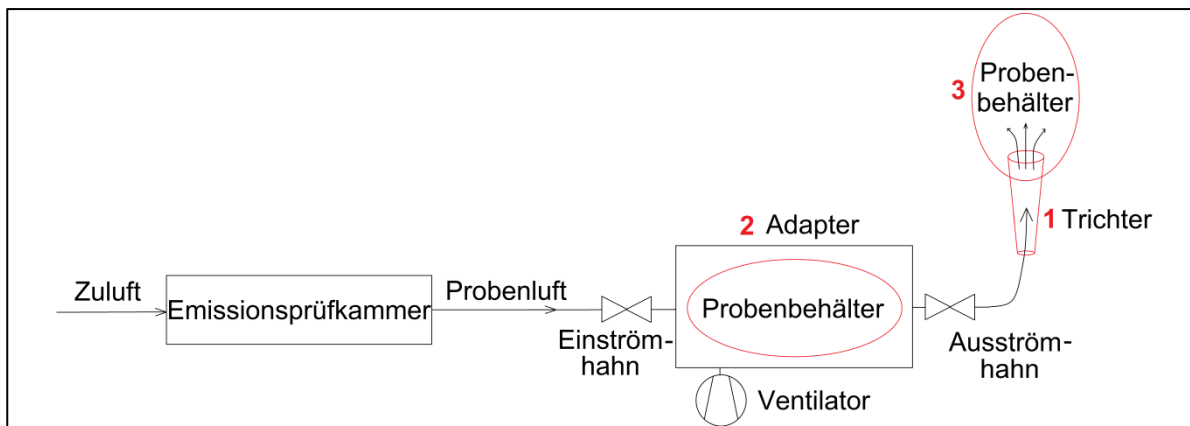


Abbildung 6-18: Darstellung der Probenahmestellen zur Ermittlung der VOC-Konzentrationen der mithilfe des Adapters bereitgestellten Probenluft

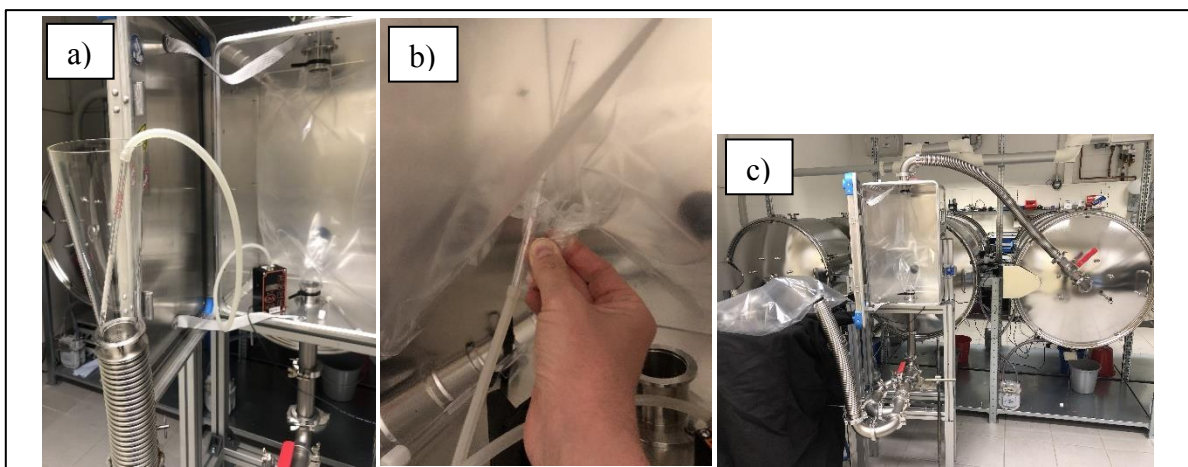


Abbildung 6-19: Fotos der drei Versuchsreihen: a) Probenahme am durchströmten Adapter, b) Probenahme aus dem Behälter des Adapters nach Zustromstopp, c) Befüllen eines zweiten Probenbehälters zur Beprobung hinter dem Adapter

Die Messungen erfolgen mit der 270 l-Emissionsprüfkammer bei der BAM. Die Beladung der Prüfkammern und der Anschluss der Probenbehälter im Adapter erfolgt jeweils einen Tag vor der Probenahme. Es werden immer Doppelproben mit einem Volumen von einem Liter entnommen (10 min Probenahme) und der Mittelwert daraus gebildet.

In der ersten Versuchsreihe am durchströmten Adapter (Kapitel 6.5.1.1) werden Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar® verwendet. Bei den Messungen kann kein Einfluss des Behältermaterials auf das Ergebnis der Messung festgestellt werden. Daher werden in der zweiten und dritten Versuchsreihe (KAPITEL 6.5.1.2 UND 6.5.1.3) lediglich Behälter aus Tedlar® verwendet. Bei der Verwendung der Behälter aus Tedlar® wurde zudem festgestellt, dass die Einführung der Probenahmerohre aufgrund der vorgeschweißten Hälse besser handhabbar ist. Dadurch lassen sich mögliche Fehler durch Undichtigkeiten an der Einführungsstelle eher vermeiden.

### Proben

Als Proben werden in der ersten Versuchsreihe (KAPITEL 6.5.1.1) eine Bodenbelagsprobe und ein Lack untersucht. Abbildung 6-20 zeigt die Positionierung der Proben in der 270 l-Emissionsprüfkammer. Die Bodenbelagsprobe besteht aus je zwei Prüfstücken Kautschuk und

Linoleum, um viele verschiedene VOCs in der Probenluft nachweisen zu können. Die Emissionsprüfkammer wird mit 0,8 m<sup>2</sup> Bodenbelag beladen und mit einer Luftwechselrate von 1 h<sup>-1</sup> betrieben, woraus sich eine flächenspezifische Luftdurchflussrate  $q_A$  von 0,34 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) ergibt. Diese daraus resultierende hohe Beladung  $L$  von knapp 3 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> soll sicherstellen, dass die VOCs in ausreichend hohen Konzentrationen für die Messung nachweisbar sind und möglichst nicht im Bereich der Nachweisgrenze des GC/MS-Verfahrens liegen.

Bei der Untersuchung des Lacks wird Lack B verwendet (KAPITEL 5.2.1), wobei sich beim gewählten Volumenstrom von 270 l/h immer jeweils zwei Petrischalen in der Emissionsprüfkammer befinden. Spätestens nach zwei Tagen werden diese durch zwei neue Petrischalen ersetzt, um immer ausreichend hohe VOC-Konzentrationen für die Messungen zu gewährleisten. Beim Ringversuch der BAM im Jahr 2021 hat die BAM vorgegeben, die Kammern mit einer Petrischale bei 100 l/h zu beladen (Horn, 2022). Damit ist die Beladung etwas geringer, als bei den Ringversuchen. Es wird jedoch im Gegensatz zum Ringversuch immer am ersten oder zweiten Tag nach Beladung gemessen, sodass die zu erwartenden VOC-Konzentrationen ausreichend hoch sind.

In der zweiten und dritten Versuchsreihe (KAPITEL 6.5.1.2 UND 6.5.1.3) wird ausschließlich mit dem Lack weiter verfahren, da hier sämtliche VOC-Konzentrationen im optimalen Bereich der GC/MS-Analytik liegen. Es kann zudem nach kurzer Zeit mit einer neuen Probe gearbeitet werden, falls die VOC-Emissionen abklingen. Bei der Bodenbelagsprobe ist davon auszugehen, dass die VOC-Konzentrationen im Laufe der Zeit abklingen und für eine Vergleichsmessung nicht mehr ausreichend VOCs in der Luftprobe vorhanden sind.

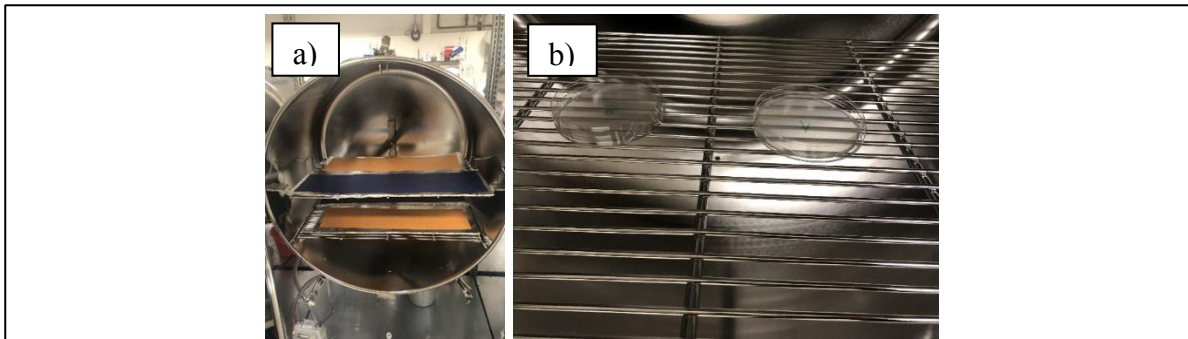


Abbildung 6-20: Proben für die VOC-Messungen mit dem Adapter in der 270 l-Emissionsprüfkammer: a) Bodenbeläge Kautschuk und Linoleum, b) zwei Petrischalen mit Lack B

### **Ermittlung der Hintergrundbelastung**

Vor jeder Messreihe wird die Hintergrundbelastung in der Emissionsprüfkammer und an den Probenbehältern ermittelt (KAPITEL 3.4). Die erreichten VOC-Konzentrationen sind vergleichbar und liegen für jede Einzelsubstanz zwischen 0 und 1 µg/m<sup>3</sup> und für die Summe unter 10 µg/m<sup>3</sup>. Sie entsprechen damit den Vorgaben der DIN EN ISO 16000-9 (DIN, 2008). Die Hintergrundmessungen der Probenbehälter zeigen im Vergleich zur Messung der Emissionsprüfkammern keine Unterschiede.

#### **6.5.1.1 Ergebnisse bei Probenahme am durchströmten Adapter**

Die Versuche dieser Messreihe am durchströmten Adapter sind unter dem Punkt A für die Bodenbelagsprobe Kautschuk und Linoleum dargestellt und unter Punkt B für die Lackprobe.

## A. Bodenbelagsprobe aus Kautschuk und Linoleum

Mit dieser Probe werden zwei Versuche an zwei unterschiedlichen Tagen durchgeführt, um die gewisse Reproduzierbarkeit der Messungen zeigen zu können. Wie in KAPITEL 5.2.4 beschrieben, wird jeweils eine Doppelprobe entnommen, woraus Mittelwerte gebildet werden.

Die Ergebnisse der VOC-Konzentrationen werden in Tabelle 6-10 dargestellt und Abbildung 6-21 zeigt die Diagramme für die relativen VOC-Konzentrationen jeweils normiert auf die in der Emissionsprüfkammer ermittelten Konzentrationen.

Tabelle 6-10: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® am durchströmten Adapter für eine Probe aus Kautschuk und Linoleum – zwei Versuche

	VOC-Konzentrationen in µg/m <sup>3</sup>			
<b>Versuch 1</b>				
Komponente (CAS-Nummer)	Emissionsprüfkammer	Nalophan®	Emissionsprüfkammer	Tedlar®
Essigsäure (64-19-7)	1439	1517	1438	1482
Propionsäure (79-09-4)	696	665	707	685
Styrol (100-42-5)	79	74	79	74
Cyclohexanon (108-94-1)	361	336	356	339
Heptanal (111-71-7)	7	6	7	6
Benzaldehyd (100-52-7)	40	38	40	38
Hexansäure (142-62-1)	153	142	153	142
Octanal (124-13-0)	12	11	12	12
2-Octenal (25447-69-2)	10	9	10	9
Nonanal (124-19-6)	15	13	14	14
Decanal (112-31-2)	3	3	3	3
2-Phenoxyethanol (122-99-6)	4	4	4	4
Benzothiazol(95-16-9)	103	92	103	92
2-Decenal (3913-81-3)	7	6	7	6
Benzophenon (119-61-9)	3	2	3	2
<b>Versuch 2</b>				
Essigsäure (64-19-7)	1477	1414	1503	1335
Propionsäure (79-09-4)	698	624	700	596
Styrol (100-42-5)	70	62	70	58
Cyclohexanon (108-94-1)	344	307	347	284
Heptanal (111-71-7)	7	7	7	6
Benzaldehyd (100-52-7)	40	38	41	36
Hexansäure (142-62-1)	146	131	155	123
Octanal (124-13-0)	14	12	14	11
2-Octenal (25447-69-2)	10	9	10	8
Nonanal (124-19-6)	17	15	17	13
Decanal (112-31-2)	5	4	4	3
2-Phenoxyethanol (122-99-6)	4	3	4	3
Benzothiazol(95-16-9)	102	88	103	81
2-Decenal (3913-81-3)	7	6	7	5
Benzophenon (119-61-9)	3	2	3	2

Die in der Tabelle 6-10 in grauer Schrift dargestellten Substanzen erreichen VOC-Konzentrationen im Bereich  $\leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Wie in KAPITEL 5.2.4 beschrieben, erfolgt daher keine grafische Darstellung der relativen Konzentrationen dieser Werte. Die höchsten VOC-Konzentrationen werden durch die Essigsäure mit Werten bis  $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erreicht.

Der Vergleich der Messungen der Emissionsprüfkammer zeigt, dass die VOC-Konzentrationen in etwa gleichbleibend sind, was eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen belegt.

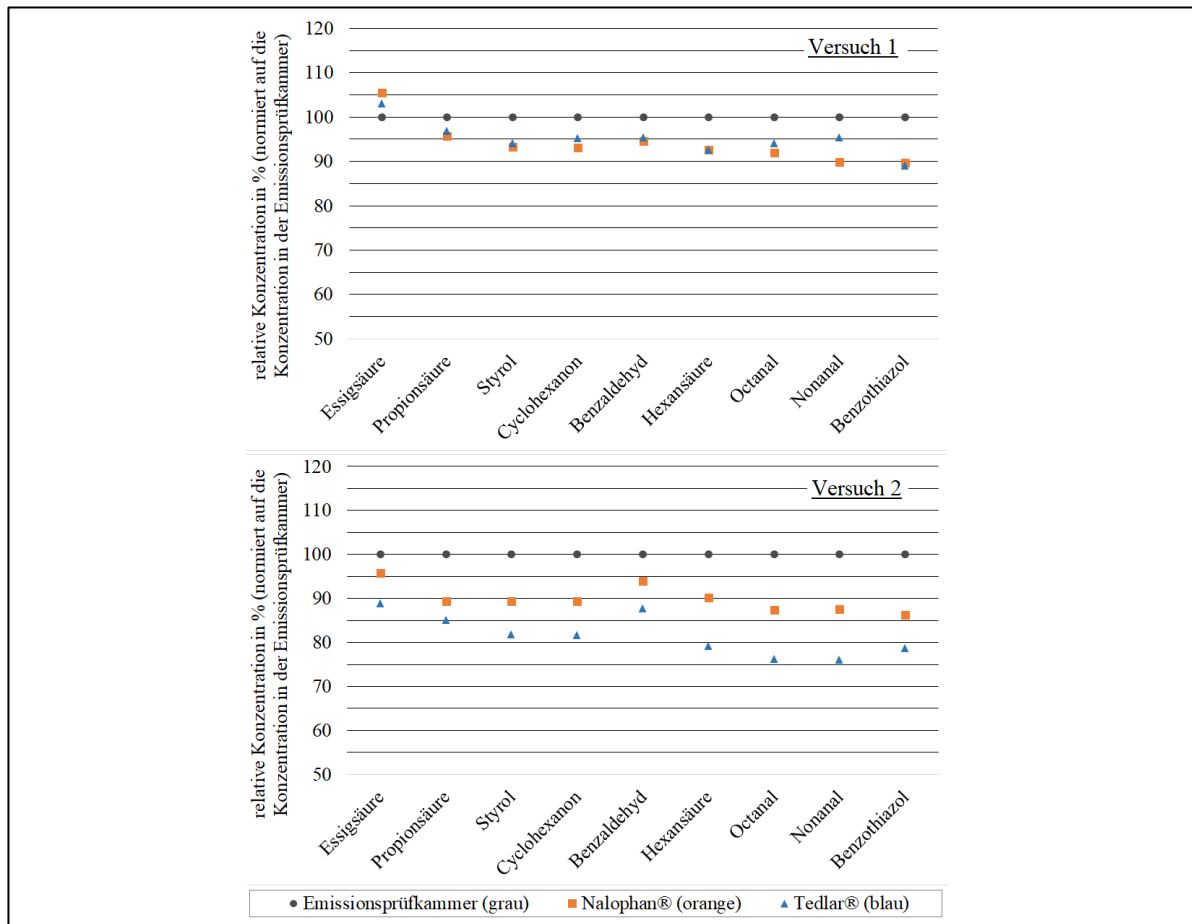


Abbildung 6-21: Relative VOC-Konzentrationen am durchströmten Adapter mit Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® normiert auf die Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer für eine Probe aus Kautschuk und Linoleum – zwei Versuche

Der Behälter aus Nalophan® zeigt in beiden Versuchen Wiederfindungsraten von etwa 90 %, während der Behälter aus Tedlar® im ersten Versuch für die meisten Substanzen Wiederfindungsraten von über 95 % aufweist und im zweiten Versuch etwa 80 % erreicht.

Damit zeigt sich bei der Probenahme am Trichter des durchströmten Adapters und der mit dem Bodenbelag beladenen Emissionsprüfkammer bei beiden Probenbehältern, dass die Konzentrationen insgesamt etwas geringer sind, jedoch im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens von 10 bis 20 % liegen.

## B. Lack B

Für die Untersuchungen wird Lack B (KAPITEL 5.1.6.2) verwendet. Insgesamt werden vier Versuche an vier Messtagen durchgeführt. Die Probenbehälter Nalophan® und Tedlar® werden also immer am gleichen Messtag geprüft.

Tabelle 6-11 zeigt die Ergebnisse der VOC-Konzentrationen und Abbildung 6-22 die Diagramme für die relativen VOC-Konzentrationen jeweils normiert auf die in der Emissionsprüfkammer ermittelten Konzentrationen.

Tabelle 6-11: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in den Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® am durchströmten Adapter für eine Lackprobe (Lack B) – vier Versuche

	VOC-Konzentrationen in µg/m <sup>3</sup>			
<b>Versuch 1</b>				
Komponente (CAS-Nummer)	Emissionsprüfkammer	Nalophan®	Emissionsprüfkammer	Tedlar®
n-Butylacetat (123-86-4)	96	90	89	81
Styrol (100-42-5)	567	530	513	466
Octanal (124-13-0)	88	82	84	76
3-Caren (13466-78-9)	264	242	246	221
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	464	427	432	389
p-Cresol (106-99-5)	75	69	73	63
Dodecan (112-40-3)	239	217	222	200
Dimethyladipat (627-93-0)	242	216	227	192
<b>Versuch 2</b>				
n-Butylacetat (123-86-4)	55	45	57	50
Styrol (100-42-5)	322	278	345	310
Octanal (124-13-0)	61	50	63	55
3-Caren (13466-78-9)	190	159	198	174
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	313	261	328	289
p-Cresol (106-99-5)	56	44	59	51
Dodecan (112-40-3)	167	137	176	151
Dimethyladipat (627-93-0)	168	132	178	148
<b>Versuch 3</b>				
n-Butylacetat (123-86-4)	45	41	39	40
Styrol (100-42-5)	307	284	269	272
Octanal (124-13-0)	32	29	29	28
3-Caren (13466-78-9)	132	120	117	117
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	369	337	325	316
p-Cresol (106-99-5)	74	67	66	63
Dodecan (112-40-3)	160	144	143	144
Dimethyladipat (627-93-0)	207	185	183	170
<b>Versuch 4</b>				
n-Butylacetat (123-86-4)	25	23	26	24
Styrol (100-42-5)	184	170	189	173
Octanal (124-13-0)	22	20	23	20
3-Caren (13466-78-9)	95	86	95	85
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	240	217	244	218
p-Cresol (106-99-5)	50	43	51	44
Dodecan (112-40-3)	112	100	113	98
Dimethyladipat (627-93-0)	139	120	141	118

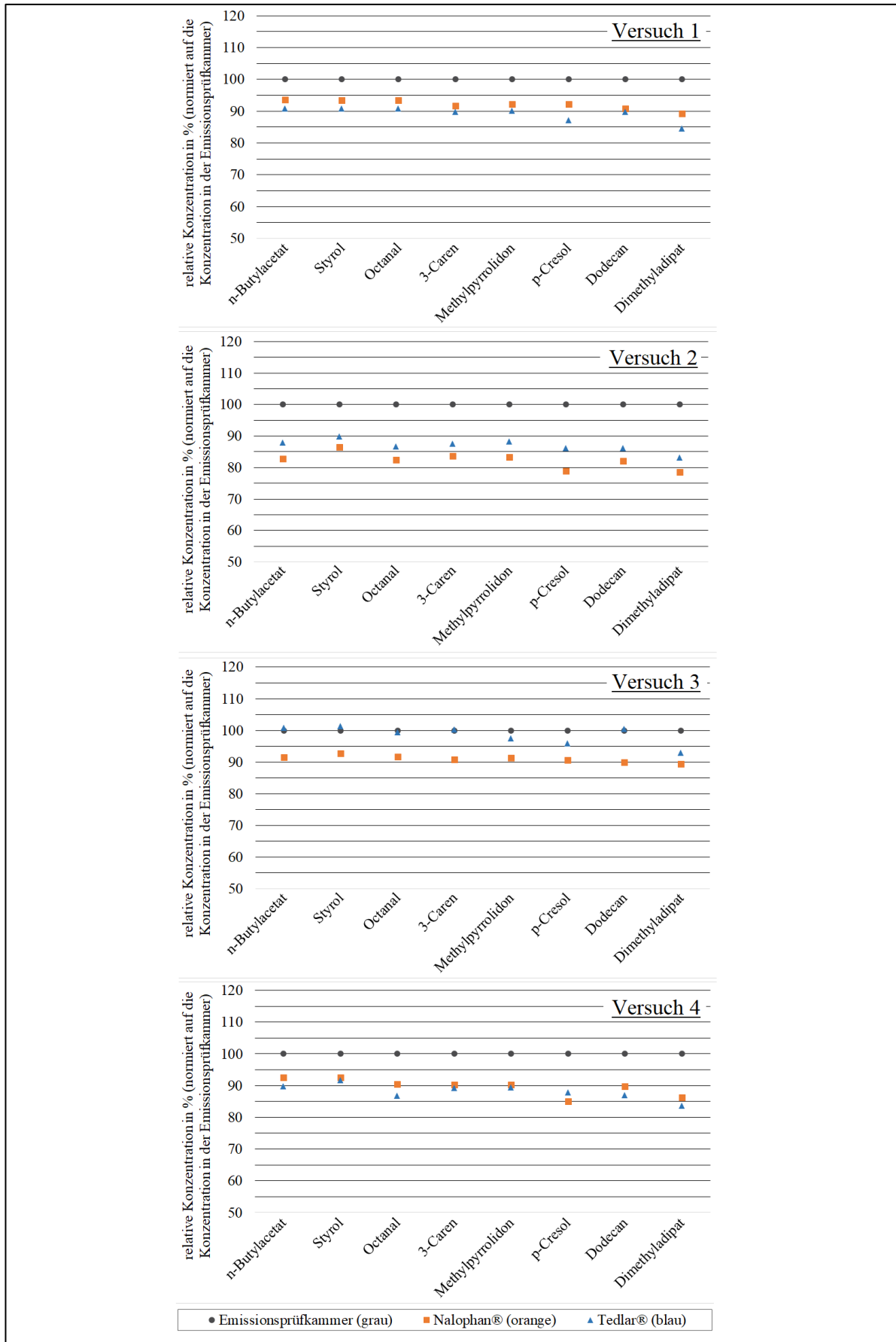


Abbildung 6-22: Relative VOC-Konzentrationen am durchströmten Adapter mit Probenbehältern aus Nalophan® und Tedlar® normiert auf die Konzentration in der Emissionsprüfkammer für eine Lackprobe (Lack B) – vier Versuche

Die VOC-Konzentrationen liegen zwischen 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  für das Octanal bis knapp 570  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  für das Styrol. Der Vergleich der VOC-Konzentrationen der Emissionsprüfkammer weist auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen hin: Die VOC-Konzentrationen zeigen in den beiden Messungen im Rahmen eines Messtages immer stabile Werte und über den Zeitraum der vier Messtage ein leichtes Abklingverhalten.

Die Messungen mit dem Lack zeigen ähnliche Ergebnisse wie mit der Bodenbelagsprobe des Versuchs A. Für beide Behältermaterialien werden Wiederfindungsraten von meist über 90 % in drei der durchgeführten Versuche und zwischen 80 und 90 % in einem Versuch (Versuch 2) ermittelt. Die Abweichungen liegen damit wieder im Messunsicherheitsbereich des Verfahrens. Jedoch zeigt sich durch die häufige Wiederholung der Messungen mit immer ähnlichen Ergebnissen, dass die Konzentrationen in den Behältern etwas geringer sind.

Im Vergleich der Behältermaterialien zeigen sich keine Unterschiede: in zwei Versuchen zeigt der Behälter aus Tedlar® etwas höhere Wiederfindungsraten und in zwei Versuchen der Behälter aus Nalophan®. Dies deutet darauf hin, dass die Wahl des Behältermaterials keine erkennbaren Auswirkungen auf die Wiederfindungsraten hat.

#### **6.5.1.2 Ergebnisse bei Probenahme aus dem Behälter des Adapters**

Insgesamt werden vier Versuche an vier Messtagen mit einer Probenahme aus dem Adapter nach dem Stoppen des Zustroms durchgeführt, um Aussagen über die Reproduzierbarkeit treffen zu können. Als Probe wird Lack B (KAPITEL 5.1.6.2) verwendet. Wie in KAPITEL 5.2.4 beschrieben, wird jeweils eine Doppelprobe entnommen und der Mittelwert daraus gebildet.

Da sich in den Versuchen in KAPITEL 6.5.1.1 gezeigt hat, dass das Material der Probenbehälter keinen Einfluss auf das Ergebnis der Analyse hat, werden ausschließlich Behälter aus Tedlar® genutzt.

Tabelle 6-12 zeigt die Ergebnisse der VOC-Konzentrationen und Abbildung 6-23 die Diagramme der relativen VOC-Konzentrationen jeweils normiert auf die in der Emissionsprüfkammer ermittelten Konzentrationen.

Die Substanzkonzentrationen liegen für das Octanal erneut im Bereich von mindestens 15  $\text{mg}/\text{m}^3$  sowie bis etwa 360  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  für das Styrol. Die Werte in der Emissionsprüfkammer zeigen in drei der vier Versuche eine gute Vergleichbarkeit, was als ein Beleg dafür gesehen wird, dass die Messungen eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen. Die Substanzkonzentrationen in Versuch 3 weichen mit höheren Konzentrationen etwas davon ab. Dies wird damit erklärt, dass vor diesem Versuch eine neue Beladung der Prüfkammer erfolgt. Versuch 1 und 2 finden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen statt und die Versuche 3 und 4 werden eine Woche darauf durchgeführt, ebenfalls an zwei aufeinanderfolgenden Tagen.

Die Wiederfindungsrate in den Behältern aus Tedlar® ist in dieser Messung sehr hoch und liegt für alle Substanzen zwischen 95 % und 100 %. Im Versuch 2 liegt die Wiederfindungsrate für einige Substanzen bei über 100 %. Hier zeigt sich die Sensibilität des Messverfahrens. Im Behälter können real nicht mehr als 100 % im Vergleich zur Emissionsprüfkammer vorliegen. Es ist davon auszugehen, dass es sich um eine Messunsicherheit handelt und auf dem verwendeten Sorptionsrohr etwas mehr Substanz

gefunden wird, da sich z. B. etwas mehr Adsorbens im Rohr befindet. Die Einzelwerte in Tabelle 6-12 liegen sehr nah beieinander. Die maximale absolute Abweichung beträgt für das Methylpyrrolidon 18 µg/m<sup>3</sup>.

Die Qualität der Probenluft in der Emissionsprüfkammer und dem Probenbehälter wird insgesamt als identisch gesehen.

Tabelle 6-12: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und im Probenbehälter aus Tedlar® des Adapters nach Zustromstopp für eine Lackprobe (Lack B) – vier Versuche

	VOC-Konzentrationen in µg/m <sup>3</sup>	
<b>Versuch 1</b>		
<b>Komponente (CAS-Nummer)</b>	<b>Emissionsprüfkammer</b>	<b>Tedlar®</b>
n-Butylacetat (123-86-4)	37	38
Styrol (100-42-5)	284	288
Octanal (124-13-0)	19	20
3-Caren (13466-78-9)	107	108
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	326	344
p-Cresol (106-99-5)	70	72
Dodecan (112-40-3)	104	104
Dimethyladipat (627-93-0)	187	194
<b>Versuch 2</b>		
n-Butylacetat (123-86-4)	25	24
Styrol (100-42-5)	201	196
Octanal (124-13-0)	16	16
3-Caren (13466-78-9)	90	86
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	260	253
p-Cresol (106-99-5)	57	54
Dodecan (112-40-3)	84	81
Dimethyladipat (627-93-0)	150	145
<b>Versuch 3</b>		
n-Butylacetat (123-86-4)	66	66
Styrol (100-42-5)	363	362
Octanal (124-13-0)	22	22
3-Caren (13466-78-9)	140	139
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	430	431
p-Cresol (106-99-5)	90	89
Dodecan (112-40-3)	127	128
Dimethyladipat (627-93-0)	237	234
<b>Versuch 4</b>		
n-Butylacetat (123-86-4)	37	36
Styrol (100-42-5)	223	218
Octanal (124-13-0)	15	15
3-Caren (13466-78-9)	94	94
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	287	274
p-Cresol (106-99-5)	63	61
Dodecan (112-40-3)	87	86
Dimethyladipat (627-93-0)	164	156

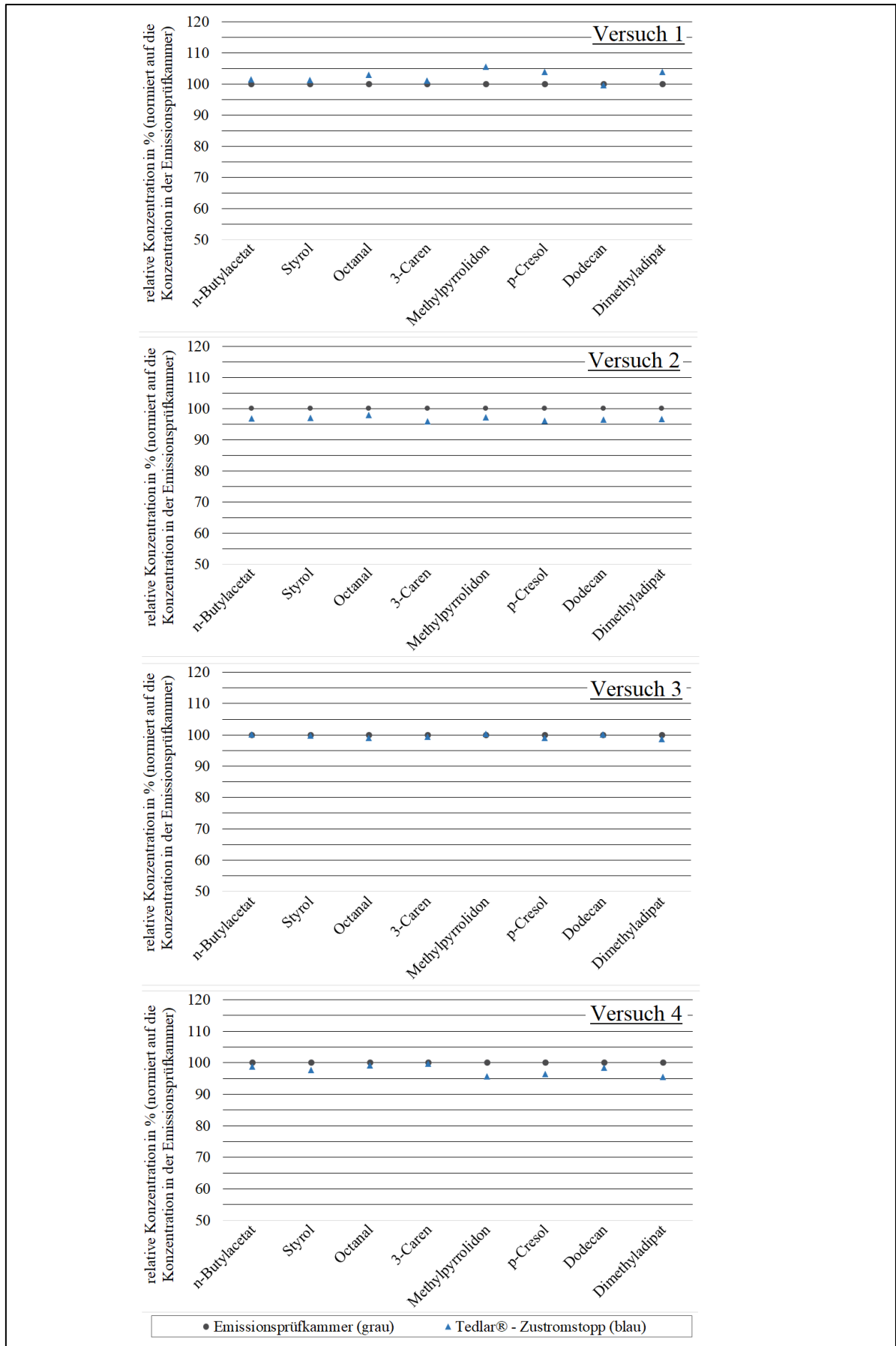


Abbildung 6-23: Relative VOC-Konzentrationen nach Zustromstopp des Adapters mit Probenbehältern aus Tedlar® normiert auf die Konzentration in der Emissionsprüfkammer für eine Lackprobe (Lack B) – vier Versuche

### 6.5.1.3 Ergebnisse bei Probenahme aus einem am Trichter gefüllten Behälter

In dieser Messreihe werden die VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in einem Probenbehälter aus Tedlar® ermittelt. In diesem Behälter wird die aus dem Adapter ausströmende Luft gesammelt, die durch die Bedienung des Ventilators in diesen gefördert wird. Auch im Adapter selbst befindet sich ein Behälter aus Tedlar®. Vor der Probenahme werden beide Behälter in etwa einen Tag lang mit Probenluft gespült.

Insgesamt werden zwei Versuche mit Lack B (KAPITEL 5.1.6.2) an zwei aufeinanderfolgenden Messtagen durchgeführt. Tabelle 6-13 zeigt die Ergebnisse der VOC-Konzentrationen und Abbildung 6-24 die Diagramme der relativen VOC-Konzentrationen jeweils normiert auf die in der Emissionsprüfkammer ermittelten Konzentrationen.

Tabelle 6-13: VOC-Konzentrationen in der Emissionsprüfkammer und in einem zweiten Probenbehälter aus Tedlar® am Ausstrom des Adapters befüllt für eine Lackprobe (Lack B) - zwei Versuche

	VOC-Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
<b>Versuch 1</b>		
Komponente (CAS-Nummer)	Emissionsprüfkammer	Tedlar® (am Ausstrom befüllt)
n-Butylacetat (123-86-4)	35	31
Styrol (100-42-5)	267	243
Octanal (124-13-0)	18	16
3-Caren (13466-78-9)	103	93
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	311	267
p-Cresol (106-99-5)	66	55
Dodecan (112-40-3)	98	90
Dimethyladipat (627-93-0)	179	139
<b>Versuch 2</b>		
n-Butylacetat (123-86-4)	24	21
Styrol (100-42-5)	195	176
Octanal (124-13-0)	16	14
3-Caren (13466-78-9)	87	78
n-Methyl-2-pyrrolidon (872-50-4)	246	202
p-Cresol (106-99-5)	54	41
Dodecan (112-40-3)	82	74
Dimethyladipat (627-93-0)	145	101

Auch in diesem Versuch zeigt das Octanal die niedrigsten Substanzkonzentrationen mit etwa  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und das Styrol die höchsten Konzentrationen bis zu etwa  $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die in der Emissionsprüfkammer ermittelten Substanzkonzentrationen sind in ihrer Höhe in etwa vergleichbar, wobei diese im zweiten Versuch für einige Substanzen niedriger sind. Dies kann auf ein Abklingverhalten hinweisen und auf die Messunsicherheit des Verfahrens zurückzuführen sein. Insgesamt weisen die Werte auf eine gute Reproduzierbarkeit hin.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Substanzen mit niedrigeren Retentionszeiten (bis 3-Caren) mit einer Rate von etwa 90 % wiedergefunden werden. Bei höheren Retentionszeiten (höherer Flüchtigkeit) sinkt die Wiederfindung auf etwa 70 bis 85 %, mit Ausnahme des Dodecans, welches ebenfalls im Bereich von 90 % liegt. Insgesamt wird auch hier eine gute Wiederfindung im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens erreicht.

Es ist jedoch auch deutlich, dass die Substanzkonzentrationen im Vergleich zu den bisher durchgeführten Versuchen (KAPITEL 6.5.1.1 und 6.5.1.2) niedriger sind. Dies kann auf die Art des Versuches zurückgeführt werden. Die Probenluft hat nach dem Austritt aus der Emissionsprüfkammer bereits eine lange Strecke sowie einen Probenbehälter passiert. Wandeffekte und eventuelle Leckagen können einen größeren Einfluss auf das Messergebnis haben. Zu einem späteren Zeitpunkt werden im Rahmen dieser Arbeit auch Messungen zur Abdichtung der Probenbehälter im Adapter durchgeführt, in denen Undichtigkeiten festgestellt werden, die durch den Bedienvorgang des Ventilators das Einströmen von Umgebungsluft ermöglichen (KAPITEL 6.5.2.2). Auch dies kann die Wiederfindungsrate der Substanzen verringern.

Interessant ist auch, dass die Wiederfindung sämtlicher Substanzen in den beiden Versuchen einen identischen Verlauf annimmt. So werden die Substanzen Methylpyrrolidon, p-Cresol und Dimethyladipat in beiden Versuchen mit niedrigeren Wiederfindungsraten in einem ähnlichen Bereich ermittelt, während die übrigen Substanzen bei etwa 90 % liegen. Die drei benannten Substanzen liegen im hohen Retentionsbereich, sind damit schwerer flüchtig und damit eventuell eher Effekten, wie einer Anlagerung an den Wänden, ausgesetzt.

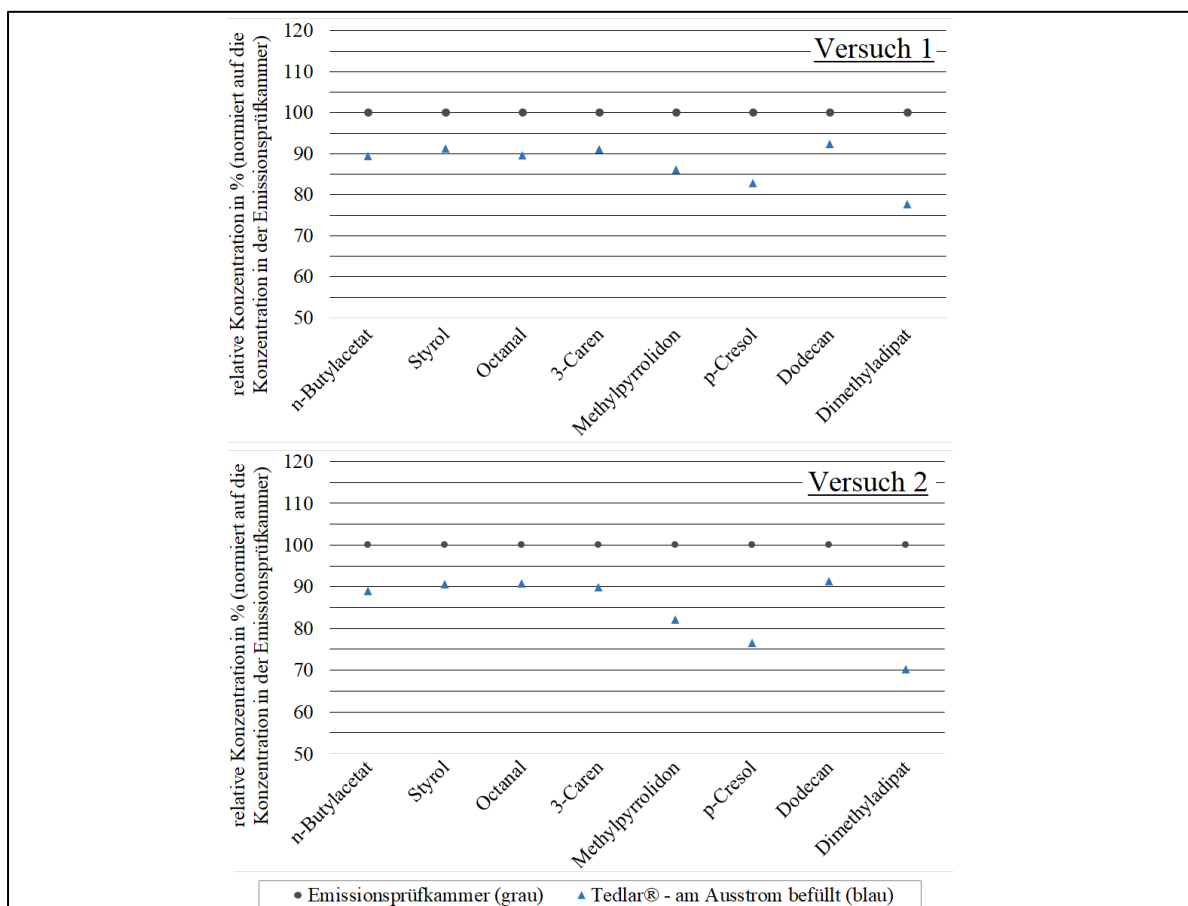


Abbildung 6-24: Relative VOC-Konzentrationen in einem zweiten Probenbehälter aus Tedlar® am Ausstrom befüllt normiert auf die Konzentration in der Emissionsprüfkammer für eine Lackprobe (Lack B) - zwei Versuche

#### 6.5.1.4 Schlussfolgerungen zu VOC-Messungen

Mit diesen Untersuchungen sollte überprüft werden, ob die mit dem Adapter dargebotene Probenluft die gleiche Zusammensetzung wie die Probenluft in der Emissionsprüfkammer hat.

In den drei durchgeführten Messreihen – mit Messungen am durchströmten Adapter, im Probenbehälter des Adapters und im Probenbehälter der am Ausstrom des Adapters befüllt wurde – können hohe Reproduzierbarkeiten erreicht werden.

Die Messungen zeigen, dass in den Probenbehältern in den meisten Fällen eine hohe Wiederfindungsrate der Substanzen zwischen 90 und 100 % im Vergleich zu den Substanzkonzentrationen in der Prüfkammer erreicht werden kann. Die höchsten Wiederfindungsraten werden im Versuch nach dem Stoppen des Zustroms erreicht (KAPITEL 6.5.1.2). Sie reichen in vielen Fällen an die 100 % heran.

Der für das GC/MS-Verfahren angegebene Bereich der Messunsicherheit liegt zwischen 10 und 20 %, womit sich die Wiederfindungsraten klar innerhalb dieses Bereiches bewegen. Einzig aufgrund der großen Anzahl der Versuche wird insgesamt davon ausgegangen, dass die Konzentrationen in den Probenbehältern etwas niedriger sind.

Ein Unterschied zwischen den Behältermaterialien Nalophan® und Tedlar® kann nicht festgestellt werden. Dies kann damit begründet werden, dass beide Materialien ihre Eignung im Rahmen der Zulassung für die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) bereits belegt haben und damit hohe Ansprüche erfüllen. Auch ist die Aufenthaltszeit der Probenluft in den Behältern sehr kurz, so dass eventuelle Materialeinflüsse kaum auf die Probenluft wirken können.

Insgesamt erweist sich der Adapter aus analytischer Sicht als geeignet.

## **6.5.2 Volumenstrommessungen**

Die Volumenstrommessungen haben das Ziel zu zeigen, ob, wie in KAPITEL 6.3.1 beschrieben, der am Trichter geforderte Volumenstrom von 0,9 l/s über einen Zeitraum von mindestens 12 Sekunden ermöglicht werden kann. Die Messungen werden in KAPITEL 6.5.2.1 beschrieben. Überraschenderweise wird bei diesen Messungen eine Rückströmung von Umgebungsluft in den Probenbehälter beobachtet, weshalb der Adapter konstruktiv angepasst wird, um dies zu vermeiden. Die Durchführung dieser Anpassung und die Erfolgskontrolle durch weitere Messungen werden ebenfalls dargelegt.

In KAPITEL 6.5.2.2 werden Untersuchungen zur Abdichtung der Probenbehälter im Adapter dargelegt. Auch diese Messungen zeigen Optimierungsbedarf in Bezug auf die Konstruktion des Anschlusses des Probenbehälters am Rohrstutzen des Adapters.

### **6.5.2.1 Ermittlung des Volumenstroms und der Darbietungsdauer**

Der am Adapter bereitgestellte Volumenstrom wird über eine Wirkdruckmessung an der eingebauten Messblende und über die Regelung der Ventilator Drehzahl geregelt. Um jedoch den bereitgestellten Volumenstrom und die Dauer der Darbietung zu ermitteln, wird das in ein Rohr eingebaute Hitzdrahtanemometer verwendet (KAPITEL 5.1.4). Dieses erfasst die Strömungsgeschwindigkeit, woraus der Volumenstrom ermittelt wird. Das Anemometer wird zur Einstellung des Volumenstroms an den übrigen Trichtern im Luftqualitätslabor verwendet. Durch die Verwendung des Anemometers ist auch für die Messung des Adapters der ermittelte Volumenstrom vergleichbar mit den Volumenströmen an den übrigen Trichtern.

Die Messung erfolgt am Trichter des Adapters während der Darbietung von Probenluft bei geöffnetem manuellem Ausströmhahn. Für die Messungen wird ein Probenbehälter aus Nalophan® verwendet.

Abbildung 6-25 zeigt den zeitlichen Verlauf der Volumenstromerfassung bei der Behälterentleerung, also Bedienung des Ventilators. Zum Zeitpunkt von 0 s wird der Ventilator gestartet und der Volumenstrom am Trichter steigt innerhalb von 8 s auf 0,9 l/s an. Er steigt noch etwas weiter auf ein Maximum von etwa 0,95 l/s. Insgesamt wird ein Volumenstrom zwischen 0,9 l/s und 0,95 l/s über einen Zeitraum von etwa 14 s eingehalten. Der Behälter entleert sich dabei und der Volumenstrom sinkt innerhalb von etwa 7 s auf einen Volumenstrom von 0,1 l/s.

Anzumerken ist, dass das Anemometer zur Ermittlung des Volumenstroms für Geschwindigkeiten größer 0,6 m/s kalibriert ist (KAPITEL 5.1.4). Dies entspricht einem Volumenstrom von etwa 0,3 l/s. Werte unterhalb dieser Schwelle sind als Schätzungen zu betrachten.

Die Messungen belegen, dass die Dauer der Darbietung mit 14 s ausreichend lang ist. Sie übersteigt die in KAPITEL 6.3.1 theoretisch ermittelten notwendigen 12 s. Der Volumenstrom kann im Bereich von 0,9 l/s über diesen Zeitraum konstant gehalten werden.

Im Versuch wird eine weitere Beobachtung entdeckt. Abbildung 6-25 zeigt den Volumenstrom am Trichter bei der Behälterentleerung, also zwischen dem Starten und dem Stoppen des Ventilators sowie einige Sekunden direkt darauffolgend. Der Volumenstrom steigt nach dem Stoppen noch einmal auf über 0,3 l/s an, um erst dann langsam auf null abzuklingen. Da der Einströmhahn zwischen Adapter und Emissionsprüfkammer während des Darbietungsprozesses geschlossen ist, kann diese Strömung nur vom Trichter in Richtung Probenahmebehälter erfolgen.

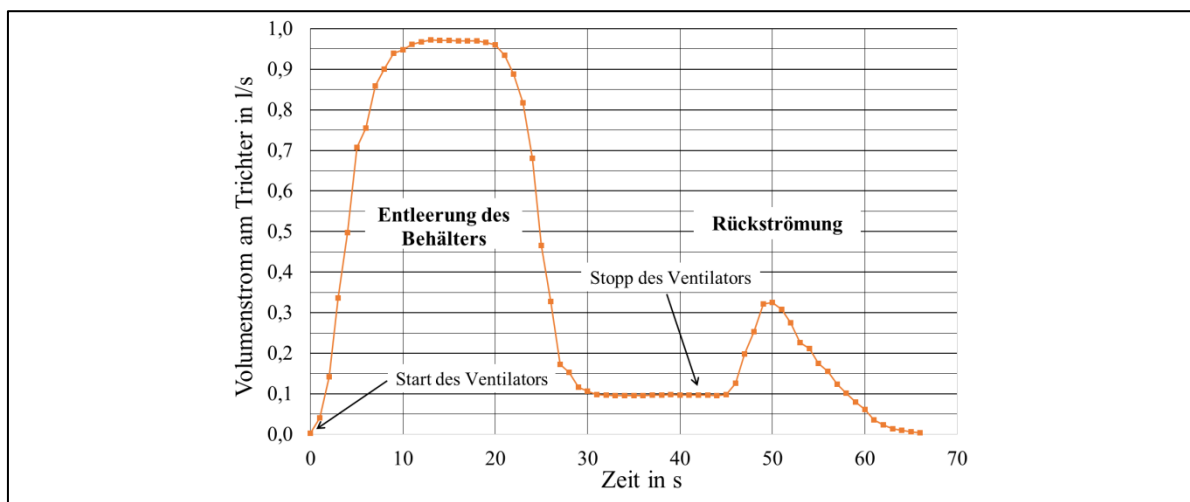


Abbildung 6-25: Volumenstromerfassung am Trichter des Adapters während und direkt nach einer Behälterentleerung (Nalophan®) – manueller Kugelhahn (erste Adapterversion)

Demnach wird der Anstieg des Volumenstroms nachdem der Ventilator gestoppt wurde, mit dem Einströmen von Umgebungsluft über den Trichter in den Probenbehälter erklärt. Sobald eine prüfende Person den Taster zur Bedienung des Ventilators nicht mehr betätigt, erfolgt

diese Rückströmung, da der entleerte Behälter einen Sogeffekt ausübt. Das Anemometer registriert dabei die Strömung bis zur Einstellung eines erfolgten Druckausgleichs.

Dieser Effekt kann bewirken, dass die dargebotene Probenluft verdünnt wird und bei den einzelnen Probenahmen durch die Prüfenden auch eine unterschiedliche Qualität aufweist, indem die Probenluft mal mehr und mal weniger stark verdünnt wird.

Aus den Untersuchungen wird deutlich, dass der manuell zu bedienende Kugelhahn eine Rückströmung nicht verhindern kann. Mit dem Einbau eines Magnetventils, das ausschließlich während der Ventilatorbedienung geöffnet ist, soll dies vermieden werden (KAPITEL 6.4.1).

Nach dieser konstruktiven Anpassung wird der Versuch wiederholt. Abbildung 6-26 zeigt die Ergebnisse für einen Probenbehälter aus Nalophan® und Abbildung 6-27 für Tedlar®.

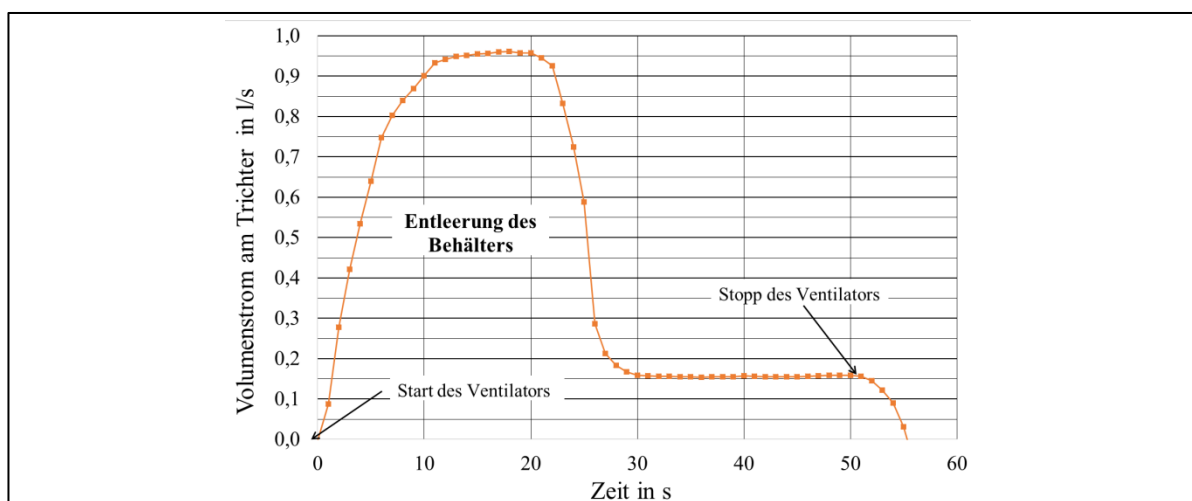


Abbildung 6-26: Volumenstromerfassung am Trichter des Adapters während und direkt nach einer Behälterentleerung (Nalophan®) - Magnetventil (zweite Adapterversion)

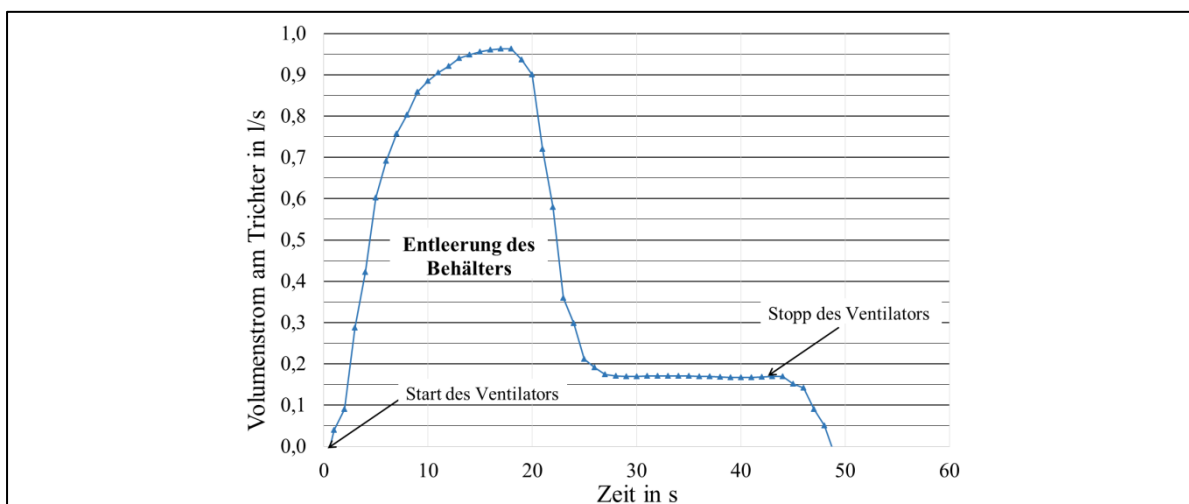


Abbildung 6-27: Volumenstromerfassung am Trichter des Adapters während und direkt nach einer Behälterentleerung (Tedlar®) - Magnetventil (zweite Adapterversion)

Die Rückströmung kann durch die Verwendung des Magnetventils vermieden werden. Nachdem der Ventilatorbetrieb beendet wird und sich gleichzeitig das Magnetventil schließt, klingt der Volumenstrom auf null ab.

Beim Behälter aus Tedlar® wird mit etwa 10 s im Bereich des Volumenstroms zwischen 0,9 und 0,95 l/s eine etwas kürzere Darbietungszeit erreicht. Sie unterschreitet die berechnete Darbietungszeit von 12 s damit geringfügig. In den sensorischen Messungen kann jedoch gezeigt werden, dass die Darbietungszeit ausreichend ist (Kapitel 6.5.3).

#### **6.5.2.2 Messungen zur Abdichtung des Probenbehälters im Adapter**

Die Probenbehälter im Adapter sind zunächst mit wiederlösbaren Kabelbindern am Rohrstutzen befestigt. Aufgrund eines Produktgeruchs in der Box des Adapters wird vermutet, dass diese Verbindung nicht dicht ist und an der starren Verschlussstelle Luft ein- oder ausströmen kann. Bei der Bedienung des Ventilators und dem Erzeugen eines Überdrucks auf den Probenbehälter könnte darüber Umgebungsluft in den Behälter einströmen und die Probenluft verdünnen. Umgekehrt kann es im Zustand der Befüllung zum Ausströmen von Probenluft in die Box kommen, was den Geruch der Box erklären würde. Aus diesem Grund werden weitere Strömungsmessungen durchgeführt, um die Abdichtung zu untersuchen.

Für die Messungen wird ein Probenbehälter aus Tedlar® verwendet, der mit Luft aus der CLIMPAQ befüllt wird. Für die Messung wird das Rohr mit dem Hitzdrahtanemometer im Trichter positioniert und die Entleerung des Behälters durch den Start des Ventilators begonnen. Es wird erwartet, dass nachdem der Behälter dadurch entleert wurde, die Geschwindigkeit bei einer dichten Verbindung wieder auf 0 m/s sinkt, auch wenn der Ventilator weiterhin bedient wird.

Da das Anemometer zur Volumenstromerfassung für Geschwindigkeiten größer 0,6 m/s kalibriert ist (KAPITEL 5.1.4) und diese Geschwindigkeit bei diesen Messungen nicht erreicht wird, werden die Ergebnisse nicht als Volumenstrom angegeben. Die gemessenen Werte liegen unterhalb dieser Schwelle und sind als Schätzungen zu betrachten.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Abdichtung mit wiederlösbaren Kabelbindern eine Strömungsgeschwindigkeit von etwa 0,25 m/s nicht unterschritten wird. Werden weitere Abdichtungen vorgenommen, indem unterhalb des Kabelbinders ein elastischer Dichtgummi aus PTFE angebracht wird, so sinkt die Geschwindigkeit auf 0,1 m/s. Diese niedrige Geschwindigkeit wird auch erreicht, wenn statt des Kabelbinders eine Rohrschelle aus Edelstahl mit einem darunterliegenden Dichtgummi aus PTFE verwendet wird.

Eine Reduzierung auf eine Geschwindigkeit von 0 m/s lässt sich bei laufendem Ventilator in den Versuchen nicht erreichen. Dies kann damit begründet werden, dass sich die Anschlussstelle nicht weiter abdichten lässt. Eine weitere Begründung kann sein, dass der leere Probenbehälter bei laufendem Ventilatorbetrieb bewegt wird (Flattern des Materials), was dazu führt, dass über die offene Leitung zum Trichter ein ständiger Druckausgleich erfolgt.

Abbildung 6-28 zeigt ein Foto der Abdichtung mit der Rohrschelle und dem darunter liegendem Dichtgummi. Für die sensorischen Messungen mit der dritten Version des Adapters wird diese Art der Abdichtung verwendet.

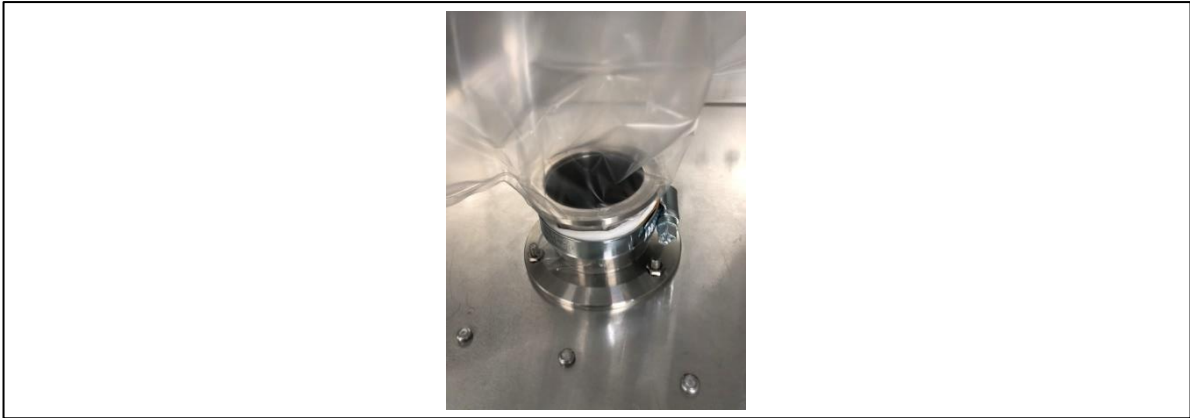


Abbildung 6-28: Verbesserung der Abdichtung an der Verbindung zwischen Probenbehälter und Rohrstutzen des Adapters (dritte Adapterversion)

### **6.5.3 Sensorische Messungen**

Wie in KAPITEL 6.4.1 und 6.5.2 beschrieben, wird der Adapter im Verlauf der Messungen baulich angepasst und optimiert. In diesem Kapitel werden zunächst die sensorischen Messungen mit manuellem Kugelhahn dargestellt (KAPITEL 6.5.3.1), dann die Messungen mit dem Magnetventil (KAPITEL 6.5.3.2) und abschließend die Messungen nach Optimierung der Abdichtung zwischen dem Probenbehälter und dem Rohrstutzen des Adapters (KAPITEL 6.5.3.3).

Die Messungen erfolgen nach der in KAPITEL 5.1 beschriebenen Versuchsdurchführung im Luftqualitätslabor der HTW Berlin.

#### **6.5.3.1 Messungen mit erster Adapterversion: manueller Kugelhahn**

Insgesamt werden sechs Vergleichsmessungen zwischen direkter Bewertung und Bewertung mithilfe des Adapters durchgeführt. Es werden ausschließlich Probenbehälter aus Nalophan® verwendet, da zum Zeitpunkt der Messungen noch kein Ofen zur Vorbehandlung von Behältern aus Tedlar® zur Verfügung steht. Die Messungen werden mit drei Produktarten durchgeführt: ein elastischer und ein holzbasierter Bodenbelag sowie Lack C (KAPITEL 5.1.6.2). Zwischen 7 und 13 Prüfende nehmen an den einzelnen Vergleichsmessungen teil, wobei immer die gleichen Prüfenden, und damit auch jeweils die gleiche Anzahl, zur Verfügung stehen.

Die Einzelergebnisse der Messungen sind in ANHANG A3 aufgeführt. In Abbildung 6-29 und Abbildung 6-30 werden die empfundene Intensität und die Hedonik gezeigt.

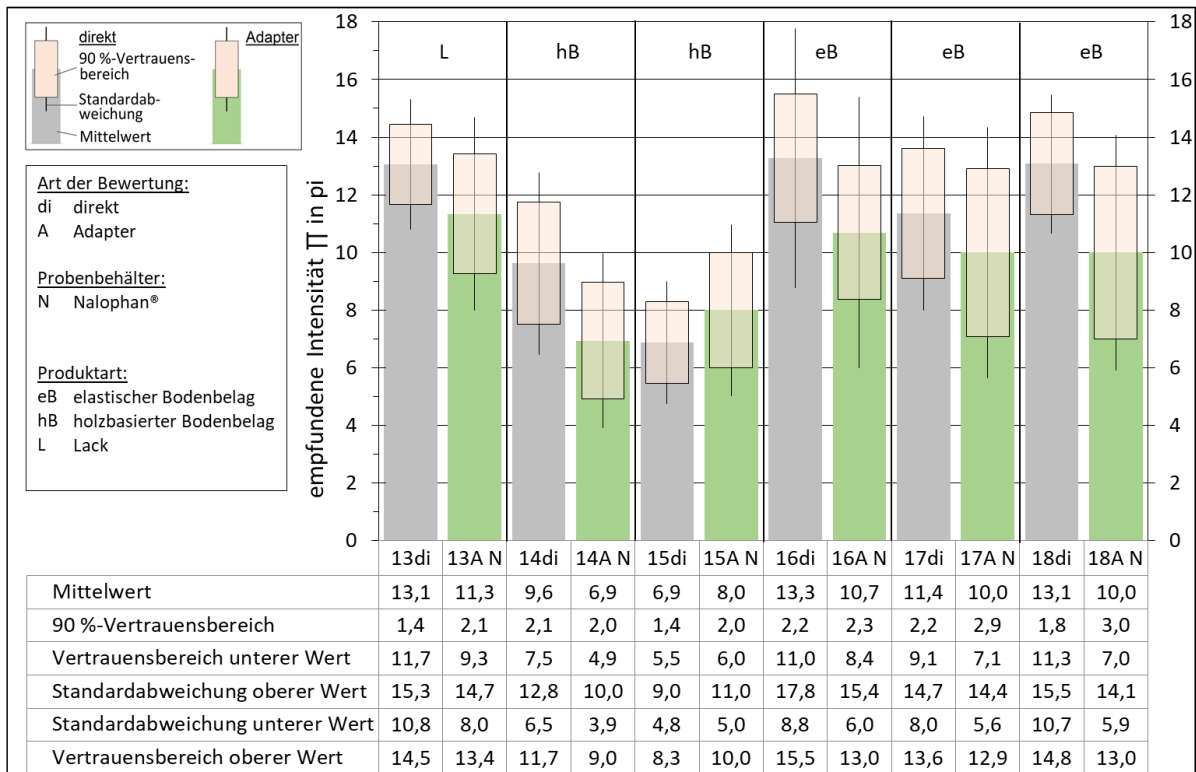


Abbildung 6-29: Empfundene Intensität eines Lackes (L), eines holzbasierten Bodenbelags (hB) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit manuellem Kugelhahn und Behältern aus Nalophan® (N)

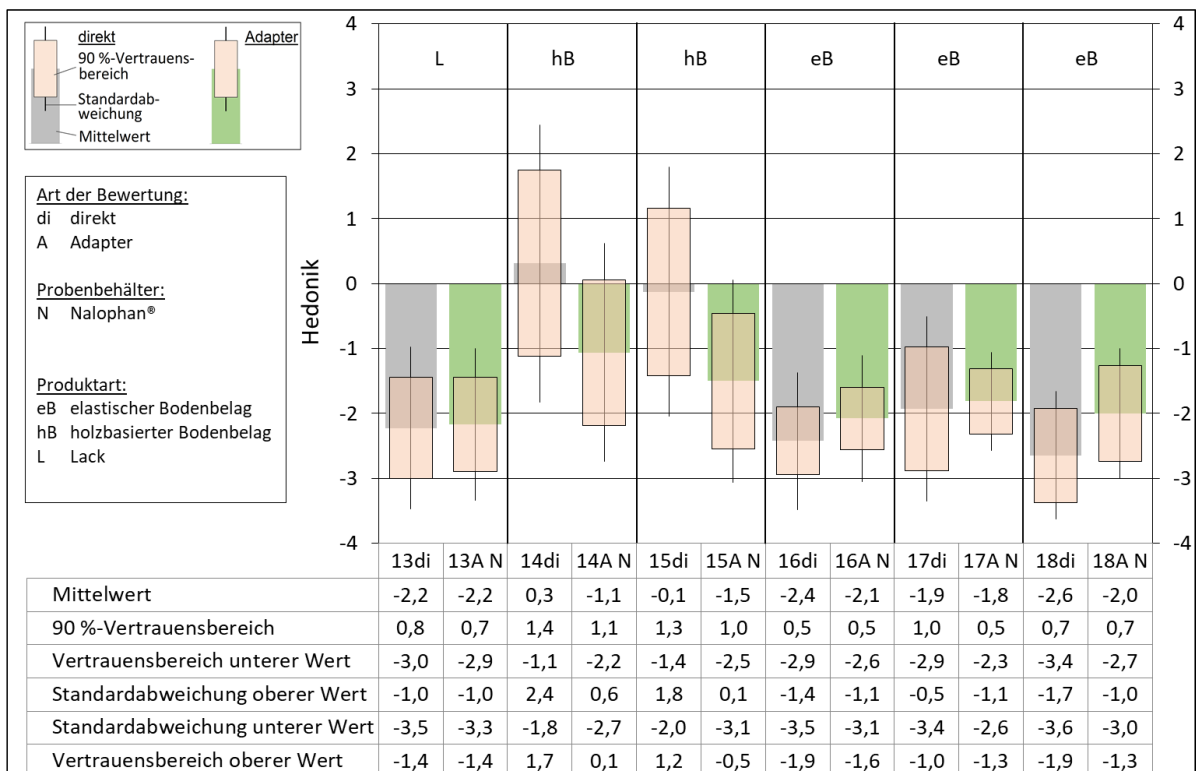


Abbildung 6-30: Hedonik eines Lackes (L), eines holzbasierten Bodenbelags (hB) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit manuellem Kugelhahn und Behältern aus Nalophan® (N)

Die untersuchten Produkte weisen empfundene Intensitäten im Bereich zwischen etwa 7 pi und 13 pi auf. Für die weitere Interpretation hilft zusätzlich zur Abbildung 6-29 die Tabelle 6-14. Dort werden die Mittelwerte der Messungen der empfundenen Intensität und ihre Differenz („Adapterbewertung“ minus „direkte Bewertung“) dargestellt. Der Vergleich der jeweils erzielten Ergebnisse mit dem Adapter und bei direkter Bewertung zeigt, dass bei fünf Messungen eine niedrigere und bei einer Messung eine höhere empfundene Intensität mit dem Adapter erzielt wird (Messung 15). Bei drei Messungen ist die Abweichung größer als  $\pm 2,0$  pi (Messung 2, 4 und 6) und damit außerhalb der Messunsicherheit des Verfahrens, was signifikant ist. Der Mittelwert aller Abweichungen beträgt -1,8 pi.

Der mit dem Adapter erreichte 90 %-Vertrauensbereich ist bei fünf der sechs Messungen größer als mit der direkten Messung. Lediglich Messung 14 erreicht einen kleineren Vertrauensbereich.

Tabelle 6-14: Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und der Adapterbewertung mit Kugelhahn (erste Adapterversion) sowie Differenzen der Mittelwerte

Messung	empfundene Intensität $\bar{I}$ in pi		
	Adapterbewertung	direktes Verfahren	Differenz: „Adapterbewertung“ - „direktes Verfahren“
13	13,1	11,3	-1,8
14	9,6	6,9	-2,7
15	6,9	8,0	1,1
16	13,3	10,7	-2,6
17	11,4	10,0	-1,4
18	13,1	10,0	-3,1
			<u>Mittelwert: -1,8</u>

Die Ergebnisse der Hedonik zeigen, dass bei vier Messungen, und zwar bei dem Lack (Messung 13) und bei den elastischen Bodenbelägen (Messung 16, 17, 18), die Hedonik am Adapter geringfügig angenehmer bis gleich wahrgenommen wird. All diese Produkte werden als unangenehm im Bereich von etwa -2 wahrgenommen. Bei den holzbasierten Produkten wird die Hedonik bei direkter Bewertung mit -0,1 und 0,3 als neutral wahrgenommen, während sie mit dem Adapter mit -1,1 und -1,5 als unangenehm wahrgenommen wird (Messung 14 und 15).

Insgesamt wird die empfundene Intensität am Adapter mit manuellem Kugelhahn etwas weniger intensiv wahrgenommen und die Hedonik wird als etwas angenehmer bis gleich, bewertet. Dies deckt sich mit dem bekannten Zusammenhang, dass weniger intensiv riechende Bauprodukte auch in ihrer Hedonik angenehmer wahrgenommen werden (KAPITEL 3.1).

### 6.5.3.2 Messungen mit zweiter Adapterversion: Magnetventil

Die Verwendung des manuellen Kugelhahns an der luftausströmenden Seite führte zu einer unerwünschten Rückströmung in den Probenbehälter des Adapters (KAPITEL 6.5.2). Diese

wird daher durch ein Magnetventil ersetzt. Die in diesem Kapitel dargestellten Messungen zeigen, wie sich der Umbau auf die sensorische Bewertung auswirkt.

Insgesamt werden neun Vergleichsmessungen der direkten Bewertung und Adapterbewertung mit Probenbehältern aus Nalophan® oder Tedlar® durchgeführt. Als Proben dienen ein elastischer und ein textiler Bodenbelag sowie Lack B. An den einzelnen Vergleichsmessungen nehmen zwischen 8 und 13 Prüfende teil, wobei es sich immer um die gleichen Prüfenden, und damit auch immer um die gleiche Anzahl, handelt.

In Abbildung 6-31 werden die Ergebnisse der empfundenen Intensität und in Abbildung 6-32 die der Hedonik dargestellt. Tabelle 6-15 zeigt die Mittelwerte der Messungen der empfundenen Intensität und ihre Differenz („Adapterbewertung“ minus „direkte Bewertung“). Die Einzeldaten können ANHANG A4 entnommen werden.

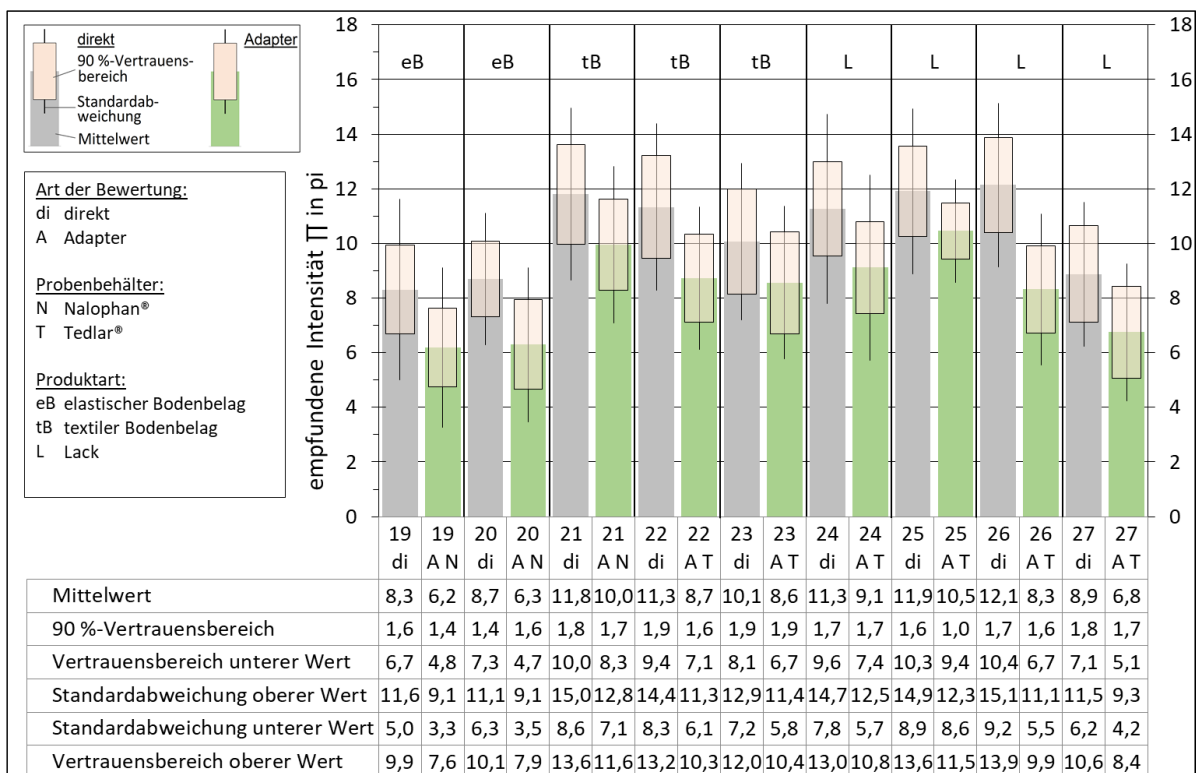


Abbildung 6-31: Empfundene Intensität eines elastischen Bodenbelags (eB), eines textilen Bodenbelags (tB) und eines Lackes (L) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil und Behältern aus Nalophan® (N) und Tedlar® (T)

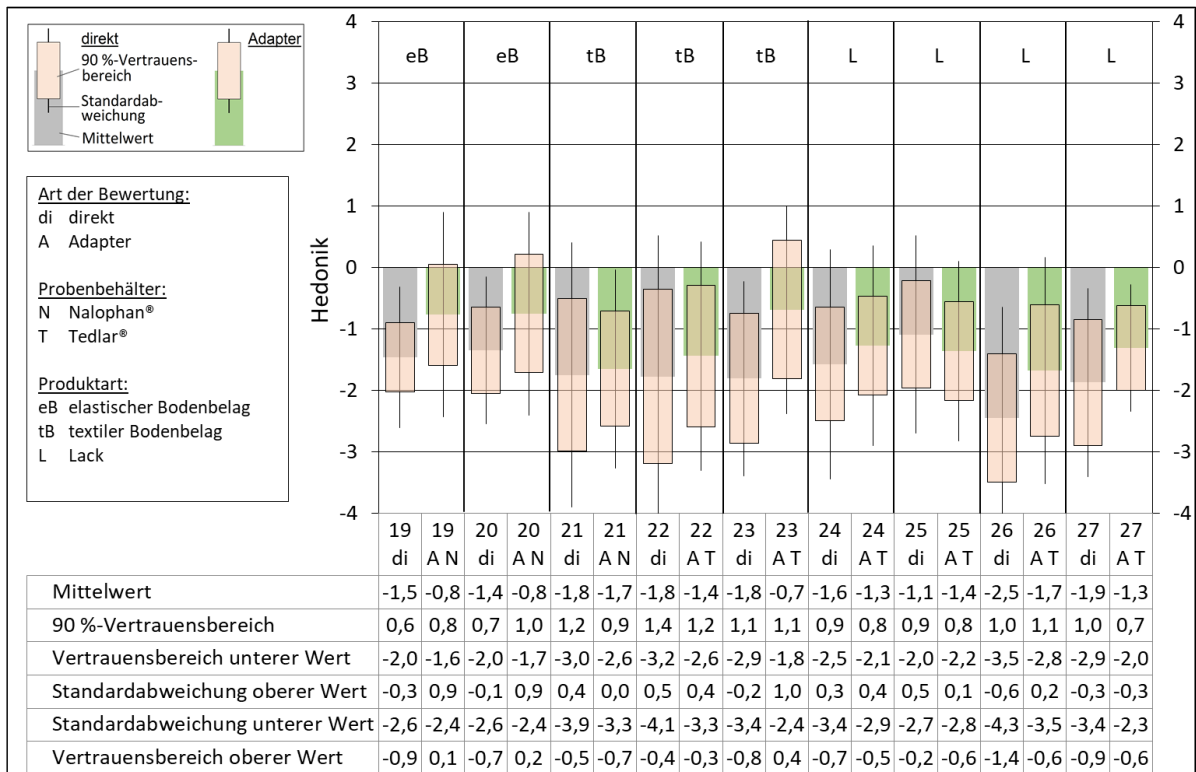


Abbildung 6-32: Hedonik eines elastischen Bodenbelags (eB), eines textilen Bodenbelags (tB) und eines Lackes (L) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil und Behältern aus Nalophan® (N) und Tedlar® (T)

Tabelle 6-15: Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und der Adapterbewertung mit Magnetventil (zweite Adapterversion) sowie Differenzen der Mittelwerte

Messung	empfundene Intensität [] in pi		
	Adapterbewertung	direktes Verfahren	Differenz: „Adapterbewertung“ - „direktes Verfahren“
19	6,2	8,3	-2,1
20	6,3	8,7	-2,4
21	10,0	11,8	-1,8
22	8,7	11,3	-2,6
23	8,6	10,1	-1,5
24	9,1	11,3	-2,2
25	10,5	11,9	-1,4
26	8,3	12,1	-3,8
27	6,8	8,9	-2,1
			<u>Mittelwert: -2,2</u>

Die untersuchten Produkte liegen im Bereich empfundener Intensitäten zwischen etwa 6 pi und 12 pi. Sie werden am Adapter alle als weniger intensiv empfunden. Bei sechs Messungen ist die Differenz der Mittelwerte der Vergleichsmessungen größer als  $\pm 2,0$  pi und ist damit signifikant (Messung 19, 20, 22, 24, 26, 27). Der aus den Abweichungen gebildete Mittelwert beträgt  $-2,2$  pi.

Der geforderte 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0$  pi wird bei allen Messungen eingehalten, womit die Messungen ausreichend genau sind. Der mit dem Adapter erreichte Vertrauensbereich ist in den meisten Fällen vergleichbar mit dem Vertrauensbereich der direkten Bewertung, wobei er bei acht der neun Messungen etwas geringer ist.

Die hedonische Wirkung aller Proben liegt etwa zwischen -1 und -2. Die mit dem Adapter ermittelten Werte sind bei acht von neun Messungen etwas positiver. Der 90 %-Vertrauensbereich von 1 wird bei vier Messungen leicht verfehlt (Messung 21, 22, 23, 26). Dies ist bei zwei Messungen bei beiden Bewertungen (Messung 22, 23), bei einer Messung lediglich bei direkter Bewertung (Messung 21) und bei einer weiteren Messung bei der Adapterbewertung (Messung 26) erkennbar.

Insgesamt zeigt sich, ähnlich wie bei den Messungen mit dem manuellen Kugelhahn (KAPITEL 6.5.3.1), dass mit dem Adapter etwas geringere empfundene Intensitäten als bei direkter Messung erzielt werden. Das Magnetventil wirkt sich jedoch positiv auf die Einhaltung des 90 %-Vertrauensbereichs von  $\pm 2,0$  pi aus. Der erreichte Vertrauensbereich ist bei direkter Bewertung und bei Adapterbewertung immer ähnlich, was vermuten lässt, dass den einzelnen Prüfenden nun Probenluft in gleichbleibender Qualität dargeboten wird. Die Rückströmung und damit eine Verdünnung mit Umgebungsluft werden verhindert (KAPITEL 6.5.2.1).

Ein Einfluss des Materials der Probebehälter kann in den Messungen nicht festgestellt werden. Mit Ausnahme von Messung 26, die eine ungewöhnlich hohe Mittelwertdifferenz zeigt, werden mit beiden Behältermaterialien ähnliche Differenzen zwischen direkter Bewertung und Adapterbewertung erreicht. Auch die Art der Produkte, also ob elastischer Bodenbelag oder Lack, hat keinen Einfluss auf die Bewertung.

Da die Differenzen zwischen direkter Bewertung und Adapterbewertung nach Einbau des Magnetventils nicht reduziert werden können, wird der Adapter weiter untersucht und die Abdichtung zwischen Probenbehältern und Rohrstutzen verbessert.

### **6.5.3.3 Messungen mit dritter Adapterversion: optimierte Abdichtung**

Die Messungen in diesem Kapitel zeigen die Vergleichsmessungen mit einer optimierten Abdichtung an der Verbindungsstelle zwischen den Probenbehältern und dem Rohrstutzen des Adapters (KAPITEL 6.5.2.2).

Als Produktgruppe werden der Lack B und ein elastischer Bodenbelag verwendet und als Probenbehälter dienen Probenbehälter aus Tedlar®. Es hat sich gezeigt, dass diese aufgrund der angeschweißten Hälse am Rohrstutzen besser befestigt werden können (Kapitel 6.5.1). An den einzelnen Vergleichsmessungen nehmen zwischen 9 und 13 Prüfende teil, wobei es sich immer um die gleichen Prüfenden, und damit auch immer um die gleiche Anzahl, handelt.

Abbildung 6-33 zeigt die Ergebnisse der empfundenen Intensität und Abbildung 6-34 die Ergebnisse der Hedonik. In Tabelle 6-16 werden die Mittelwerte der Messungen der empfundenen Intensität noch einmal auszugsweise mit ihrer Differenz („Adapterbewertung“ minus „direkte Bewertung“) dargestellt. Die Einzelergebnisse werden in ANHANG A5 aufgeführt.

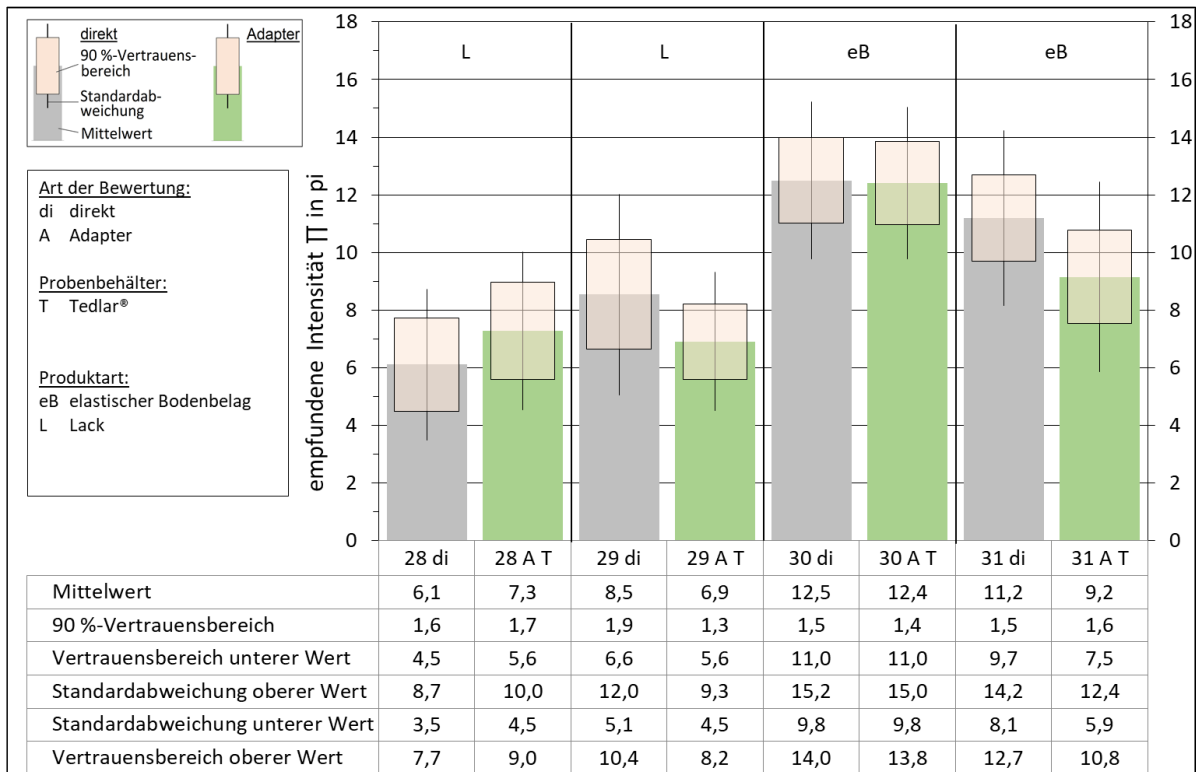


Abbildung 6-33: Empfundene Intensität eines Lackes (L) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil, optimierter Abdichtung und Behältern aus Tedlar® (T)

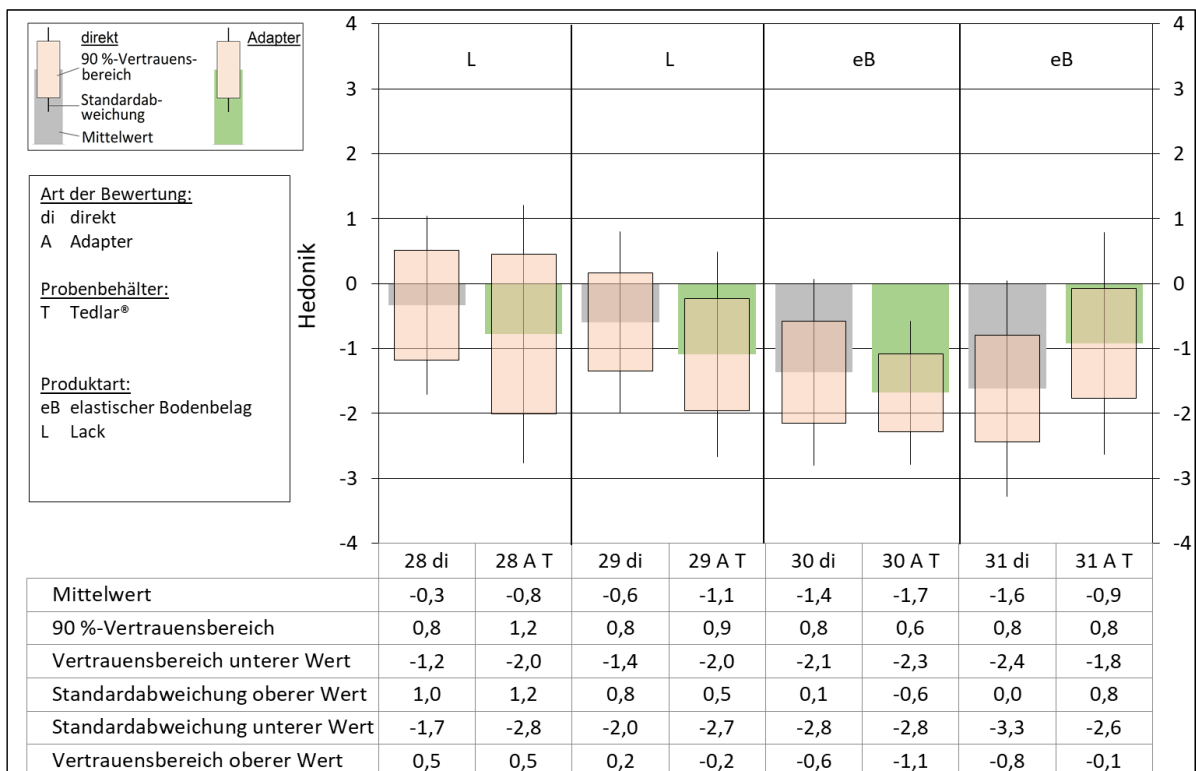


Abbildung 6-34: Hedonik eines Lackes (L) und eines elastischen Bodenbelags (eB) ermittelt mit dem direkten Verfahren (di) und unter Verwendung des Adapters (A) mit Magnetventil, optimierter Abdichtung und Behältern aus Tedlar® (T)

Tabelle 6-16: Mittelwerte der empfundenen Intensität ermittelt mit dem direkten Verfahren und der Adapterbewertung mit optimierter Abdichtung (dritte Adapterversion) sowie Differenzen der Mittelwerte

Messung	empfundene Intensität $[\pi]$ in $\pi_i$		
	Adapterbewertung	direktes Verfahren	Differenz: „Adapterbewertung“ - „direktes Verfahren“
28	7,3	6,1	1,2
29	6,9	8,5	-1,6
30	12,4	12,5	-0,1
31	9,2	11,2	-2,0
			<u>Mittelwert: -0,6</u>

Es werden vier Produkte untersucht, deren empfundene Intensitäten im Bereich zwischen 6  $\pi_i$  und 12  $\pi_i$  liegen. Die mit dem Adapter bestimmte empfundene Intensität ist in drei Messungen bei direkter Bewertung geringer (Messung 29, 30, 31). Dabei unterscheidet sich die Bewertung bei einer der Messungen (Messung 30) um lediglich 0,1  $\pi_i$ , weshalb dies als gleich groß bewertet wird. In Messung 28 wird am Adapter eine etwas höhere empfundene Intensität erreicht. Die Differenzen sind bei allen Messungen im Bereich von  $\pm 2,0 \pi_i$  und damit im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens. Sie sind daher als nicht signifikant zu bewerten.

Sämtliche Messungen halten zudem in Bezug auf die empfundene Intensität den 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0 \pi_i$  ein und sind damit ausreichend genau. Der mit dem Adapter erreichte Vertrauensbereich ist vergleichbar mit dem Vertrauensbereich der direkten Messungen, wobei in zwei Messungen etwas höhere und in zwei Messungen ein etwas geringerer Wert ermittelt wird.

Die Hedonik der Probenluft wird in dieser Messreihe bei drei von vier Messungen (Messung 28, 29, 30) als etwas unangenehmer bewertet. Nur bei einer Adapterbewertung (Messung 28) wird der 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 1$  verfehlt.

Insgesamt wird damit in dieser Messreihe eine hohe Vergleichbarkeit der Messergebnisse erzielt.

#### **6.5.3.4 Schlussfolgerungen zu den sensorischen Messungen**

Mit dem direkten Bewertungsverfahren werden tendenziell etwas höhere empfundene Intensitäten ermittelt als bei einer Bewertung unter Verwendung des Adapters.

Mit dem Einsatz eines Magnetventils statt eines manuellen Kugelhahns wird zwar keine Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen direkter Bewertung und Adapterbewertung erreicht, jedoch kann der 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0 \pi_i$  bei allen Messungen eingehalten werden. Mit dem manuellen Kugelhahn wird dieser Bereich bei fast allen Messungen nicht erreicht. Dies deutet darauf hin, dass allen Prüfenden Probenluft in gleichbleibender Qualität dargeboten wird, da eine Rückströmung nun verhindert wird (Kapitel 6.5.2.1).

Nach Optimierung der Abdichtung sind die Messungen der empfundenen Intensität bei direkter Bewertung und Adapterbewertung vergleichbar. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens. Der Adapter wird daher in seiner dritten Version für sensorische Messungen als geeignet angesehen.

Die mit dem Adapter dargebotene Probenluft wird in den Messungen mit dem Kugelhahn und dem Magnetventil in ihrer Hedonik häufig als leicht angenehmer bewertet. Dies bestätigt den bekannten Zusammenhang, dass Bauprodukte mit niedriger empfundener Intensität auch angenehmer bewertet werden (KAPITEL 4.2.1).

## **6.6 Auswertung und Diskussion**

Bei der Entwicklung des Adapters wird zunächst getestet, ob neben den standardmäßig aus Nalophan® und Tedlar® verwendeten flexiblen Probenbehältern, auch solche mit fester Form geeignet sind. Zu diesem Zweck wird in KAPITEL 6.3.2 ein Gefäß aus Glas getestet, welches mit Probenluft aus der Emissionsprüfkammer gefüllt wird. Vergleichende Messungen der VOC-Konzentrationen zeigen, dass im Glasgefäß eine hohe Wiederfindungsrate der Substanzen im Vergleich zur Konzentration in der Emissionsprüfkammer erreicht werden kann: 100 % im durchströmten Glasgefäß und 92 bis 95 % nach Zustromstopp. Die für die Arbeit festgelegte Anforderung an die Wiederfindungsrate von 80 % im Vergleich zur Emissionsprüfkammer wird damit weit übertroffen. Dieses Ergebnis wurde auch so erwartet, da Glas gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ein für den Kontakt mit Probenluft zugelassenes Material ist (KAPITEL 3.2.3.1). In den daran anschließenden sensorischen Messungen erwies sich ein fester Probenbehälter jedoch als ungeeignet, da eine Darbietung von Probenluft ohne das Einströmen von Umgebungsluft während der Probenahme nicht ermöglicht werden konnte. Die mithilfe des Adapters bewertete empfundene Intensität ist deutlich geringer als bei einer direkten Bewertung und die Hedonik wird als angenehmer empfunden.

Für den Bau des Adapters wird daher die Verwendung flexibler Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar® vorgesehen (KAPITEL 3.2.3.2). Die Technik des Adapters lehnt sich an die derzeit verfügbaren Darbietungssysteme an, bei denen ein Ventilator von außen Druck auf den Probenbehälter erzeugt und die darin befindliche Probenluft so zu einem angeschlossenen Trichter transportiert wird. Im Unterschied zu den aktuell verfügbaren Darbietungssystemen, die eine separate Einrichtung bilden, wird der Adapter dauerhaft zwischen der Emissionsprüfkammer und dem Trichter positioniert und ermöglicht eine abwechselnde Sammlung und Darbietung. Damit soll ein Verlust geruchsaktiver Substanzen durch Verringerung der Lagerungszeit vermieden werden.

VOC-Messungen in KAPITEL 6.3.3.3 und 6.5.1 zeigen die Eignung der für den Adapter hergestellten etwa 20 Liter großen Probenbehälter. In Bezug auf die VOC-Konzentrationen beträgt die Wiederfindung für die meisten Substanzen in den Behältern im Vergleich zur Emissionsprüfkammer über 90 %. Ein Unterschied bei der Verwendung von Nalophan® oder Tedlar® kann nicht festgestellt werden, womit beide Behältermaterialien sich als gleich gut geeignet erweisen.

Der Adapter wird gemäß KAPITEL 6.3.4, Abbildung 6-16 gebaut und in seiner Anwendung in VOC-Messungen, Volumenstrommessungen und sensorischen Messungen getestet.

Bei den VOC-Messungen (KAPITEL 6.5.1) werden hohe Wiederfindungsraten der Substanzen von 90 bis 100 % im Vergleich zu den Substanzkonzentrationen in der Emissionsprüfkammer erreicht. Damit wird die für diese Arbeit festgelegte Anforderung von 80 % deutlich erfüllt. Die Probenluft im Adapter ist teilweise identisch mit der Probenluft in der Prüfkammer.

Die Volumenstrommessungen am Trichter des Adapters zeigen, dass ein Luftvolumenstrom von etwa 0,9 l/s über einen Zeitraum von 12 bis 14 Sekunden dargeboten werden kann (KAPITEL 6.5.2). Bei den Messungen wird aufgrund einer Rückströmung von Umgebungsluft in den Probenbehälter und wegen Undichtigkeiten ein Optimierungsbedarf aufgedeckt, womit letztlich in den sensorischen Messungen (KAPITEL 6.5.3) insgesamt drei Versionen getestet werden:

- 1. Version: Einsatz eines manuellen Kugelhahns an der luftausströmenden Seite,
- 2. Version: Einsatz eines Magnetventils an der luftausströmenden Seite,
- 3. Version: Optimierung der Abdichtung des Probenbehälters im Adapter.

In Abbildung 6-35 werden die Ergebnisse der Messungen der empfundenen Intensität vergleichend dargestellt. Die X-Achse zeigt die ermittelten Werte bei der Verwendung des Darbietungssystems im Standardverfahren gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021), also die Ergebnisse der in KAPITEL 6.1 vorgestellten Messungen, sowie die Ergebnisse der Messungen mit dem Adapter in den KAPITELN 6.5.3.1 bis 6.5.3.3. Die Y-Achse zeigt im Vergleich die Werte bei der direkten Messung. Würde bei beiden Messungen derselbe Wert der empfundenen Intensität gemessen werden, so läge ein Bewertungspunkt auf der dargestellten Diagonale. Die Messunsicherheit des Messverfahrens von  $\pm 2,0$  pi wird entlang dieser Diagonale als grauer Bereich dargestellt.

Insgesamt werden neun Vergleichsmessungen mit dem Standardverfahren und 19 mit dem Adapter durchgeführt. Für die drei Versionen des Adapters wird dabei jeweils eine andere Markierung gewählt.

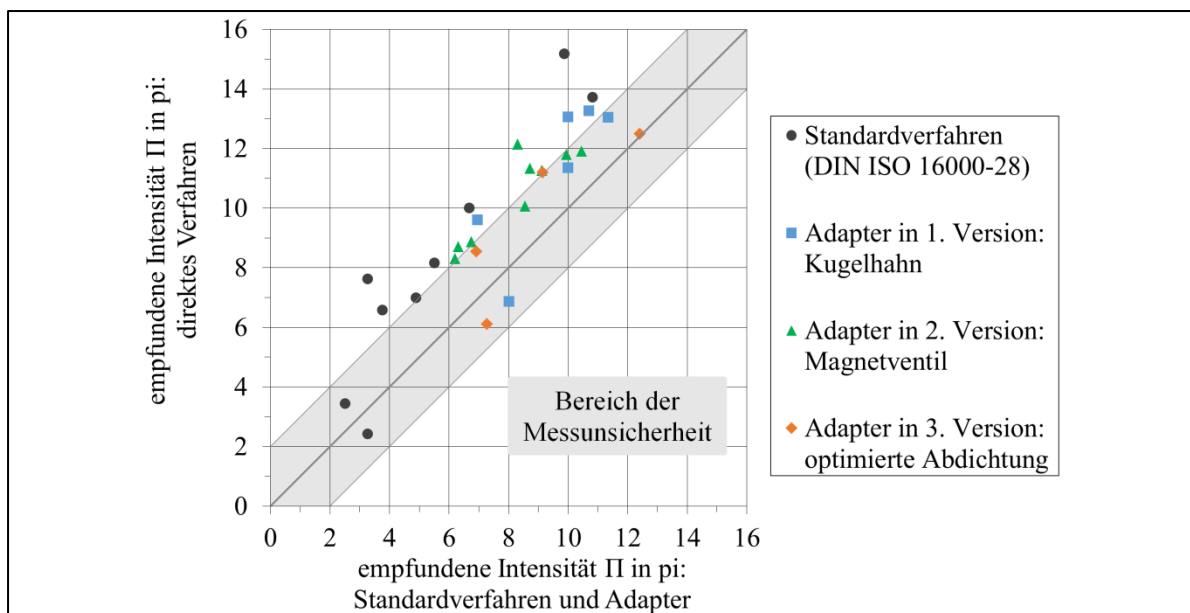


Abbildung 6-35: Vergleich der direkten Bewertungen der empfundenen Intensität mit der Bewertung unter Verwendung des Adapters und Probenahmebehältern

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass bei Anwendung des direkten Verfahrens meist etwas höhere empfundene Intensitäten erreicht werden als bei Anwendung des Standardverfahrens oder des Adapters. Die mit dem Adapter erzielten Ergebnisse, liegen dabei näher an den Messergebnissen des direkten Verfahrens, was das Ziel der Entwicklung war. Deutlich mehr Bewertungspunkte befinden sich innerhalb der Messunsicherheit des Verfahrens.

Tabelle 6-17 stellt die mittleren Abweichungen des Standardverfahrens und des Adapters im Vergleich zur direkten Bewertung zusammenfassend dar.

*Tabelle 6-17: Mittelwerte der Differenzen der empfundenen Intensität bei Anwendung des Standardverfahrens und der einzelnen Adapterversionen.*

<b>Vergleichsmessung</b>	<b>Mittelwert der Differenz der empfundenen Intensität <math>\bar{\pi}</math> in <math>\pi_i</math> „Standard- bzw. Adapterbewertung“ - „direktes Verfahren“</b>
Standardverfahren (DIN ISO 16000-28)	-2,6
Adapter in 1. Version: Kugelhahn	-1,8
Adapter in 2. Version: Magnetventil	-2,2
Adapter in 3. Version: optimierte Abdichtung	-0,6

Mit dem Adapter in seiner ersten Version kann die mittlere Abweichung im Vergleich zum direkten Verfahren von -2,6  $\pi_i$  auf -1,8  $\pi_i$  reduziert werden, was innerhalb der Messunsicherheit des Verfahrens von 2,0  $\pi_i$  liegt. Allerdings ist der 90 %-Vertrauensbereich, bei gleicher Anzahl an Prüfenden in den einzelnen Vergleichsmessungen, mit dem Adapter in fast allen Fällen größer als bei Anwendung der direkten Messung (KAPITEL 6.5.3.1). Bei Verwendung eines Magnetventils zur Verhinderung der Rückströmung (2. Version) wird zwar die Abweichung zwischen direkter Bewertung und Adapterbewertung mit -2,2  $\pi_i$  nicht weiter verbessert und erhöht sich sogar, allerdings ist der 90 %-Vertrauensbereich dieser Messungen nun ähnlich hoch wie bei Anwendung der direkten Messung und dabei häufig sogar etwas geringer (KAPITEL 6.5.3.2). Mit einer zusätzlichen optimierten Abdichtung des Probenbehälters im Adapter lässt sich die mittlere Abweichung im Vergleich zum direkten Verfahren auf einen Wert von -0,6  $\pi_i$  reduzieren und alle vier Vergleichsmessungen liegen im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens  $\pm 2,0 \pi_i$ . Zudem ist der 90 %-Vertrauensbereich der Adaptermessungen ähnlich groß bei der direkten Messung (KAPITEL 6.5.3.3). Aus zeitlichen Gründen konnten mit dieser Version nur vier Messungen durchgeführt werden.

Der Vergleich der hedonischen Wirkung bei direkter Bewertung im Vergleich zur Bewertung mit dem Adapter zeigt häufig eine leicht angenehmere Bewertung. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Intensität, denn Bauprodukte mit niedrigerer empfundener Intensität werden häufig angenehmer bewertet.

Insgesamt werden bei der Geruchsbewertung mit dem Adapter im Vergleich zum Standardverfahren Ergebnisse erreicht, die näher an denen aus direkter Messung liegen, was das Ziel der Entwicklung war. Nach Optimierung der Dichtheit werden in den dargestellten Messungen dabei die besten Ergebnisse erzielt. Der Adapter sollte im weiteren Verlauf, außerhalb der Untersuchungen für diese Dissertation, in seiner Anwendung erprobt werden.

## 7 Vereinfachte Bewertung der empfundenen Intensität

Das Ziel der Untersuchungen ist, wie in KAPITEL 2.2 beschrieben, die Vereinfachung der Bewertung der empfundenen Intensität.

Der AgBB hält eine unzumutbare Belästigung durch einen Geruch für gegeben, wenn mehr als 30 % einer ungeschulten Personengruppe diesen als unzumutbar bewerten. Als vorläufigen Bewertungsmaßstab und aus gesundheitlichen Aspekten leitet er eine Geruchsintensität in Höhe von 7 pi nach 28 Tagen ab (AgBB, 2021) und empfiehlt mit einer geschulten Prüfergruppe die Ermittlung der empfundenen Intensität  $\Pi$  gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) durchzuführen (KAPITEL 3.2.4 und 4.2.1).

In dieser Arbeit wird untersucht, ob und wie mithilfe einer vereinfachten Messung eingeordnet werden kann, wie die empfundene Intensität im Vergleich zu einer Acetonintensität von 7 pi wahrgenommen wird. Ausgehend von der vorgeschlagenen Bewertungsweise des AgBBs wird zur Auswertung der Messungen ebenfalls davon ausgegangen, dass eine unzumutbare Belästigung vorliegt, wenn mehr als 30 % die Probe intensiver als 7 pi wahrnehmen. Die Prüfenden haben bei ihrer Entscheidung drei Möglichkeiten: Sie können die Intensität stärker, gleich stark oder schwächer als die dargebotene Acetonintensität empfinden.

Für die Auswertung ist es dabei entscheidend, ob:

- eine Probe stärker riecht, womit das Bauprodukt für den Innenraum geruchlich ungeeignet wäre, oder
- schwächer bis gleich stark, womit das Bauprodukt für den Innenraum geruchlich geeignet wäre.

Dies ergibt letztlich eine Zweibereichsabfrage (binominale Skala). Diese Abfrage wird im Folgenden als „Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage“ bezeichnet.

In diesem Kapitel werden die Messungen beschrieben, die zeigen sollen, ob und unter welchen Voraussetzungen die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage geeignet ist. Insgesamt finden drei Versuchsreihen im Luftqualitätslabor der HTW Berlin statt. Diese erfolgen immer nach dem gleichen Vorgehen, indem zunächst die Abfrage durchgeführt und anschließend der Wert der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) ermittelt wird. Zur Beurteilung der Eignung der vereinfachten Methode werden die Ergebnisse beider Messungen einander gegenübergestellt.

Die folgenden drei Versuchsreihen werden durchgeführt:

- Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden
- Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden, wobei geschulte Prüfende die Messungen gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) durchführen
- Laborringversuch mit geschulten Prüfenden

In allen Versuchsreihen wird auch die Hedonik ermittelt (KAPITEL 3.2.2.3). Mit den ungeschulten Prüfenden werden zudem die Akzeptanz und Zumutbarkeit hinzugenommen (KAPITEL 3.2.2.1 und 3.2.2.4). Damit sollen, ähnlich wie in KAPITEL 4.2.2, unterschiedliche

sensorische Messgrößen miteinander verglichen werden, um mögliche Zusammenhänge zu erforschen.

In KAPITEL 7.1 werden der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung der einzelnen Versuchsreihen beschrieben und in KAPITEL 7.2 die Ergebnisse dargestellt.

In KAPITEL 7.3 fließen die Ergebnisse aller Versuchsreihen in eine Auswertung und Diskussion ein.

## 7.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In Abbildung 7-1 wird die einleitend beschriebene Messung und Bewertung mit der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage dargestellt.

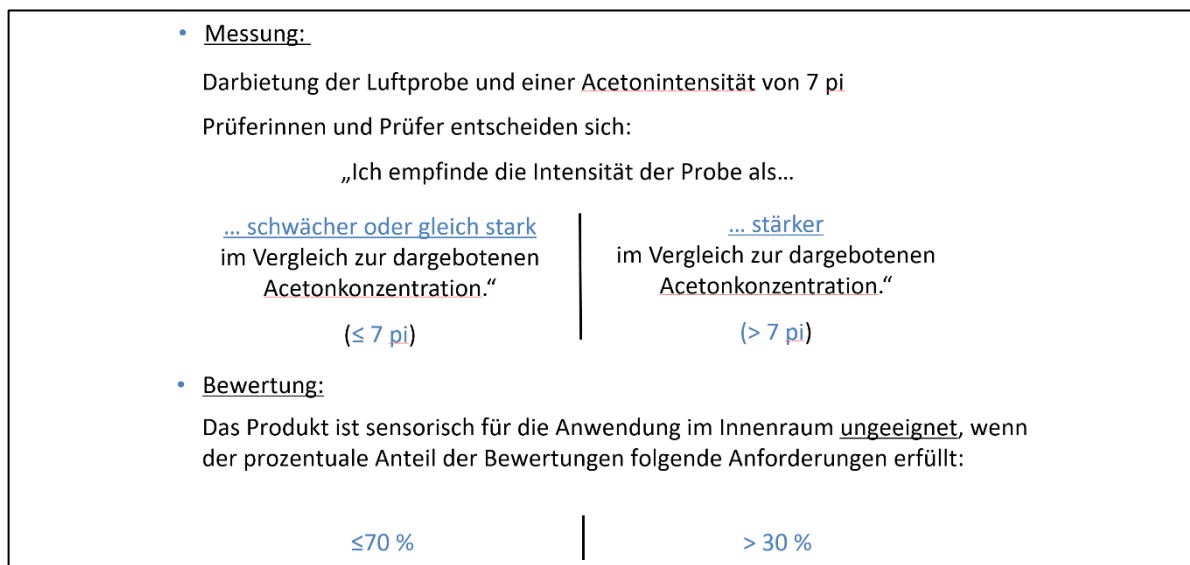


Abbildung 7-1: Messung und Bewertung mit der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage

In Vorbereitung auf die Messung wird eine empfundene Intensität des Acetons von 7 pi, an einem der Trichter des Vergleichsmaßstabes eingestellt. Dies entspricht einer Acetonkonzentration von 160 mg/m<sup>3</sup>. An der HTW Berlin wird einer der beiden Trichter verwendet, der sonst für die Einstellung einer unbekanntes Intensität zum Testen der Riechfähigkeit der Prüfenden genutzt wird (KAPITEL 3.2.2.2). Die Prüfenden sind es gewohnt, dass ihnen die Intensität der Gerüche an diesen Trichtern unbekannt ist. Für eine einwandfreie Durchführung der Messung ist es entscheidend, dass der Wert der Acetonintensität den Prüfenden unbekannt bleibt.

Im Folgenden werden die Besonderheiten im Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung der drei durchgeführten Versuchsreihen detailliert beschrieben.

### 7.1.1 Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden

Die Messungen mit geschulten Prüfenden finden über einen Zeitraum von über zwei Jahren statt. In den meisten Fällen erfolgen Messungen mit elastischen Bodenbelägen und holzbasierten Produkten wie in KAPITEL 5.1.6.1 beschrieben. Die untersuchte Produktpalette umfasst zudem die Lacke B und C, deren Vorbereitung und Beladung in KAPITEL 5.1.6.2 beschrieben wird.

Darüber hinaus werden Teppichböden aus sensorischen Messungen vorhergehender Projekte verwendet, um eine weitere Produktgruppe mit einer anderen Geruchsqualität hinzuzunehmen. Die Teppichböden wiesen noch immer einen Geruch auf, da sie kühl und lichtgeschützt in Aluminiumfolie verpackt eingelagert waren. Die gewählte flächenspezifische Luftdurchflussrate  $q_A$  für die Teppichböden beträgt wie bei den anderen sensorischen Messungen mit Bodenbelägen  $1,25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ .

In Tabelle 7-1 werden die Produkte und die Anzahl der durchgeführten Messungen zusammenfassend dargestellt. Insgesamt stehen 32 Produkte in 154 Messungen zur Verfügung. Im ANHANG B findet sich ein Überblick mit den Ergebnissen sämtlicher Messungen.

Tabelle 7-1: Überblick der Produkte und Messungen für die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden

Produktgruppe	Produktart	Anzahl Produkte	Anzahl Messungen
textile Bodenbeläge	Teppichboden	5	16
elastische Bodenbeläge	PVC	4	13
	Kunststoff	3	15
	Kautschuk	5	22
	Linoleum	2	10
	Kork	1	1
		$\Sigma 15$	$\Sigma 61$
holzbasierte Produkte	Laminat	2	20
	Parkett	3	30
	Furnierboden	4	14
	Wand-/Deckenpaneel	1	8
		$\Sigma 10$	$\Sigma 72$
Lack	Lack B	1	3
	Lack C	1	2
<u>Summe</u>		<u>32</u>	<u>154</u>

Zu Beginn jeder Messung führen die geschulten Prüfenden zunächst die Leistungsprüfung durch, bei der die empfundene Intensität zweier unbekannter Acetonkonzentrationen zu ermitteln ist (KAPITEL 3.2.2.2). Im weiteren Verlauf werden nur die Prüfergebnisse der Prüfenden berücksichtigt, die um nicht mehr als  $\pm 2 \text{ pi}$  von der vorgegebenen Acetonintensität abweichen. Prüfende, die die Leistungsprüfung an einem Messtag nicht bestehen, dürfen zu Übungszwecken weiterhin teilnehmen.

Nach der Leistungsprüfung erfolgt die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage. Im Anschluss daran ermitteln die Prüfenden die Hedonik und die empfundene Intensität der dargebotenen Proben gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021).

Für eine korrekte Durchführung der Messungen ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Prüflitung die Prüfenden nicht auf vermeintlich „unlogische“ Ergebnisse hinweist. Das folgende Beispiel dient zur Erläuterung: Eine Person gibt in der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage an, dass sie die Probenluft im Vergleich zur vorgegebenen Acetonintensität als weniger intensiv empfindet. Bei der Bestimmung des Wertes für die empfundene Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) gibt sie jedoch einen Wert in Höhe von  $10 \text{ pi}$  an. Um eine Verfälschung der Messergebnisse zu vermeiden und später bewerten zu können, ob die

Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage geeignet ist, darf diese Person nicht darauf hingewiesen werden. Auch wenn die Prüfenden geschult sind, die vorgegebene Acetonintensität gut einschätzen zu können, ist die Ungewissheit über die tatsächlich vorgegebene Höhe von großer Bedeutung.

Tabelle 7-2 zeigt die Dokumentation durch die Prüfleitung der drei möglichen Bewertungen durch Prüfende. Geben die Prüfenden an, dass sie den Geruch der Probe im Vergleich zum Aceton als stärker empfinden, so wird entsprechend ein Kreuz (X) gesetzt. Bei der Angabe, dass die Probe schwächer riecht, wird das Kreuz in die andere Spalte gesetzt. Die Ergänzung mit einem Gleich-Zeichen (=) bedeutet, dass die Probe als gleich stark empfunden wird. Dies dient als zusätzliche Information für die Auswertung im Rahmen dieser Arbeit.

Da zu Beginn der Versuche nicht feststand, dass die zusätzliche Information durch Ergänzung des Gleich-Zeichens für die Auswertung interessant sein wird, wurden die ersten Messungen (insgesamt 30 der 154 Messungen) ohne Protokollierung dieser Abfrage durchgeführt.

Tabelle 7-2: Dokumentation der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit den drei möglichen Bewertungen

Prüfer/-in	Ich empfinde den Geruch der Probe im Vergleich zum Aceton ...	
	... stärker.	... weniger oder gleich stark.
1	X	
2		X
3		X=

### 7.1.2 Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden

Die Messungen mit ungeschulten Prüfenden finden an vier Messtagen in einem Zeitraum von vier Wochen statt. Insgesamt werden an jedem Messtag vier Proben, und damit insgesamt 16 Proben, untersucht. Einen Überblick zu den untersuchten Proben zeigt Tabelle 7-3.

Tabelle 7-3: Überblick der Produkte und Messungen für die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden

Produktgruppe	Produktart	Anzahl Produkte = Anzahl Messungen
elastische Bodenbeläge	PVC	2
	Kunststoff	3
	Kautschuk	2
	Linoleum	2
	Kork	1
		} $\Sigma$ 10
holzbaasierte Produkte	Laminat	1
	Parkett	2
	Furnierboden	1
	Wand-/Deckenpaneel	1
		} $\Sigma$ 5
Lack	Lack C	1
<u>Summe</u>		<u>16</u>

An den vier Messtagen nehmen jeweils zwischen 23 und 40 ungeschulte Prüfende teil. Personen mit Erkältungssymptomen, akuten Allergien oder solche, denen Anosmien bekannt sind, dürfen nicht teilnehmen. Auch Personen, die beim Riechen der Probenluft oder des

Acetongemisches keinen Geruch wahrgenommen hätten, wären von den Messungen ausgeschlossen worden. Dies war jedoch nicht der Fall.

Neben der Durchführung der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage bewerten die ungeschulten Prüfenden die Messgrößen Hedonik, Akzeptanz und Zumutbarkeit. Die Hinzunahme der Messgrößen Akzeptanz und Zumutbarkeit erfolgt, da insgesamt wenige Messungen vorliegen, um die vorläufig festgelegte Zumutbarkeitsschwelle von 7 pi gemäß AgBB-Schema zu validieren (KAPITEL 4.2.1). Mit den Messungen im Rahmen dieser Dissertation soll hier ein Beitrag geleistet werden.

Für die Bewertung der Produkte verwenden die ungeschulten Prüfenden den in Abbildung 7-2 dargestellten Fragebogen, der mit Excel angefertigt wurde. Seine Entwicklung erfolgte in Anlehnung an die in KAPITEL 4.2.1, ABBILDUNG 4-7 dargestellte Oberfläche der Datenerfassungssoftware (B. Müller et al., 2011).

**Hedonik**  
*Stellen Sie sich vor, Sie würden mehrere Stunden täglich der Luft aus der Probe ausgesetzt.  
 Wie angenehm ist die Luftqualität (äußerst unangenehm (-4), weder angenehm noch unangenehm (0) oder äußerst angenehm (+4)) ?*

0

< ————— >

-4      -3      -2      -1      0      1      2      3      4

**Akzeptanz**  
*Stellen Sie sich vor, Sie wären diesem Geruch im Alltag ausgesetzt. Würden Sie diesen Geruch als akzeptabel empfinden?*

< ————— >

klar unakzeptabel      gerade unakzeptabel      gerade akzeptabel      klar akzeptabel

weder akzeptabel, noch unakzeptabel

Ich halte die Luftqualität als tägliche Arbeitsumgebung **für unzumutbar!**

**Probenluft**  
*Riecht die Probenluft stärker, gleich stark oder schwächer als die Referenzintensität?*

**gleich stark**

< ————— >

schwächer      gleich stark      stärker

Abbildung 7-2: Excel-Fragebogen für ungeschulte Prüfende

Die Prüfenden beginnen mit der Bewertung der Hedonik auf einer Skala von -4 bis +4 (KAPITEL 3.2.2.3). Dann bewerten sie die Akzeptanz auf der Skala von -1 bis 1, wobei die Wahl von Skalenteilen in 0,05er Schritten möglich ist, jedoch die Skalenteile nicht sichtbar sind (KAPITEL 3.2.2.1). Zur besseren Orientierung werden wichtige Skalenteile semantisch belegt. Als nächstes wird nach der Zumutbarkeit der Luftprobe gefragt (KAPITEL 3.2.2.4). Wird die Luftprobe als unzumutbar empfunden, so müssen die Prüfenden ein Häkchen setzen. Abschließend bewerten die Prüfenden mit einem Schieberegler, ob sie die Probenluft als stärker, gleich stark oder schwächer als die vorgegebene Acetonintensität empfinden.

Einmal abgegebene Bewertungen dürfen nicht mehr korrigiert werden. Damit wird vermieden, dass die Prüfenden die abgegebenen Messgrößen untereinander vergleichen und einer logischen Prüfung unterziehen. Beispielsweise stellen Prüfende die Frage, ob denn ein Geruch der unangenehm wirkt, dennoch akzeptabel sein kann. Die Prüfleitung weist ausdrücklich darauf hin, dass keine Zusammenhänge zwischen den einzelnen Fragestellungen entwickelt werden sollen.

Am Folgetag der Messungen mit den ungeschulten Prüfenden werden Messungen mit der geschulten Prüfergruppe durchgeführt. Die Ergebnisse der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit den ungeschulten Prüfenden können so mit dem ermittelten Wert der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) verglichen werden. Die aufeinanderfolgenden zeitnahen Prüfungen mit beiden Prüfergruppen sollen sicherstellen, dass die sensorischen Eigenschaften der Proben möglichst unverändert sind. Die geschulte Prüfergruppe bewertet zusätzlich zur empfundenen Intensität auch die Hedonik.

### **7.1.3 Laborringversuch mit geschulten Prüfenden**

Um die vereinfachte Methode der Intensitätsbewertung auch durch Beteiligung anderer Labore zu prüfen, wird diese im Jahr 2021 im Ringversuch der BAM getestet (Horn, 2022). Die Labore ermitteln die empfundene Intensität mit der vereinfachten Methode sowie die empfundene Intensität und Hedonik gemäß DIN ISO 16000-2828 (DIN, 2021).

Insgesamt nehmen einschließlich der HTW Berlin 11 Labore teil. Die BAM stellt für die Untersuchungen eine Lackprobe bereit, der zuvor VOCs hinzugefügt wurden. Die Probe wird in KAPITEL 5.1.6.2 beschrieben (Lack C). Sie wird in luftdichter Aluminiumfolie an die Labore versandt. Diese führen die Versuche innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums von einer Kalenderwoche durch. Für die Beladung der Emissionsprüfkammern verwenden alle Labore eine Petrischale pro einem Luftdurchfluss von 100 l/h.

Die Labore erhalten genaue Vorgaben zur Durchführung der sensorischen Versuche. Diese enthalten insbesondere folgende Punkte:

- Die Prüfenden müssen sich fünf bis zehn Minuten vor den Messungen in einem klimatisierten geruchsfreien Raum aufhalten, den sie auch zwischen den einzelnen Messungen zur Regeneration nutzen. Die Dauer der Regeneration soll ebenfalls immer mindestens fünf Minuten betragen.
- Die Prüfleitung stellt den Ablaufplan und die durchzuführenden Messungen vor und prüft, ob die Verhaltensregeln eingehalten werden. Insbesondere wird darauf geachtet, ob Prüfende stark nach Deodorants oder Parfum riechen und daher von den Messungen ausgeschlossen werden müssen.
- Um die Riechfähigkeit der Prüfenden am Messtag zu testen, müssen diese einzeln die vorgegebenen Acetonintensitäten in aufsteigender Reihenfolge riechen. Sie müssen in der Lage sein, zwischen den gegebenen Intensitäten unterscheiden zu können. Ist dies nicht der Fall, müssen auch diese Prüfenden von den Messungen ausgeschlossen werden.
- Die Messungen sollen mit der Leistungsprüfung mit Aceton für zwei Intensitäten beginnen. Die Durchführung der Leistungsprüfung erfolgt in gleicher Weise wie die Durchführung im Rahmen dieser Arbeit und wird in KAPITEL 5.1.8 beschrieben.

- Die Durchführung der Messungen der empfundenen Intensität und Hedonik muss gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) erfolgen.

Zur Durchführung der Messung der empfundenen Intensität mit der vereinfachten Methode wird eine zusätzliche Arbeitsanweisung an die Labore übergeben. Darin wird zunächst die Idee der Methode beschrieben und das Ziel der Messungen formuliert. Die Arbeitsanweisung gibt folgende Vorgaben zur Durchführung:

- Die Labore werden gebeten in ihrem Messablauf nach Abschluss der Leistungsprüfung zunächst die vereinfachte Methode durchzuführen und danach die Messung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021). Für die Auswertung der Messungen werden nur die Ergebnisse der Prüfenden berücksichtigt, die die Leistungsprüfung bestehen.
- In Vorbereitung auf die Messungen soll einer der Trichter des Vergleichsmaßstabes auf eine Acetonintensität von 7 pi eingestellt werden. Dabei ist am besten ein Trichter geeignet, der üblicherweise zur Ermittlung der unbekanntes Intensität verwendet wird. Die Intensität darf den Prüfenden nicht bekannt gegeben werden.
- Die Prüfenden vergleichen die vorgegebene Intensität des Acetons mit der Probe und geben an, ob sie die Probe als intensiver empfinden oder als weniger bis gleich intensiv.

Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgte ähnlich wie in KAPITEL 7.1.1, TABELLE 7-2 angegeben. Im Unterschied dazu wurde die Zusatzinformation bei einer gleich starken Bewertung durch das Gleich-Zeichen nicht abgefragt. Zum Zeitpunkt des Laborversuches war noch nicht klar, dass dies bei der Auswertung der Ergebnisse eine nützliche Information sein kann.

## 7.2 Ergebnisse

### 7.2.1 Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden

Die Daten der Messergebnisse im Luftqualitätslabor mit geschulten Prüfenden sind in ANHANG B1 dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage im Vergleich zur empfundenen Intensität für die elastischen und textilen Bodenbeläge sowie für die Holzprodukte dargestellt. Dann erfolgt eine Auswertung der Hedonik und abschließend eine Betrachtung des 90 %-Vertrauensbereiches.

#### **Empfundene Intensität und Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage der elastischen und textilen Bodenbeläge**

Zunächst werden die Messungen mit elastischen und textilen Bodenbelägen sowie dem Lack durchgeführt. Abbildung 7-5 zeigt ein Diagramm mit der Darstellung der empfundenen Intensität, die den Ergebnissen der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage gegenübergestellt wird. Auf der X-Achse ist der Mittelwert der empfundenen Intensitäten und auf der Y-Achse der prozentuale Anteil der Prüfenden aufgetragen, welche die Probenluft stärker als die dargebotene Acetonintensität von 7 pi empfinden.

Eine senkrechte Linie bei 7 pi auf der X-Achse unterteilt diese in zwei Bereiche: Wird der Geruch eines Produktes mit einem Mittelwert für die empfundene Intensität von weniger als 7 pi bewertet, so hat das Produkt die Bewertung nach dem AgBB-Schema bestanden. Die Y-Achse, die die Ergebnisse der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage darstellt, wird durch eine

waagerechte Linie bei 30 % in zwei Bereiche unterteilt. Wenn weniger als 30 % der Prüfenden die Probenluft intensiver empfinden als die dargebotene Acetonintensität, so hat das Produkt die vereinfachte Messung bestanden.

Das Diagramm wird damit in insgesamt 4 Quadranten unterteilt. Die Bewertungen in den weiß dargestellten Quadranten haben jeweils nach beiden Prüfmethode die gleiche Bewertung erhalten und entweder bestanden oder nicht bestanden. Liegen Bewertungen in den grauen Quadranten, wird das Produkt in den beiden Messungen unterschiedlich bewertet und besteht jeweils nur nach einer der beiden Prüfmethode.

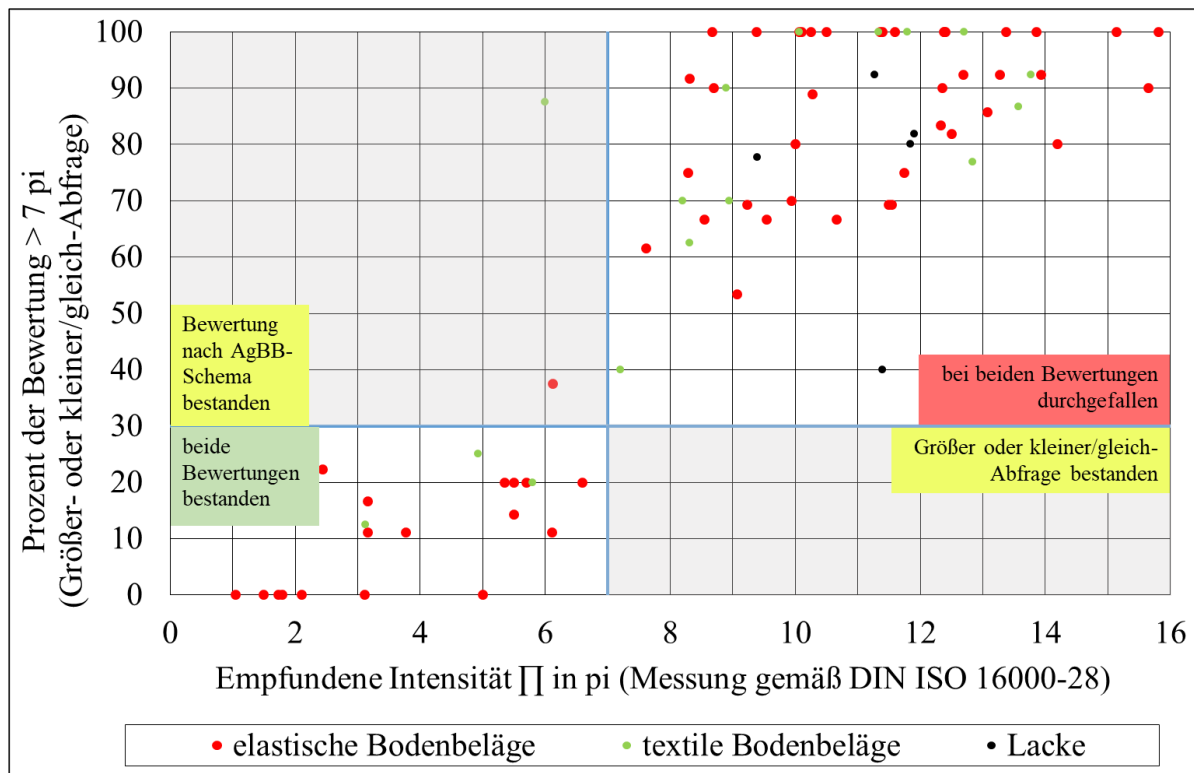


Abbildung 7-3: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität  $\Pi$  in pi und dem Ergebnis der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden für elastischen und textilen Bodenbelägen sowie Lacken

Die Ergebnisse zeigen, dass von den durchgeführten 80 Messungen 78 Messungen die gleiche Bewertung erhalten. Dies entspricht einem prozentualen Anteil von 98 %.

Nur jeweils eine Messung eines elastischen und eines textilen Bodenbelages erreicht unterschiedliche Bewertungen. Die Proben bestehen mit empfundenen Intensitäten von 6,1 pi und 6 pi gemäß dem AgBB-Schema, jedoch mit 38 % und 88 % nicht gemäß der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage. Unter Beachtung der Messunsicherheit des Verfahrens der Messung der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) von  $\pm 2,0$  pi liegen diese Werte allerdings im Bereich der Messunsicherheit um 7 pi. Die Messergebnisse werden daher nicht als signifikant gesehen.

Nur wenige Messpunkte liegen im Bereich zwischen 20 und 60 % der Größer- oder kleiner/gleich Abfrage. Dies zeigt, dass die Prüfenden sehr klar entscheiden können, ob ein Produkt intensiver oder weniger bis gleich intensiv als die vorgegebene Acetonkonzentration wahrgenommen wird.

Die Ergebnisse in Bezug auf die Produktarten der Produktgruppe der elastischen Bodenbeläge (PVC, Kunststoff, Kautschuk, Linoleum, Kork) zeigen keine Besonderheiten. Eine grafische Darstellung nach den einzelnen Produktarten erfolgt daher nicht.

Die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage zeigt in den Versuchen eine sehr gute Brauchbarkeit hinsichtlich der Verwendung der vereinfachten Methode zur Bewertung der sensorischen Eignung eines Produktes für den Innenraum.

### Empfundene Intensität und Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage der holzbasierten Produkte

Anschließend werden die Messungen mit holzbasierten Produkten durchgeführt. Die folgende Abbildung 7-5 zeigt die Ergebnisse der holzbasierten Produkte.

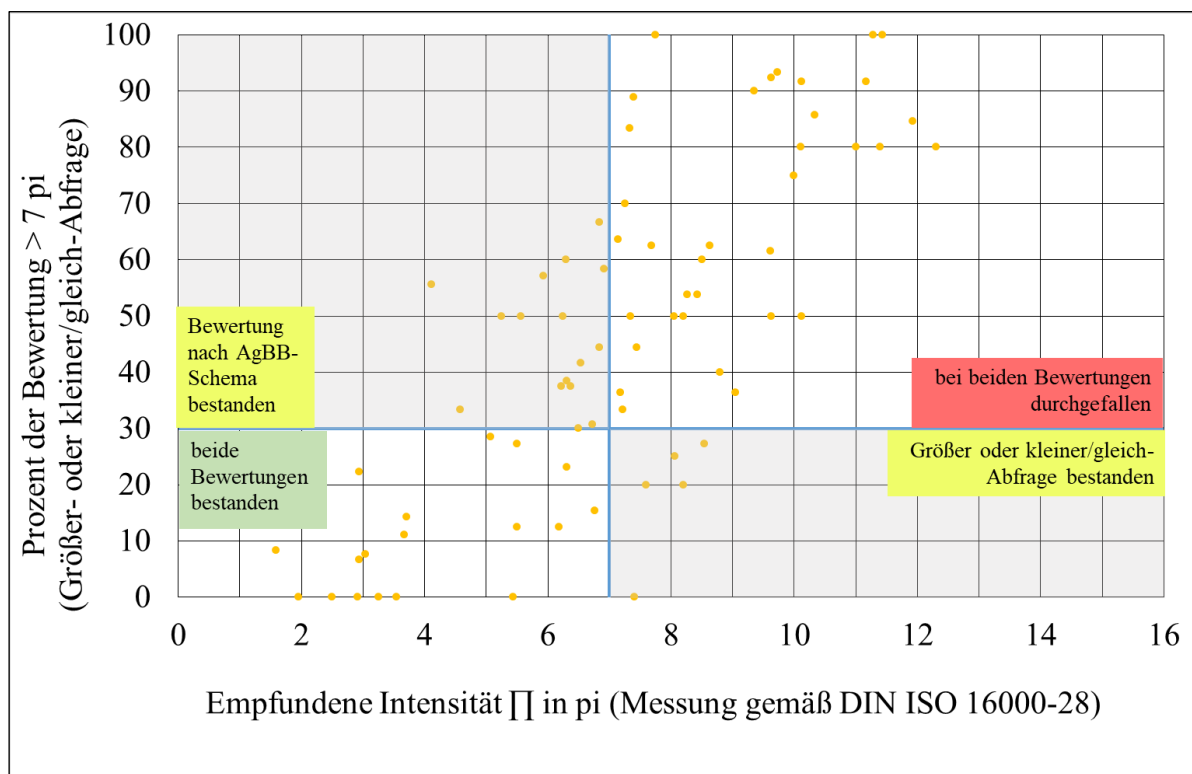


Abbildung 7-4: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität  $I$  in pi und dem Ergebnis der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden für holzbasierte Produkte

Die Ergebnisse zeigen, dass keines der untersuchten Holzprodukte mit empfundenen Intensitäten größer als etwa 12 pi bewertet wird.

Bei 54 der durchgeführten 74 Bewertungen wird in beiden Verfahren eine gleiche Bewertung erreicht, was einen prozentualen Anteil von 73 % ausmacht. Es werden 20 unterschiedliche Bewertungen erreicht, von denen 15 gemäß AgBB-Schema und 5 Bewertungen gemäß der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage bestehen.

Die unterschiedlichen Bewertungen liegen im Bereich empfundener Intensitäten zwischen 4,1 pi und 9,1 pi, also in einem Bereich um 7 pi. In diesem Bereich können die Prüfenden entweder im Rahmen der Größer- oder kleiner/gleich Bewertung nicht deutlich entscheiden oder aber es ist schwierig, die empfundene Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) zu ermitteln. Dies zeigt auch die Verteilung der Bewertungen: anders als bei den

Bewertungen der textilen und elastischen Bodenbeläge sowie des Lackes liegen viele Bewertungen auch im Bereich zwischen 20 und 60 %. Eine Bewertungslücke bei der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage ist nicht vorhanden. Dies zeigt auch deutlich die Gesamtdarstellung aller Ergebnisse in Abbildung 7-5. Einige Messpunkte überlagern sich in der grafischen Darstellung, weshalb in Tabelle 7-4 die Anzahl der Bewertungen in den vier Quadranten zusammenfassend dargestellt wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass von den insgesamt durchgeführten 154 vergleichenden Messungen insgesamt 131 Messungen die gleiche Bewertung erhalten (36 bestehen beide Bewertungen und 95 fallen bei beiden Bewertungen durch). Bei 22 Messungen werden unterschiedliche Ergebnisse erreicht, wobei hier in den meisten Fällen (17 von 22) die Bewertung nach dem AgBB-Schema bestanden wird.

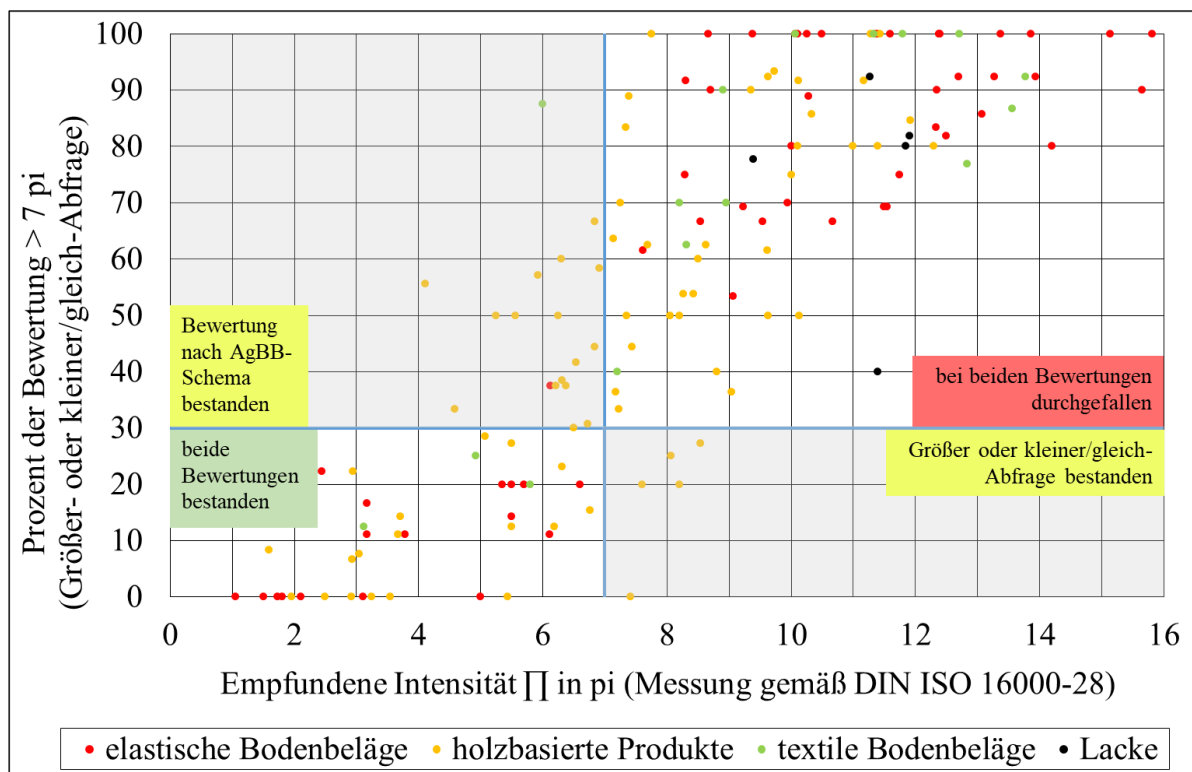


Abbildung 7-5: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität [ ] in pi und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden

Tabelle 7-4: Anzahl der Messungen in den vier Quadranten des Diagramms nach Abbildung 7-5

Produktart	Lage im Quadrant			
	beide Bewertungen bestanden	bei beiden Bewertungen durchgefallen	AgBB Bewertung bestanden	Bewertung nach vereinfachter Methode bestanden
59 elastische Bodenbeläge	17	41	1	0
74 holzbasierte Produkte	16	38	15	5
16 textile Bodenbeläge	3	12	1	0
5 Lacke	0	5	0	0
<b>Summe</b>	<b>36</b>	<b>95</b>	<b>17</b>	<b>5</b>

## Bewertung der Hedonik

Um zu ergründen, weshalb Holzprodukte sich anders verhalten als die übrigen untersuchten Produkte, erfolgt eine Betrachtung der Hedonik. In Abbildung 7-6 wird der Zusammenhang der Hedonik und der empfundenen Intensität  $\Pi$  der durchgeführten Messungen dargestellt. Insgesamt zeigt sich der bekannte Zusammenhang, dass Bauprodukte mit höher empfundener Intensität in ihrer Hedonik auch als unangenehmer wahrgenommen werden. Beim Blick auf die einzelnen Produktgruppen zeigt sich, dass elastische und textile Bodenbeläge sowie der untersuchte Lack bei empfundenen Intensitäten größer als 6 pi bis auf eine Ausnahme ausschließlich als unangenehm wahrgenommen werden. Anders die Messungen holzbasierter Produkte, von denen auch viele der untersuchten Produkte im Bereich höherer Intensitäten als angenehm empfunden werden.

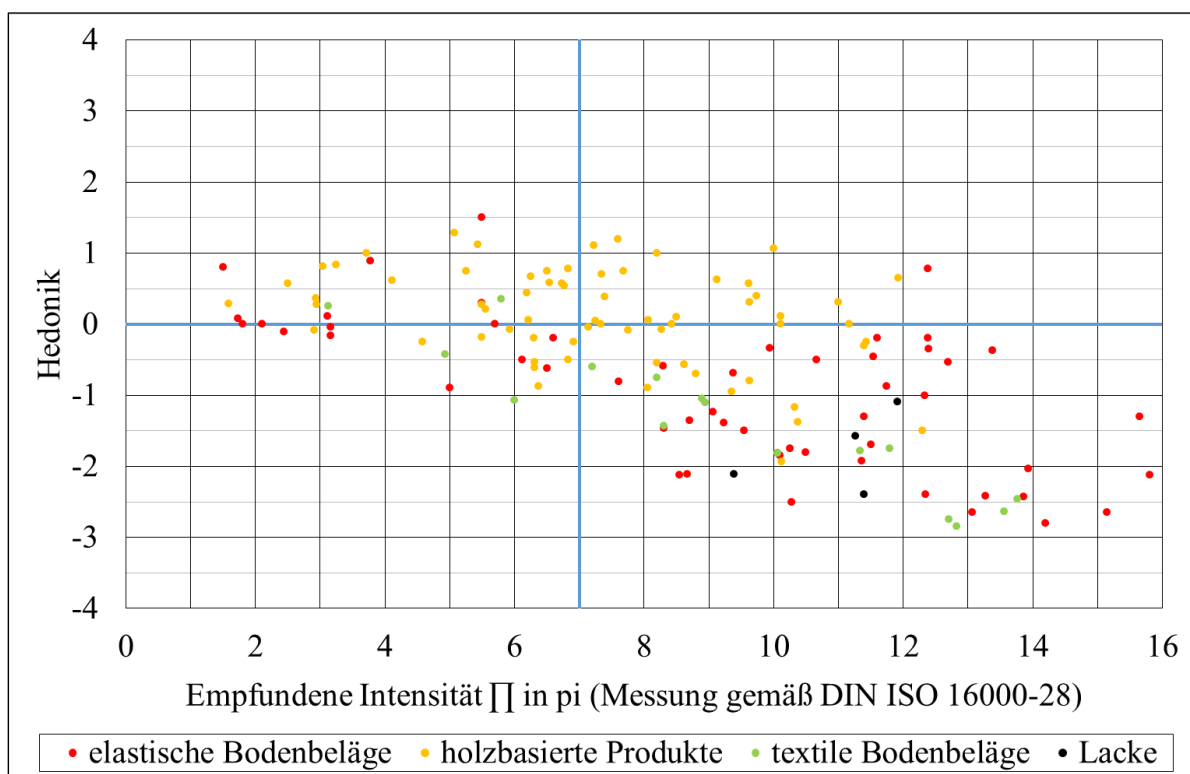


Abbildung 7-6: Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität  $\Pi$  in pi und der Hedonik mit geschulten Prüfenden

## Betrachtungen zum 90 %-Vertrauensbereich und der Anzahl Prüfender

Aufgrund der Corona-Pandemie waren Messungen teilweise nur eingeschränkt mit wenigen Prüfenden möglich (KAPITEL 5.1.8). Dies hat Auswirkungen auf die Einhaltung des 90 %-Vertrauensbereichs für die empfundene Intensität von  $\pm 2,0$  pi, der bei etwa einem Viertel der Messungen (insgesamt 41 der 154 Messungen) verfehlt wird. Abbildung 7-7 zeigt, dass der festgelegte Vertrauensbereich bei den durchgeführten Messungen mit weniger Prüfenden häufiger verfehlt wird und ab einer Anzahl von 11 Prüfenden verlässlich eingehalten werden kann.

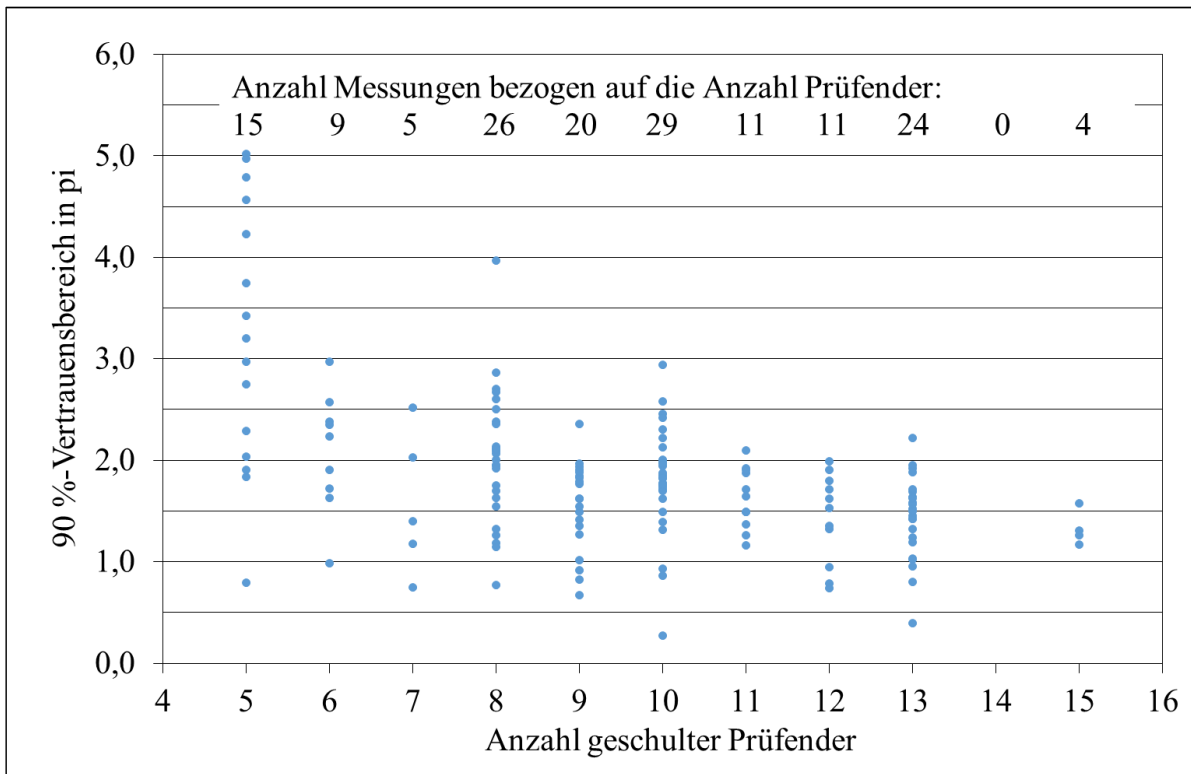


Abbildung 7-7: Zusammenhang des 90 %-Vertrauensbereichs der empfundenen Intensität mit der Anzahl geschulter Prüfer

Um die Auswirkungen der Einhaltung des 90 %-Vertrauensbereichs auf die Ergebnisse der vereinfachten Methode zu untersuchen, werden in Abbildung 7-8 ausschließlich die Messungen präsentiert, bei denen der Bereich eingehalten wird. Im Vergleich zu Abbildung 7-5 zeigt sich zunächst eine weniger dichte Verteilung der Messpunkte.

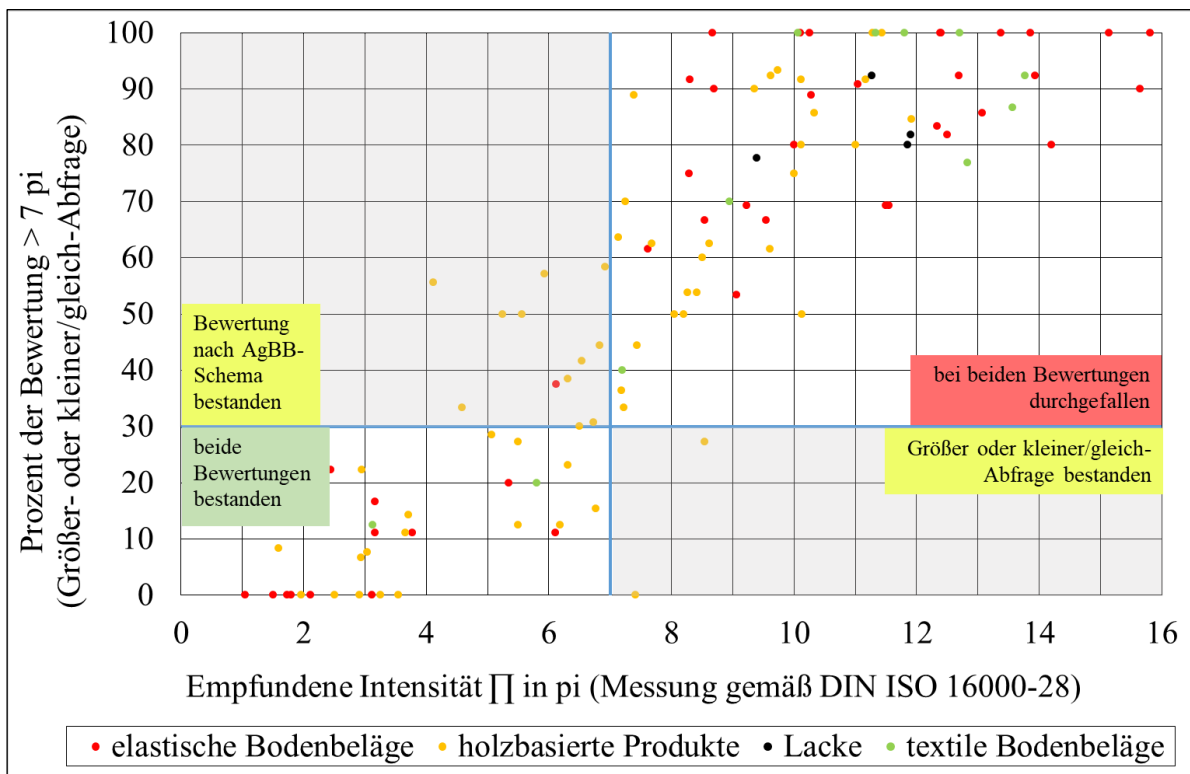


Abbildung 7-8: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität [] in pi und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden – Darstellung der Messungen, die den 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0$  pi einhalten

Um eine Interpretation zu ermöglichen, zeigt Tabelle 7-5 die Anzahl der Messungen in den vier Quadranten des Diagramms. Die letzte Zeile gibt den prozentualen Anteil der Messungen im Vergleich zu Tabelle 7-4 an.

Tabelle 7-5: Anzahl der Messungen in den vier Quadranten des Diagramms nach Abbildung 7-8 – Darstellung der Messungen, die den 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2,0$  pi einhalten

Anzahl und Produktart	Lage im Quadrant			
	beide Bewertungen bestanden	bei beiden Bewertungen durchgefallen	AgBB Bewertung bestanden	Bewertung nach vereinfachter Methode bestanden
42 elastische Bodenbeläge	12	29	1	0
56 holzbasierte Produkte	18	27	9	2
11 textile Bodenbeläge	2	9	0	0
4 Lacke	0	4	0	0
<b>Summe</b>	<b>32</b>	<b>69</b>	<b>10</b>	<b>2</b>
% im Vergleich zur Summe aus Tabelle 7-4	89 %	73 %	59 %	40 %

Insgesamt zeigt sich eine leichte Verschiebung der Messwerte in den einzelnen Quadranten. Der Anteil der Messungen mit eindeutiger Bewertung (grüne und rote Spalte) liegt bei 89 und 73 %, während der Anteil der Bewertungen mit uneindeutiger Bewertung (gelbe Spalten) bei

59 und 40 % liegt. Die uneindeutigen Bewertungen reduzieren sich demnach stärker als die eindeutigen Bewertungen. Umgekehrt gibt es damit in Bezug auf alle durchgeführten 154 Messungen mehr Messungen in den Bereichen mit uneindeutigen Bewertungen, die den 90 %-Vertrauensbereich nicht einhalten.

Obwohl insgesamt nur wenige Messergebnisse in den Quadranten mit uneindeutiger Bewertung liegen und die Berechnung des prozentualen Anteils daher eine eingeschränkte Gültigkeit besitzt, liefert das Ergebnis dennoch einen wichtigen Hinweis: Die uneindeutigen Bewertungen können sowohl auf Messunsicherheiten des Messverfahrens der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) zurückgeführt werden, als auch auf Unsicherheiten bei der Anwendung der vereinfachten Methode.

### **7.2.2 Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden**

ANHANG B2 zeigt die Daten der Messergebnisse an denen ungeschulte Prüfende teilnehmen.

Der Zusammenhang der Ergebnisse der Bewertung der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage wird in Abbildung 7-9 gezeigt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt wie in KAPITEL 7.2.1. Die empfundene Intensität wird ausschließlich mit geschulten Prüfenden ermittelt, während der Prozentsatz der Bewertungen der Größer- oder kleiner/gleich Abfrage sowohl mit geschulten als auch mit ungeschulten Prüfenden bestimmt wird. Als Markertyp für die Ergebnisse mit geschulten Prüfenden wurde ein Punkt gewählt, während als Markertyp mit ungeschulten Prüfenden ein Kreuz verwendet wurde. Für jedes der 16 untersuchten Produkte ergeben sich damit jeweils zwei Marker im Diagramm, wobei die Bewertungen eines Produkts immer genau übereinander liegen.

Alle Messungen mit ungeschulten Prüfenden sind eindeutig und liegen in den weißen Quadranten, wobei sechs Messungen beide Bewertungen bestehen und zehn Messungen bei beiden Bewertungen durchfallen. Bei zwei Ergebnissen (Holzprodukt bei 7,2 pi und elastischer Bodenbelag bei 8,5 pi) liegen die Bewertungen der ungeschulten Prüfenden genau auf der Bewertungsgrenze für die Größer- oder kleiner/gleich Messung von 30 %. Sie liegen innerhalb des Messunsicherheitsbereiches von  $\pm 2$  pi.

Die mit den geschulten Prüfenden durchgeführten Messungen zeigen ähnliche Ergebnisse, wobei jedoch zwei Produkte eine uneindeutige Bewertung erhalten und ausschließlich die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage bestehen. Auch diese Produkte mit empfundenen Intensitäten von 7,4 pi und 8,5 pi liegen innerhalb der Messunsicherheit des Verfahrens von  $\pm 2$  pi.

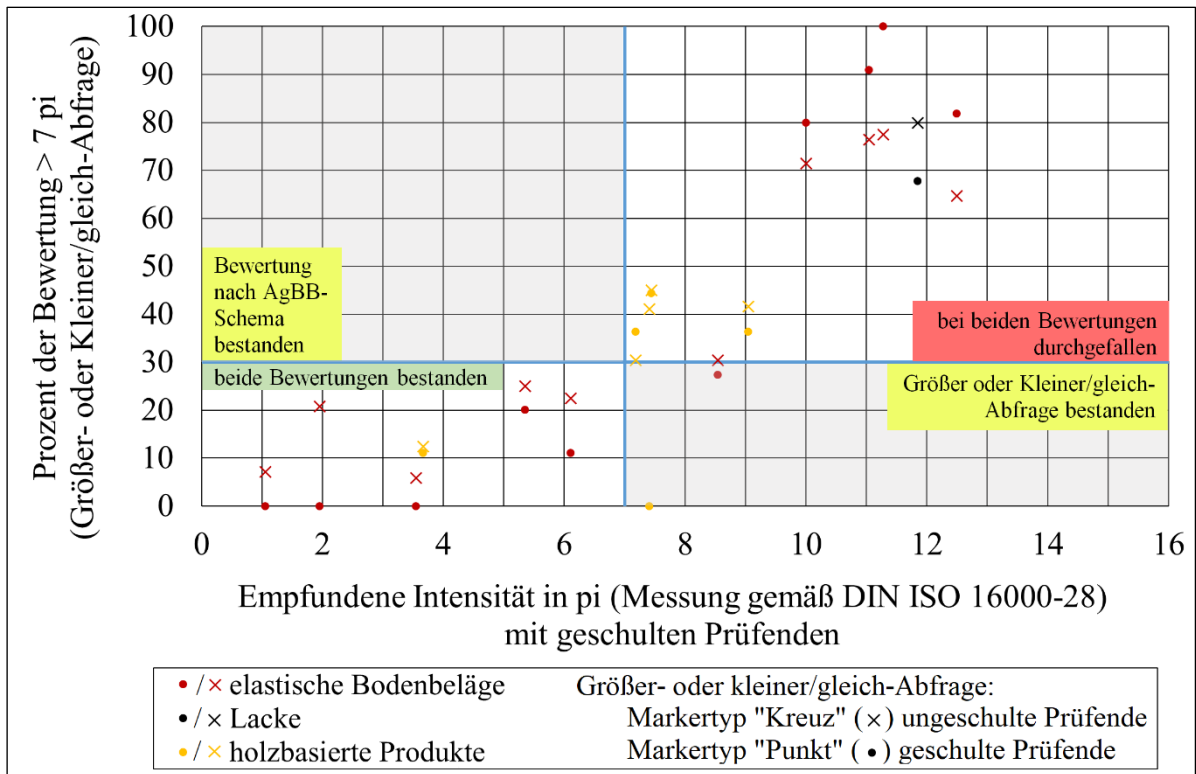


Abbildung 7-9: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) mit geschulten Prüfenden und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten und ungeschulten Prüfenden

Im Bereich empfundener Intensitäten < 7 pi empfinden prozentual etwas mehr ungeschulte Prüfende die Probe stärker als bei den geschulten Prüfenden. Im Bereich höherer Intensitäten > 7 pi sind es dagegen prozentual etwas weniger ungeschulte Prüfende.

Wie auch bei den Ergebnissen der geschulten Prüfenden zeigt sich für die untersuchten Produkte eine Bewertungslücke, diesmal im Bereich zwischen 30 und 60 %, außer bei den Holzprodukten.

In Abbildung 7-10 wird der Zusammenhang der ermittelten Hedonik durch geschulte und ungeschulte Prüfende zur ermittelten empfundene Intensität gezeigt. Die Hedonik wird durch beide Gruppen ähnlich bewertet, wobei die ungeschulten Prüfenden diese meist als etwas angenehmer empfinden. Bei beiden Prüfergruppen zeigt sich, dass die Hedonik im Bereich höherer empfundener Intensitäten als unangenehmer bewertet wird. Dies bestätigt die in den Forschungsgrundlagen in KAPITEL 4.2.1 dargestellten Messungen. Bei den Holzprodukten ist dieser Trend weniger deutlich, ähnlich wie bei den Messungen mit geschulten Prüfenden in KAPITEL 7.2.1.

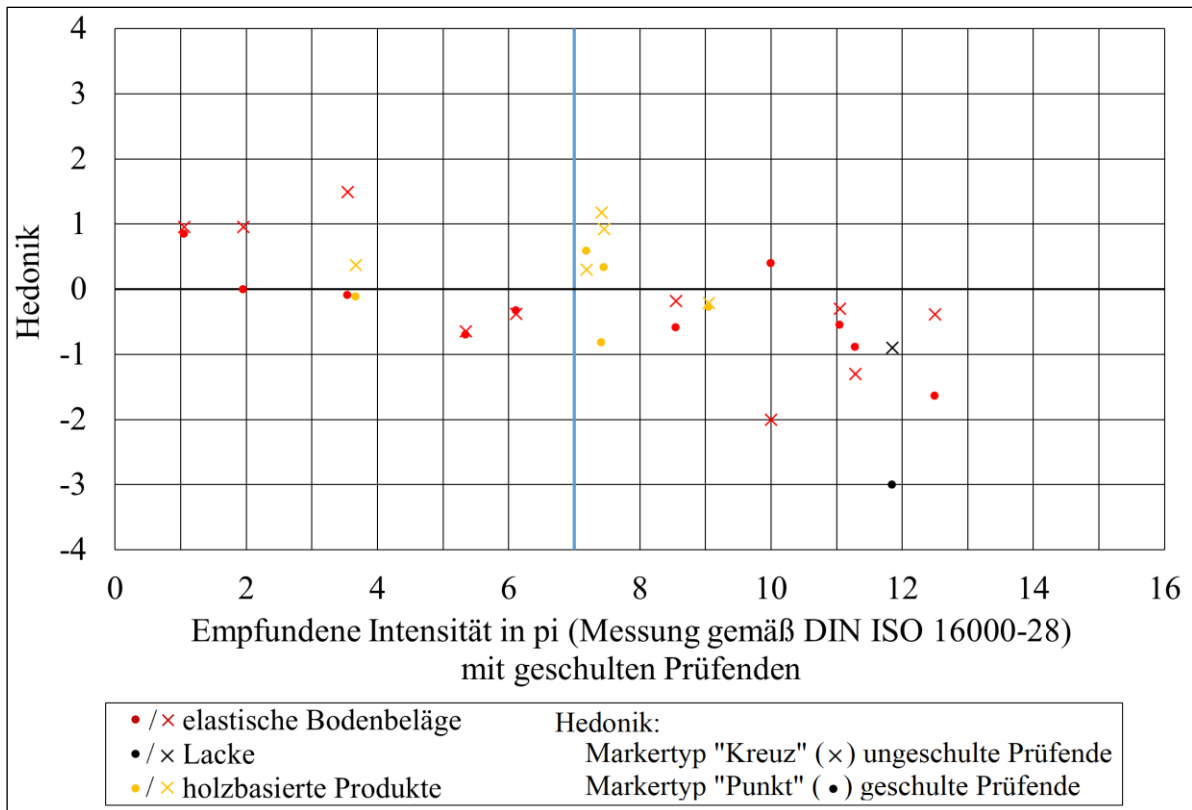


Abbildung 7-10: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) mit geschulten Prüfenden und der Hedonik mit geschulten und ungeschulten Prüfenden

Die im Folgenden vorgestellten Auswertungen dieses Kapitels sind auch Teil des Abschlussberichtes des Forschungsprojektes, an das diese Promotion gekoppelt ist (B. Müller et al., im Druck).

Abbildung 7-11 zeigt den Zusammenhang der empfundenen Intensität, die durch die geschulten Prüfenden ermittelt wird, mit der Zumutbarkeit, die durch ungeschulte Prüfende ermittelt wird. Hierbei wird der Prozentsatz der unzumutbaren Bewertungen dargestellt. Auf der X-Achse ist bei 7 pi und auf der Y-Achse bei 30 % der Schwellenwert des AgBB-Schemas als blaue Linie gekennzeichnet, womit das Diagramm in vier Quadranten eingeteilt wird. In den grauen Bereichen finden sich Bewertungen wieder, deren Bewertungen in beiden Methoden (empfundene Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 und Zumutbarkeit) zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. In den weißen Bereichen sind dahingegen gleiche Bewertungen in beiden Methoden dargestellt.

Bei den elastischen Bodenbelägen nimmt der Prozentsatz unzumutbarer Bewertungen zu und neun der zehn Produkte werden in beiden Methoden gleich bewertet. Bei den Holzprodukten verhält sich dies anders. Vier der untersuchten Produkte erreichen Intensitäten zwischen 7 pi und 9 pi. Sie werden dennoch von nur wenigen Prüfenden als unzumutbar bewertet (etwa 10 bis 20 %). Es wird vermutet, dass hier wiederum die positiv wahrgenommene Hedonik einen Einfluss hat und die Prüfenden auch intensivere Gerüche als angenehm empfinden, weshalb sie diese damit eher als zumutbar bewerten.

Abbildung 7-12 zeigt den Zusammenhang zwischen der Hedonik der ungeschulten Prüfenden und dem Prozentsatz ihrer unzumutbarer Bewertungen. Diese Ergebnisse zeigen, dass

angenehm bewertete Proben als weniger unzumutbar empfunden werden. Die Holzprodukte werden alle als neutral bis leicht angenehm bewertet.

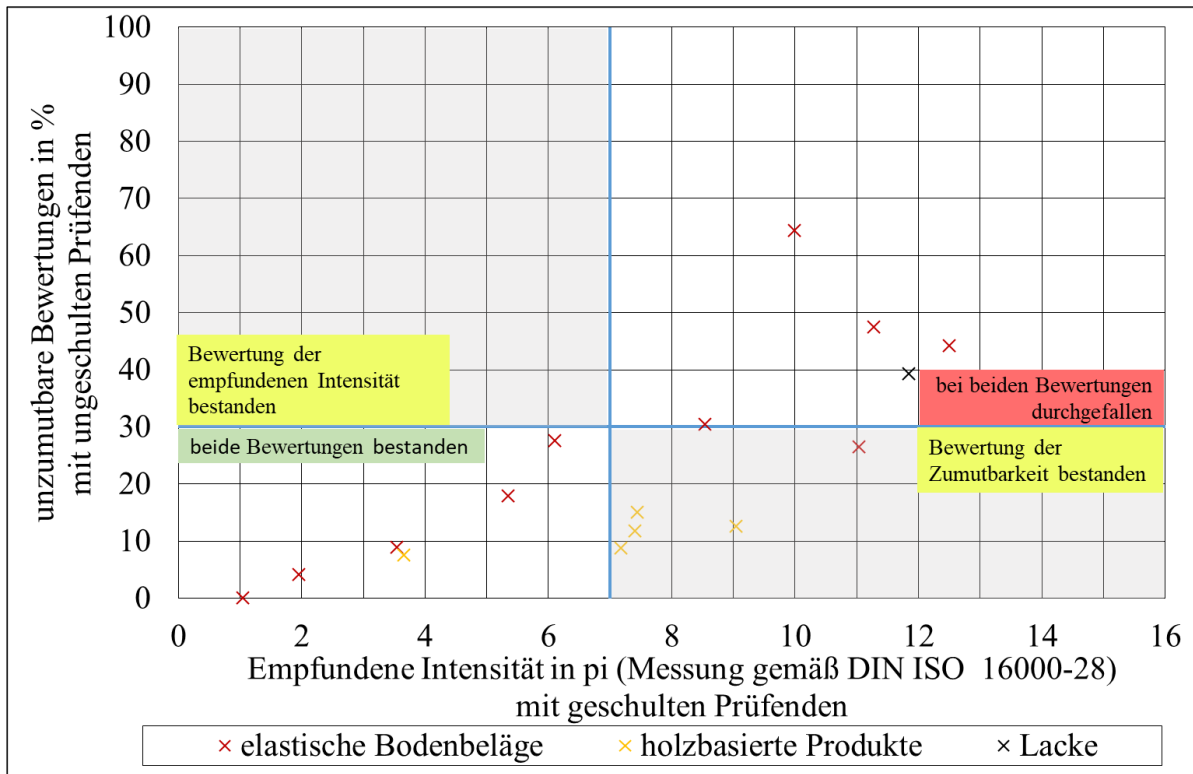


Abbildung 7-11: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) mit geschulten Prüfenden und des Prozentsatzes der unzumutbaren Bewertungen mit ungeschulten Prüfenden

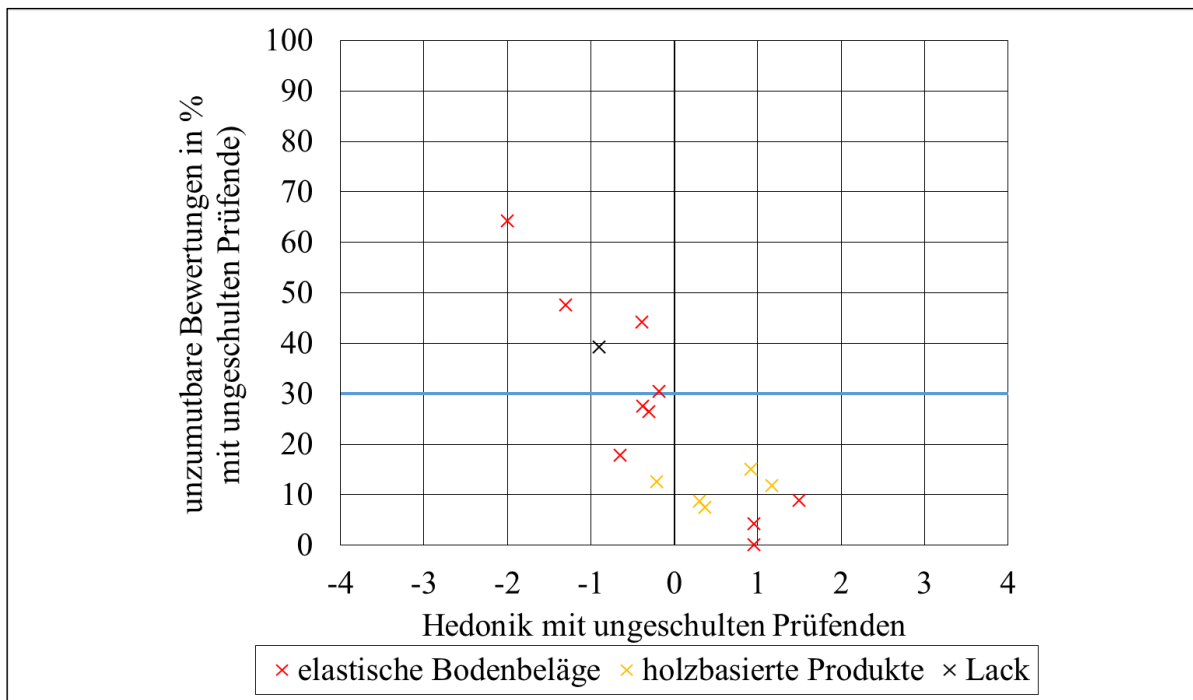


Abbildung 7-12: Zusammenhang zwischen der Hedonik mit ungeschulten Prüfenden und des Prozentsatzes der unzumutbaren Bewertungen mit ungeschulten Prüfenden

Der Zusammenhang zwischen dem PD-Wert der Akzeptanz und der Zumutbarkeit wird in Abbildung 7-13 dargestellt. Beide Messgrößen werden ausschließlich durch die ungeschulte Prüfergruppe ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass Proben, die häufiger als unakzeptabel bewertet werden (steigender PD-Wert), auch häufiger als unzumutbar wahrgenommen werden. Dabei steigt der Prozentsatz unzumutbarer Bewertungen nicht so schnell wie der PD-Wert. Empfinden beispielsweise 30 % der Prüfenden den Geruch als unzumutbar, so empfinden ihn bereits knapp 50 % als unakzeptabel. Bewertet etwa die Hälfte der Prüfenden einen Geruch als unzumutbar, so beurteilen ihn bereits etwa 75 % der Prüfenden als unakzeptabel.

Wie in KAPITEL 4.2.1, ABBILDUNG 4-10 wird auch hier der lineare Trend dargestellt. Der Zusammenhang verhält sich sehr ähnlich. Zum Beispiel empfinden bei einem PD-Wert von 30 % in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen, 15 % die Probe als unzumutbar. In Abbildung 4-10 bewerten 25 % der Prüfenden Proben mit diesem PD-Wert als unzumutbar. Legt man beispielsweise einen PD-Wert von 80 % zugrunde, empfinden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen etwa 52 % die Probe als unzumutbar und in den in Abbildung 4-10 dargestellten Messungen 55 %.

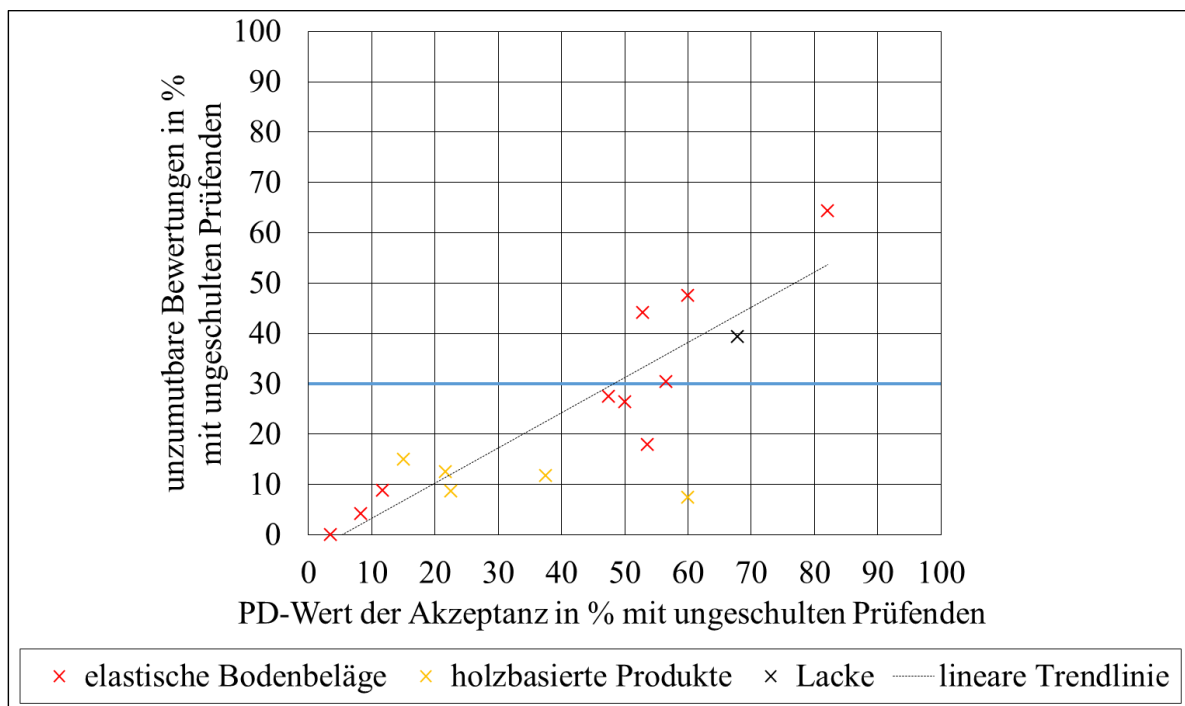


Abbildung 7-13: Zusammenhang zwischen dem PD-Wert der Akzeptanz und dem Prozentsatz der unzumutbaren Bewertungen (beides mit ungeschulten Prüfenden ermittelt)

### 7.2.3 Laboringversuch mit geschulten Prüfenden

Abbildung 7-14 zeigt die Messergebnisse des Ringversuches (Horn, 2022). Diese erfolgten mit der Probe Lack C (KAPITEL 5.1.6.2). Die Erklärung der Ergebnisse erfolgt in KAPITEL 7.2.1, wobei der Zusammenhang der Ergebnisse der Bewertung der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage gezeigt wird.

In Bezug auf die Bewertung der vereinfachten Methode zeigt sich, dass von den insgesamt 11 durchgeführten Messungen neun Ergebnisse in den weißen Bereichen liegen, womit die Labore bei beiden Bewertungen das gleiche Ergebnis erzielen. Das Labor mit dem Ergebnis „beide Bewertungen bestanden“ hat die Messungen ohne Leistungsprüfung durchgeführt, was eine Erklärung für das insgesamt sehr abweichende Ergebnis sein könnte.

Zwei Ergebnisse finden sich in den grauen Bereichen, was bedeutet, dass das Ergebnis uneindeutig ist. Diese Ergebnisse liegen jedoch auch sehr dicht an den jeweiligen Schwellenwerten von 7 pi bzw. 30 %.

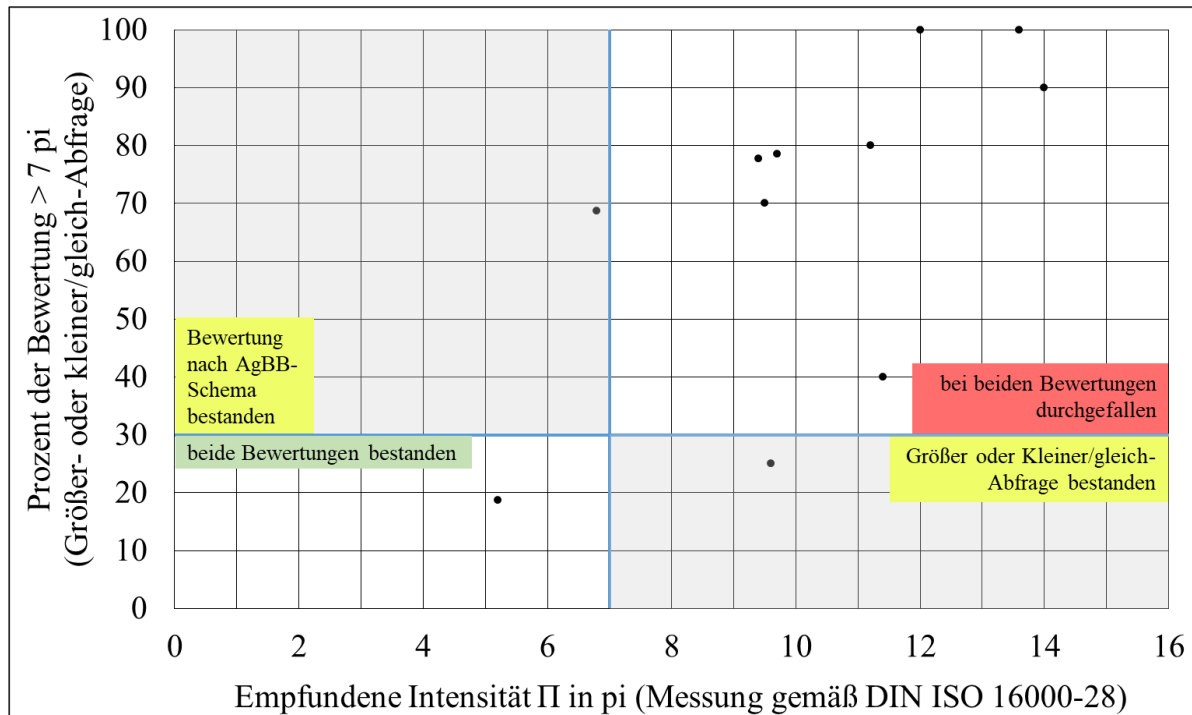


Abbildung 7-14: Zusammenhang zwischen empfundener Intensität einer Lackprobe (Lack C) ermittelt gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und des Ergebnisses der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden im Rahmen des Ringversuches

### 7.3 Auswertung und Diskussion

Im Folgenden werden die drei durchgeführten Messreihen ausgewertet und diskutiert.

#### 7.3.1 Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden

An den Messungen mit geschulten Prüfenden nehmen 5 bis 15 Prüfende teil.

Von den 80 durchgeführten Messungen mit elastischen und textilen Bodenbelägen sowie einem Lack erreichen 78 die gleiche Bewertung bei Anwendung des Verfahrens gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) und der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage (KAPITEL 7.2.1, ABBILDUNG 7-3). Dies entspricht einem prozentualen Anteil von 98 %, weshalb die Messmethode für diese Produkte eindeutig als geeignet befunden wird. Die Prüfenden können bei diesen Produkten sehr klar entscheiden, ob ein Produkt intensiver oder weniger bis gleich intensiv empfunden wird. Dies zeigt sich auch in einer großen Lücke im Bereich zwischen 20 % und 60 % der Abfrage, wo nur wenige Messpunkte liegen.

Die Untersuchung der Holzprodukte zeigt dahingegen ein etwas anderes Ergebnis. Von den 74 durchgeführten Bewertungen erreichen 54 die gleiche Bewertung in beiden angewendeten Verfahren, was einen prozentualen Anteil von 73 % ausmacht. Die unterschiedlichen Bewertungen liegen im Bereich empfundener Intensitäten zwischen etwa 4 pi und 9 pi (KAPITEL 7.2.1, ABBILDUNG 7-4 UND ABBILDUNG 7-5). Dies ist auch der Bereich um 7 pi, was der vorgegebenen Acetonintensität entspricht. Hier können die Prüfenden entweder die empfundene Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) nicht genau ermitteln oder sie haben Schwierigkeiten mit der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage. Im Gegensatz zu den übrigen untersuchten Produkten zeigen die Holzprodukte keine Bewertungslücke zwischen 20 % und 60 % der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage. Die Abfrageergebnisse verteilen sich sehr gleichmäßig.

Die Bewertung der Hedonik wird als Erklärung für die abweichenden Ergebnisse der Untersuchung der Holzprodukte gesehen. Holz wird auch bei höherer empfundener Intensität häufig angenehm wahrgenommen (KAPITEL 7.2.1, ABBILDUNG 7-6). Oder anders ausgedrückt: eine angenehme Hedonik bleibt auch bei der Wahrnehmung höherer Intensitäten bestehen. Es ist möglich, dass dadurch intensiv wahrgenommene Holzprodukte aufgrund ihrer angenehmen Hedonik gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) weniger intensiv bewertet werden. Dies wird damit begründet, dass bei der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage, bei der mehr Messungen nicht bestehen als bei der Abfrage gemäß Norm, eine strengere Bewertung erfolgt. Auch Holzprodukte mit Intensitäten ab 4 pi fallen hier durch. Die angenehme Hedonik spielt bei der Bewertung der empfundenen Intensität im direkten Vergleich mit nur einer Acetonintensität gegebenenfalls eine geringere Rolle und hat damit bei der Größer-oder kleiner/gleich-Abfrage einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis der Bewertung. Es werden weitere Untersuchungen mit Holzprodukten empfohlen, um diesen Zusammenhang näher zu erforschen.

Aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie wird bei etwa einem Viertel der Messungen der 90 %-Vertrauensbereich von  $\pm 2$  pi bei der Ermittlung der empfundenen Intensität verfehlt. Werden diese Messungen in der Auswertung nicht berücksichtigt, so reduziert sich der Anteil uneindeutiger Bewertungen stärker als der Anteil eindeutiger Bewertungen (KAPITEL ABBILDUNG 7-8 UND TABELLE 7-5). Die Einhaltung des 90 %-Vertrauensbereiches und damit die genauere Durchführung der Messung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) führt demnach auch zu eindeutigeren Ergebnissen bei der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage.

### ***7.3.2 Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden***

Insgesamt werden 16 Messungen mit 23 bis 40 ungeschulten Prüfenden zur Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage durchgeführt. Um die Eignung der Abfrage zu prüfen, bewerten parallel geschulte Prüfende die empfundene Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021). Die Ergebnisse zeigen, dass eine Schulung zur Durchführung der vereinfachten Messung nicht erforderlich ist, denn die Bewertungen nach den beiden Messmethoden führen jeweils zum gleichen Ergebnis (KAPITEL 7.2.2, ABBILDUNG 7-9).

Um zu prüfen, ob es Unterschiede zwischen geschulten und ungeschulten Prüfergruppen in Bezug auf die Ergebnisse der Größer-oder kleiner/gleich-Abfrage gibt, beantworten auch die

geschulten Prüfenden die Abfrage. Die Ergebnisse mit geschulten Prüfenden liegen in den meisten Fällen dicht an den Ergebnissen mit ungeschulten Prüfenden und führen nur in zwei Fällen zu einem abweichenden Ergebnis (KAPITEL 7.2.2, ABBILDUNG 7-9).

Die Ergebnisse der Messungen weisen insgesamt darauf hin, dass die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage auch mit ungeschulten Prüfenden durchgeführt werden kann. Die ungeschulte Personen sind in der Lage, die Intensität einer Acetonkonzentration mit der Intensität von Probenluft zu vergleichen.

Sowohl die ungeschulten als auch die geschulten Prüfenden ermitteln die Hedonik der Probenluft. Der Vergleich dieser Ergebnisse zeigt, dass die Bewertungen meist ähnlich sind (KAPITEL 7.2.2, ABBILDUNG 7-10). Außerdem zeigt sich auch hier der Trend, dass intensiv empfundene Proben hedonisch als unangenehmer bewertet werden. Eine Ausnahme bilden wiederum die Holzprodukte.

Um dazu beizutragen den Wert der empfundenen Intensität von 7 pi als Schwellenwert für die Zumutbarkeit von Bauproduktgerüchen zu prüfen (KAPITEL 4.2.1), wird die Zumutbarkeit durch die ungeschulten Prüfenden ermittelt und mit der durch die geschulten Prüfenden ermittelten empfundenen Intensität verglichen (KAPITEL 7.2.2, ABBILDUNG 7-11). Die Ergebnisse zeigen, dass der Schwellenwert für die untersuchten elastischen Bodenbeläge bestätigt werden kann. Die Messungen der Holzprodukte bilden eine Ausnahme. Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei Intensitäten von 9 pi noch eine hohe Zumutbarkeit (85 % bis 90 %) erreicht wird. Die Holzprodukte weisen mit Werten zwischen -0,2 bis 1,2 eine neutrale bis angenehme Hedonik auf (KAPITEL 7.2.2, ABBILDUNG 7-12) Da insgesamt nur wenige Messungen (zehn elastische Bodenbeläge, ein Lack und fünf Holzprodukte) mit ungeschulten Prüfenden durchgeführt wurden, wird empfohlen weitere Messungen durchzuführen.

Der mit den ungeschulten Prüfenden ermittelte PD-Wert der Akzeptanz zeigt im Vergleich mit der Unzumutbarkeit der Geruchsproben, dass die Bewertung „unzumutbar“ ein strengeres Urteil darstellt, als die Bewertung „unakzeptabel“. Proben, die als unakzeptabel bewertet werden, erhalten von einem geringeren prozentualen Anteil Prüfender eine unzumutbare Bewertung (KAPITEL 7.2.2, ABBILDUNG 7-13). Dies deckt sich ebenfalls mit den Ergebnissen des in KAPITEL 4.2.1 dargestellten Forschungsprojektes.

In KAPITEL 4.2.2, ABBILDUNG 4-14 wird eine Untersuchung zum Vergleich sensorischer Messgrößen dargestellt und ein Vorschlag zur Festlegung von Geruchszonen unterbreitet. Bei der Festlegung der Geruchszonen sind Bauproduktmessungen mit Intensitäten größer als 7 pi mit einer Hedonik größer als -0,5, einem PD-Wert kleiner als 60 % und einem Prozentsatz für die Unzumutbarkeit kleiner als 33 % nicht vorgesehen. Die Geruchszonen berücksichtigen demnach nicht, dass auch intensiv riechende Produkte eine positive Hedonik einhergehend mit einem akzeptablen und zumutbaren Geruch aufweisen können. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Messungen der Holzprodukte zeigen jedoch genau dieses Verhalten, womit sich die Ergebnisse nicht in den vorgeschlagenen Zonen einordnen lassen. Auch dies zeigt, dass die Holzprodukte eine Besonderheit darstellen.

### **7.3.3 Laborringversuch mit geschulten Prüfenden**

Die im Ringversuch ermittelten empfundenen Intensität liegen in einem großen Bereich zwischen 5 pi und 14 pi. Dennoch wird in 9 von 11 Messungen bei der Bewertung der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) das gleiche Ergebnis wie mit der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage (KAPITEL 7.2.3, ABBILDUNG 7-14) erreicht. Die übrigen beiden Messungen liegen sehr nah an den Rändern zwischen den Quadranten, weshalb dies hier wegen der Messunsicherheit des Verfahrens auch zu einem eindeutigen Ergebnis hätte kommen können.

Der Ringversuch zeigt große Unterschiede bei der Messung in unterschiedlichen Laboren. Die vereinfachte Messmethode erweist sich jedoch auch im Laborringversuch als eine geeignete Methode, die weiter geprüft werden sollte.

### **7.3.4 Gesamtblick**

Die drei durchgeführten Messreihen zeigen, dass die Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage in den meisten Fällen zur gleichen Bewertung wie die Bewertung gemäß dem AgBB-Schema führt. Sie ist damit zur Beurteilung der sensorischen Eignung von Bauprodukten für den Innenraum geeignet. Produkte aus Holz zeigen aufgrund ihrer Hedonik ein etwas anderes Verhalten und es wird empfohlen diese weiter zu untersuchen.

Die Messungen mit geschulten Prüfenden werden aufgrund der Corona-Pandemie teilweise mit einer geringen Zahl an geschulten Prüfenden (ab fünf) durchgeführt. Insbesondere bei elastischen und textilen Bodenbelägen sowie dem Lack zeigt sich auch bei dieser geringen Zahl Prüfender eine große Eindeutigkeit der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit nur wenigen Bewertungspunkten zwischen 20 % und 60 %. Eine Gruppengröße von fünf geschulten Prüfenden für die Durchführung der vereinfachten Methode wird insgesamt jedoch nicht empfohlen, da der 90 %-Vertrauensbereich der Ermittlung der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) nur selten erfüllt wird (KAPITEL 7.2.1, ABBILDUNG 7-7). Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit wird eine Gruppengröße ab sechs bis sieben geschulten Prüfenden für die Durchführung der vereinfachten Abfrage empfohlen, wenn alle Prüfenden die gleiche Bewertung abgeben oder höchstens eine prüfende Person davon abweicht. Geben die geschulten Prüfenden unterschiedliche Ergebnisse ab, so sollten wie gemäß DIN ISO 16000-28 insgesamt 12 bis 15 Personen teilnehmen. Voraussetzung für die Teilnahme ist das Bestehen der Leistungsprüfung.

Die Eindeutigkeit der vereinfachten Abfrage nimmt bei Einhaltung des 90 %-Vertrauensbereichs bei der Ermittlung der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) zu (KAPITEL 7.2.1: ABBILDUNG 7-8 UND TABELLE 7-5). Dies wird auf die Bewertung der Holzprodukte zurückgeführt. Bei ihrer vereinfachten Bewertung mit geschulten Prüfenden, sollten daher grundsätzlich 12 bis 15 Personen teilnehmen.

An den Messungen mit ungeschulten Prüfenden nehmen 23 bis 40 Prüfende teil. Die Gruppengröße hat sich als geeignet erwiesen, da die Ergebnisse eindeutig sind und mit den Ergebnissen, die durch geschulte Prüfende erzielt werden, übereinstimmen. Es wird empfohlen, künftig zu prüfen, ob eine Verringerung der Gruppengröße möglich ist. Eine Gruppengröße von 15 bis 25 ungeschulten Prüfenden (wie bei der Ermittlung der Akzeptanz)

ist vorstellbar. Der Vorteil einer ungeschulten Gruppe besteht darin, dass keine Schulungen und Leistungsprüfungen erforderlich sind. Da es sich um eine sehr einfache Abfrage handelt, kann der Nachteil der relativ großen Gruppengröße gegebenenfalls noch ausgeglichen werden.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel dieser Arbeit ist es, die Methode der sensorischen Prüfung von Bauprodukten gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) weiter zu entwickeln. Dabei werden zwei Forschungsziele verfolgt: Die Verbesserung der Probendarbietung durch die Entwicklung eines Adapters (KAPITEL 2.1) und die Vereinfachung des Verfahrens zur Bewertung der empfundenen Intensität (KAPITEL 2.2). Im Folgenden wird der aktuelle Forschungsstand dieser beiden Themen zusammenfassend dargestellt und den im Rahmen dieser Promotion erreichten Ergebnissen gegenübergestellt.

### **8.1 Verbesserung der Probendarbietung mit einem Adapter**

Beim Standardverfahren der Geruchsbeurteilung müssen Probenbehälter verwendet werden. Im Vergleich zu direkten Messungen, die eigentlich zu bevorzugen wären, bestehen jedoch Abweichungen. Mit dem zu entwickelnden Adapter sollen Verluste von Substanzen durch eine Verkürzung der Lagerungszeit von Probenluft reduziert werden und die erzielten Ergebnisse sensorischer Messungen näher an den Ergebnissen aus direkter Messung liegen (KAPITEL 2.1). Der Adapter wird als Puffer zwischen Emissionsprüfkammer und Bewertungstrichter eingesetzt, um eine wechselnde Sammlung und Darbietung von Probenluft zu ermöglichen.

Zunächst werden in der Literatur verfügbare Messungen ausgewertet, in denen das Standardverfahren der Probendarbietung mittels Probenbehältern mit der direkten Beurteilung am Trichter einer Emissionsprüfkammer verglichen wird (KAPITEL 4.1.1). Es gibt insgesamt nur wenige Messungen, die einen Vergleich dieser Darbietungsarten zeigen. Insbesondere die Durchführung beider Messungen (direkt und Standard) im selben Labor ist selten erfolgt. Dies kann ohnehin nur schwer ermöglicht werden, da entweder große Emissionsprüfkammern oder CLIMPAQs zur Verfügung stehen müssen. Die Auswertung der Ergebnisse der Messungen aus der Literatur zeigen Abweichungen zwischen den Darbietungsarten, was die Notwendigkeit einer Verbesserung der Probendarbietung begründet.

Des Weiteren wird die einzige verfügbare Literaturstudie zur Anwendung einer Geruchsmaske vorgestellt. Diese Maske fungierte bereits als Adapter, indem mit ihr ermöglicht wurde, eine kleine Menge Probenluft aus einer Emissionsprüfkammer zu sammeln und darzubieten (KAPITEL 4.1.2). Ihre Anwendung wurde jedoch vor einigen Jahren eingestellt und ist gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) nicht mehr zulässig. Die mit ihr erzielten Messergebnisse waren mit Bewertungen direkt an der Emissionsprüfkammer nicht vergleichbar. Möglicherweise war es nicht möglich, ein Umströmen der Nase mit Probenluft zu gewährleisten und das Volumen der Maske war zu klein, weshalb beim Riechen auch Umgebungsluft eingeatmet wurde. Im Grunde stellt die Maske dennoch einen Adapter dar, denn mit dieser konnten trotz kleiner Volumenströme der Probenluft, Probenahmen direkt an der Emissionsprüfkammer erfolgen. Diese Idee wird daher für den Bau des im Rahmen dieser Promotion entwickelten Adapters aufgegriffen.

Zunächst werden im Rahmen dieser Arbeit eigene Messungen durchgeführt, um die Darbietungsart im Standardverfahren unter Verwendung von Probenbehältern mit der direkten Darbietungsart zu vergleichen und damit eine Grundlage für die Beurteilung der

Funktionsfähigkeit des Adapters zu schaffen. In KAPITEL 6.1 werden diese sensorischen Messungen dargestellt, wobei die empfundene Intensität und die Hedonik ermittelt werden. Im Ergebnis werden mit dem Standardverfahren in acht der neun Messungen geringere empfundene Intensitäten als bei direkter Messung erzielt, wobei die Abweichung im Mittel 2,6 pi beträgt. Bei sieben der neun Messungen ist die Abweichung teilweise deutlich größer als die geforderte Messgenauigkeit des Verfahrens von  $\pm 2,0$  pi. Die Hedonik wird mit Probenbehältern als etwas angenehmer empfunden.

Die Konstruktion des Adapters erfolgt auf Basis bestimmter Anforderungen, die in KAPITEL 6.2 formuliert und in KAPITEL 6.3 geprüft werden. Dazu gehören folgende Punkte:

- Der Adapter wird so konstruiert, dass es möglich ist, diesen zwischen der Emissionsprüfkammer und dem Bewertungstrichter zu positionieren, so dass ein wechselndes Sammeln und Darbieten von Probenluft ermöglicht wird.
- Am Bewertungstrichter ist der geforderte Volumenstrom zwischen 0,6 l/s und 1,0 l/s einzuhalten.
- Das Volumen der Probenbehälter muss ausreichend groß sein, um Probenluft für eine prüfende Person zur Verfügung zu stellen. Es wird ermittelt, dass die Probenluft für eine Dauer von insgesamt 12 Sekunden bereitgestellt werden muss und damit ein Volumen von 20 Litern geeignet ist (KAPITEL 6.3.1). In Versuchen mit einer Gasuhr, bei denen die Volumen der hergestellten Behälter bestimmt werden, kann gezeigt werden, dass das geforderte Volumen erreicht wird (KAPITEL 6.3.3.2).

Gleichzeitig ermöglicht das gewählte relativ kleine Volumen im Vergleich zu bisher verwendeten Behältern in der Größe von 50 bis 300 Litern (KAPITEL 3.2.3.2), dass eine erneute Befüllung zwischen den einzelnen Messungen möglich ist, ohne dass die Zeitintervalle zu lang werden und der Messablauf dadurch gestört werden könnte.

- Die Art des Probenbehälters kann prinzipiell fest oder flexibel mit veränderbarer Form sein (KAPITEL 6.3.2). Da die Art des Behälters eine grundlegende Auswirkung auf die Konstruktion des Adapters hat, wird diese vor dem Bau des Adapters festgelegt. Die Anwendung flexibler Systeme ist Stand der Technik, weshalb in VOC-Messungen und sensorischen Messungen zunächst die Anwendung fester Systeme, durch Verwendung eines Glasgefäßes, geprüft wird. Dabei wird die Probenluft in einer Emissionsprüfkammer mit der Probenluft des daran angeschlossenen Glasgefäßes, welches mit der Luft aus der Prüfkammer befüllt wird, verglichen.

Die Ergebnisse der VOC-Messungen zeigen, dass im Glasgefäß hohe Wiederfindungsraten der Substanzen im Vergleich zur Emissionsprüfkammer erreicht werden. Glas ist ein für den Kontakt mit Probenluft zugelassener Werkstoff, weshalb dieses Ergebnis erwartet wurde.

Bei den sensorischen Messungen werden Vergleichsmessungen zwischen einer direkten Ermittlung an einer CLIMPAQ und der Ermittlung am Glasgefäß durchgeführt. Am Glasgefäß werden dabei deutlich geringere empfundene Intensitäten ermittelt und die Hedonik wird als angenehmer empfunden. Es zeigt sich, dass bei Verwendung des Glasgefäßes ein Umströmen der Nase mit Probenluft nicht erreicht wird, weshalb die Prüfenden während der Probenahme auch Umgebungsluft einatmen. Aufgrund der Untersuchungen wird die Anwendung von Probenbehältern mit festem Volumen

ausgeschlossen und es werden flexible Probenbehälter aus Nalophan® oder Tedlar® verwendet (KAPITEL 6.3.3).

Für den Bau des Adapters (KAPITEL 6.3.4 und 6.4) werden die flexiblen Probenbehälter in einer luftdichten Box positioniert. Die Probenluft aus der Emissionsprüfkammer strömt auf einer Seite in den Probenbehälter ein. Der Einströmhahn ist als Dreiwegehahn ausgelegt, so dass die Luft wahlweise direkt zu einem Trichter oder zum Adapter strömt. Der Ausströmhahn auf der anderen Seite des Probenbehälters ist in einer ersten Version ein manueller Kugelhahn und wird später durch ein Magnetventil ersetzt, das nur öffnet, wenn Probenluft aus dem Behälter ausströmen soll. Parallel zum Magnetventil ist ein Bypassventil mit geringem Durchmesser installiert, um ein Durchströmen des Behälters zu ermöglichen und diesen somit zu spülen. Im Falle einer Messung wird der Ventilator durch die prüfende Person gestartet und es öffnet sich gleichzeitig das Magnetventil. Die Drehzahl des Ventilators wird mithilfe der Messblende so geregelt, dass der geforderte Probenluftvolumenstrom von etwa 0,9 l/s zur Verfügung gestellt wird. Die Luft über den Trichtern wird über eine Ablufteinrichtung abgeführt. Der Einbau des Adapters im Luftqualitätslabor der HTW Berlin ermöglicht vergleichende Messungen direkt am Trichter der Emissionsprüfkammer und am Adapter.

Zur Prüfung der Funktionsfähigkeit des Adapters erfolgen die in KAPITEL 6.5 beschriebenen VOC-Messungen, die Volumenstrommessungen und die sensorischen Messungen.

Die VOC-Messungen zeigen, dass die Probenluft die aus dem Adapter strömt, hohe Wiederfindungsraten der VOC-Konzentrationen zwischen 90 und 100 % im Vergleich zur Luft in der Emissionsprüfkammer erreicht (KAPITEL 6.5.1). Unterschiede zwischen den Behältern aus Nalophan® und Tedlar® werden nicht gefunden. Der Adapter ist aus analytischer Sicht für die Sammlung und Darbietung von Probenluft geeignet.

In Volumenstrommessungen kann gezeigt werden, dass ein Volumenstrom zwischen 0,9 und 0,95 l/s über einen Zeitraum von 12 bis 14 Sekunden eingehalten werden kann (KAPITEL 6.5.2). Damit wird die geforderte Dauer und die Konstanz der Darbietung des Luftvolumenstroms erreicht (KAPITEL 6.3.1). Im Rahmen dieser Messungen, die mit manuellem Kugelhahn als Ausströmhahn erfolgen, werden weitere Beobachtungen gemacht, die zu einer Optimierung des Adapters in zwei Schritten führen:

- Nach der Entleerung des Behälters und dem Stoppen des Ventilators, kommt es wiederholt zur Erhöhung des Luftvolumenstroms (KAPITEL 6.5.2.1). Der leere Probenbehälter übt einen Sogeffekt aus, wodurch von der Trichterseite aus Umgebungsluft in den Probenbehälter einströmen kann. Dies kann dazu führen, dass die Probenluft bei der nächsten Darbietung verdünnt vorliegt und die Prüfenden diese zudem in unterschiedlichen Zusammensetzungen dargeboten bekommen. Um die Rückströmung zu beseitigen, wird der manuelle Kugelhahn auf der luftausströmenden Seite durch ein Magnetventil ersetzt. Dieses öffnet nur im Falle der Betätigung des Tasters zur Bedienung des Ventilators durch eine prüfende Person. Erneute Volumenstrommessungen zeigen, dass die Rückströmung damit vermieden wird.
- Da in der Box des Adapters ein Probengeruch wahrnehmbar ist, wird die Dichtheit des Systems überprüft (KAPITEL 6.5.2.2). Die Volumenstrommessungen zeigen, dass am Kabelbinder mit dem der Probenbehälter am Rohrstutzen des Adapters befestigt ist,

Luft in den Probenbehälter ein- oder ausströmen kann. Unterhalb des Kabelbinders, wird ein Dichtgummi eingebracht, der eine bessere Abdichtung ermöglicht.

Insgesamt ergeben sich durch zwei Optimierungsschritte drei Adapterversionen:

- 1. Version: Einsatz eines manuellen Kugelhahns an der luftausströmenden Seite
- 2. Version: Einsatz eines Magnetventils an der luftausströmenden Seite
- 3. Version: Optimierung der Abdichtung des Probenbehälters im Adapter

Diese drei Versionen werden in sensorischen Messungen durch Vergleiche einer direkten Bewertung und einer Adapterbewertung von Probenluft überprüft (KAPITEL 6.5.3). Dabei wird zunächst die empfundene Intensität der Probenluft ermittelt. Ziel ist es, dass möglichst gleiche Ergebnisse mit beiden Bewertungsarten erzielt werden. Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Bewertungsarten werden zudem mit den Abweichungen verglichen, die durch Messungen des Vergleichs von Ergebnissen aus direkter Bewertung und Bewertung im Standardverfahren ermittelt werden (KAPITEL 6.1).

Mit dem Adapter werden im Vergleich zum Standardverfahren Ergebnisse für die empfundene Intensität erzielt, die näher an den Ergebnissen aus direkter Messung heranreichen (KAPITEL 6.6, ABBILDUNG 6-35). Der Einsatz des Magnetventils führt zunächst dazu, dass der 90 %-Vertrauensbereich in den Messungen erreicht wird und damit die Genauigkeit des Verfahrens ausreichend groß ist. Nach der Optimierung der Dichtheit des Probenbehälters im Adapter liegen die Abweichungen im Vergleich zum direkten Verfahren deutlich im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens von  $\pm 2,0$  pi. Damit führt die verbesserte Abdichtung und zugleich Verhinderung des Einströmens von Umgebungsluft zu Ergebnissen, die sehr nah an der direkten Bewertung liegen. Im Mittel wird bei den vier Messungen mit dem Adapter eine um 0,6 pi geringere empfundene Intensität im Vergleich zur direkten Messung erzielt.

Auch die Hedonik wird vergleichend gemessen. Es zeigt sich, dass bei direkter Bewertung im Vergleich zur Bewertung mit dem Adapter oft eine leicht angenehmere Bewertung erfolgt. Dies wird damit begründet, dass Bauprodukte mit niedrigerer empfundener Intensität häufig angenehmer bewertet werden.

In KAPITEL 4.1.1.2 wird eine Messung des Fraunhofer WKI vorgestellt, in welcher mit Behältern aus Tedlar® niedrigere empfundene Intensitäten ermittelt wurden als mit dem Material Nalophan®. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten sensorischen Untersuchungen zeigen hingegen keine Besonderheiten, die auf die Art des verwendeten Materials zurückgeführt werden können. Auch bei den VOC-Messungen werden keine Unterschiede offensichtlich.

Ein Vorteil der Behälter aus Tedlar® sind ihre Hälse zur Anbringung im Adapter (KAPITEL 6.3.3). Die Hälse können leicht über den Rohrstutzen gezogen werden und eine dichte Verbindung ist einfacher realisierbar. Bei Behältern aus Nalophan® muss hingegen aufgrund der Schlauchform besonders darauf geachtet werden, dass der gesamte Schlauch unterhalb des Kabelbinders eingespannt ist und keine Löcher aufweist. Nachteilig bei Behältern aus Tedlar® ist hingegen die intensivere Vorbehandlung durch das Ausheizen im Vergleich zu Behältern aus Nalophan® (KAPITEL 5.1.7), die jedoch notwendig ist, um einem eventuellen Einfluss des Behältermaterials vorzubeugen.

Die Probenluft in den Behältern erfährt zwar kaum Lagerungszeit, dennoch ist es möglich, dass die Qualität der Probenluft durch eine nicht ausreichende Vorbehandlung der Behälter aus Nalophan® oder Tedlar® beeinflusst werden kann. Insbesondere aufgrund des geringen Volumens der Probenbehälter des Adapters von 20 Litern im Vergleich zu größeren Behältern zur Verwendung in derzeit verwendeten Darbietungssystemen mit 50 bis 300 Litern, haben diese im Verhältnis zu ihrem Volumen eine größere innere Oberfläche (KAPITEL 6.3.3.1). Verunreinigungen können damit stärker die Zusammensetzung der Probenluft beeinflussen.

Beim Vergleich der VOC-Messungen und der sensorischen Untersuchungen wird festgestellt, dass die Substanzkonzentrationen ebenso wie die empfundenen Intensitäten etwas geringer sind als die jeweilige Bewertung der Emissionsprüfkammer. Es gibt jedoch auch VOC-Messungen, bei denen die Luft in der Emissionsprüfkammer und im Adapter identisch ist. Eine weitere Erklärung für die etwas geringeren empfundenen Intensitäten am Adapter im Vergleich zur direkten Messung könnte sein, dass die Messung mit dem Adapter eine höhere Aufmerksamkeit der Prüfenden erfordert. Im Unterschied zur direkten Messung müssen die Prüfenden neben dem eigentlichen Riechen einen Taster bedienen. Es wird vermutet, dass dies bereits einen Einfluss auf die Bewertung von Geruchsproben haben kann. Daher wird empfohlen, die Bedienung des Adapters in den Schulungen zu üben und bei den Messungen einen regelmäßigen Umgang mit dem Adapter zu praktizieren. Die Prüfenden müssen zudem genau unterwiesen werden, wie eine Messung durchzuführen ist. Hinweise zur Durchführung der Messung sind in KAPITEL 6.4.2 dargelegt.

In den Untersuchungen des Adapters wird eine Rückströmung von Umgebungsluft in den Probenbehälter erkannt und durch Optimierung verhindert. Für die Anwendung der derzeit verwendeten Darbietungssysteme wird empfohlen, sicherzustellen, dass auch bei diesen ein Einströmen von Umgebungsluft in den Probenbehälter, aus der Richtung des Bewertungstrichters, verhindert wird.

Ein Nachteil bei der Verwendung des Adapters besteht darin, dass täglich nur eine Geruchsprobe beurteilt werden kann. Dies ist bei den derzeit verfügbaren Darbietungssystemen anders, da bei diesen nur der Behälter ausgetauscht werden muss, um eine weitere Bewertung vorzunehmen. Sollen mehrere Proben mit dem Adapter an einem Tag bewertet werden, besteht die Möglichkeit einen Adapter immer direkt in Verbindung mit der Emissionsprüfkammer aufzubauen.

Der Adapter kann in Laboren eingesetzt werden, in denen die Geruchsbewertung in räumlicher Nähe zur Emissionsprüfkammer erfolgt und demnach ein Transport von Probenluft durch Verwendung von Probenbehältern nicht erforderlich ist. Dabei muss sichergestellt sein, dass der Raum sich für Geruchsmessungen eignet und entsprechend geruchsarm gestaltet ist (KAPITEL 5.1.1).

Der Adapter sollte zukünftig in weiteren Messungen geprüft werden, um seine Funktionsfähigkeit zu bestätigen. In einem nächsten Schritt könnte auch ein Adapter gebaut werden, der mehreren Laboren für Probemessungen zur Verfügung gestellt wird. Hier können auch Messlabore einbezogen werden, die die Möglichkeit besitzen, direkte Bewertungen und Adapterbewertungen vergleichend durchzuführen.

Das Ziel, die Darbietung von Probenluft bei Geruchsmessungen so zu verbessern, dass im Vergleich zur direkten Messung vergleichbarere Ergebnisse erzielt werden, konnte insgesamt erreicht werden.

## **8.2 Vereinfachte Bewertung der empfundenen Intensität**

Die empfundene Intensität wird gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) durch eine geschulte Gruppe von 12 bis 15 Prüfenden ermittelt (KAPITEL 3.2.2.2). Um den Messaufwand dieser Prüfung zu verringern, wird im Rahmen dieser Arbeit eine vereinfachte Methode geprüft. Dabei geben die Prüfenden lediglich an, ob sie die Intensität einer Probe im Vergleich zu einer vorgegebenen Acetonintensität von 7 pi als intensiver oder gleich bis weniger intensiv wahrnehmen (Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage). Zur Beurteilung der Eignung für den Innenraum wird festgelegt, dass das Produkt ungeeignet ist, wenn mehr als 30 % der Bewertungen die Probe als intensiver einordnen. Die angegebene empfundene Intensität von 7 pi und der Schwellenwert von 30 % werden von der sensorischen Bewertung von Bauprodukten übernommen, die das AgBB-Schema vorgibt. Demnach ist ein Bauprodukt sensorisch zur Nutzung im Innenraum geeignet, wenn eine empfundene Intensität von 7 pi am 28. Messtag nicht überschritten wird (KAPITEL 3.2.4).

Um die Eignung des Verfahrens zu prüfen, bewerten Prüfende eine Probe sowohl nach dem vereinfachten Verfahren als auch gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021). Es wird festgelegt, dass das vereinfachte Verfahren geeignet ist, wenn die Beurteilungen miteinander übereinstimmen.

Insgesamt werden drei Versuchsreihen durchgeführt, die im folgenden zusammenfassend beschrieben werden.

### **1. Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden (KAPITEL 7.1.1, 7.2.1 und 7.3.1)**

In der umfangreichsten ersten Versuchsreihe mit geschulten Prüfenden werden 154 Produkte aus den Produktgruppen der elastischen Bodenbeläge, der holzbasierten Produkte und der textilen Bodenbeläge sowie einige Lacke getestet. Von großer Bedeutung für die Messungen ist es, dass die Prüfenden die Stärke der vorgegebenen Acetonintensität nicht kennen und dass sie nicht auf gegebenenfalls abgegebene widersprüchliche Ergebnisse in den beiden Messungen der empfundenen Intensität hingewiesen werden. Damit wird sichergestellt, dass die Messergebnisse nicht verfälscht werden. Bei der Auswertung der Ergebnisse werden nur die Prüfergebnisse der Prüfenden berücksichtigt, die die Leistungsprüfung an diesem Tag bestanden haben. Das Ergebnis zeigt, dass bei den elastischen und textilen Bodenbelägen und dem untersuchten Lack mit der vereinfachten Methode und der Methode gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) die gleichen Ergebnisse erzielt werden (ABBILDUNG 7-3). Bei der Darstellung der Ergebnisse des Prozentsatzes der Prüfenden, die angeben, dass die Probenluft stärker als 7 pi empfunden wird, liegt zudem nur eine geringe Anzahl an Messpunkten im Bereich zwischen 20 % und 60 %. Das bedeutet, dass die Prüfenden auch bei Produkten, die im Bewertungsbereich um etwa 7 pi mit der Methode gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) liegen, sehr deutlich entscheiden können, ob die Geruchsprobe weniger bis gleich stark oder als stärker empfunden wird.

Bei den Holzprodukten werden etwas andere Ergebnisse erzielt. Hier erreichen etwa drei Viertel der Bewertungen das gleiche Ergebnis mit beiden Messmethoden. Bei etwa einem Viertel der Bewertungen zwischen 4 pi und 9 pi werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Die Bewertungspunkte verteilen sich gleichmäßig und liegen auch im Bereich zwischen 20 % und 60 %. Eine Erklärungsmöglichkeit für das abweichende Verhalten der Holzprodukte ist, dass Holz auch bei höheren Intensitäten häufig neutral bis angenehm in seiner Hedonik wahrgenommen wird (ABBILDUNG 7-4).

## 2. Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden (KAPITEL 7.1.2, 7.2.2 und 7.3.2)

Im Rahmen dieser Messreihe wird die durch ungeschulte Prüfende durchgeführte Größer- oder kleiner/gleich Abfrage den Ergebnissen der Ermittlung der empfundenen Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) mit geschulten Prüfenden gegenüber gestellt.

Bei den Messungen mit ungeschulten Prüfenden zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie bei den Messungen mit den geschulten Prüfenden. Hier werden zwar mit 16 Proben aus dem Bereich elastischer und holzbasierter sowie einer Lackprobe deutlich weniger Messungen durchgeführt, jedoch erhalten nur zwei Proben eine unterschiedliche Bewertung in beiden Bewertungsarten. Die beiden Produkte bestehen die vereinfachte Abfrage und verfehlen die Bewertung gemäß AgBB knapp (ABBILDUNG 7-9).

Der Zusammenhang zwischen der empfundenen Intensität und der Zumutbarkeit wurde bisher lediglich in einem Forschungsprojekt untersucht, weshalb der im AgBB-Schema festgelegte Schwellenwert von 7 pi zunächst vorläufig festgelegt worden ist (KAPITEL 3.2.4). Um die in den KAPITELN 4.2.1 und 4.2.2 dargestellten Zusammenhänge unterschiedlicher sensorischer Messgrößen zu erforschen, werden im Rahmen der Messungen dieser Arbeit auch die Messgrößen Hedonik, Akzeptanz und Zumutbarkeit durch die ungeschulten Prüfenden ermittelt. Damit soll geprüft werden, ob der Zusammenhang anhand dieser Messungen bestätigt werden kann und die Grundannahme zur Beurteilung mit dem vereinfachten Verfahren Bestand hat. Im Ergebnis bestätigt sich, dass die Zumutbarkeit einer Luftprobe mit steigender Intensität sinkt. Die Untersuchung der elastischen Bodenbeläge zeigt, dass ab einer empfundenen Intensität von 7 pi mehr als 30 % der Prüfenden den Geruch als unzumutbar empfinden. Die untersuchten Holzprodukte verhalten sich jedoch anders. Hier werden auch Produkte mit empfundenen Intensitäten bis zu 9 pi noch von deutlich weniger als 30 % als unzumutbar bewertet. Dies kann wieder mit der positiv empfundenen Hedonik auch intensiv wahrgenommener Bauprodukte begründet werden (ABBILDUNG 7-12).

Die Untersuchung der Akzeptanz und Zumutbarkeit zeigen eine positive Korrelation, wobei die Zumutbarkeit ein strengeres Kriterium darstellt: Gerüche, die als unakzeptabel bewertet werden, erhalten nicht auch gleich die Bewertung unzumutbar zu sein. Auch dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen des in KAPITEL 4.2.1 dargestellten Forschungsprojektes.

## 3. Laborringversuch mit geschulten Prüfenden (KAPITEL 7.1.3, 7.2.3 und 7.3.3)

Insgesamt nehmen 11 Labore am Ringversuch teil, in dem alle die gleiche Lackprobe sensorisch bewerten. In insgesamt neun Laboren wird bei der Bewertung der

empfundene Intensität gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) das gleiche Ergebnis wie mit der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage (KAPITEL 7.2.3, ABBILDUNG 7-14) erzielt.

Die vereinfachte Messmethode erweist sich in allen drei Messreihen als grundsätzlich geeignet, da sie meist zur gleichen Beurteilung gemäß der Norm führt. Die Bewertung der Holzprodukte weicht aufgrund der angenehmen Hedonik davon ab. Hier kommt es im Bereich von 4 pi und 9 pi zu Unsicherheiten.

Da bei der Anwendung der vereinfachten Methode nur eine Acetonkonzentration angeboten werden muss, ist hier weniger Messequipment erforderlich. Insbesondere bei einer Neuausstattung von Laboren kann dies von Vorteil sein.

Die vereinfachte Methode empfiehlt sich insbesondere auch, wenn die Kenntnis des genauen Wertes der empfundenen Intensität nicht erforderlich ist.

Bei Anwendung der vereinfachten Methode sollte sich die erforderliche Mindestzahl an Prüfenden danach richten, ob die Prüfenden geschult sind (KAPITEL 7.3.4).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Arbeit mit geschulten Prüfenden sechs bis sieben Personen ausreichend sein können. Dabei sollten jedoch alle Prüfenden entweder die gleiche Bewertung abgegeben haben oder höchstens eine Person hat eine abweichende Bewertung vorgenommen. Bei jeder anderen Bewertung, mit geringerer Eindeutigkeit, empfiehlt sich die Teilnahme von 12 bis 15 Prüfenden, so wie es die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) bei der Bewertung der empfundenen Intensität empfiehlt. Für die Bewertung der Holzprodukte wird empfohlen, grundsätzlich mit 12 bis 15 Prüfenden zu arbeiten.

Bei Messungen mit ungeschulten Prüfenden hat sich eine Prüferzahl von 23 bis 40 Personen als geeignet gezeigt. Im weiteren Verlauf kann geprüft werden, ob Gruppengrößen von 15 bis 25 Personen (wie bei der Ermittlung der Akzeptanz) ausreichend sind.

In Bezug auf die Beurteilung von Produkten für eine Auszeichnung mit dem Blauen Engel kann bei Anwendung der vereinfachten Methode die Möglichkeit einer Wiederholungsprüfung wie folgt gegeben werden. Geben etwas mehr als 30 % bei der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage an, dass die empfundene Intensität größer ist als 7 pi, z. B. bei bis zu 40 %, so könnte am Folgetag eine Wiederholungsprüfung erfolgen, um zu prüfen, ob das Produkt die Prüfung doch bestehen würde. Dies wäre analog der Bewertung von textilen Bodenbelägen im Rahmen der Zulassung für den Blauen Engel DE-UZ 128. Bei diesem Umweltzeichen ist bei der Ermittlung einer empfundenen Intensität von größer 7 pi bis 8 pi am 28. Messtag eine Wiederholungsmessung am Folgetag möglich (KAPITEL 4.2.1, ABBILDUNG 4-1).

Zudem ist es bei der Prüfung im Rahmen des Blauen Engels auch bei der vereinfachten Methode möglich, ein Abbruchkriterium einzuführen. Wenn bereits am 7. Tag nach Beladung weniger als 30 % der Prüfenden angeben, dass sie die Intensität der Geruchsprobe geringer als 7 pi empfinden, so könnte die Messung vorzeitig mit positivem Ergebnis beendet werden.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Holzprodukte insgesamt anders bewertet werden als die übrigen untersuchten Produkte. Neben den abweichenden Bewertungen bei der vereinfachten Abfrage lassen sich diese nicht in den Vorschlag zur Einteilung von Geruchszonen (KAPITEL 4.2.2) einordnen. Hier wird empfohlen auch weitere Messungen mit

ungeschulten Prüfenden durchzuführen, um die Zusammenhänge zwischen den Messgrößen der empfundenen Intensität, Hedonik, Akzeptanz und Zumutbarkeit weiter zu erforschen.

Eine Möglichkeit der Bewertung der holzbasierten Produkte mit der vereinfachten Bewertung könnte zum jetzigen Zeitpunkt theoretisch sein, den Schwellenwert der Methode etwas höher zu setzen, z. B. auf 40 % bis 50 %. Damit wäre der höheren Zumutbarkeit bei Holzprodukten auch bei höheren Intensitäten aufgrund ihrer angenehmen Hedonik Rechnung getragen. Gegen diese Verfahrensweise spricht jedoch, dass damit Produkte mit höheren Intensitäten für die Anwendung im Innenraum zulässig wären. Zum Schutz der Innenraumluft und dem Ziel seiner geruchsarmen Gestaltung ist es von hoher Bedeutung geringe Intensitäten unabhängig von der hedonischen Wirkung der Bauprodukte einzuhalten.

Mit der vereinfachten Methode können der Messaufwand der Geruchsprüfung gemäß DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) in Bezug auf das erforderliche Messequipment, insbesondere dem Vergleichsmaßstab, die Aufgabe der Prüfenden und der erforderliche Schulungsbedarf reduziert werden. Aufgrund der erzielten Ergebnisse wird empfohlen, das Verfahren in die DIN ISO 16000-28 (DIN, 2021) sowie die VDI-Richtlinie 4302 Blatt 1 (VDI, 2015) aufzunehmen.

## 9 Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene (2008). *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden*. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 51(11), 1358–1369.  
<https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte (2014). *Gesundheitlich-hygienische Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mithilfe von Geruchsleitwerten. Entwurf der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumlufthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden zur öffentlichen Diskussion bis Ende Dezember 2015*. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 57(1), 148–153. <https://doi.org/10.1007/s00103-013-1882-3>
- AE (2020). *INNOVA 1512. Highly accurate, reliable, stable, quantitative, and remotely controllable gas monitoring system*. ENG-Innova1512-235-01 9.20. Advanced Energy Industries, Inc. <http://sv.svsamford.com/img/cms/en-gs-innova1512-data-sheet.pdf>
- AgBB (2003). *Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC) aus Bauprodukten*. Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten.  
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/AgBB-Bewertungsschema2003.pdf>
- AgBB (2021). *Anforderungen an die Innenraumluftqualität in Gebäuden: Gesundheitliche Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, SVOC und SVOC) aus Bauprodukten*. Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/dokumente/agbb\\_bewertungsschema\\_2021.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/dokumente/agbb_bewertungsschema_2021.pdf)
- Albrecht, J. & Wiesmann, M. (2006). *Das olfaktorische System des Menschen. Anatomie und Physiologie*. Der Nervenarzt, 77(8), 931–939. Berlin: Springer Medizin Verlag 2006.  
<https://doi.org/10.1007/s00115-006-2121-z>
- Altenburger, D., Bauer, N., Cervinka, R., Ekmekcioglu, C., Kociper, K., Kundi, M., Moshhammer, H., Neudorfer, E., Schauburger, G., Schlacher, R., Tappler, P. & Wallner, P. (2016). *Leitfaden. Medizinische Fakten zur Beurteilung von Geruchsimmissionen*. Wien: Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt (AUG).  
[https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/11002341\\_33794017/747fda9c/Leitfaden\\_MedizinischeFakten\\_BeurteilungGeruchsimmissionen\\_Aktualisiert\\_AGU\\_%C3%9CberarbeiteteFassung\\_160317.pdf](https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/11002341_33794017/747fda9c/Leitfaden_MedizinischeFakten_BeurteilungGeruchsimmissionen_Aktualisiert_AGU_%C3%9CberarbeiteteFassung_160317.pdf)
- Amoore, J. E., Johnston, J. W. & Rubin, M. (1964). *The Stereochemical Theory of Odor*. Scientific American, 210(2), 42–49. Scientific American, a division of Nature America, Inc. <http://www.jstor.org/stable/24936014>

- AMR (2011). *ALMEMO® Handbuch: Für Sensoren und Messgeräte bis Version 6*. AHLBORN Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen.
- AMR (o.J.). *Grundlagen zur Messung der Luftströmung. Thermo-Anemometersonde*. Abgerufen 21. April 2024 von <https://www.ahlborn.com/grundlagen/luftstroemung>
- Axel, R. (2005). *Geruch und Empfindung: eine molekulare Logik der olfaktorischen Wahrnehmung (Nobel-Vortrag)*. *Angewandte Chemie*, 117(38), 6264–6282. <https://doi.org/10.1002/ange.200501726>
- Babich, F., Demanega, I., Avella, F. & Belleri, A. (2020). *Low Polluting Building Materials and Ventilation for Good Air Quality in Residential Buildings: A Cost–Benefit Study*. *Atmosphere*, 11(1), 102. <https://doi.org/10.3390/atmos11010102>
- BauPVO (2011). *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. ABl. L 88/5, 4.4.2011.
- Bitter, F., Dahms, A., Kasche, J., Müller, B., Müller, D. & Panašková, J. (2008). *Sensorische Bestimmung der Luftqualität*. In H. Rietschel & K. Fitzner (Hrsg.), *Raumklimatechnik – Band 2* (Bd. 42, S. 673–728). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Blyussen, P. & Fanger, P. O. (o.J.). *Trained Panels to evaluate perceived air quality*. Laboratory of Heating and Air Conditioning. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark. [https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB\\_DC32255.pdf](https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC32255.pdf)
- Böttcher, O. (2003). *Experimentelle Untersuchungen zur Berechnung der Empfundenen Luftqualität*. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15, Umwelttechnik: Bd. 243. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Braun, P., Bruns-Tober, E., Damberger, B., Hoffmann, M., Hutter, H.-P., Kundi, M., Lerch, P., Maraun, W., Saleschak, G., Santen, M., Schmidt, M., Tappler, P., Thumulla, J., Twrdik, F. & Wallner, P. (2013). *AGÖF-Leitfaden "Gerüche in Innenräumen - Sensorische Bestimmung und Bewertung*. Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V. [https://www.agoef.de/fileadmin/user\\_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Geruchsleitfaden-2013.pdf](https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Geruchsleitfaden-2013.pdf)
- Brosig, L. (2018). *Optimierung der normgerechten Intensitätsbewertung und Untersuchung weiterer Referenzgerüche zur Qualitätssicherung*. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. <https://depositonce.tu-berlin.de/items/b8bbcea9-1969-42d3-973a-ecf70a335012>
- Brosig, L., Horn, W., Pyza, L. & Jann, O. (2014). *Ringversuch zur Einführung der Geruchsmessungen nach DIN ISO 16000-28 in die Bewertung von Bauprodukten*. UBA-Texte 88/2014. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Burdack-Freitag, A., Scherer, C. & Mayer, F. (2015). *Geruchsbewertung und Geruchsstoffanalytik pastöser Innenputze - Erfahrungsbericht zu DIN ISO 16000-28*. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 75(3), 76–84 (Sonderdruck).

- DE-UZ 12a (2011). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissions- und schadstoffarme Lacke. Vergabekriterien*. Ausgabe August 2011. Version 6. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20012a-201108-de%20Kriterien-2019-06-19.pdf>
- DE-UZ 38 (2022). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Möbel und Lattenroste aus Holz und Holzwerkstoffen. Vergabekriterien*. Ausgabe Januar 2022. Version 5. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20038-202201-de-Kriterien-V5.pdf>
- DE-UZ 76 (2016). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme plattenförmige Werkstoffe (Bau- und Möbelplatten) für den Innenausbau*. Ausgabe Februar 2016. Version 11. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20076-201602-de-Kriterien-V11.pdf>
- DE-UZ 102 (2019). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Innenwandfarben*. Ausgabe Januar 2019. Version 5. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20102-201901-de%20Kriterien-V5.pdf>
- DE-UZ 113 (2019). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Bodenbelagsklebstoffe und andere Verlegewerkstoffe*. Ausgabe Januar 2019. Version 9. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20113-201901-de%20Kriterien-V9.pdf>
- DE-UZ 117 (2018). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Polstermöbel. Ausgabe Januar 2018. Version 3*. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20117-201801-de%20Kriterien%20V3.pdf>
- DE-UZ 119 (2018). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Matratzen*. Ausgabe Januar 2018. Version 3. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20119-201801-de%20Kriterien-V3.1.pdf>
- DE-UZ 120 (2011). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Elastische Fußbodenbeläge*. Ausgabe Februar 2011. Version 12. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20120-201102-de%20Kriterien-V12.pdf>
- DE-UZ 123 (2019). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Dichtstoffe für den Innenraum*. Ausgabe Januar 2019. Version 7. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20123-201901-de%20Kriterien-V7.pdf>
- DE-UZ 128 (2016). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme textile Bodenbeläge*. Ausgabe Februar 2016. Version 6. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20128-201602-de-Kriterien-V6.pdf>
- DE-UZ 132 (2020). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Wärmedämmstoffe und Unterdecken für Innenanwendungen*. Ausgabe Januar 2020. Version 6. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20132-202001-de%20Kriterien-V6.pdf>

- DE-UZ 148 (2015). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Leder*. Ausgabe März 2015. Version 5. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20148-201503-de%20Kriterien-V5.pdf>
- DE-UZ 156 (2019). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Verlegeunterlagen für Bodenbeläge*. Ausgabe Januar 2019. Version 3. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20156-201901-de%20Kriterien-V3.pdf>
- DE-UZ 176 (2013). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Bodenbeläge, Paneele und Türen aus Holz und Holzwerkstoffen für Innenräume*. Ausgabe Januar 2013. Version 8. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20176-201301-de-Kriterien-V8.pdf>
- DE-UZ 198 (2019). *Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Emissionsarme Putze für den Innenraum*. Ausgabe Januar 2019. Version 3. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20198-201901-de%20Kriterien-V3.pdf>
- DIBt (2015). *Laborhandbuch der sachverständigen Prüfstellen des Gesundheitsschutzes und der PÜZ-Stellen 51/2: Prüf- und Messverfahren für die gesundheitliche Bewertung von Bauprodukten*. Laborhandbuch 2015-01-30. Referat für Gesundheitsschutz und Innenraumhygiene. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin.
- DIN (2006). DIN EN ISO 16000-11:2006-06. *Innenraumlufiverunreinigungen - Teil 11: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen – Probenahme, Lagerung der Proben und Vorbereitung der Prüfstücke (ISO 16000-11:2006); Deutsche Fassung EN ISO 16000-11:2006*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN (2008). DIN EN ISO 16000-9:2008-04, *Innenraumlufiverunreinigungen - Teil 9 Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen - Emissionsprüfkammer-Verfahren (ISO 16000-9:2006); Deutsche Fassung EN ISO 16000-9:2006*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN (2012a). DIN ISO 16000-28:2012-12, *Innenraumlufiverunreinigungen - Teil 28: Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten mit einer Emissionsprüfkammer (ISO 16000-28:2012)*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN (2012b). DIN ISO 16000-6:2012-11, *Innenraumlufiverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluf und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID (ISO 16000-6:2011)*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN (2020). DIN EN 16516:2020-10, *Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Bestimmung von Emissionen in die Raumluf (EN 16516:2020); Deutsche Fassung EN 16516:2017+A1:2020*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN (2021). DIN ISO 16000-28 *Innenraumlufiverunreinigungen – Teil 28: Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten mit einer Emissionsprüfkammer (ISO 16000-28:2020)*. Berlin: DIN Media GmbH.

- DIN (2022a). *DIN EN 13725:2022-06, Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration durch dynamische Olfaktometrie und die Geruchsstoffemissionsrate (EN 13725:2022); Deutsche Fassung EN 13725:2022*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN (2022b). *DIN EN 16798-1:2022-03, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil\_1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul MI-6 (EN 16798-1:2022); Deutsche Fassung EN 16798-1:2019*. Berlin: DIN Media GmbH.
- ECA (1997). *Evaluation of VOC Emissions from Building Products. Solid Flooring Materials*. Report No. 18. European Collaborative Action: Indoor Air Quality & its Impact on Man". European Commission. Joint Research Centre – Environment Institute. <https://www.aivc.org/resource/eca-18-evaluation-voc-emissions-building-products>
- ECA (1999). *Sensory Evaluation of Indoor Air Quality*. Report No. 20. European Collaborative Action: Indoor Air Quality & its Impact on Man. European Commission. Joint Research Centre – Environment Institute. <https://www.aivc.org/resource/eca-20-sensory-evaluation-indoor-air-quality>
- EPBD (2018). *Richtlinie (EU) 2018/844 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz (Text von Bedeutung für den EWR)*. ABl. L 156/75, 19.6.2018.
- Fang, L., Clausen, G. & Fanger, P. O. (1998). *The impact of temperature and humidity on perception and emission of indoor air pollutants*. Indoor air (8), 276–284.
- Fanger, P. O. (1988a). *Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors*. Energy and Buildings, 12(1), 1–6.
- Fanger, P. O. (1988b). *Olf and decipol: New units for perceived air quality*. Building Services Engineering Research and Technology, 9(4), 155–157.
- Fisk, W. & Seppanen, O. (2007). *Providing Better Indoor Environmental Quality Brings Economic Effects*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- GUT (2020). *Die Geruchsprüfung. Im Rahmen der GUT-Produktprüfung*. Abgerufen 22. Juli 2024 von <https://gut-prodis.eu/geruchspruefung/>
- Horn, W. (2022). *Report on Results of RR-VOC-O-BAM-2021* (unveröffentlichter Bericht). Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM).
- Horn, W., Jann, O., Kasche, J., Bitter, F., Müller, D. & Müller, B. (2007). *Umwelt- und Gesundheitsanforderungen an Bauprodukte: Ermittlung und Bewertung der VOC-Emissionen und geruchlichen Belastungen*. UBA-Texte 16/07. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umwelt-gesundheitsanforderungen-an-bauprodukte>

- Horn, W., Wilke, O., Richter, M., Baldan, A., de Krom, I. (2018). *Report on Results of RR\_VOC\_O\_BAM\_VSL\_2018. Final Version*. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), National Metrology Institute of the Netherlands (VSL).
- Ilvonen, O., Dürkop, J., Horn, W., Englert, N., Plehn, W., Bolland, T., Däumling, C., Dorer, C., Fischer, J., Kirschbaum, B., Noack, C., Oehm, A., Rapp, T., Scutaru, A. M., Utermann, J., Wolter, R. & Wurbs, J. (2015). *Umwelt- und gesundheitsverträgliche Bauprodukte: Ratgeber für Architekten, Bauherren und Planer*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umwelt-gesundheitsvertraegliche-bauprodukte>
- LfU (2020). *Gerüche und Geruchsbelästigungen*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Bayern. [https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_23\\_geruchsbelaestigungen.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_23_geruchsbelaestigungen.pdf)
- Lumitos AG (2024). *Massenspektrometrie*. Abgerufen 22. Juli 2024 von <https://www.chemie.de/lexikon/Massenspektrometrie.html>
- Mayer, S. (2013). *Die gesundheitliche Relevanz von Innenraumbelastungen — Die Bedeutung von Gerüchen*. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 63(6), 312–323. <https://doi.org/10.1007/BF03350877>
- MBO (2002). *Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002. Zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 23./24.11.2023*. Fortlaufend aktualisiert. <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=75909860991>.
- Mücke, W. & Lemmen, C. (2010). *Duft und Geruch: Wirkungen und gesundheitliche Bedeutung von Geruchsstoffen*. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: ecomed MEDIZIN.
- Müller, B. (2002). *Entwicklung eines Gerätes zur Entnahme und Darbietung von Luftproben zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität*. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15, Umwelttechnik: Bd. 242. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Müller, B., Brandt, S., Badura, A. & Knigge, A. (im Druck). *Geruchs- und emissionsarme Produkte für eine gesunde Innenraumluft: Entwicklung von Anforderungen für den Blauen Engel bei innenraumrelevanten, großflächigen Produkten*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Müller, B., Mertes, A., de Lima Vasconcelos, S., Jann, O., Horn, W. & Brosig, L. (2019). *Emissions- und geruchsarme Bauprodukte für energieeffiziente Gebäude - Entwicklung von Anforderungen und Konzepten für den Blauen Engel aus Klimaschutzsicht*. UBA-Texte 92/2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissions-geruchsarme-bauprodukte-fuer>

- Müller, B., Mertes, A. & Scutaru, A. M. (2016). *Innenraumlufthqualität nach Einbau von Bauprodukten in energieeffizienten Gebäuden*. UBA-Texte 36/2016. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/innenraumlufthqualitaet-nach-einbau-von-bauprodukten>
- Müller, B., Panašková, J., Danielak, M., Horn, W., Jann, O. & Müller, D. (2011). *Sensorische Bewertung der Emissionen aus Bauprodukten: Integration in die Vergabegrundlagen für den Blauen Engel und das Bewertungsschema des Ausschusses zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten*. UBA-Texte 35/2011. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sensorische-bewertung-emissionen-aus-bauprodukten>
- Müller, D., Bitter, F., Böttcher, O., Kasche, J. & Müller, B. (2004). *Neue Systematik zur Bewertung der empfundenen Luftqualität*. HLH - Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik, 55(12), 52–57.
- Nordtest (06/1998). *Building materials: Emission testing using the CLIMPAQ (NT BUILD 482)*. Espoo, Finland: NORDTEST.  
<https://www.nordtest.info/wp/1998/06/21/building-materials-emission-testing-using-the-climpaq-nt-build-482/>
- Olfasense GmbH (o.J.). *SET 7: Geruchsrads mit Sniffing Sticks*. Abgerufen 21. April 2024 von <https://www.olfasense.com/de/instrument/set-7-geruchsrads-sniffing-sticks/>
- Panašková, J. (2012). *Olfaktorische Bewertung von Emissionen aus Bauprodukten. Dissertation*. RWTH Aachen, Aachen. <http://publications.rwth-aachen.de/record/211587?ln=de>
- Panašková, J. & Müller, B. (2015). *Akzeptanz, empfundene Intensität, Hedonik und PD-Wert: Zusammenhang dieser Messgrößen*. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 75(10), 421–426.
- Pettenkofer, M. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. München: Literarisch-Artistische-Anstalt der J.G.Cotta'schen Buchhandlung.
- Rakennustieto (2017). *M1 Emission Classification of Building Materials: Protocol for Chemical and Sensory Testing of Building Materials*. The Building Information Foundation RTS sr 2017. <https://www.eco-institut.de/wp-content/uploads/2017/11/Testing-protocol-15112017.pdf>
- RAL e.V. (2022). RAL-GZ 430:2022-01. *Allgemeine Güte- und Prüfbestimmungen für Möbel - Gütesicherung*. Berlin: DIN Media GmbH.
- Roßmann, T. (2004). *Entwicklung und Validierung eines Meßverfahrens zur Bestimmung der Geruchsausbreitung im bodennahen Bereich*. Dissertation. TU Chemnitz, Chemnitz.  
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:swb:ch1-200401063>

- Salthammer, T., Schulz, N., Stolte, R. & Uhde, E. (2016). *Human sensory response to acetone/air mixtures*. *Indoor air*, 26(5), 796–805. <https://doi.org/10.1111/ina.12262>
- Salthammer, T., Schulz, N., Stolte, R., Uhde, E. & Bartsch, J. (2016). *Evaluierung einer Methode zur sensorischen Bewertung von Bauprodukten für Innenraumanwendungen unter Praxisbedingungen*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Fraunhofer WKI, Braunschweig.
- Savic, I., Gulyás, B. & Berglund, H. (2002). *Odorant differentiated pattern of cerebral activation: comparison of acetone and vanillin*. *Human brain mapping*, 17(1), 17–27. <https://doi.org/10.1002/hbm.10045>
- Schmidt, R. F., Thews, G. & Lang, F. (1997). *Physiologie des Menschen*. 27. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schünke, M. & Faller, A. (2016). *Der Körper des Menschen: Einführung in Bau und Funktion*. 17. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
- SNV (1968). *SNV 195 651:1968, Textilien; Bestimmung der Geruchsentwicklung von Ausrüstungen (Sinnenprüfung)*. Winterthur: Schweizerische Normen-Vereinigung.
- Speth, M. M., Speth, U. S., Sedaghat, A. R. & Hummel, T. (2022). *Riech- und Schmeckstörungen*. *HNO*, 70(2), 157–166. <https://doi.org/10.1007/s00106-021-01132-y>
- Sucker, K., Westphal, G., Bünger, J. & Brüning, T. (2014). *Gute oder schlechte Luft? Gerüche am Arbeitsplatz und im Innenraum und ihre Bedeutung für den Versicherungsträger*. *IPA-Journal*, 02/2014, 16–21. [https://www.dguv.de/medien/ipa/publikationen/ipa-journale/ipa-journale2014/documents/ipa-journal\\_1402-gerueche.pdf](https://www.dguv.de/medien/ipa/publikationen/ipa-journale/ipa-journale2014/documents/ipa-journal_1402-gerueche.pdf)
- Tirkkonen, T., Saarela, K. & Kukkonen, E. (2004). *Sensory evaluation method of building materials for labelling purposes*. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. Ausum Esko Kukkonen <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2004/T2262.pdf>
- Umweltbundesamt (2015). *Konferenz Abschluss Pilotphase AgBB Geruchsprüfung Bauprodukte*. Abgerufen 22. Juli 2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/service/termine/konferenz-abschluss-pilotphase-agbb-geruchspruefung>
- Umweltbundesamt (2020). *Gerüche aus Bauprodukten*. Abgerufen 22. Juli 2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/gerueche-aus-bauprodukten#wie-riechts-bei-ihnen>
- Universität zu Köln (o.J.). *EI: Elektronenstoßionisation*. Abgerufen 21. April 2024 von <http://www.oc.uni-koeln.de/ms-oc/download/ei.pdf>
- VDI (1994). *VDI-Richtlinie 3882 Blatt 2: Olfaktometrie; Bestimmung der hedonischen Geruchswirkung*. Berlin: DIN Media GmbH.
- VDI (2015). *VDI 4302 Blatt 1: Geruchsprüfung von Innenraumluft und Emissionen aus Innenraummaterialien; Grundlagen*. Berlin: DIN Media GmbH.

- Waldeck, C. P. zu & Frings, S. (2005). *Die molekularen Grundlagen der Geruchswahrnehmung - Wie wir riechen, was wir riechen*. *Biologie in unserer Zeit*, 35(5). <https://doi.org/10.1002/biuz.200410290>
- Wargocki, P. & Fanger, P. O. (1999). *A transfer model between perceived air quality judged by a trained panel and by an untrained panel*. In Proc. of 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (pp. 594-599). Construction Research Communications, Ltd.
- Wolff, M. (2021). *Sensor-Technologien. Band 3: Stoffmenge, Konzentration, Analytik*. Berlin, Bosteon: De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783110702040>
- Wyon, D. & Wargocki, P. (2006). *Indoor air quality effects on office work*. *Creating the Productive Workplace* (1), 193–205.  
[https://www.researchgate.net/publication/288154576\\_Indoor\\_air\\_quality\\_effects\\_on\\_office\\_work](https://www.researchgate.net/publication/288154576_Indoor_air_quality_effects_on_office_work)
- Yaglou, C. P., Riley, E. C. & Coggins, D. I. (1936). *Ventilation Requirements*. A.S.H.V.E. Transactions (Vol. 42), 133–162.
- Yaglou, C. P. & Witheridge, W. N. (1937). *Ventilation requirements, Part 2*. A.S.H.V.E. Transactions (Vol. 43), 423–436.  
[https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_2066.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_2066.pdf)

## 10 Anhang

## Anhang A: Untersuchungen zur Entwicklung des Probendarbietungssystems Adapter

### Anhang A1: Daten zu Kapitel 6.1 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Standardverfahren

Probenbewertung mit Daten der Leistungsprüfung (beinhalten die Anzahl der Prüfenden mit zweiter Beurteilung und die Anzahl ausgeschlossener Prüfender), empfundener Intensität und Hedonik (jeweils Mittelwert, Standardabweichung und 90%-Vertrauensbereich).

<b>Messung</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)		eB	eB	eB	eB	eB	eB	eB	eB	eB
Anzahl Prüfender nach bestandener Leistungsprüfung (=Anzahl gültiger Prüfergebnisse)		9	9	9	8	9	6	8	8	8
Leistungsprüfung mit Aceton	II des Acetons in pi (vorgegebener niedriger Wert)	5	5	3	3	3	4	0	0	0
	Mittelwert in pi	5,6	5,6	3,4	3,4	3,4	4,8	1,7	1,7	1,7
	Standardabweichung in pi	0,8	0,8	1,3	1,3	1,3	1,2	0,6	0,6	0,6
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,5	0,5	0,8	0,9	0,8	1,0	0,4	0,4	0,4
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	4	4	5	5	5	3	3	3	3
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	0	2	2	2	0	1	1	1
	II des Acetons in pi (vorgegebener hoher Wert)	10,0	10,0	14,5	14,5	14,5	8,0	10,5	10,5	10,5
	Mittelwert in pi	9,5	9,5	13,9	13,9	13,9	8,8	10,1	10,1	10,1
	Standardabweichung in pi	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	1,0	1,0	1,0
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	3	3	5	5	5	2	2	2	2
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	2	2	3	3	3	2	0	0	0
	Gesamtanzahl ausgeschlossener Prüfender	2	2	5	5	5	2	1	1	1
II bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert in pi	10,0	8,2	7,0	2,4	13,7	6,6	7,6	3,4	15,2
	Standardabweichung in pi	2,4	2,8	2,8	1,4	3,1	2,6	3,0	2,7	3,7
	90 %-Vertrauensbereich in pi	1,5	1,7	1,7	0,9	1,9	2,2	2,0	1,8	2,5
Hedonik bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert	0,5	-1,2	0,7	0,2	-2,1	0,4	0,4	0,1	-2,6
	Standardabweichung	2,5	1,6	1,4	1,0	1,5	1,5	1,4	0,6	0,7
	90 %-Vertrauensbereich	1,5	1,0	0,9	0,7	0,9	1,2	0,9	0,4	0,5
Art des Folienmaterials: Nalophan® = N, Tedlar® = T		N	N	N	N	N	N	N	N	N
II bei Anwendung des Standardverfahrens (Probenbehälter)	Mittelwert in pi	6,7	5,5	4,9	3,3	10,8	3,8	3,3	2,5	9,9
	Standardabweichung in pi	2,5	2,8	2,6	1,9	3,3	2,8	2,6	1,2	3,1
	90 %-Vertrauensbereich in pi	1,5	1,7	1,8	1,3	2,2	2,3	1,8	0,8	2,1
Hedonik bei Anwendung des Standardverfahrens (Probenbehälter)	Mittelwert	1,3	-0,9	0,0	-0,1	-1,2	-0,3	0,8	0,3	-1,5
	Standardabweichung	1,5	0,7	1,0	0,8	1,5	0,9	1,0	0,8	1,6
	90 %-Vertrauensbereich	0,9	0,5	0,7	0,6	1,0	0,7	0,7	0,6	1,1

## Anhang A2: Daten zu Kapitel 6.3.2.3 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und festes System (Glasgefäß)

Probenbewertung mit Daten der Leistungsprüfung (beinhalten die Anzahl der Prüfenden mit zweiter Beurteilung und die Anzahl ausgeschlossener Prüfender), empfundener Intensität und Hedonik (jeweils Mittelwert, Standardabweichung und 90%-Vertrauensbereich).

<b>Messung</b>		<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)		eB	eB	eB
Anzahl Prüfender nach bestandener Leistungsprüfung (=Anzahl gültiger Prüfergebnisse)		8	8	9
Leistungsprüfung mit Aceton	II des Acetons in pi (vorgegebener niedriger Wert)	6	3	4,5
	Mittelwert in pi	5,9	4,1	4,7
	Standardabweichung in pi	0,9	0,8	0,7
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,6	0,5	0,4
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	2	1	5
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	0	0
	II des Acetons in pi (vorgegebener hoher Wert)	12	14	12
	Mittelwert in pi	11,3	12,6	11,8
	Standardabweichung in pi	1,5	1,1	0,6
	90 %-Vertrauensbereich in pi	1,0	0,7	0,3
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	0	0	1
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	0	1
	Gesamtanzahl ausgeschlossener Prüfender	0	0	1
II bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert in pi	9,6	9,2	9,4
	Standardabweichung in pi	3,7	3,9	4,4
	90 %-Vertrauensbereich in pi	2,5	2,6	2,8
Hedonik bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert	-1,2	-0,1	-1,0
	Standardabweichung	2,2	2,3	1,9
	90 %-Vertrauensbereich	1,5	1,5	1,2
II bei Anwendung des Glassammelgefäßes	Mittelwert in pi	6,9	5,6	3,8
	Standardabweichung in pi	3,1	3,8	2,3
	90 %-Vertrauensbereich in pi	2,1	2,5	1,4
Hedonik bei Anwendung des Glassammelgefäßes	Mittelwert	-0,8	0,8	0,0
	Standardabweichung	1,6	1,4	1,2
	90 %-Vertrauensbereich	1,0	1,0	0,8

### Anhang A3: Daten zu Kapitel 6.5.3.1 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Adapter (1. Version: manueller Kugelhahn)

Probenbewertung mit Daten der Leistungsprüfung (beinhalten die Anzahl der Prüfenden mit zweiter Beurteilung und die Anzahl ausgeschlossener Prüfender), empfundener Intensität und Hedonik (jeweils Mittelwert, Standardabweichung und 90%-Vertrauensbereich).

<b>Messung</b>		<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)		L	hB	hB	eB	eB	eB
Anzahl Prüfender nach bestandener Leistungsprüfung (=Anzahl gültiger Prüfergebnisse)		9	8	8	13	8	7
Leistungsprüfung mit Aceton	II des Acetons in pi (vorgegebener niedriger Wert)	3	2	2	6	8	4
	Mittelwert in pi	2,8	2,6	2,9	5,6	7,3	4,6
	Standardabweichung in pi	1,2	0,7	1,0	1,3	1,1	0,7
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,7	0,5	0,6	0,6	0,8	0,5
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	0	1	3	5	3	3
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	1	0	0	1	1
	II des Acetons in pi (vorgegebener hoher Wert)	11	8	15	9	14	11
	Mittelwert in pi	11,1	7,8	13,6	10,0	13,4	11,4
	Standardabweichung in pi	1,1	1,3	0,9	1,2	0,9	1,4
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,7	0,9	0,6	0,6	0,6	1,0
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	3	6	4	4	2	2
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	2	3	1	0	1	1
	Gesamtanzahl ausgeschlossener Prüfender	2	4	1	0	2	2
II bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert in pi	13,1	9,6	6,9	13,3	11,4	13,1
	Standardabweichung in pi	2,3	3,2	2,1	4,5	3,4	2,4
	90 %-Vertrauensbereich in pi	1,4	2,1	1,4	2,2	2,2	1,8
Hedonik bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert	-2,2	0,3	-0,1	-2,4	-1,9	-2,6
	Standardabweichung	1,3	2,1	1,9	1,1	1,4	1,0
	90 %-Vertrauensbereich	0,8	1,4	1,3	0,5	1,0	0,7
Art des Folienmaterials (Nalophan® = N, Tedlar® = T)		N	N	N	N	N	N
II bei bei Bewertung mithilfe des Adapters	Mittelwert in pi	11,3	6,9	8,0	10,7	10,0	10,0
	Standardabweichung in pi	3,3	3,0	3,0	4,7	4,4	4,1
	90 %-Vertrauensbereich in pi	2,1	2,0	2,0	2,3	2,9	3,0
Hedonik bei Bewertung mithilfe des Adapters	Mittelwert	-2,2	-1,1	-1,5	-2,1	-1,8	-2,0
	Standardabweichung	1,2	1,7	1,6	1,0	0,8	1,0
	90 %-Vertrauensbereich	0,7	1,1	1,0	0,5	0,5	0,7

## Anhang A4: Daten zu Kapitel 6.5.3.2 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Adapter (2. Version: Magnetventil)

Probenbewertung mit Daten der Leistungsprüfung (beinhalten die Anzahl der Prüfenden mit zweiter Beurteilung und die Anzahl ausgeschlossener Prüfender), empfundener Intensität und Hedonik (jeweils Mittelwert, Standardabweichung und 90%-Vertrauensbereich).

Messung		19	20	21	22	23	24	25	26	27
Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)		eB	eB	tB	tB	tB	L	L	L	L
Anzahl Prüfender nach bestandener Leistungsprüfung (=Anzahl gültiger Prüfergebnisse)		13	10	10	9	8	13	11	10	8
Leistungsprüfung mit Aceton	II des Acetons in pi (vorgegebener niedriger Wert)	2	1	7	5	4	7	3	7	5
	Mittelwert in pi	2,8	2,3	7,0	4,6	3,9	7,0	3,6	7,5	5,3
	Standardabweichung in pi	1,0	0,7	1,3	1,4	1,2	1,2	0,9	1,3	1,5
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,5	0,4	0,7	0,9	0,8	0,6	0,5	0,7	1,0
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	4	5	5	4	2	6	3	4	3
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	II des Acetons in pi (vorgegebener hoher Wert)	8	14	13	12	9	12	9	12	12
	Mittelwert in pi	8,5	13,2	13,1	12,5	9,6	12,2	9,2	12,3	12,1
	Standardabweichung in pi	1,1	0,9	0,7	1,3	1,4	1,3	1,5	1,3	1,5
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,5	0,5	0,4	0,8	0,9	0,6	0,8	0,7	1,0
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	4	4	2	1	2	1	4	3	1
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	1	0	0	0	0	1	1	0
	Gesamtanzahl ausgeschlossener Prüfender	0	2	1	0	0	0	1	2	0
II bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert in pi	8,3	8,7	11,8	11,3	10,1	11,3	11,9	12,1	8,9
	Standardabweichung in pi	3,3	2,4	3,2	3,0	2,9	3,5	3,0	3,0	2,6
	90 %-Vertrauensbereich in pi	1,6	1,4	1,8	1,9	1,9	1,7	1,6	1,7	1,8
Hedonik bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert	-1,5	-1,4	-1,8	-1,8	-1,8	-1,6	-1,1	-2,5	-1,9
	Standardabweichung	1,1	1,2	2,2	2,3	1,6	1,9	1,6	1,8	1,5
	90 %-Vertrauensbereich	0,6	0,7	1,2	1,4	1,1	0,9	0,9	1,0	1,0
Art des Folienmaterials (Nalophan® = N, Tedlar® = T)		N	N	N	T	T	T	T	T	T
II bei bei Bewertung mithilfe des Adapters	Mittelwert in pi	6,2	6,3	10,0	8,7	8,6	9,1	10,5	8,3	6,8
	Standardabweichung in pi	2,9	2,8	2,9	2,6	2,8	3,4	1,9	2,8	2,5
	90 %-Vertrauensbereich in pi	1,4	1,6	1,7	1,6	1,9	1,7	1,0	1,6	1,7
Hedonik bei Bewertung mithilfe des Adapters	Mittelwert	-0,8	-0,8	-1,7	-1,4	-0,7	-1,3	-1,4	-1,7	-1,3
	Standardabweichung	1,7	1,7	1,6	1,9	1,7	1,6	1,5	1,8	1,0
	90 %-Vertrauensbereich	0,8	1,0	0,9	1,2	1,1	0,8	0,8	1,1	0,7

## Anhang A5: Daten zu Kapitel 6.5.3.3 - Sensorische Vergleichsmessungen: direktes Verfahren und Adapter (3. Version: optimierte Abdichtung)

Probenbewertung mit Daten der Leistungsprüfung (beinhalten die Anzahl der Prüfenden mit zweiter Beurteilung und die Anzahl ausgeschlossener Prüfender), empfundener Intensität und Hedonik (jeweils Mittelwert, Standardabweichung und 90%-Vertrauensbereich).

Messung		28	29	30	31
Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)		L	L	eB	eB
Anzahl Prüfender nach bestandener Leistungsprüfung (=Anzahl gültiger Prüfergebnisse)		9	11	11	13
Leistungsprüfung mit Aceton	II des Acetons in pi (vorgegebener niedriger Wert)	5	3	4	5
	Mittelwert in pi	5,3	3,4	4,4	5,5
	Standardabweichung in pi	1,3	0,7	1,1	1,3
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,8	0,4	0,6	0,6
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	1	0	0	3
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	0	0	0
	II des Acetons in pi (vorgegebener hoher Wert)	9	9	10	11
	Mittelwert in pi	9,2	9,5	9,5	10,6
	Standardabweichung in pi	0,9	1,1	1,2	1,2
	90 %-Vertrauensbereich in pi	0,6	0,6	0,7	0,6
	Anzahl Prüfender mit Wiederholungsprüfung	1	0	1	3
	Anzahl ausgeschlossener Prüfender	0	0	0	0
	Gesamtanzahl ausgeschlossener Prüfender	0	0	0	0
	II bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert in pi	6,1	8,5	12,5
Standardabweichung in pi		2,6	3,5	2,7	3,0
90 %-Vertrauensbereich in pi		1,6	1,9	1,5	1,5
Hedonik bei Anwendung des direkten Verfahrens	Mittelwert	-0,3	-0,6	-1,4	-1,6
	Standardabweichung	1,4	1,4	1,4	1,7
	90 %-Vertrauensbereich	0,8	0,8	0,8	0,8
Art des Folienmaterials (Nalophan® = N, Tedlar® = T)		T	T	T	T
II bei bei Bewertung mithilfe des Adapters	Mittelwert in pi	7,3	6,9	12,4	9,2
	Standardabweichung in pi	2,7	2,4	2,6	3,3
	90 %-Vertrauensbereich in pi	1,7	1,3	1,4	1,6
Hedonik bei Bewertung mithilfe des Adapters	Mittelwert	-0,8	-1,1	-1,7	-0,9
	Standardabweichung	2,0	1,6	1,1	1,7
	90 %-Vertrauensbereich	1,2	0,9	0,6	0,8

## Anhang B: Untersuchungen zur vereinfachten Messung der empfundenen Intensität

### Anhang B1: Daten zu Kapitel 7.2.1 - Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit geschulten Prüfenden

Probenbewertung mit Anzahl der qualifizierten und ausgeschlossenen Prüfenden, empfundene Intensität und Hedonik (jeweils Mittelwert, Standardabweichung und 90 %-Vertrauensbereich) sowie Ergebnisse der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage.

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		[] in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfender in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton $\leq$ , $>$ oder $=$ empfinden		
				qualifiziert	aussgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 %-Ver- trauensbereich	$\leq$	$>$	$=$
1	eB	Kunststoff	20.004	9	1	3,8	1,6	1,0	0,9	2,0	1,2	88,9	11,1	nicht protokolliert
2	eB	Kunststoff	20.004	10	1	3,1	1,4	0,9	0,1	0,8	0,5	100,0	0,0	nicht protokolliert
3	eB	Kunststoff	20.004	9	3	3,2	1,5	0,9	-0,2	1,2	0,7	88,9	11,1	nicht protokolliert
4	eB	Kunststoff	20.004	12	1	3,2	1,5	0,8	0,0	1,0	0,5	83,3	16,7	nicht protokolliert
5	eB	Kautschuk	20.005	9	1	2,4	2,3	1,4	-0,1	1,1	0,7	77,8	22,2	nicht protokolliert
6	eB	Kautschuk	20.005	10	1	1,5	0,5	0,3	0,8	1,5	0,9	100,0	0,0	nicht protokolliert
7	eB	Kautschuk	20.005	9	3	2,1	1,1	0,7	0,0	0,9	0,5	100,0	0,0	nicht protokolliert
8	eB	Kautschuk	20.005	12	1	1,7	1,4	0,7	0,1	1,7	0,9	100,0	0,0	nicht protokolliert
9	eB	Kautschuk	20.006	9	1	8,7	2,4	1,5	-2,1	1,8	1,1	0,0	100,0	nicht protokolliert
10	eB	Kautschuk	20.006	10	1	10,1	3,0	1,8	-1,9	2,2	1,3	0,0	100,0	nicht protokolliert
11	eB	Kautschuk	20.006	9	3	10,3	2,5	1,5	-2,5	0,8	0,5	11,1	88,9	nicht protokolliert
12	eB	Kautschuk	20.006	12	1	8,5	3,0	1,5	-2,1	1,4	0,8	33,3	66,7	nicht protokolliert
13	tB	Teppichboden	14.034	10	0	9,0	3,0	1,8	-1,1	1,8	1,0	30,0	70,0	nicht protokolliert
14	tB	Teppichboden	14.034	8	0	6,0	3,2	2,4	-1,1	1,1	0,8	12,5	87,5	nicht protokolliert
15	tB	Teppichboden	14.034	8	0	8,3	3,9	2,6	-1,4	1,3	0,8	37,5	62,5	nicht protokolliert
16	tB	Teppichboden	14.034	10	0	8,2	4,2	2,4	-0,8	1,7	1,0	30,0	70,0	nicht protokolliert
17	tB	Teppichboden	14.030	10	0	8,9	3,8	2,2	-1,1	1,5	0,9	10,0	90,0	nicht protokolliert
18	tB	Teppichboden	14.030	8	0	4,9	2,9	2,1	-0,4	1,5	1,1	75,0	25,0	nicht protokolliert
19	tB	Teppichboden	14.030	8	0	3,1	3,0	2,0	0,3	1,3	0,9	87,5	12,5	nicht protokolliert
20	tB	Teppichboden	14.030	10	0	5,8	2,9	1,7	0,4	1,5	0,9	80,0	20,0	nicht protokolliert

## Fortsetzung Anhang B1

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		[] in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000-28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton $\leq$ , $>$ oder $=$ empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standardabweichung	90 %- Vertrauensbereich	Mittelwert	Standardabweichung	90 %- Vertrauensbereich	$\leq$	$>$	$=$
21	eB	Kautschuk	20.007	10	0	12,4	3,7	2,1	-2,4	0,7	0,4	10,0	90,0	nicht protokolliert
22	eB	Kautschuk	20.007	8	0	10,1	4,3	2,9	-1,8	1,1	0,7	0,0	100,0	nicht protokolliert
23	eB	Kautschuk	20.007	8	0	9,4	4,0	2,7	-0,7	1,8	1,2	0,0	100,0	nicht protokolliert
24	eB	Kautschuk	20.007	10	0	10,3	3,0	1,7	-1,8	1,3	0,7	0,0	100,0	nicht protokolliert
25	hB	Laminat	21.001	8	1	11,4	2,0	1,3	-0,3	1,8	1,2	0,0	100,0	nicht protokolliert
26	hB	Laminat	21.001	10	1	9,4	3,5	2,0	-1,0	1,7	1,0	10,0	90,0	nicht protokolliert
27	hB	Laminat	21.001	13	0	9,6	3,2	1,6	-0,8	1,9	1,0	7,7	92,3	0,0
28	hB	Laminat	21.001	10	2	10,1	3,2	2,0	0,0	1,8	1,1	20,0	80,0	0,0
29	hB	Laminat	21.001	6	4	7,3	3,6	3,0	0,0	1,8	1,5	16,7	83,3	0,0
30	eB	Kunststoff	21.002	8	1	15,8	1,9	1,3	-2,1	1,6	1,1	0,0	100,0	nicht protokolliert
31	eB	Kunststoff	21.002	10	1	15,7	3,4	2,0	-1,3	2,5	1,4	10,0	90,0	nicht protokolliert
32	eB	Kunststoff	21.002	13	0	11,5	3,5	1,9	-0,5	2,2	1,2	30,8	69,2	0,0
33	eB	Kunststoff	21.002	10	2	9,9	4,7	2,9	-0,3	2,2	1,4	30,0	70,0	30,0
34	eB	Kunststoff	21.002	6	4	10,7	2,9	2,4	-0,5	1,4	1,1	33,3	66,7	33,3
35	hB	Parkett	21.003	8	1	10,0	1,7	1,1	1,1	1,7	1,2	25,0	75,0	nicht protokolliert
36	hB	Parkett	21.003	10	1	8,1	3,2	1,9	-0,9	1,1	0,7	50,0	50,0	nicht protokolliert
37	hB	Parkett	21.003	13	0	8,3	3,1	1,5	-0,1	1,7	0,9	46,2	53,8	30,8
38	hB	Parkett	21.003	10	2	7,3	3,1	1,8	0,1	1,7	1,0	30,0	70,0	30,0
39	hB	Parkett	21.003	6	4	6,3	2,7	2,2	0,7	1,0	0,8	50,0	50,0	33,3
40	L	Lack C	RR-O 1	5	4	11,4	3,4	3,2	-2,4	0,4	0,4	60,0	40,0	44,4

### Fortsetzung Anhang B1

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		[] in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton $\leq$ , $>$ oder $=$ empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 %-Ver- trauensbereich	$\leq$	$>$	$=$
41	L	Lack C	RR-O 2	9	2	9,4	3,0	1,8	-2,1	0,9	0,6	22,2	77,8	22,2
42	hB	Furnierboden	21.004	5	6	8,2	3,1	3,0	1,0	2,0	1,9	80,0	20,0	20,0
43	hB	Furnierboden	21.004	8	4	8,6	2,6	1,8	-0,6	1,5	1,0	37,5	62,5	12,5
44	hB	Furnierboden	21.004	8	1	6,4	3,2	2,1	-0,9	1,4	0,9	62,5	37,5	12,5
45	hB	Furnierboden	21.004	7	2	5,1	1,9	1,4	1,3	1,0	0,8	71,4	28,6	28,6
46	hB	Laminat	21.005	5	6	7,6	2,9	2,7	1,2	1,8	1,7	80,0	20,0	20,0
47	hB	Laminat	21.005	8	4	6,2	1,8	1,2	0,4	1,9	1,2	87,5	12,5	50,0
48	hB	Laminat	21.005	8	1	5,5	2,4	1,6	-0,2	1,4	0,9	87,5	12,5	37,5
49	hB	Laminat	21.005	7	2	3,7	1,6	1,2	1,0	0,9	0,6	85,7	14,3	42,9
50	hB	Parkett	21.006	5	6	11,0	2,0	1,9	0,3	1,8	1,7	20,0	80,0	20,0
51	hB	Parkett	21.006	8	4	9,6	3,2	2,1	0,3	2,1	1,4	50,0	50,0	12,5
52	hB	Parkett	21.006	8	1	5,6	2,8	0,8	0,2	2,3	0,6	50,0	50,0	12,5
53	hB	Parkett	21.006	8	3	6,2	3,6	2,7	0,1	1,6	1,1	62,5	37,5	25,0
54	hB	Parkett	21.006	7	2	5,9	1,0	0,7	-0,1	1,7	1,3	42,9	57,1	28,6
55	eB	Kautschuk	21.007	13	0	13,3	4,5	2,2	-2,4	1,1	0,5	7,7	92,3	0,0
56	eB	Kautschuk	21.007	10	-2	11,4	3,4	2,5	-1,9	1,4	1,0	0,0	100,0	0,0
57	eB	Kautschuk	21.007	9	-2	13,1	2,4	1,8	-2,6	1,0	0,7	14,3	85,7	14,3
58	eB	Kautschuk	21.007	8	-3	11,4	4,2	4,0	-1,3	1,2	1,1	0,0	100,0	0,0
59	eB	Kautschuk	21.008	13	0	13,9	3,7	1,7	-2,0	1,5	0,7	7,7	92,3	0,0
60	eB	Kautschuk	21.008	8	2	15,1	2,0	1,5	-2,6	1,2	0,9	0,0	100,0	0,0

### Fortsetzung Anhang B1

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbaasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		II in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton ≤, > oder = empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 % Ver- trauensbereich	≤	>	=
61	eB	Kautschuk	21.008	7	2	13,9	1,8	1,4	-2,4	1,3	0,9	0,0	100,0	0,0
62	eB	Kautschuk	21.008	5	3	10,5	2,5	2,4	-1,8	0,8	0,8	0,0	100,0	0,0
63	hB	Furnierboden	22.001	6	1	2,9	1,2	1,0	-0,1	1,0	0,8	100,0	0,0	16,7
64	hB	Furnierboden	22.001	6	2	3,3	2,1	1,7	0,8	1,0	0,8	100,0	0,0	33,3
65	hB	Furnierboden	22.001	9	0	2,9	2,1	1,3	0,3	0,9	0,6	77,8	22,2	22,2
66	hB	Parkett	22.002	6	1	6,8	2,9	2,4	-0,5	2,1	1,8	33,3	66,7	16,7
67	hB	Parkett	22.002	6	2	7,8	3,1	2,6	-0,1	1,6	1,3	0,0	100,0	0,0
68	hB	Parkett	22.002	9	0	7,4	3,0	1,8	0,4	1,6	1,0	11,1	88,9	22,2
69	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	6	1	4,6	2,0	1,6	-0,3	1,4	1,1	66,7	33,3	33,3
70	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	6	2	5,3	2,3	1,9	0,8	0,9	0,8	50,0	50,0	33,3
71	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	9	0	4,1	3,1	0,8	0,6	2,1	0,6	33,3	55,6	11,1
72	hB	Parkett	21.006	5	0	11,4	5,2	5,0	-0,3	2,3	2,1	20,0	80,0	0,0
73	eB	Linoleum	19.011	8	1	11,8	3,1	2,1	-0,9	2,2	1,4	25,0	75,0	25,0
74	hB	Parkett	21.006	8	1	8,1	3,7	2,5	0,1	2,2	1,5	75,0	25,0	0,0
75	tB	Teppichboden	14.041	5	1	7,2	2,1	2,0	-0,6	1,3	1,2	60,0	40,0	20,0
76	eB	Kunststoff	20.001	7	0	5,5	3,4	2,5	1,5	1,2	0,9	85,7	14,3	0,0
77	hB	Laminat	21.001	7	0	10,3	2,5	2,0	-1,2	1,5	1,2	14,3	85,7	0,0
78	eB	Kunststoff	20.001	5	0	5,5	2,4	2,3	0,3	1,5	1,4	80,0	20,0	40,0
79	eB	Kunststoff	20.001	8	0	6,1	2,3	1,5	-0,5	1,8	1,2	62,5	37,5	12,5
80	hB	Laminat	21.001	8	0	10,1	2,5	1,7	-1,9	2,1	1,4	50,0	50,0	25,0

### Fortsetzung Anhang B1

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbaasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		II in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton ≤, > oder = empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 % Ver- trauensbereich	≤	>	=
81	hB	Laminat	21.001	5	2	12,3	4,8	4,6	-1,5	1,7	1,6	20,0	80,0	20,0
82	eB	PVC	22.005	5	2	14,2	1,9	1,8	-2,8	0,8	0,7	20,0	80,0	20,0
83	eB	Kunststoff	20.001	5	3	5,0	3,6	3,4	-0,9	1,9	1,8	100,0	0,0	40,0
84	hB	Laminat	21.001	5	3	8,8	5,3	5,0	-0,7	0,7	0,6	60,0	40,0	60,0
85	eB	PVC	22.005	5	3	5,7	5,0	4,8	0,0	2,5	2,4	80,0	20,0	0,0
86	eB	Kunststoff	20.001	5	0	6,6	4,4	4,2	-0,2	2,1	2,0	80,0	20,0	20,0
87	hB	Laminat	21.001	5	0	6,3	3,9	3,7	-0,2	2,3	2,2	40,0	60,0	40,0
88	eB	PVC	22.005	5	0	1,8	0,8	0,8	0,0	1,9	1,8	100,0	0,0	0,0
89	eB	PVC	19.006	13	1	11,5	1,6	0,8	-1,7	1,6	0,8	30,8	69,2	0,0
90	hB	Parkett	21.006	13	1	11,9	2,5	1,2	0,7	1,9	0,9	15,4	84,6	0,0
91	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	13	1	3,0	2,0	1,0	0,8	1,0	0,5	92,3	7,7	0,0
92	tB	Teppichboden	14.038	13	1	13,8	2,9	1,4	-2,5	0,9	0,5	7,7	92,3	0,0
93	eB	PVC	19.006	12	2	9,5	3,8	2,0	-1,5	1,8	0,9	33,3	66,7	16,7
94	hB	Parkett	21.006	12	2	11,2	2,6	1,4	0,0	1,8	0,9	8,3	91,7	8,3
95	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	12	2	1,6	1,7	0,9	0,3	0,9	0,5	91,7	8,3	0,0
96	tB	Teppichboden	14.038	12	2	12,7	3,3	1,7	-2,8	1,5	0,8	0,0	100,0	0,0
97	eB	PVC	19.006	13	1	9,2	3,2	1,6	-1,4	1,5	0,7	30,8	69,2	15,4
98	hB	Parkett	21.006	13	1	10,1	2,4	1,2	0,1	1,6	0,8	16,7	91,7	15,4
99	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	13	1	2,5	1,9	1,0	0,6	1,1	0,5	100,0	0,0	23,1
100	tB	Teppichboden	14.038	13	1	12,8	1,7	0,4	-2,8	0,7	0,2	23,1	76,9	15,4

## Fortsetzung Anhang B1

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbaasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		II in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton ≤, > oder = empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 % Ver- trauensbereich	≤	>	=
101	eB	PVC	19.006	15	0	9,1	3,5	1,6	-1,2	1,1	0,5	46,7	53,3	20,0
102	hB	Parkett	21.006	15	0	9,7	2,6	1,2	0,4	1,8	0,8	6,7	93,3	6,7
103	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	15	0	2,9	2,9	1,3	0,4	1,3	0,6	93,3	6,7	13,3
104	tB	Teppichboden	14.038	15	0	13,6	2,8	1,3	-2,6	1,1	0,5	13,3	86,7	6,7
105	eB	PVC	19.013	12	2	8,3	2,5	1,3	-0,6	1,0	0,5	25,0	75,0	8,3
106	eB	Linoleum	22.006	12	2	12,3	3,7	1,9	-1,0	1,7	0,9	16,7	83,3	16,7
107	hB	Parkett	21.003	12	2	6,9	3,1	1,6	-0,3	1,4	0,7	41,7	58,3	25,0
108	hB	Furnierboden	21.004	12	2	6,5	3,5	1,8	0,6	1,5	0,8	58,3	41,7	16,7
109	eB	PVC	19.013	13	0	7,6	3,2	1,6	-0,8	1,8	0,9	38,5	61,5	30,8
110	eB	Linoleum	22.006	13	0	12,7	3,8	1,9	-0,5	2,1	1,0	7,7	92,3	0,0
111	hB	Parkett	21.003	13	0	8,4	4,0	2,0	0,0	1,8	0,9	46,2	53,8	15,4
112	hB	Furnierboden	21.004	13	0	6,3	2,7	1,3	-0,6	1,7	0,8	76,9	23,1	30,8
113	eB	PVC	19.013	13	0	8,3	3,3	1,6	-1,5	1,1	0,6	16,7	91,7	0,0
114	eB	Linoleum	22.006	13	0	12,4	2,9	1,5	-0,2	2,1	1,0	0,0	100,0	0,0
115	hB	Parkett	21.003	13	0	6,3	4,5	4,5	-0,5	3,0	0,7	61,5	38,5	30,8
116	hB	Furnierboden	21.004	13	0	6,7	2,9	1,4	0,6	1,7	0,8	69,2	30,8	38,5
117	eB	PVC	19.013	10	2	8,7	2,4	1,4	-1,4	1,2	0,7	10,0	90,0	10,0
118	eB	Linoleum	22.006	10	2	12,4	3,3	1,9	-0,4	2,7	1,6	0,0	100,0	0,0
119	hB	Parkett	21.003	10	2	8,2	3,2	1,9	-0,6	1,9	1,1	50,0	50,0	30,0
120	hB	Furnierboden	21.004	10	2	7,4	4,4	2,6	0,7	2,0	1,2	50,0	50,0	20,0

### Fortsetzung Anhang B1

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		[] in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton $\leq$ , $>$ oder $=$ empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 %-Ver- trauensbereich	$\leq$	$>$	$=$
121	eB	Linoleum	22.006	10	1	11,6	4,0	2,3	-0,2	2,5	1,5	0,0	100,0	0,0
122	hB	Laminat	21.005	10	1	6,5	3,0	1,7	0,8	1,7	1,0	70,0	30,0	30,0
123	hB	Parkett	22.002	10	1	8,5	3,1	1,8	0,1	1,9	1,1	40,0	60,0	30,0
124	tB	Teppichboden	14.040	10	1	11,8	3,2	1,8	-1,8	2,2	1,2	0,0	100,0	0,0
125	eB	Linoleum	22.006	9	0	12,4	3,8	2,4	0,8	2,7	1,7	0,0	100,0	0,0
126	hB	Laminat	21.005	9	0	7,2	3,1	1,9	1,1	2,0	1,2	66,7	33,3	55,6
127	hB	Parkett	22.002	9	0	6,8	2,6	1,6	0,8	1,5	0,9	55,6	44,4	44,4
128	tB	Teppichboden	14.040	9	0	11,3	3,0	1,9	-1,8	2,3	1,4	0,0	100,0	0,0
129	eB	Linoleum	22.006	8	0	13,4	2,9	2,0	-0,4	2,9	1,9	0,0	100,0	0,0
130	hB	Laminat	21.005	8	0	5,4	3,1	2,1	1,1	1,8	1,2	100,0	0,0	37,5
131	hB	Parkett	22.002	8	0	7,7	2,9	2,0	0,8	1,4	0,9	37,5	62,5	37,5
132	tB	Teppichboden	14.040	8	0	10,1	2,9	1,9	-1,8	1,6	1,1	14,3	100,0	12,5
133	hB	Laminat	21.005	13	0	6,8	3,3	1,6	0,5	1,7	0,8	84,6	15,4	38,5
134	hB	Parkett	22.002	13	0	9,6	3,0	1,5	0,6	1,5	0,7	38,5	61,5	30,8
135	L	Lack B	23.001	13	0	11,3	3,5	1,7	-1,6	1,9	0,9	7,7	92,3	18,2
136	hB	Laminat	21.005	11	1	5,5	2,1	1,2	0,3	1,4	0,8	72,7	27,3	36,4
137	hB	Parkett	22.002	11	1	7,1	2,5	1,4	0,0	1,5	0,8	36,4	63,6	36,4
138	L	Lack B	23.001	11	1	11,9	3,0	1,6	-1,1	1,6	0,9	18,2	81,8	27,3
139	L	Lack B	23.002	10	2	11,9	3,1	1,8	-3,0	1,0	0,6	20,0	80,0	16,7
140	eB	Linoleum	22.006	10	2	10,0	2,3	1,3	0,4	2,0	1,2	20,0	80,0	25,0

### Fortsetzung Anhang B1

Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbaasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		∏ in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton ≤, > oder = empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 % Ver- trauensbereich	≤	>	=
141	eB	PVC	19.013	10	2	5,4	2,8	1,6	-0,7	1,6	0,9	80,0	20,0	8,3
142	eB	PVC	19.009	10	2	1,1	1,6	0,9	0,9	1,6	0,9	100,0	0,0	16,7
143	eB	Kautschuk	20.006	9	0	6,1	2,6	1,6	-0,3	1,4	0,8	88,9	11,1	33,3
144	hB	Kork	19.007	9	0	11,3	3,2	2,0	-0,9	1,9	1,2	0,0	100,0	0,0
145	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	9	0	3,7	2,9	1,8	-0,1	0,8	0,5	88,9	11,1	33,3
146	hB	Parkett	21.006	9	0	7,4	3,1	1,9	0,3	1,9	1,2	55,6	44,4	55,6
147	hB	Furnierboden	20.001	11	0	8,5	3,5	1,9	-0,6	1,4	0,8	72,7	27,3	36,4
148	hB	Furnierboden	19.010	11	0	2,0	2,3	1,3	0,0	0,8	0,4	100,0	0,0	0,0
149	hB	Furnierboden	21.004	11	0	7,2	2,7	1,5	0,6	1,9	1,0	63,6	36,4	45,5
150	hB	Laminat	21.001	11	0	9,0	3,8	2,1	-0,3	2,2	1,2	63,6	36,4	36,4
151	eB	Kautschuk	20.007	11	0	12,5	2,7	1,5	-1,6	1,2	0,7	18,2	81,8	18,2
152	hB	Furnierboden	19.015	11	0	3,5	3,1	1,7	-0,1	0,8	0,5	100,0	0,0	27,3
153	eB	Linoleum	19.011	11	0	11,0	3,5	1,9	-0,5	1,9	1,0	9,1	90,9	63,6
154	hB	Parkett	21.003	11	0	7,4	3,4	1,9	-0,8	1,5	0,8	100,0	0,0	9,1

## Anhang B2: Daten zu Kapitel 7.2.2 - Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage mit ungeschulten Prüfenden

Zum Vergleich erfolgen die Messungen zudem mit geschulten Prüfenden.

Der Datensatz der Probenbewertung mit ungeschulten Prüfenden enthält die Anzahl der Prüfenden, die Bewertung der Hedonik und der Akzeptanz (Mittelwert, Standardabweichung, 90 %-Vertrauensbereich), der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage sowie der Zumutbarkeit.

Der Datensatz der Probenbewertung mit geschulten Prüfenden enthält die Anzahl der qualifizierten und ausgeschlossenen Prüfenden sowie die Bewertung der Größer- oder kleiner/gleich-Abfrage, der empfundenen Intensität und der Hedonik (jeweils Mittelwert, Standardabweichung und 90 %-Vertrauensbereich).

UNGESCHULTE PRÜFENDE																
Messung	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Prüfende  Anzahl	Hedonik nach DIN ISO 16000- 28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton $\leq$ , $>$ oder $=$ empfinden			Akzeptanz nach DIN ISO 16000-28				Zumutbarkeit	
					Mittelwert	Standardab- weichung	90 % Ver- trauensbereich	$\leq$	$>$	$=$	Mittelwert	Standardab- weichung	90 % Ver- trauensbereich	PD-Wert in %	Zumutbarkeit in %	unzumutbar in %
1	L	Lack C	23.002	28	-0,9	1,6	0,5	32,1	67,9	10,7	-0,2	0,4	0,2	67,9	60,7	39,3
2	eB	Linoleum	22.006	28	-2,0	1,8	0,6	28,6	71,4	7,1	-0,5	0,5	0,3	82,1	35,7	64,3
3	eB	PVC	19.013	28	-0,6	1,6	0,5	75,0	25,0	28,6	0,0	0,5	0,3	53,6	82,1	17,9
4	eB	PVC	19.009	28	1,0	1,6	0,5	92,9	7,1	14,3	0,7	0,4	0,2	3,6	100,0	0,0
5	eB	Kautschuk	20.006	40	-0,4	1,8	0,5	77,5	22,5	17,5	0,1	0,5	0,2	47,5	72,5	27,5
6	eB	Kork	19.007	40	-1,3	1,9	0,5	22,5	77,5	17,5	-0,3	0,5	0,2	60,0	52,5	47,5
7	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	40	0,4	1,7	0,5	87,5	12,5	17,5	0,3	0,5	0,2	15,0	92,5	7,5
8	hB	Parkett	21.006	40	0,9	2,1	0,6	55,0	45,0	15,0	0,3	0,5	0,2	22,5	85,0	15,0
9	eB	Kunststoff	20.001	23	-0,2	2,0	0,7	69,6	30,4	26,1	0,0	0,6	0,4	56,5	69,6	30,4
10	eB	Kunststoff	19.010	24	1,0	1,7	0,6	79,2	20,8	4,2	0,5	0,5	0,3	8,3	95,8	4,2
11	hB	Furnierboden	21.004	23	0,3	1,7	0,6	69,6	30,4	34,8	0,2	0,5	0,3	21,7	91,3	8,7
12	hB	Laminat	21.001	24	-0,2	2,0	0,7	58,3	41,7	25,0	0,1	0,5	0,4	37,5	87,5	12,5
13	eB	Kautschuk	20.007	34	-0,4	2,3	0,7	35,3	64,7	17,6	-0,1	0,6	0,3	52,9	55,9	44,1
14	eB	Kunststoff	19.015	34	1,5	2,0	0,6	94,1	5,9	14,7	0,5	0,4	0,2	11,8	91,2	8,8
15	eB	Linoleum	19.011	34	-0,3	2,2	0,6	23,5	76,5	20,6	0,0	0,6	0,2	50,0	73,5	26,5
16	hB	Parkett	21.003	34	1,2	2,0	0,6	58,8	41,2	26,5	0,5	0,5	0,2	17,6	88,2	11,8

## Fortsetzung Anhang B2

Messung  (entspricht zudem den Messungen 139-154 in Anhang B1)	GESCHULTE PRÜFENDE													
	Produktgruppe: elastische- (eB), textile- (tB), holzbasierte (hB) Bodenbeläge, Lack (L)	Produktart	HTW Produktnummer	Anzahl Prüfende		∏ in pi nach DIN ISO 16000-28			Hedonik nach DIN ISO 16000-28			Anteil Prüfer in %, die den Probengeruch im Vergleich zum Aceton ≤, > oder = empfinden		
				qualifiziert	ausgeschlossen	Mittelwert	Standard- abweichung	90 %-Ver- trauensbereich	Mittelwert	Standardab- weichung	90 % Ver- trauensbereich	<	>	=
1	L	Lack C	23.002	10	2	11,9	3,1	1,8	-3,0	1,0	0,6	20	80	20,0
2	eB	Linoleum	22.006	10	2	10,0	2,3	1,3	0,4	2,0	1,2	20	80	20,0
3	eB	PVC	19.013	10	2	5,4	2,8	1,6	-0,7	1,6	0,9	80	20	10,0
4	eB	PVC	19.009	10	2	1,1	1,6	0,9	0,9	1,6	0,9	100	0	10,0
5	eB	Kautschuk	20.006	9	0	6,1	2,6	1,6	-0,3	1,4	0,8	89	11	33,3
6	eB	Kork	19.007	9	0	11,3	3,2	2,0	-0,9	1,9	1,2	0	100	0,0
7	hB	Wand-/Deckenpaneel	22.003	9	0	3,7	2,9	1,8	-0,1	0,8	0,5	89	11	55,6
8	hB	Parkett	21.006	9	0	7,4	3,1	1,9	0,3	1,9	1,2	56	44	33,3
9	eB	Kunststoff	20.001	11	0	8,5	3,5	1,9	-0,6	1,4	0,8	73	27	36,4
10	eB	Kunststoff	19.010	11	0	2,0	2,3	1,3	0,0	0,8	0,4	100	0	0,0
11	hB	Furnierboden	21.004	11	0	7,2	2,7	1,5	0,6	1,9	1,0	64	36	36,4
12	hB	Laminat	21.001	11	0	9,0	3,8	2,1	-0,3	2,2	1,2	64	36	45,5
13	eB	Kautschuk	20.007	11	0	12,5	2,7	1,5	-1,6	1,2	0,7	18	82	18,2
14	eB	Kunststoff	19.015	11	0	3,5	3,1	1,7	-0,1	0,8	0,5	100	0	27,3
15	eB	Linoleum	19.011	11	0	11,0	3,5	1,9	-0,5	1,9	1,0	9	91	9,1
16	hB	Parkett	21.003	11	0	7,4	3,4	1,9	-0,8	1,5	0,8	100	0	72,7

## Anhang C: Ermittlung des Volumens der Probenbehälter aus Nalophan® und Tedlar® mit einer Gasuhr (Daten zu Kapitel 6.3.3.2)

Datensatz zu den Zählerständen der Gasuhr zu Messbeginn und Messende, Volumendifferenz der Gasuhr zu Beginn und Ende der Messung ohne und mit Berücksichtigung des Korrekturfaktors F (0,98). Angabe des berechneten Mittelwerts und der Standardabweichung aus der Volumendifferenz unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors.

<b>Nalophan®</b>					
Messung	Zählerstand		Volumendifferenz der Gasuhr zwischen Ende und Beginn der Messung in l	Volumendifferenz unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors der Gasuhr (F = 0,98) in l	Mittelwert und Standardabweichung (aus der Volumendifferenz unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors)
	Messbeginn in l	Messende in l			
1	317 908,0	317 929,6	21,6	21,2	<b>Mittelwert: <u>19,2 l</u></b> <b>Standardabweichung: <u>0,9 l</u></b>
2	317 930,0	317 950,4	20,4	20,0	
3	317 951,0	317 971,2	20,2	19,8	
4	317 972,0	317 992,0	20	19,6	
5	317 992,0	318 011,0	19	18,6	
6	318 12,0	318 31,6	19,6	19,2	
7	318 32,0	318 50,8	18,8	18,4	
8	318 51,0	318 69,2	18,2	17,8	
9	318 70,0	318 89,6	19,6	19,2	
10	318 90,0	318 109,0	19	18,6	
<b>Tedlar®</b>					
1	317 705	317 724,6	19,6	19,2	<b>Mittelwert: <u>19,3 l</u></b> <b>Standardabweichung: <u>0,6 l</u></b>
2	317 725	317 743,2	18,2	17,8	
3	317 744	317 764,2	20,2	19,8	
4	317 765	317 784,4	19,4	19,0	
5	317 785	317 805,4	20,4	20,0	
6	317 806	317 825,2	19,2	18,8	
7	317 826	317 846,4	20,4	20,0	
8	317 847	317 866,6	19,6	19,2	
9	317 867	317 886,6	19,6	19,2	
10	317 887	317 907,4	20,4	20,0	