

**Emissionen aus Lüftungsgeräten
und Kunststofflüftungsleitungen –
Vorschläge für ein realitätsnahes
Prüfverfahren**

T 3346

T 3346

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-8167-9927-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleiter

Prof Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht Nr. BBH 007/2016/281

Emissionen aus Lüftungsgeräten und Kunststoff- lüftungsleitungen – Vorschläge für ein realitäts- nahes Prüfverfahren

Durchgeführt im Auftrag des
Deutschen Instituts für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 B
10829 Berlin

P 52-5-18.33-1471/15

Der Bericht umfasst
71 Seiten Text
21 Tabellen
27 Abbildungen

Bearbeiter
Christian Scherer

Valley, 28. November 2016

Abteilungsleiter



Dr. rer. nat.
Florian Mayer

Bearbeiter



Dr.-Ing.
Christian Scherer

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Ausgangssituation	5
2.1	Marktsituation	5
2.2	Einbau und Verwendung	6
3	Experimenteller Ansatz	6
3.1	Thermoextraktionsuntersuchungen	7
3.2	Referenzraum und kontrollierte Wohnraumlüftung	7
3.3	Verwendete Materialien	9
3.4	Vorversuche	12
3.5	Thermoextraktion	13
3.6	Prüfkammeruntersuchungen	14
3.7	Chemische Analytik	15
4	Ergebnisse	17
4.1	Vorversuche	17
4.2	Thermoextraktion	21
4.3	Prüfkammeruntersuchungen	30
4.4	Qualitative Gegenüberstellung der Messergebnisse von Thermoextraktion und Prüfkammeruntersuchung	32
5	Verfahrensvorschlag	41
5.1	Allgemeine Randbedingungen	41
5.2	Lüftungsleitungen	41
5.3	Lüftungsventile	44
5.4	Lüftungsverteiler	42
5.5	Dichtungsmaterialien	42
5.6	Indirekte Prüfverfahren	44
5.7	Zusammenfassung	45
6	Diskussion	45
7	Ausblick	47
8	Literatur	47

1 Zusammenfassung

Für die mechanische Wohnraumlüftung werden üblicherweise Lüftungsleitungen aus Polymermaterialien (HD-PE, PP, EPP) verwendet. Polymermaterialien können, abhängig vom Materialtyp, den eingesetzten Additiven (z. B. Weichmacher, Flammhemmer) und Produktionshilfsstoffen, Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen (VOC) aufweisen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden insbesondere Lüftungsleitungen auf ihre VOC-Emissionen hin untersucht. Da für die Emissionsuntersuchungen an Vertretern dieser Produktgruppe keine Prüfverfahren vorgegeben sind, wurden sowohl die Emissionsprüfung gemäß dem AgBB-Schema [AgBB 2012] bzw. dem harmonisierten Normentwurf DIN EN 16516 [DIN EN 16516] als auch Untersuchungen in der Mikro-kammer, einer Form der Thermoextraktion, zur Bestimmung des Emissionspotentials ausgewählter Lüftungsleitungen und eines Kaltschrumpfbandes herangezogen. Für die Emissionsuntersuchung und –bewertung nach dem AgBB-Schema war es nötig, basierend auf dem Modellraumkonzept, Annahmen über die Leitungslängen zu treffen, über die die Frischluft dem Referenzraum zugeführt wird. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde angenommen, dass a) die gesamte Zuluft zum Referenzraum, der gemäß Konvention einen Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ ($15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) aufweist, durch eine Lüftungsleitung erfolgt und b) diese Zuluftleitung eine Länge von 7 m aufweist. Das entspricht einer Längs- und einer Querseite des Referenzraums.

Zwei der untersuchten Lüftungsleitungen wiesen eine Beschichtung der Rohrinne-seite auf. Diese Rohre wurden so in die Prüfkammer eingebaut, dass die VOC-Emissionen der Rohrinne-seite und der Rohraußenseite getrennt untersucht werden konnten. Bei einem Produkt wurde der Untersuchungszeitraum auf 84 Tage ausgedehnt, um das Langzeitverhalten der Lüftungsleitung hinsichtlich der VOC-Emissionen abschätzen zu können.

Alle sechs untersuchten Produkte (zwei HDPE- Verteilerschläuche und drei EPP-Rohre bzw. –Formteile sowie ein Kaltschrumpfband) zeigten in der Prüfkammeruntersuchung bei Anwendung des o. g. beschriebenen Szenarios sehr geringe Emissionen, die bei einer Bewertung gemäß dem AgBB-Schema einen uneingeschränkten Einsatz in Innenräumen erlauben.

Während die Untersuchung in einer Emissionsprüfkammer bei Standard-Innen-raumbedingungen ($23 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ } \%$ r. F.) durchgeführt wird, kann bei der Thermoextraktion die Extraktionstemperatur von Raumtemperatur bis $120 \text{ }^\circ\text{C}$ variiert werden. Die Thermoextraktion wurde deshalb bei zwei Temperaturen, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ und $50 \text{ }^\circ\text{C}$, durchgeführt. Die höhere Extraktionstemperatur wurde gewählt, da a) in mechanischen Lüftungsanlagen die Zuluft auf max. $50 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt werden darf, ohne dass mit einer Staubverschmelzung zu rechnen ist und b) eine höhere Extraktionstemperatur einen zeittraffenden Effekt hinsichtlich der VOC-Emissionen bewirken kann. Erwartungsgemäß stiegen die Emissionen schwerer flüchtiger Stoffe mit der höheren Extraktionstemperatur an. Gleichzei-

tig kam es zu einer schnelleren Verarmung an leichter flüchtigen Komponenten.

Für die Emissionsprüfung von Lüftungsleitungen ist ein Szenario denkbar, bei dem nicht auf die emittierende Oberfläche sondern auf die Länge der Lüftungsleitung Bezug genommen wird. Insbesondere die Tatsache, dass viele Lüftungsleitungen keine glatte und damit exakt bestimmbare Oberfläche aufweisen, legt dieses Vorgehen nahe. Unter der Annahme einer glatten Lüftungsleitung ergeben sich dann in Abhängigkeit vom Leitungsdurchmesser folgende Randbedingungen für die Beladung:

Beladungsfaktor	0,23 m·m ⁻³ (Längenbezug ohne Berücksichtigung des Durchmessers)
	0,06 m ² m ⁻³ (DN 75)
	0,1 m ² m ⁻³ (DN 125)
	0,12 m ² m ⁻³ (DN 160)

Bei den Dichtungsbändern wird empfohlen, die Vorgabe aus der DIN EN 16516 für sehr kleine Oberflächen zu übernehmen. Für die Erarbeitung einer harmonisierten Produktnorm können diese beiden Ansätze dem zuständigen Produkt-TC vorgeschlagen werden.

Lüftungs- oder Luftauslassventile können aus Materialkombinationen bestehen und deshalb nur als Ganzes geprüft werden. Angesichts der frei emittierenden Oberfläche und der Tatsache, dass im Referenzraum max. 2 Lüftungsventile (Zu- und Abluft) eingebaut werden, ergibt sich rechnerisch eine Luftwechselrate pro Ventil von 7,5 m³·h⁻¹. Lüftungsverteiler können keinem Raum direkt zugeordnet werden. Festlegungen für die Prüfung dieser Anlagenkomponenten sollten durch das zuständige Produkt-TC oder die Regulatoren vorgenommen werden.

Aktive Anlagenteile wie Wärmetauscher, Heizregister und Lüftungsgeräte wurden nicht untersucht. Da diese Komponenten elektrische Bauteile mit flammhemmender Ausrüstung enthalten können, sind unter Betriebsbedingungen höhere und von ihrer stofflichen Zusammensetzung her andere VOC-Emissionen zu erwarten. Es wird daher empfohlen, diese Produkte unter Betriebsbedingungen a) einer Prüfkammeruntersuchung bzw. b) einer Untersuchung unter simulierten Nutzungsbedingungen zu unterziehen, um abzuklären, ob diese Komponenten aufgrund ihrer Emissionseigenschaften einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Luftqualität in Innenräumen ausüben.

2 Ausgangssituation

§ 6 (1) der Energieeinsparverordnung 2014 [EnEV 2014] verlangt: „Zu errichtende Gebäude sind so auszuführen, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig entsprechend den anerkannten Regeln der Technik abgedichtet ist.“ In § 6 (2) der Verordnung wird gleichzeitig gefordert, dass „... der zum Zwecke der Gesundheit und Beheizung erforderliche Mindestluftwechsel sichergestellt ist.“ Bei Wohngebäuden, die die höchsten Anforderungen an die Energieeinsparung erfüllen, wird der aus hygienischen Gründen nötige Mindestluftwechsel durch die Undichtigkeiten im Gebäude nicht mehr gewährleistet. Hoch energieeffiziente Wohngebäude benötigen deshalb eine mechanische Wohnraumlüftung. Mechanische Wohnraumlüftungen unterscheiden sich konstruktiv ganz wesentlich von den im gewerblichen Umfeld eingebauten Lüftungsanlagen. Während Lüftungsanlagen im Objektbau üblicherweise in Metall und verhältnismäßig großvolumig ausgeführt sind, werden im Wohnbau kompakte Anlagen, deren Komponenten größtenteils aus Polymermaterialien bestehen, installiert. Die Lüftungsgeräte dieser Anlagen benötigen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, nicht jedoch luftführende Komponenten wie Leitungen, Dichtungsmaterialien, Verteiler und Auslässe. Da in energieeffizienten Wohngebäuden ein Großteil der Frischluft durch diese Komponenten in den Innenraum geleitet wird, stellt sich die Frage, ob diese Bauteile einer mechanischen Wohnraumlüftungsanlage aus Gründen des vorbeugenden Gesundheitsschutzes bauaufsichtlich in Bezug zu nehmen sind. In Betracht kommen hier die Emissionen der Außenseiten der Lüftungskomponenten, die gegebenenfalls mit der Raumluft in Kontakt stehen können und selbstverständlich die Innenseiten der Bauteile, die mit der zugeführten Frischluft in Kontakt stehen.

2.1 Marktsituation

Hersteller von Heiz- und Klimatechnik bieten oftmals auch Anlagen zur kontrollierten Wohnraumlüftung an. Über den Sanitärfachgroßhandel sind im süddeutschen Raum die Produkte dreier Markenhersteller zu beziehen. Über Baumärkte oder ausschließlich über das Internet vertriebene Anlagenkomponenten wurden nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz zur den reinen Abluftrohren für den Anschluss von Wäschetrocknern oder Dunstabzugshauben, die üblicherweise aus Polyvinylchlorid (PVC) gefertigt sind, kommt bei den Lüftungsrohren zur kontrollierten Wohnraumlüftung überwiegend Polyethylen hoher Dichte (HD-PE) oder Polypropylen (EPP) zum Einsatz. Dichtungs- und Klebebänder bestehen häufig aus aktiviertem Butylkautschuk (IIR). Für die Untersuchungen wurden Leitungen aus HD-PE und EPP sowie ein Klebeband aus IIR herangezogen.

2.2 Einbau und Verwendung

Die immer dichter werdende Gebäudehülle führt dazu, dass die Nutzungsfeuchte, das von den Raumnutzern abgeatmete Kohlendioxid, geruchsaktive und aus Bau- und Einrichtungsmaterialien emittierende flüchtige organische Stoffe durch den natürlichen Luftwechsel nicht mehr in hinreichendem Maße nach außen abgeführt werden können. Der Verschlechterung der hygienischen Situation im Raum kann mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung entgegen gewirkt werden. Anlagen zur kontrollierten Wohnraumlüftung können wie raumluftechnische Anlagen mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet werden. Bei der Wohnraumlüftung kommen meist Kreuzstrom-Wärmetauscher zum Einsatz. Die Anlagen zur kontrollierten Wohnraumlüftung werden als Einzelraumlüftung oder als Anlagen für einzelne Wohneinheiten bis hin zum Geschößwohnungsbau angeboten. Die bei raumluftechnischen Anlagen (RLT) eingesetzten luftführenden Komponenten sind üblicherweise aus Metall (z. B. Wickelfalzrohre aus verzinktem Stahlblech). Bei der kontrollierten Wohnraumlüftung hingegen werden meist Polymermaterialien (Polyethylen, Polypropylen) für Leitungen und Verteiler eingesetzt. Reine Abluftleitungen, die bei Abluft-Wäschetrocknern oder Dunstabzugshauben eingesetzt werden, sind häufig aus Polyvinylchlorid (PVC) oder Polystyrol. Sie wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht mit berücksichtigt.

Im Neubau können die Lüftungsleitungen im Decken- oder Fußbodenaufbau integriert werden. Bei sanierten Gebäuden werden die Leitungen häufig mit Gipskartonplatten umkleidet. Da die Gipskartonplatten nicht diffusionsdicht sind, kann angenommen werden, dass Stoffe, die von der Rohraußenseite emittiert werden, auch ins Innere des Raumes gelangen können.

3 Experimenteller Ansatz

Handelsübliche Lüftungsleitungen verschiedener Hersteller und Dichtungsmaterialien wurden für die Untersuchungen herangezogen. Die Untersuchungen folgten einem dreistufigen Konzept. In Stufe I wurden die Produkte bei 25 °C und bei 50 °C mittels Thermoextraktion auf ihre Gesamtemissionen untersucht. Auf die Identifizierung der Einzelstoffe wurde hierbei verzichtet. Diese erste Emissionsabschätzung diente dazu, das Emissionspotenzial der Materialien orientierend zu erfassen und für die Stufe II (Thermoextraktionsuntersuchung mit Identifizierung der emittierten Stoffe und Ermittlung der massenspezifischen Emissionsraten) Prüfstückgrößen bzw. -massen zu ermitteln, bei denen die sichere Identifizierung der freigesetzten Stoffe und eine zuverlässige Berechnung der massenspezifischen Emissionsraten möglich ist. In der Stufe III wurden die Lüftungsrohre in eine Emissionsprüfkammer eingebaut und die Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen gemäß AgBB-Schema [AgBB 2012] untersucht. Ein Lüftungsrohr wurde einer Langzeituntersuchung unterzogen. Bei einem weiteren Lüftungsrohr mit einer antistatischen Beschichtung der Rohrrinnenfläche wurde das Emissionsverhalten sowohl der Rohraußenseite als auch der Beschichtung charakterisiert.

3.1 Thermoextraktionsuntersuchungen

Bei der Thermoextraktion handelt es sich um ein miniaturisiertes Prüfkammerverfahren unter z. T. instationären Bedingungen. Werden in Emissionsprüfkammeruntersuchungen i. A. Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ bis $1,5 \text{ h}^{-1}$ [3] eingestellt, betragen diese bei der Thermoextraktion häufig 2 h^{-1} und mehr. Aufgrund dieser hohen Luftwechsel kann es zu einer Abreicherung der VOC an der Oberfläche kommen. Diese Abreicherung ist sowohl von den physiko-chemischen Eigenschaften der einzelnen flüchtigen organischen Stoffe (Siedepunkt, Dampfdruck, Polarität, etc.) als auch von der Beschaffenheit (Materialzusammensetzung, Porosität, Dichte, etc.) des zu prüfenden Produkts abhängig. Die Verarmung an VOC an der Oberfläche des Prüfstücks führt dazu, dass die Diffusion der VOC an die Oberfläche zum bestimmenden Faktor bei der Emission wird. Bei der Prüfkammeruntersuchung treten diese Effekte nicht oder nur in viel schwächerer Form auf.

Die Thermoextraktion erlaubt eine Abschätzung des Emissionspotenzials von Produkten über die Zeit in einem kurzen Untersuchungszeitraum. Da sich bei der Thermoextraktion kein Konzentrationsgleichgewicht im Thermoextraktor einstellen kann, wird bei der Thermoextraktionsuntersuchung keine Stoffkonzentration in der Luft, sondern eine intrinsische Eigenschaft des untersuchten Materials, die Emissionsrate (Masse pro Zeiteinheit) angegeben. Abhängig von der Beschaffenheit des zu untersuchenden Materials können massenspezifische (bei einer nicht bestimmbar Oberfläche) oder flächenspezifische Emissionsraten (bei Proben mit einer definierten Geometrie) angegeben werden. Emissionsraten beschreiben das Emissionspotenzial einer Probe abhängig von der anliegenden Temperatur. Die Thermoextraktion bietet durch die Erhöhung der Temperatur die Möglichkeit, Emissionsverläufe zeitlich zu raffen.

3.2 Referenzraum und kontrollierte Wohnraumlüftung

Emissionen aus Bauprodukten für die Verwendung in Innenräumen werden im Rahmen der abZ in einem 28 Tage dauernden Prüfkammerexperiment [DIN EN ISO 16000-9, DIN ISO 16000-6, DIN ISO 16000-3, DIN EN 16516] bestimmt und gemäß dem AgBB-Schema [AgBB 2015] bzw. den Zulassungsgrundsätzen des DIBt [DIBt 2010] bewertet.

Das AgBB-Schema, das den Grundsätzen des DIBt zugrunde liegt, geht von einem Referenzraum der Abmessungen $4 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$ aus. Dieser Referenzraum besitzt eine Türe mit einer Oberfläche von $1,6 \text{ m}^2$ und ein Fenster mit einer Fläche von $2,0 \text{ m}^2$. Türe und Fenster zählen nicht zu den frei emittierenden Flächen im Raum. Der Luftwechsel im Referenzraum wird mit $0,5 \text{ h}^{-1}$ angesetzt, das entspricht $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

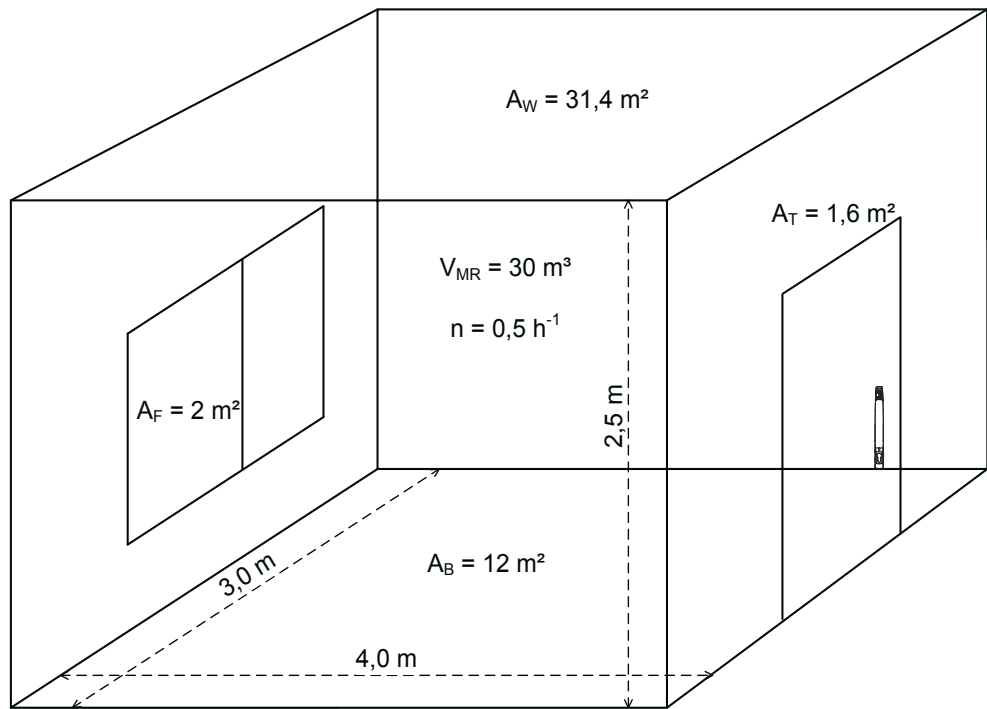


Bild 1:
Schematische Darstellung des Referenzraums laut AgBB-Schema [AgBB 2012, AgBB 2015].

Zur Übertragung dieser Bedingungen auf Lüftungsleitungen, für die es im AgBB-Schema keine Festlegungen gibt, wurde angenommen, dass der Luftwechsel im Referenzraum ausschließlich durch eine mechanische Wohnraumlüftung sichergestellt wird, d. h. $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ werden ausschließlich über die Lüftungsleitung zugeführt. Da die Konzentration emittierter Stoffe von der mit der Luft in Kontakt stehenden Oberfläche abhängig ist, müssen zusätzlich Festlegungen für die Leitungslänge getroffen werden, über die die Luft zugeführt wird. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde eine Leitungslänge von 7 m, das entspricht einer Längs- und einer Querseite des Referenzraums angenommen. Diese Bedingungen sind nun auf die Verhältnisse in der Emissionsprüfkammer zu übertragen.

Tabelle 1:
Verhältnisse im Referenzraum und Übertragung auf eine Emissionsprüfkammer.

Parameter	Einheit	Referenzraum	Emissionsprüfkammer $V = 200 \text{ L}$
Raumvolumen V	m^3	30	0,2
Luftwechsel n	h^{-1}	0,5	0,5

Parameter	Einheit	Referenzraum	Emissionsprüfkammer V = 200 L
Lüftungsrate Q	m ³ · h ⁻¹	15	0,1
Länge des Lüftungsrohres L	m	7,0	0,05

Für das Dichtungsband (Kaltschrumpfband) wurde das Szenario für sehr kleine Oberflächen (Beladungsfaktor 0,007 m²·m⁻³, flächenspezifische Lüftungsrate 71,5 m³·m⁻²·h⁻¹) angewandt [DIN EN 16516]. Bei einer Lüftungsrate in der Prüfkammer von 0,3 m³·h⁻¹ ergab sich daraus eine frei emittierende Oberfläche von 0,004 m².

3.3 Verwendete Materialien

Für die Untersuchungen wurden fünf handelsübliche Lüftungsrohre bzw. –schläuche sowie ein Kaltschrumpfband herangezogen. Die Materialien wurden über den Sanitärgrößhandel bezogen und ohne weitere Vorbehandlung eingesetzt.

Tabelle 2:
Untersuchte Produkte.

Vorgangsnummer	Produkt	Material
E2360-1	Luftverteilerschlauch antistatisch, CWL 75/63	HD-PE
E2360-2	Luftverteilerschlauch 75/63 mm, 25 m Rolle	HD-PE
E2360-3	Rohr DN 150/DN 210, EPP Rundrohr f. LivingAir LAB/LAK	EPP
E2360-4	ISO-Rohrbogen CWL 45 °, DN 160	EPP
E2360-5	Kaltschrumpfband KB 160 Alu, 50 mm, 15 m Ring (KB2010)	Aktivierter Butylkautschuk (IIR)
E2360-6	Rohr DN 125 mit Muffe	EPP



Bild 2:
E2360-1
Luftverteilerschlauch antistatisch, CWL 75/63.



Bild 3:
E2360-2
Luftverteilerschlauch 75/63 mm, 25 m Rolle.



Bild 4:
E2360-3
DN 150/DN 210, EPP.



Bild 5:
E2360-4
ISO-Rohrbogen CWL 45 °, DN 160 .



Bild 6:
E2360-5
Kaltschrumpfband KB 160 Alu, 50 mm.

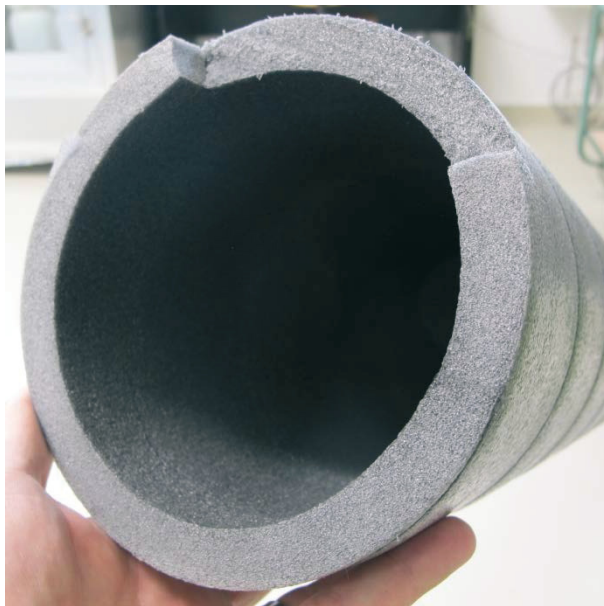


Bild 7:
E2360-6
Rohr DN 125 mit Muffe.

3.4 Vorversuche

Vor der Untersuchung des Emissionspotenzials mittels Thermoextraktion wurde die für die Identifizierung und Quantifizierung der Einzelstoffe benötigte Probenmenge abgeschätzt. Diese Abschätzung erfolgte ebenfalls mittels Thermoextraktion. In der aus der Mikrokammer ausströmenden Luft wurde mit Hilfe eines Photoionisationsdetektors (PID) der Summenwert der enthaltenen flüchti-

gen organischen Stoffe bestimmt. Eine Identifikation der Einzelstoffe ist bei diesem Verfahren nicht möglich. Über einen Zeitraum von 18 h wurde der Summenwert der emittierten flüchtigen organischen Stoffe aufgezeichnet. Die Kalibrierung des PID erfolgte mit Isobuten; der Summenwert der Emissionen wird daher in Isobuten-Äquivalenten (IE) angegeben. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Gesamtemissionen war es möglich, das Zeitfenster zu erkennen, in dem die Emissionen am höchsten sind. Der PID weist eine vom Flammenionisationsdetektor (FID), bei dem die im Gasstrom enthaltenen Analyten in einer Wasserstoffflamme verbrannt werden, abweichende Empfindlichkeit auf. So werden beim PID die Verbindungen, die Mehrfachbindungen enthalten (z. B. Alkene, Aromaten) leichter ionisiert als z. B. Alkane, die nur Einfachbindungen aufweisen. Der Einsatz eines Prozess-FID war jedoch in Verbindung mit der Mikrokammer nicht möglich, da der Prozess-FID einen für die Mikrokammer zu hohen Probengasstrom benötigt.

3.5 Thermoextraktion

Sowohl für die Vorversuche (Bild 8) als auch für die Thermoextraktionsuntersuchungen der Phase II wurden die Probematerialien zerkleinert.



Bild 8:
Bestimmung der massenabhängigen Emissionsraten von Rohr- und Dämmmaterialien mittels Thermoextraktion.

Ausgehend von den Ergebnissen der Vorversuche (siehe 4.1) wurden für die Thermoextraktion die in Tabelle 3 aufgelisteten Randbedingungen festgelegt:

Tabelle 3:
Randbedingungen der Thermoextraktionsuntersuchungen.

Parameter	Einheit	Wert
Thermoextraktor	[-]	µ-CTE, Markes International GmbH
Extraktionsgas	[-]	Synthetische Luft, KW-frei
Extraktionstemperatur	[°C]	25, 50
Extraktionsgasfluss	[mL·min ⁻¹]	95,6 – 100,5
Dauer der Probenahme	[min]	60
Start der Probenahme nach Einbringen der Probe	[h]	0,5 / 2,5 / 17,5
Einwaage	[g]	0,26 – 5,04 ¹⁾

1) Die Einwaagen differieren wegen der unterschiedlichen Dichten der Materialien.

3.6 Prüfkammeruntersuchungen

Das Emissionsprüfkammerverfahren nach DIN EN ISO 16000-9 stellt das für die Bewertung von Bauprodukten hinsichtlich ihrer Emissionen in die Innenraumluft maßgebliche Prüfverfahren dar. Im Gegensatz zur Thermoextraktion können bei der Prüfkammeruntersuchung sowohl flächen- oder massenspezifische Emissionsraten als auch Stoffkonzentrationen in der Prüfkammerluft angegeben und zur Bewertung herangezogen werden. Aufgrund der nicht exakt bestimmbaren Oberfläche der Lüftungsleitungen wurde ein längenbezogener Beladungsfaktor festgelegt. Alle Lüftungsleitungen wurden mit einer Länge von 0,14 m in die Prüfkammer eingebracht und der Luftwechsel auf 1,5 h⁻¹, das entspricht 300 NL·h⁻¹, eingestellt. Damit wurden die Vorgaben der DIN EN 16516 hinsichtlich des maximal zulässigen Luftwechsels noch eingehalten.

Das Innere der Luftverteilerschläuche (E2360-1, -2) war zur Verringerung von Ablagerungen antistatisch beschichtet. Um die Emissionseigenschaften der Beschichtung und des Rohrmaterials gleichzeitig untersuchen zu können, wurde die Prüfkammeruntersuchung modifiziert (Bild 9). Der an beiden Seiten verschlossene Luftverteilerschlauch wurde in eine Emissionsprüfkammer eingebracht. Ein Strom konditionierter Pressluft wurde durch den Schlauch (E2360-1b, E2360-2b) und ein zweiter Strom durch die Prüfkammer (E2360-1a, E2360-2a) geleitet. Die Luftströme waren voneinander unabhängig und konnten getrennt geregelt werden. Beide Luftströme wurden am Ausgang der Prüfkammer beprobt.

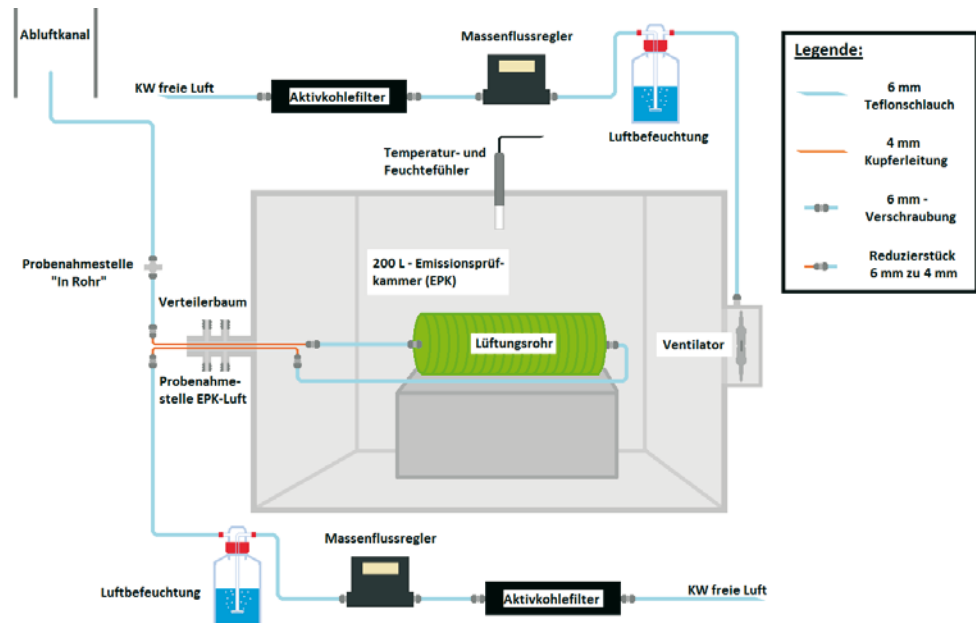


Bild 9:
Gleichzeitige Bestimmung der Emissionen der Außenseite und der Beschichtung der Schlauchinnenseite im Prüfkammerexperiment.

3.7 Chemische Analytik

Die aus Bauprodukten emittierten organischen Stoffe können unterschiedlichen Stoffgruppen mit wiederum unterschiedlichen physiko-chemischen Eigenschaften zugeordnet werden. Dieses Stoffspektrum kann deshalb nicht mit nur einer einzigen Probenahme- und Analysenmethode identifiziert und quantifiziert werden.

Aldehyde (z. B. Formaldehyd) und Ketone werden auf mit 2,6-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) imprägniertem Silicagel gesammelt. Die flüchtigen Carbonylverbindungen reagieren mit dem DNPH unter Bildung der entsprechenden Hydrazone, die ihrerseits nicht flüchtig sind. Die Hydrazone werden mit Lösemittel vom Silicagel eluiert und mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatografie und optischer Detektion (HPLC-DAD) identifiziert und quantifiziert. Die Retentionszeit, also die Verweilzeit eines Hydrazons auf der analytischen Säule, ist bei gegebenen Randbedingungen für einen Stoff charakteristisch. Das UV/VIS-Spektrum des aus der analytischen Säule austretenden Eluats dient zur Absicherung der Identifizierung. Weichmacher aus der Gruppe der Phthalsäureester werden an einem Magnesiumsilikat (Florisil) adsorbiert, mit Lösemittel eluiert und ebenfalls mittels HPLC-DAD identifiziert und quantifiziert.

Für die Probenahme der übrigen VOC werden Adsorberrohre gefüllt mit Tenax TA®, einem polymeren Adsorberharz, genutzt. Identifizierung und Quantifizierung der adsorbierten Stoffe erfolgen mittels Thermodesorptions-Gaschromatografie gekoppelt mit einem massenselektiven Detektor (TD-GC-MS). Die Identifizierung und Quantifizierung der adsorbierten Stoffe erfolgt mittels Thermodesorptions-Gaschromatografie gekoppelt mit einem massenselektiven Detektor (TD-GC-MS).

tifizierung erfolgt sowohl über die Retentionszeit als auch über das Fragmentierungsmuster des jeweiligen Stoffs im massenselektiven Detektor. Damit ist es möglich, auch über nicht eindeutig identifizierte Stoffe weitergehende Aussagen wie z. B. die Zugehörigkeit zu einer Stoffgruppe, zu treffen.

Die angewandten Probenahme- und Analysenverfahren sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4:
Probenahme und Analysenverfahren bei den Prüfkammeruntersuchungen.

Stoffgruppe	Probenahmezeitpunkt [d] ¹⁾	Probenvolumen [NL]	Fluss [NL·min ⁻¹]	Adsorber	Analysenverfahren
VOC	3, 28 (56, 84)	2,0 5,0	0,1	Tenax TA	Thermodesorption, GC-MS ²⁾
Aldehyde & Ketone	3, 28 (56, 84)	60	1,0	DNPH Silica	HPLC-DAD ³⁾
Phthalsäureester	3, 28 (56, 84)	40	1,0	Florisil	HPLC-DAD ⁴⁾

- 1) Zeitpunkt nach Beginn der Prüfung.
- 2) Qualitative und quantitative Analyse mittels TD-GC-MS nach IBP-SAA 282/070, Kalibrierung über Flüssigdotierung der Standards auf Tenax TA™, (Signal-Rausch-Verhältnis von 5:1 für 1 ng Toluol) mit massenselektivem Detektor. Bestimmungsgrenze für Toluol 0,6 µg·m⁻³, entspricht 3 ng absolut.
- 3) Untersucht wird auf die DNP-Hydrazone folgender Verbindungen Formaldehyd, Acetaldehyd, Acrolein, Aceton, Propionaldehyd, Butyraldehyd, 2-Butanon, Crotonaldehyd, Valeraldehyd, Isovaleraldehyd, Cyclohexanon, Hexanal, Methylisobutylketon, Benzaldehyd, o-Tolualdehyd, m-Tolualdehyd, p-Tolualdehyd, 2,5-Dimethylbenzaldehyd, Heptanal, Octanal, Nonanal, Decanal. Die Quantifizierung erfolgt substanzspezifisch über eine Fünf-Punkt-Kalibrierfunktionen der DNP-Hydrazone in Acetonitril.
- 4) Untersucht werden Dimethylphthalat, Diethylphthalat, Diallylphthalat, Di-n-propylphthalat, Diphenylphthalat, Benzylbutylphthalat, Di-iso-butylphthalat, Di-n-butylphthalat, Di-n-pentylphthalat, Dicyclohexylphthalat, Bis(2-ethyl)-hexylphthalat, Di-n-octylphthalat, Di-n-decylphthalat. Die Quantifizierung erfolgt substanzspezifisch über eine Fünf-Punkt-Kalibrierfunktionen.

4 Ergebnisse

4.1 Vorversuche

Die Vorversuche dienten zur Ermittlung geeigneter Probemengen für die eigentlichen Thermoextraktionsuntersuchungen in der Mikroammer. Anhand der Emissionsverläufe konnten zudem die optimalen Zeitpunkte für die Probenahme ermittelt werden. Die Emissionsverläufe wurden mit einem PID aufgezeichnet.

Nimmt man die Emission flüchtiger organischer Stoffe als einen ausschließlich monomolekularen Prozess an und vernachlässigt zusätzliche Bildungsreaktionen von VOC wie z. B. die Oxidation durch Luftsauerstoff, so kann die Arrhenius'sche Näherung herangezogen werden, wonach eine Temperaturerhöhung um 10 K zu einer Verdoppelung der Emissionsrate führt. Die Erhöhung der Extraktionstemperatur von 25 °C auf 50 °C sollte nach dieser groben Abschätzung zu einer Vervierfachung der Emissionsrate führen.

In Bild 10 sind die massenspezifischen Emissionsraten der sechs Probenmaterialien in Isobuten-Äquivalenten wiedergegeben. Die beschichteten Rohrinneisen der Luftverteilerschläuche aus HD-PE (E2360-1 und -2) wurden nicht getrennt von den Rohraußenseiten betrachtet. Bereits hier war ersichtlich, dass die beiden Luftverteilerschläuche die geringsten Emissionsraten aufwiesen, gefolgt von den drei Produkten aus EPP (E2360-3, -4 und -6). Das Kaltschrumpfband wies den höchsten massenspezifischen Emissionsmassenstrom aller untersuchten Produkte auf. Somit kann bei einer Extraktionstemperatur von 25 °C folgende Reihung der Emissionsraten aufgestellt werden: HD-PE > EPP > IIR.

Bei einer Extraktionstemperatur von 50 °C zeigten zu Beginn der Untersuchung auch die Luftverteilerschläuche aus HD-PE messbare Emissionen (Bild 11). Die beiden EPP-Varianten E2360-3 und E2360-4 zeigten bei 25 °C ein fast identisches Emissionsverhalten. Bei 50 °C sank die Emissionsrate von E2360-4 nach ca. 4 h auf das Niveau der Luftverteilerschläuche aus HD-PE ab, während die Emissionsrate bei E2360-3 bis zum Ende der Thermoextraktionsuntersuchung nahezu konstant zwischen 7 und 8 mg·kg⁻¹·h⁻¹ blieb.

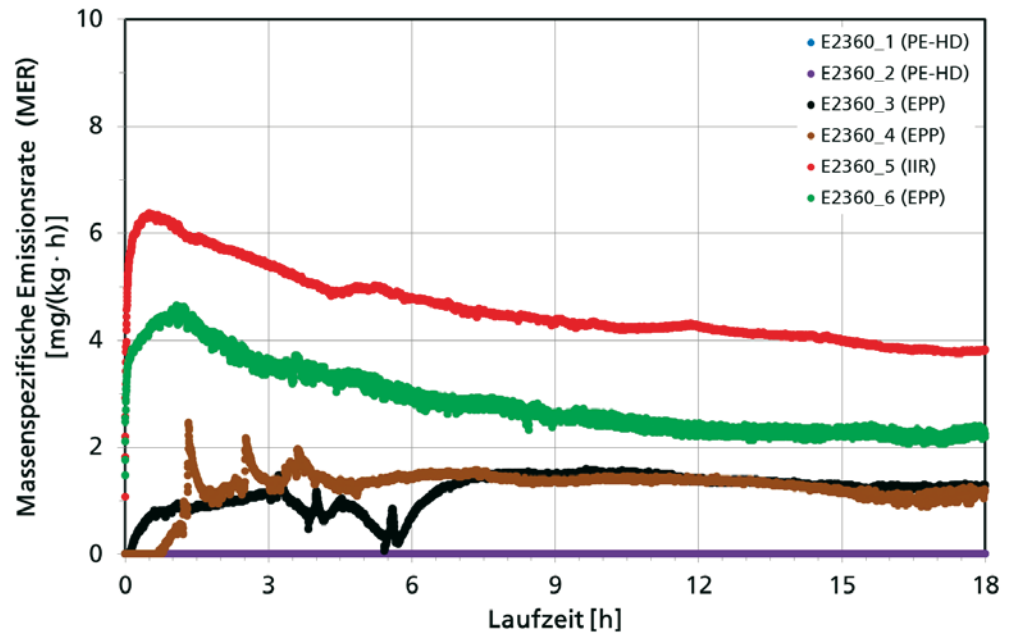


Bild 10:
Verlauf der massenspezifischen Emissionsrate (MER) der untersuchten Produkte über die Zeit bei einer Extraktionstemperatur von 25 °C.

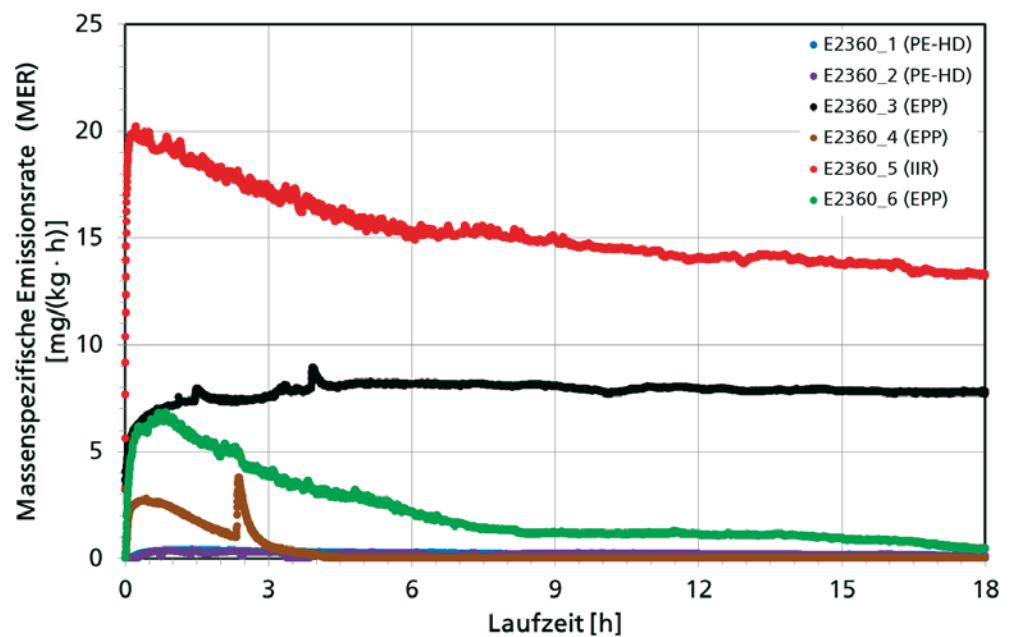


Bild 11:
Verlauf der massenspezifischen Emissionsrate (MER) der untersuchten Produkte über die Zeit bei einer Extraktionstemperatur von 50 °C.

Die beiden Lüftungsrohre aus HD-PE zeigten einen recht ähnlichen Verlauf in ihrem Emissionsverhalten. Während bei einer Extraktionstemperatur von 25 °C mit dem PID praktische keine Emissionen nachweisbar waren, stieg der Emissionsmassenstrom bei 50 °C zu Beginn des Thermoextraktionsexperiments auf ca. 0,4 mg·kg⁻¹·h⁻¹ an (Bild 12) und fiel bis zum Ende des Extraktionszeitraums auf 0,1 mg kg⁻¹·h⁻¹.

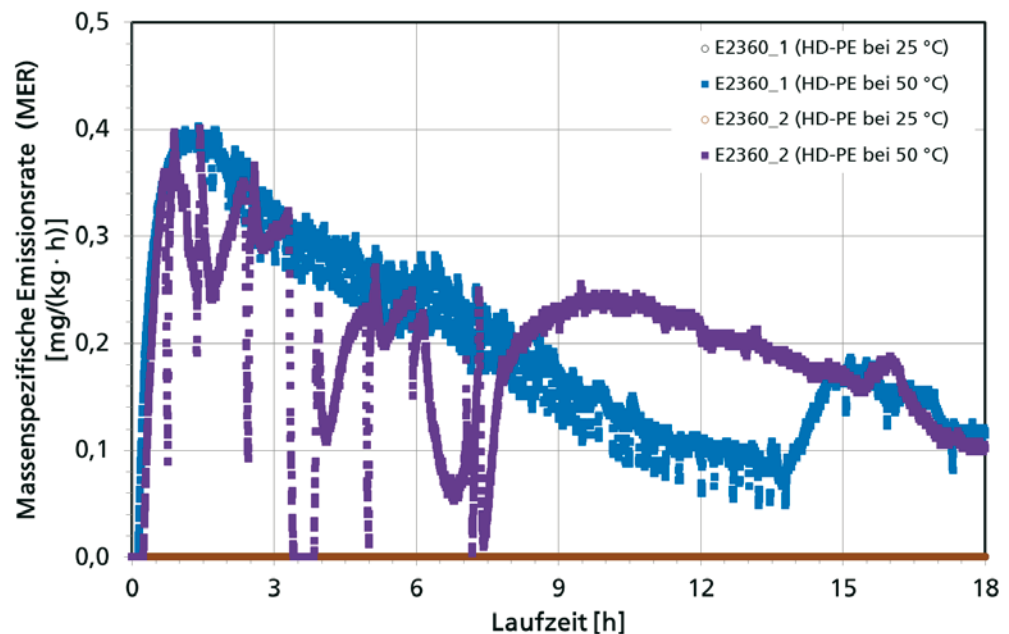


Bild 12:

Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens der Lüftungsrohre aus HD-PE in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur.

Das Emissionsverhalten von E2360-3 (EPP) kam der Arrhenius'schen Abschätzung nahe. Mit der Temperaturerhöhung von 25 °C auf 50 °C auf stieg der Emissionsmassenstrom auf etwas mehr als das Vierfache an (Bild 13). Bei beiden Temperaturen war nur eine moderate Abnahme der Emissionsrate mit der Zeit zu erkennen. Das zeitliche Verhalten der Emission kann mit der Stofffreisetzung aus dem Inneren des Materials erklärt werden, die durch die Struktur der Oberfläche bestimmt wird. Die makroskopische Betrachtung der drei Produkte aus EPP ließ erkennen, dass die Oberfläche von E2360-3 wesentlich geschlossener wirkt als die Oberflächen von E2360-4 und E2360-6.

Bei der Freisetzung von Stoffen, die nur an der Oberfläche adsorbiert sind, ist ein Verlauf ähnlich E2360-6 bei 50 °C in Bild 14 zu erwarten. Die Emissionsrate steigt steil an und erreicht das Maximum, nachdem alle adsorptiven Stellen des Versuchsaufbaus belegt sind. Ab jetzt setzt mit zunehmender Versuchsdauer eine Abreicherung der nur oberflächlich gebundenen VOCs ein und die Diffusion aus dem Innern des Materials bestimmt wesentlich den weiteren zeitlichen Verlauf der Emissionsrate.

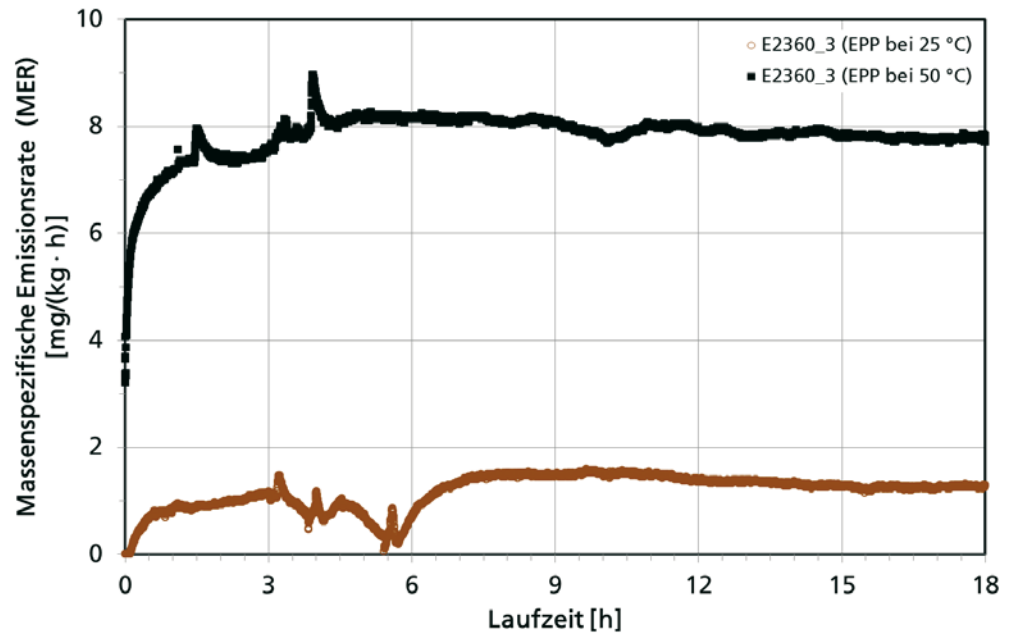


Bild 13:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Lüftungsrohres aus EPP in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur.

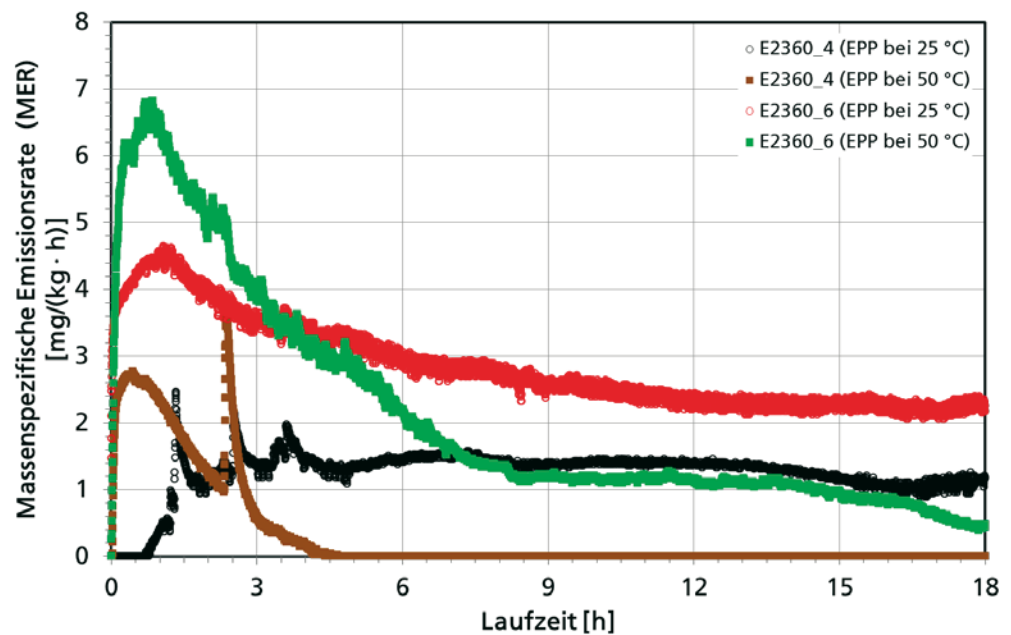


Bild 14:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens der Lüftungsrohre aus EPP in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur.

Das Kaltschrumpfband wies sowohl bei 25 °C als auch bei 50 °C die höchsten massenspezifischen Emissionsraten auf (Bild 15). Im Untersuchungsverlauf nahmen sie um ca. 30 % ab.

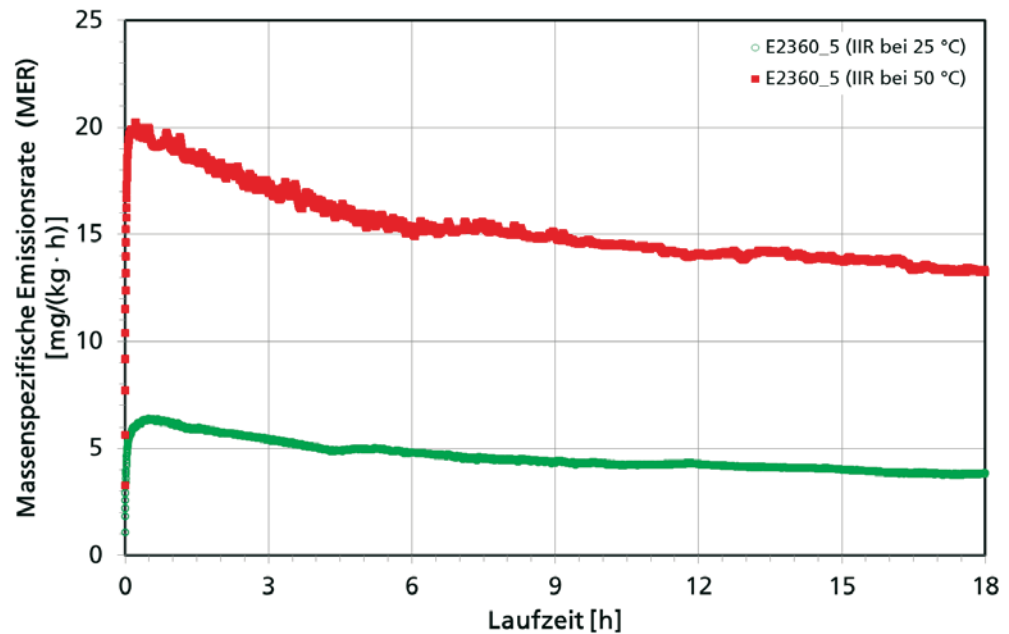


Bild 15: Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Kaltschrumpfbandes aus Butylkautschuk in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur.

4.2 Thermoextraktion

Im Anschluss an die Voruntersuchungen, bei denen die Summe der Emissionen in Abhängigkeit von der Extraktionsdauer und der Extraktionstemperatur ermittelt wurde, lag bei der zweiten Untersuchung der Produkte in der Mikrokammer der Focus auf der Identifizierung und Quantifizierung der emittierten Stoffe, da mögliche adverse Effekte auf die Innenraumluftqualität nicht nur von der Summe der Emissionen sondern insbesondere auch von deren stofflicher Zusammensetzung abhängig sind. Die aus der Mikrokammer austretende Luft wurde deshalb auf geeigneten Adsorbentien gesammelt und nach thermischer oder Lösemitteldesorption auf ihre Inhaltsstoffe analysiert. Die Luft einer Mikrokammer ohne Beladung diente bei den Untersuchungen als Hintergrundwert. Bei den in Tabelle 9 bis Tabelle 14 zusammengefassten massenspezifischen Emissionsraten sind die Hintergrundwerte bereits subtrahiert.

Im Rahmen der Thermoextraktionsuntersuchungen konnten keine cancerogenen, mutagenen oder reproduktionstoxischen Stoffe der EU Kategorien 1A oder 1B der Verordnungen (EU) Nr. 605/2014, Nr. 2015/491 und Nr. 2015/1221 identifiziert werden. Als Weichmacher konnten Vertreter der Stoffklasse der Adipinsäureester (Bis-(2-ethylhexyl)-adipat bei E2360-1 bis -4, Tabelle 9 bis Ta-

belle 12) identifiziert werden, die zunehmend die Phthalsäureester ersetzen. Letztere konnten bei keinem untersuchten Produkt nachgewiesen werden.

Beim Luftverteilerschlauch E2360-1 (Bild 16) dominierte bei 25 °C 2,2,4,6,6-Pentamethylheptan, ein Isomeres des Dodecans die Emissionen, gefolgt von 1-Dodecen und 1-Tetradecen. Auch bei 50 °C werden diese drei Stoffe am stärksten emittiert, wenn auch mit veränderter Gewichtung (1-Dodecen > 1-Tetradecen > 2,2,4,6,6-Pentamethylheptan). Die Abnahme der Emissionen mit zunehmender Extraktionszeit ist bei den leichter flüchtigen Komponenten 2,2,4,6,6-Pentamethylheptan und 1-Dodecen ausgeprägt.

Beim Luftverteilerschlauch E2360-2 (Bild 17) finden sich ausschließlich Alkane, aber keine Alkene unter den intensivsten (> 10 %) Emittenten. Während bei einer Extraktionstemperatur von 25 °C n-Octan die Emissionen dominiert, verschiebt sich der Schwerpunkt der Emissionen bei 50 °C in Richtung der schwerer flüchtigen Stoffe n-Dodecan und n-Tetradecan. n-Hexadecan tritt bei 50 °C erwartungsgemäß viel stärker in Erscheinung als bei 25 °C.

Beim Lüftungsrohr aus EPP (E2360-3, Bild 18) weisen die Emissionen ein breiteres Stoffspektrum auf. Neben Siloxanen treten unbekannte Ester, weitere nicht identifizierbare Stoffe und auch der Weichmacher Bis-(2-ethylhexyl)-adipat in der Abluft der Mikroammer auf. Die Tatsache, dass Bis-(2-ethylhexyl)-adipat bei 25 °C und einer Extraktionszeit von 1 h auftritt, lässt den Schluss zu, dass es sich dabei um eine äußerlich Anhaftung handelt, deren Ursache sowohl im Produktionsprozess als auch in der Handhabung des Materials liegen kann.

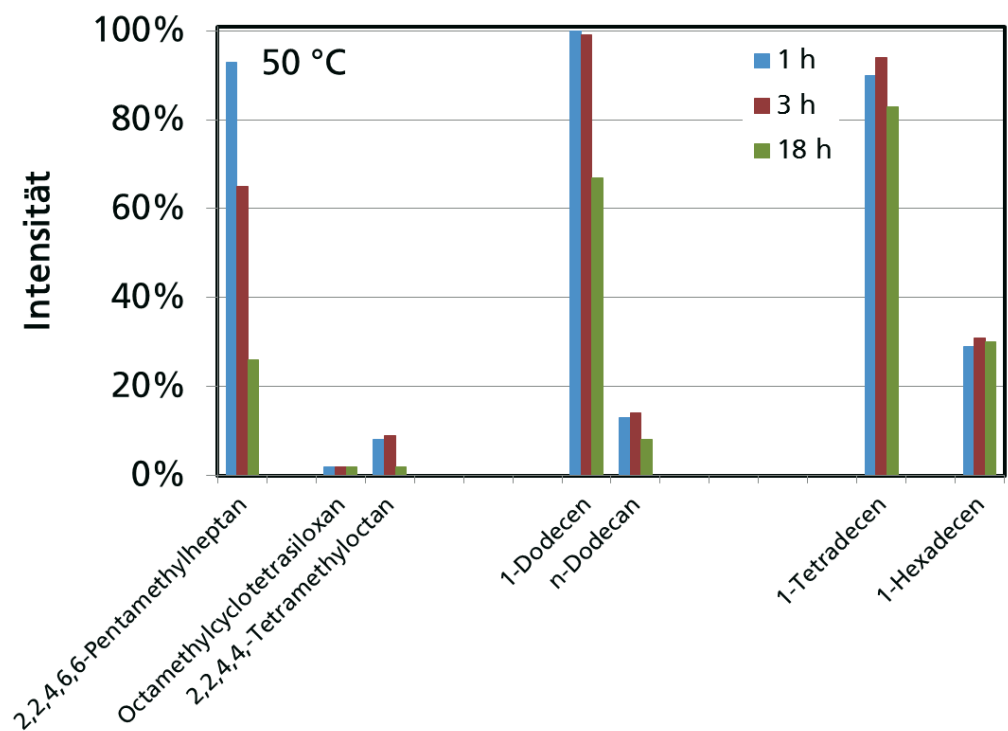
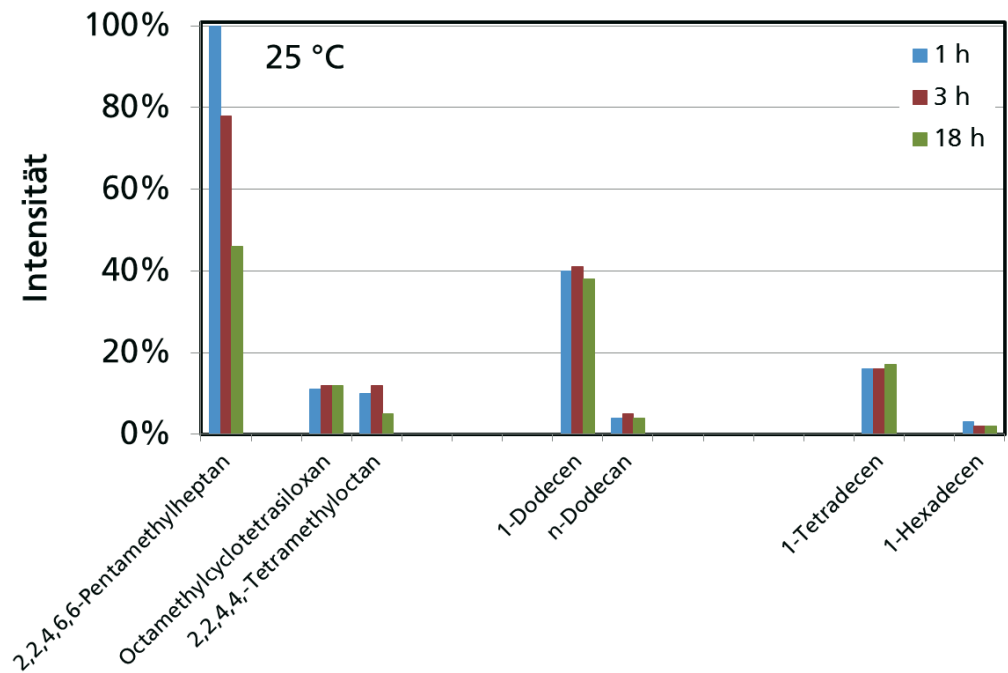


Bild 16:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Luftverteilerschlauchs (E2360-1) in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur (25 °C oben, 50 °C unten). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

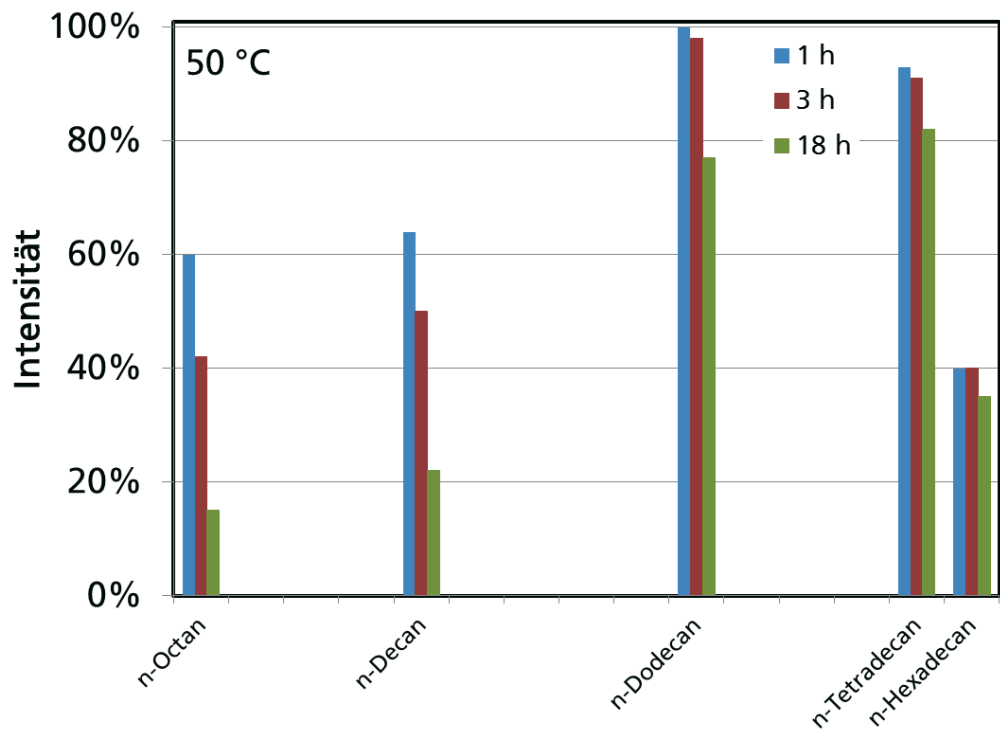
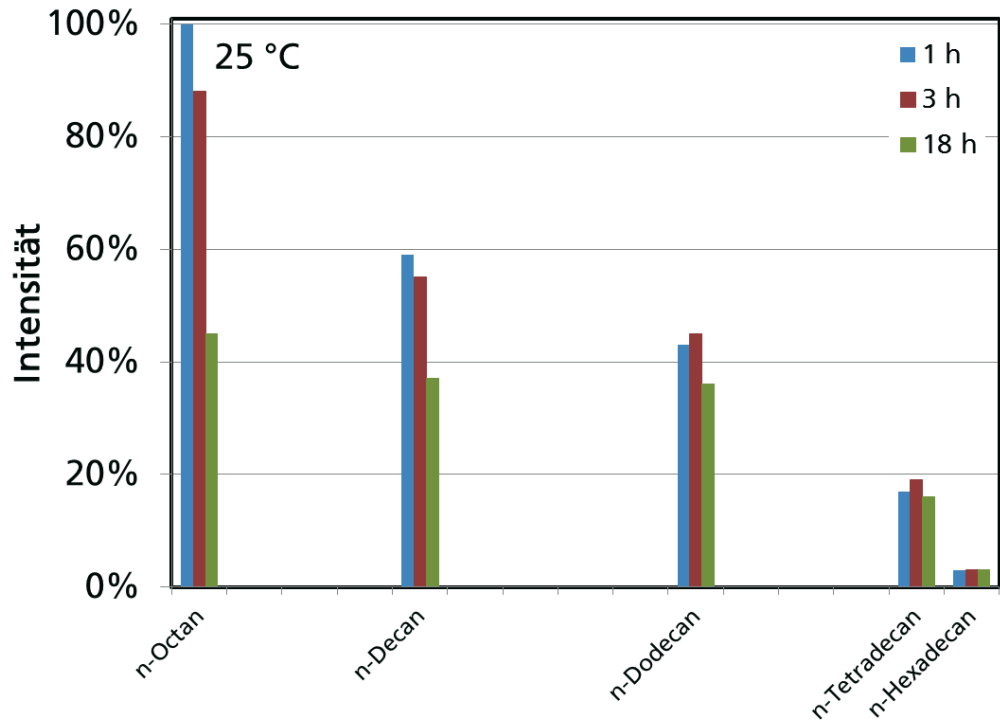


Bild 17:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Luftverteilerschlauchs (E2360-2) in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur (25 °C oben, 50 °C unten). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

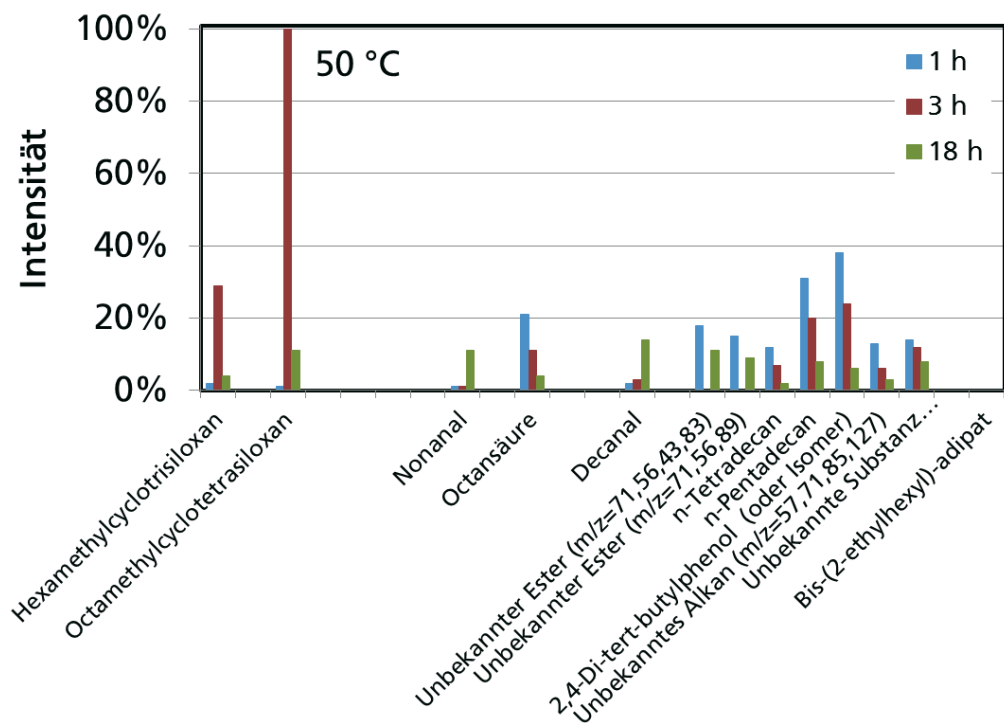
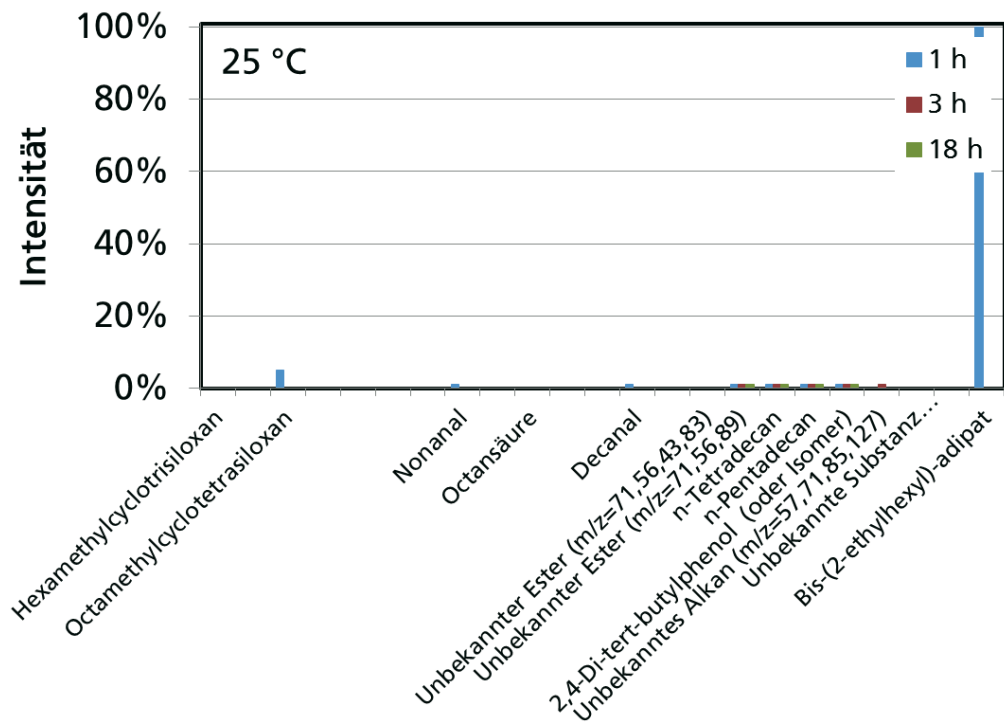


Bild 18:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Lüftungsrohrs (E2360-3) in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur (25 °C oben, 50 °C unten). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

Bei E2360-4 (Bild 19) bestehen die maßgeblichen Emissionen ausschließlich aus den Alkanen n-Undecan, n-Dodecan und n-Tridecan, die über die Zeit stark abnehmen.

Die Emissionen von E2360-5 (Bild 20) sind schlecht identifizierbar. Zwei nicht auftrennbare Cluster mit 20 bzw. 15 nicht näher identifizierbaren Stoffen dominieren die Emissionen. Außerdem trägt 2,6-Di-tert.-butyl-4-methylphenol, ein Antioxidans, das die Stabilität von Produkten gegenüber Sauerstoff erhöht, noch wesentlich zu den Gesamtemissionen bei.

E2360-5 (Bild 21) zeigt ein für EPP typisches Emissionsmuster. Auffällig ist das Auftreten von Isobutan und von Squalen. Da Squalen nur bei 25 °C und einer Extraktionsdauer von 3 h auftritt, kann davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um eine äußerliche Verunreinigung beim Umgang mit dem Material handelt. Squalen kommt auch in den menschlichen Hautlipiden vor.

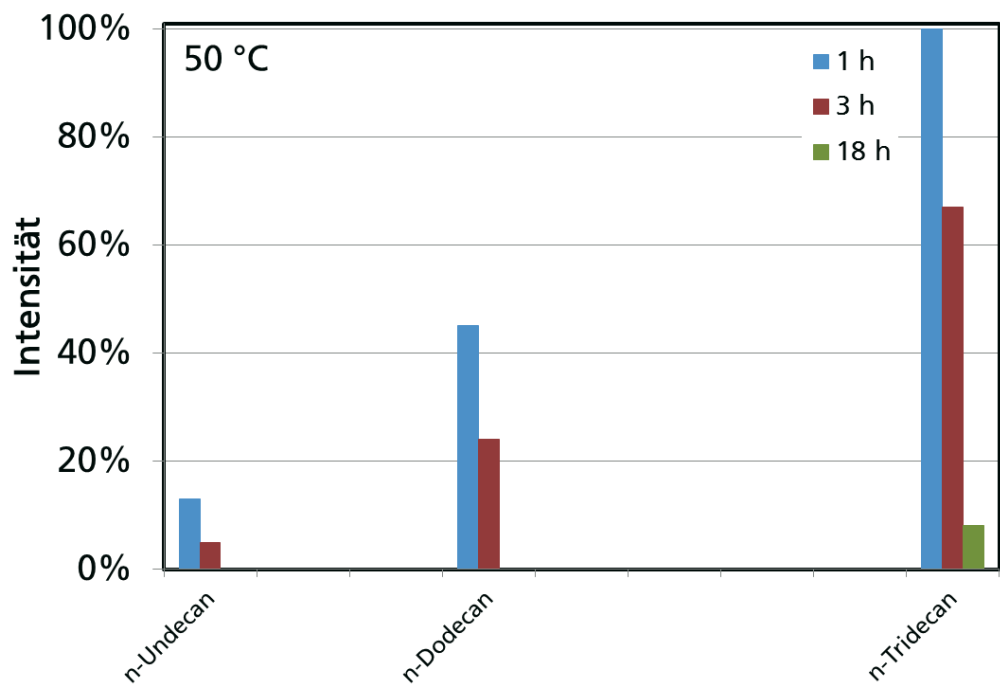
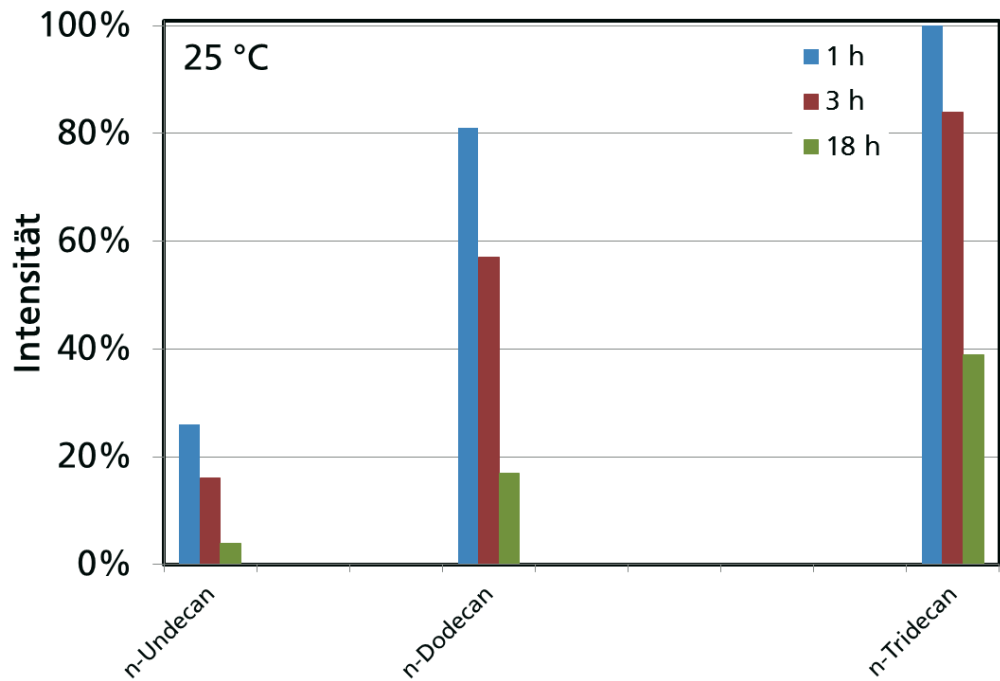


Bild 19:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Rohrbogens (E2360-4) in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur (25 °C oben, 50 °C unten). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

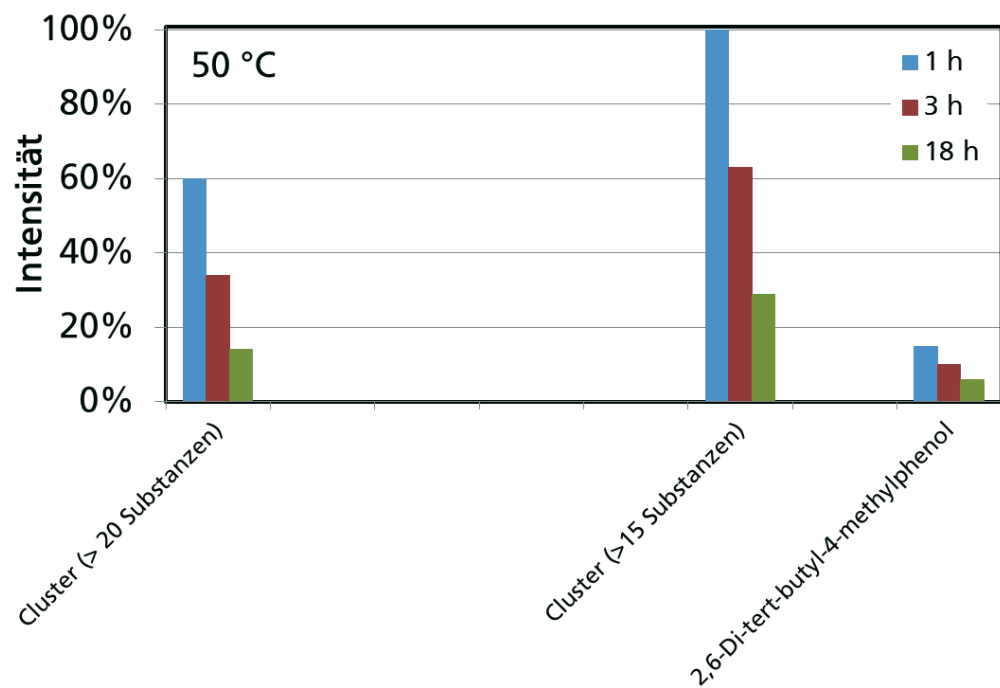
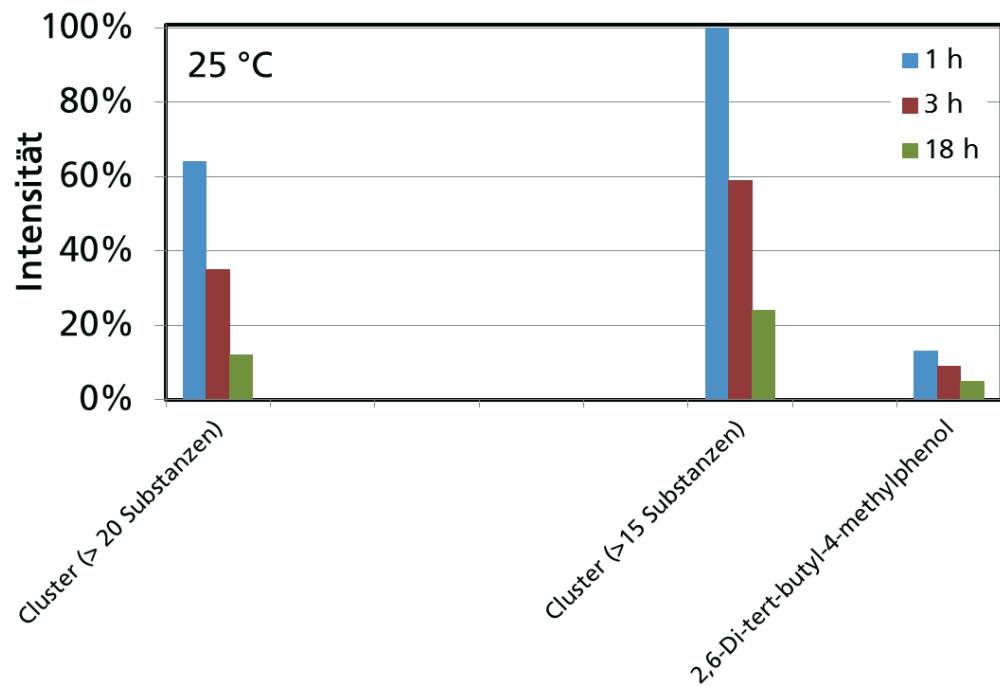


Bild 20:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Kaltschrumpfbands (E2360-5) in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur (25 °C oben, 50 °C unten). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

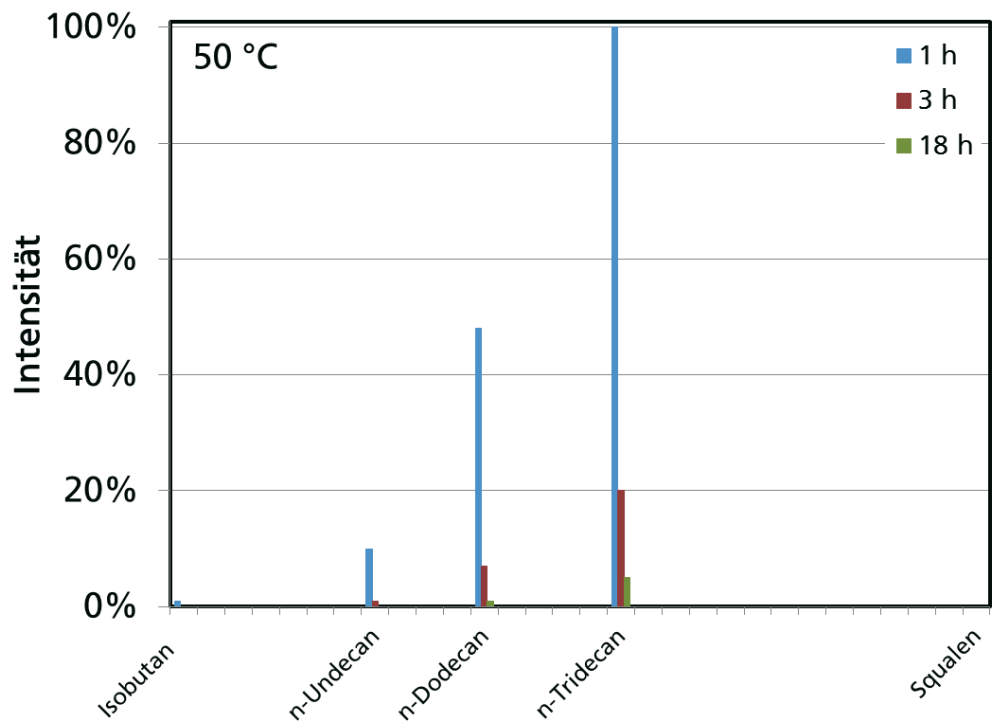
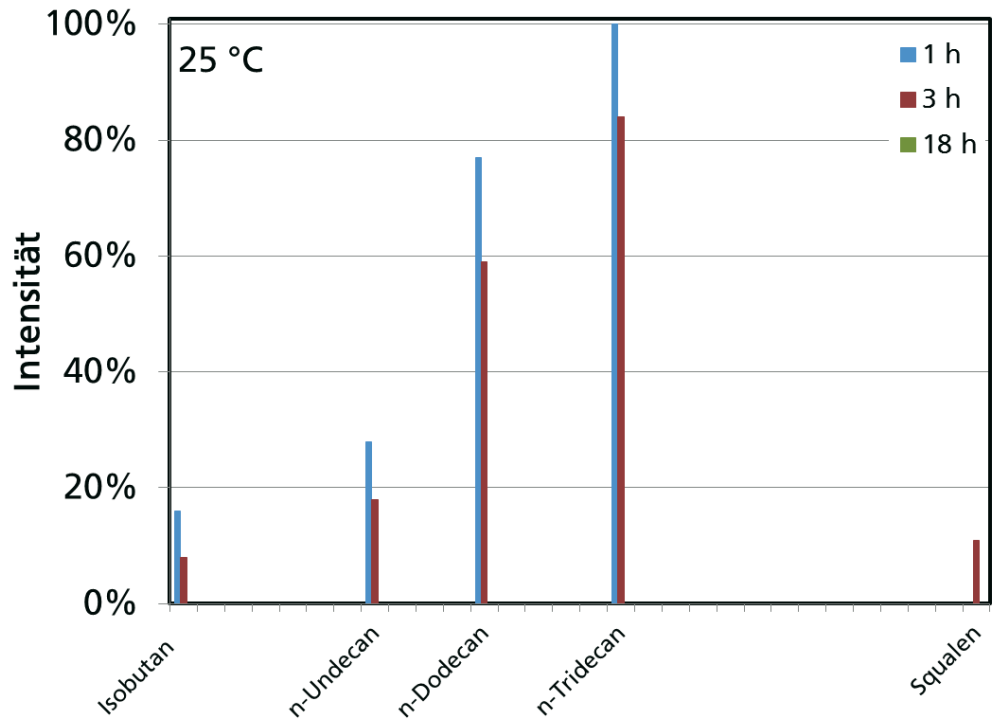


Bild 21:
Gegenüberstellung des Emissionsverhaltens des Lüftungsrohres mit Muffe (E2360-6) in Abhängigkeit von der Extraktionstemperatur (25 °C oben, 50 °C unten). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

4.3 Prüfkammeruntersuchungen

Die Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen sind in Tabelle 15 bis Tabelle 22 wiedergegeben. Die Bewertung gemäß AgBB-Schema 2015 findet sich in Tabelle 5.

Unter den in Tabelle 4 beschriebenen Prüfbedingungen konnten keine cancerogenen Stoffe der Kategorien 1A oder 1 B gefunden werden. Die Einzelstoffkonzentrationen in der Prüfkammerluft lagen mit Ausnahme von E2360-2a und -2b an Tag 28 unter $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Weichmacher aus der Stoffgruppe der Phthalsäureester (Phthalate) konnten bei keiner Probe nachgewiesen werden. Der R-Wert zur Beurteilung von bewertbaren Stoffen erreichte bei keiner Probe den Wert 1. Formaldehyd konnte bei keiner Untersuchung nachgewiesen werden.

Bei den Lüftungsleitungen aus HD-PE überwiegen in den Prüfkammeruntersuchungen bei qualitativer Betrachtung Emissionen von Alkanen und Alkenen. Zu Beginn der Untersuchung (3 d, 7 d) auftretendes Aceton (E2360-1a und -1b) kann an Tag 28 in keiner Probe mehr nachgewiesen werden bzw. die gefundenen Konzentrationen lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Beim zweiten Lüftungsrohr aus HD-PE (Tabelle 17, Tabelle 18) konnten bei den Probenahmen an den Tagen 28, 56 und 84 jeweils $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 2-Butanon in der Prüfkammerluft nachgewiesen werden. Die Emissionen an Alkanen (n-Dodecan, n-Tetradecan und n-Hexadecan) lagen an Tag 28 unterhalb der Bewertungsgrenze des AgBB-Schemas.

Bei den luftführenden Bauteilen aus EPP (E2360-3, -4 und -6) wiesen E2360-3 und E2360-4 an Tag 3 Aceton-Emissionen auf, die zu einer Konzentration von $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in der Prüfkammerluft führten (Tabelle 19 und Tabelle 20). Bereits an Tag 7 lagen die Acetonkonzentrationen unter der analytischen Bestimmungsgrenze. Ansonsten bestimmten längerkettige n-Alkane (n-Undecan bis n-Tridecan) das Emissionsbild. Das Lüftungsrohr mit Muffe aus EPP (E2360-6) wies in der Prüfkammeruntersuchung (Tabelle 22) nur geringe Emissionen auf.

Das Kaltschrumpfband (Tabelle 21) aus aktiviertem Butylkautschuk wies ein von den anderen Produkten abweichendes Emissionsbild auf. Hier traten insbesondere, wenn auch auf niedrigem Niveau, organische Schwefelsäureester und nicht näher identifizierbare Alkene in Erscheinung. Außerdem konnten zwei Stoffe nicht identifiziert werden, d. h. selbst die Zuordnung zu einer bestimmten Stoffgruppe war nicht möglich.

Tabelle 5:
Beurteilung der Messergebnisse gemäß AgBB-Schema 2015.

Einhaltende Kriterien an Tag 28 des Prüfkammerexperiment	Stoffkonzentrationen in der Prüfkammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]							
	E2360-1 außen	E2360-1 innen	E2360-2 außen	E2360-2 innen	E2360-3	E2360-4	E2360-5	E2360-6
Formaldehyd	0	0	0	0	0	0	0	0
TVOC	0	0	5	5	0	0	0	0
$\Sigma\text{VOC}_{\text{Canc}}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma\text{VOC}_{\text{oNIK}}$	0	0	0	0	0	0	0	0
R [-]	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣSVOC	0	0	0	0	0	0	0	0

4.4 Qualitative Gegenüberstellung der Messergebnisse von Thermoextraktion und Prüfkammeruntersuchung

Die mittels Thermoextraktion ermittelten massenspezifischen Emissionsraten und die Stoffkonzentrationen in der Prüfkammerluft können nicht in eine direkte Beziehung zueinander gesetzt werden. Eine qualitative Gegenüberstellung der bei Anwendung der jeweiligen Verfahren identifizierten Stoffe ist jedoch möglich. Dieses Vorgehen lässt eine Aussage darüber zu, inwieweit durch das einfachere, schnellere und kostengünstigere Thermoextraktionsverfahren alle die Stoffe zuverlässig erfasst werden können, die auch im Prüfkammerexperiment bestimmt werden können.

Wie aus den Werten in Tabelle 15 bis Tabelle 22 ersichtlich ist, sind die VOC-Konzentrationen in der Prüfkammerluft beim gewählten Szenario sehr gering. Bei den Thermoextraktionsuntersuchungen der Luftverteilerschläuche E2360-1 und -2 (Bild 22 und Bild 23 jeweils untere Abbildung sowie Tabelle 9 und Tabelle 10) wurde nicht nach Rohrrinnen- und Außenseite unterschieden. Die ermittelten Emissionen stellen somit einen Summenwert aus beiden potenziellen Quellen dar. Bei den Prüfkammeruntersuchungen hingegen wurden die Emissionen der Außenseiten und der beschichteten, luftführenden Innenseiten getrennt untersucht.

Bei E2360-1 (Bild 22) unterschieden sich die Emissionsmuster der Rohrrinnen- und der Rohraußenseite in erster Linie durch die Anwesenheit zweier Glykole (2-(2-Butoxyethoxy)-ethanol und 2-[2-(2-Ethoxyethoxy)ethoxy]-ethanol), die nur in der Prüfkammerluft, nicht jedoch im Luftstrom, der durch das Rohrrinnere geführt wurde, nachweisbar waren. In den Thermoextraktionsuntersuchungen konnten die beiden Glykole nicht nachgewiesen werden. Ein Grund für diese Diskrepanz kann in der Verwendung nicht befeuchteter aufgereinigter Pressluft bei der Thermoextraktion liegen. Das Emissionsverhalten unpolarer Stoffe wie der n-Alkane oder Alkene wird durch die Luftfeuchte weit weniger beeinflusst als das polarer Komponenten (z. B. Alkohole oder Glykole).

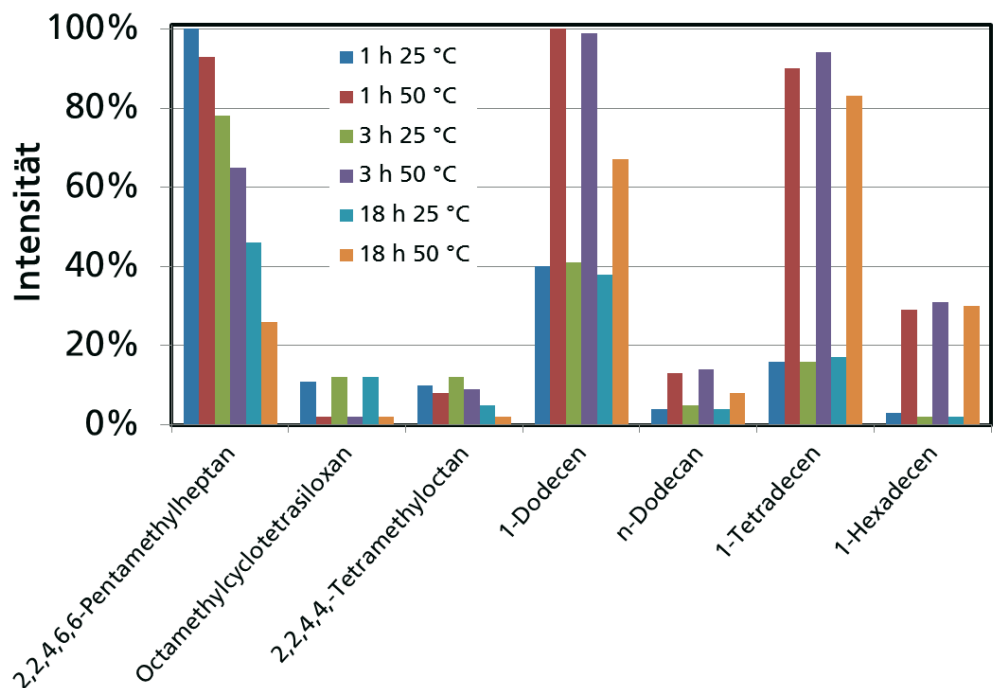
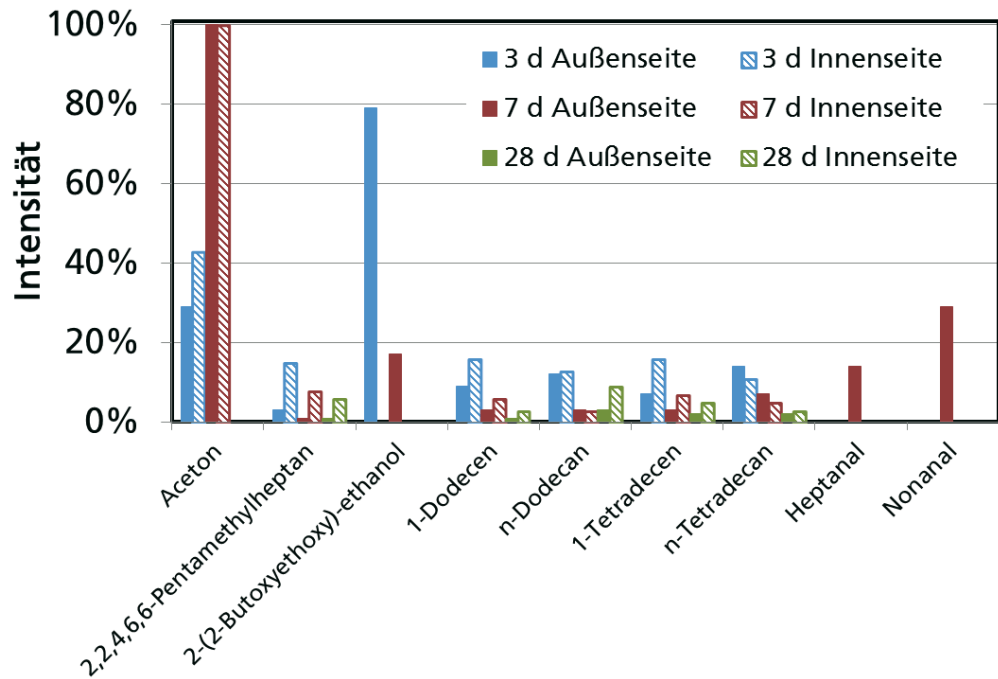


Bild 22:
Gegenüberstellung der Ergebnisse von Prüfkammeruntersuchung (oben) und Thermoextraktionsuntersuchung (unten) des Luftverteilerschlauchs (E2360-1). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

Beim Luftverteilerschlauch E2360-2 (Bild 23) wurde der Verlauf der VOC-Emissionen in der Prüfkammer über einen Zeitraum von 84 Tagen verfolgt. Mit Ausnahme von n-Hexadecan, das nur in der Luft, die mit der Innenseite des Luftverteilerschlauchs in Kontakt kam, nachgewiesen werden konnte, wiesen Rohrrinnen- und -außenseite übereinstimmende Emissionsmuster auf. Die Makrokomponenten n-Dodecan und n-Tetradecan konnten sowohl mit der Thermoextraktion als auch mit dem Prüfkammerexperiment bestimmt werden. Hexadecan, das in der Luft, die mit der Rohrrinnenseite Kontakt hatte, als Makrokomponente gefunden wurde, konnte auch in der Thermoextraktion (Tabelle 10) nachgewiesen werden. Allerdings zählt es hier nicht zu den Makrokomponenten mit einer Emissionsrate $\geq 10\%$ der höchsten Emissionsrate.

Das zweischalige Lüftungsrohr aus EPP (E2360-3) zeigt in der Prüfkammeruntersuchung nur messbare Emissionen an Aceton. Die Konzentrationen weiterer Stoffe liegen unter der Bestimmungsgrenze. Im Thermoextraktionsexperiment ließ sich - insbesondere bei 50 °C - eine Vielzahl von Stoffen nachweisen. Der Weichmacher Bis-(2-ethylhexyl)-adipat, dominierte die Emissionen bei 25 °C und 1 h Extraktionszeit, trat aber im weiteren Versuchsverlauf nicht mehr in Erscheinung, so dass von einer Anhaftung an der Probenoberfläche ausgegangen werden kann. Das verstärkte Auftreten vieler Stoffe bei 50 °C erklärt, warum diese im Prüfkammerexperiment nicht oder nur in Konzentrationen kleiner der Bestimmungsgrenze nachgewiesen werden konnten (Bild 24). Sie werden erst bei höheren Temperaturen aus dem Material freigesetzt. Das bedeutet gleichzeitig, dass es, sobald erwärmte Luft ($\gg 23$ °C) durch den Luftverteilerschlauch geführt wird, zu einem Anstieg der VOC-Emissionen kommen kann.

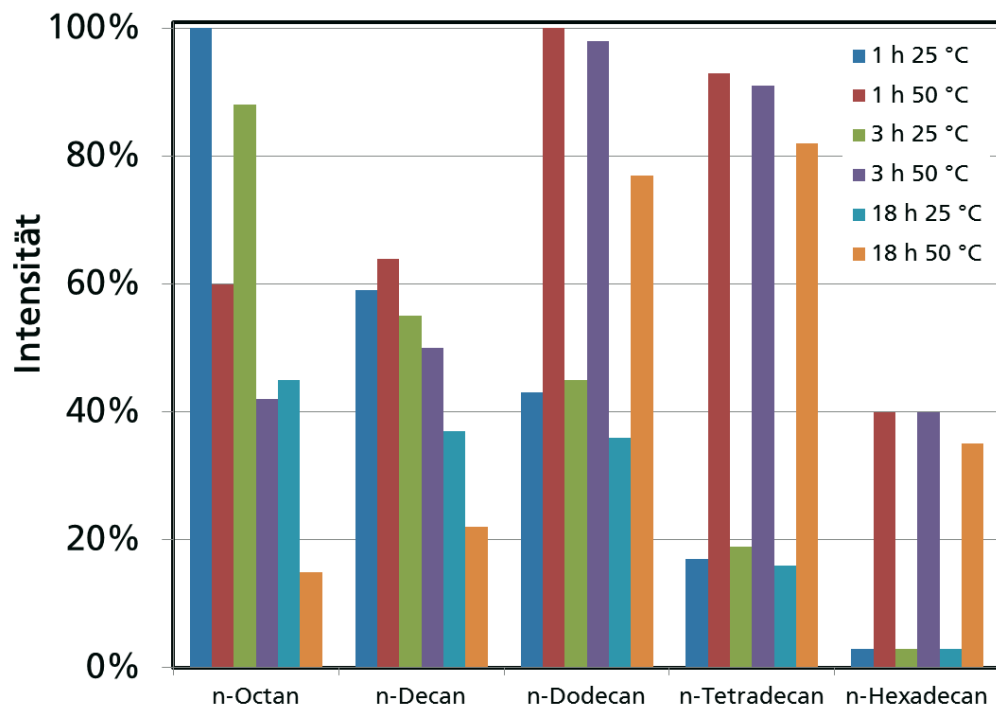
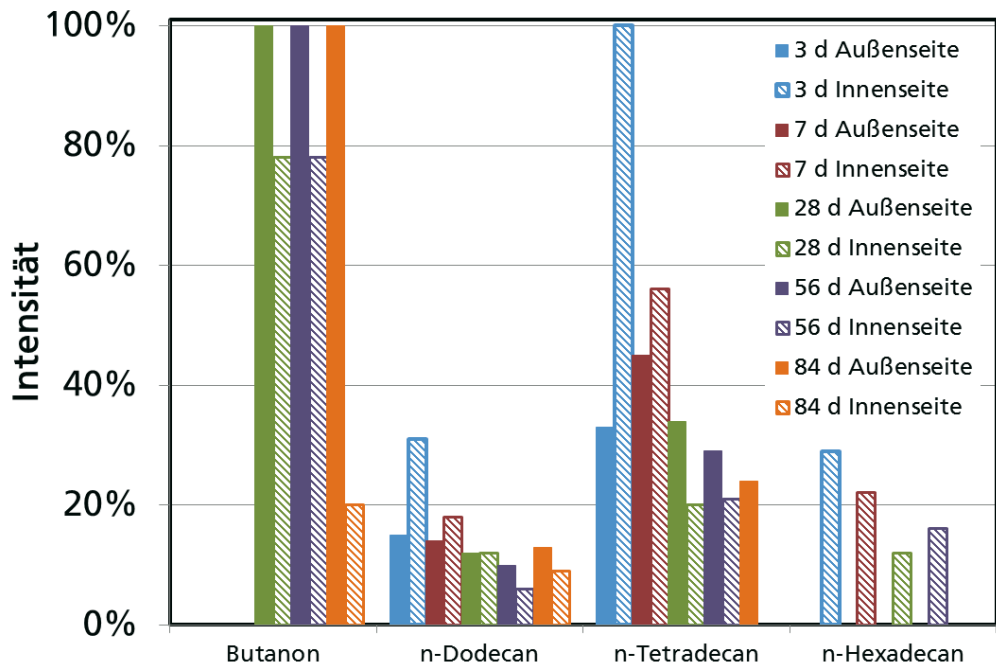


Bild 23:
Gegenüberstellung der Ergebnisse von Prüfkammeruntersuchung(oben) und Thermoextraktionsuntersuchung (unten) des Luftverteilerschlauchs (E2360-2). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

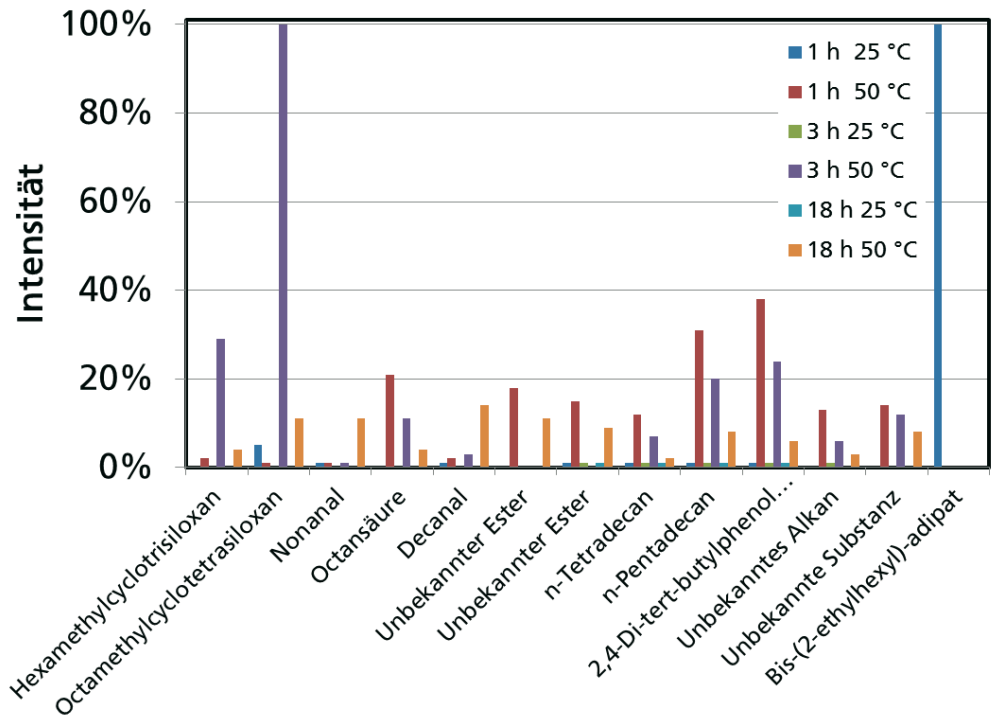


Bild 24:

Ergebnisse der Thermoextraktionsuntersuchung des zweischaligen Lüftungsrohres aus EPP (E2360-3). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

Beim Iso-Rohrbogen aus EPP (E2360-4, Bild 25) stimmen die Makrokomponenten n-Undecan, n-Dodecan und n-Tridecan bei beiden Untersuchungen überein. Aceton, das bei der Prüfkammeruntersuchung an Tag 3 die höchste Kammerkonzentration erreichte, konnte in der Thermoextraktion nicht nachgewiesen werden, was der Tatsache geschuldet ist, dass bei der Thermoextraktion die Luftproben ausschließlich auf Adsorberrohren mit Tenax TA gesammelt wurden und im Gegensatz zu der Prüfkammeruntersuchung keine zusätzliche reaktive Probenahme für Aldehyde und Ketone auf DNPH-Adsorbentien durchgeführt wurde. Aceton wird an Tenax TA nicht oder für eine quantitative Analyse nur unzureichend adsorbiert.

Die Ergebnisse der beiden Untersuchungsverfahren sind beim Kaltschrumpfband aus aktiviertem Butylkautschuk (E2360-5) nicht vergleichbar, da aufgrund der vielen nicht identifizierbaren Stoffe keine Aussagen über den Grad der Übereinstimmung der Emissionsmuster getroffen werden können (Bild 26).

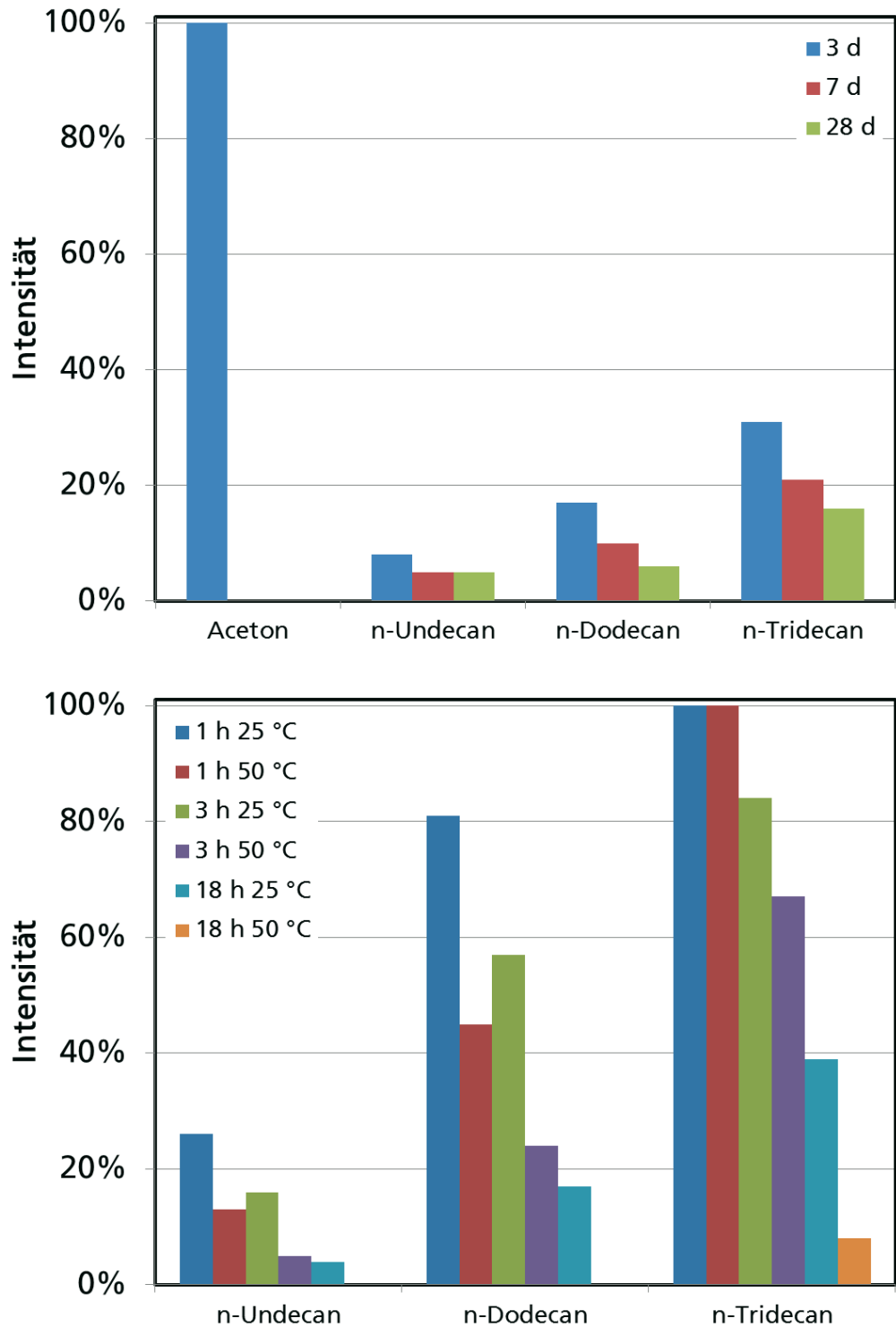


Bild 25:
Gegenüberstellung der Ergebnisse von Prüfkammeruntersuchung (oben) und Thermoextraktionsuntersuchung (unten) des Rohrbogens (E2360-4). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

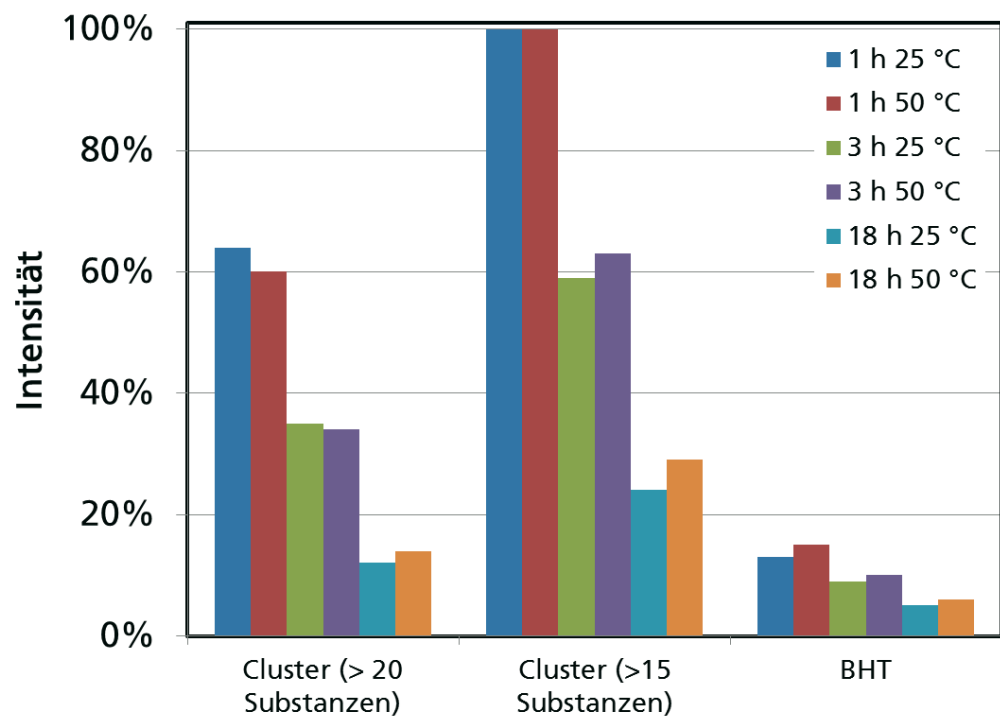
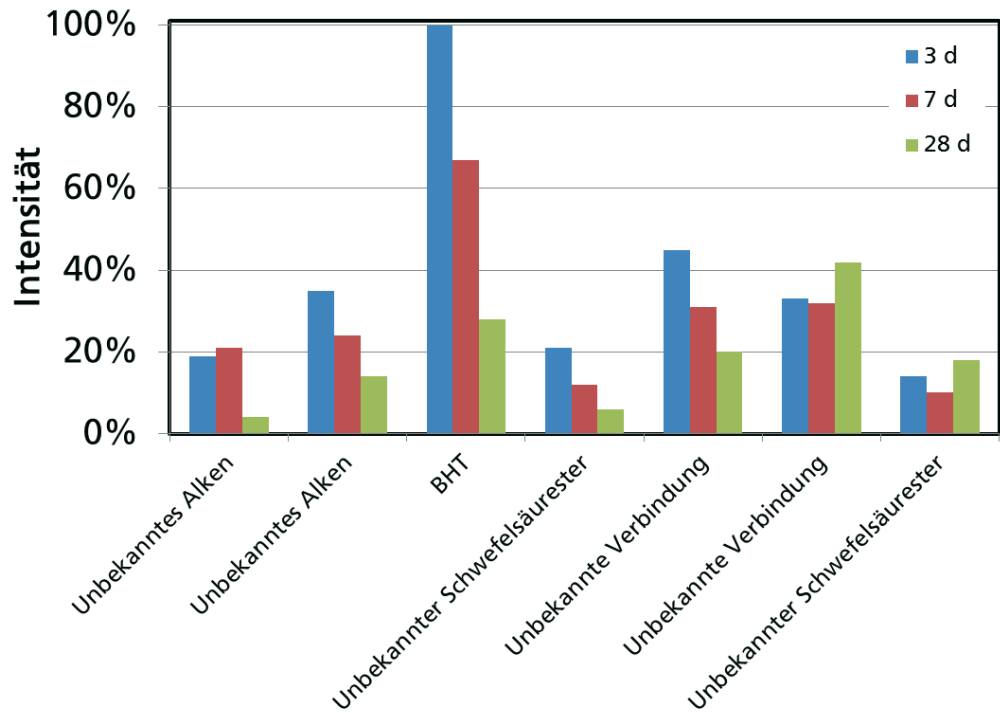


Bild 26: Gegenüberstellung der Ergebnisse von Prüfkammeruntersuchung (oben) und Thermoextraktionsuntersuchung (unten) des Kaltschrumpfbandes (E2360-5). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

Sowohl im Prüfkammerexperiment als auch in der Thermoextraktion dominierten beim Lüftungsrohr mit Muffe (E2360-6) die Alkane n-Dodecan und n-Tridecan (Bild 27). Da bei der Prüfkammeruntersuchung die erste Probenahme nach 3 Tagen stattfindet, konnte Isobutan, das einen niedrigen Siedepunkt (-11,7 °C) und eine hohe Flüchtigkeit aufweist, nicht mehr nachgewiesen werden. Squalen, ein natürlicher Stoff, der auch in den Lipiden der menschlichen Haut vorkommt, kann als oberflächliche Antragung angesehen werden, der durch den Umgang mit dem Material auf dessen Oberfläche gelangt ist.

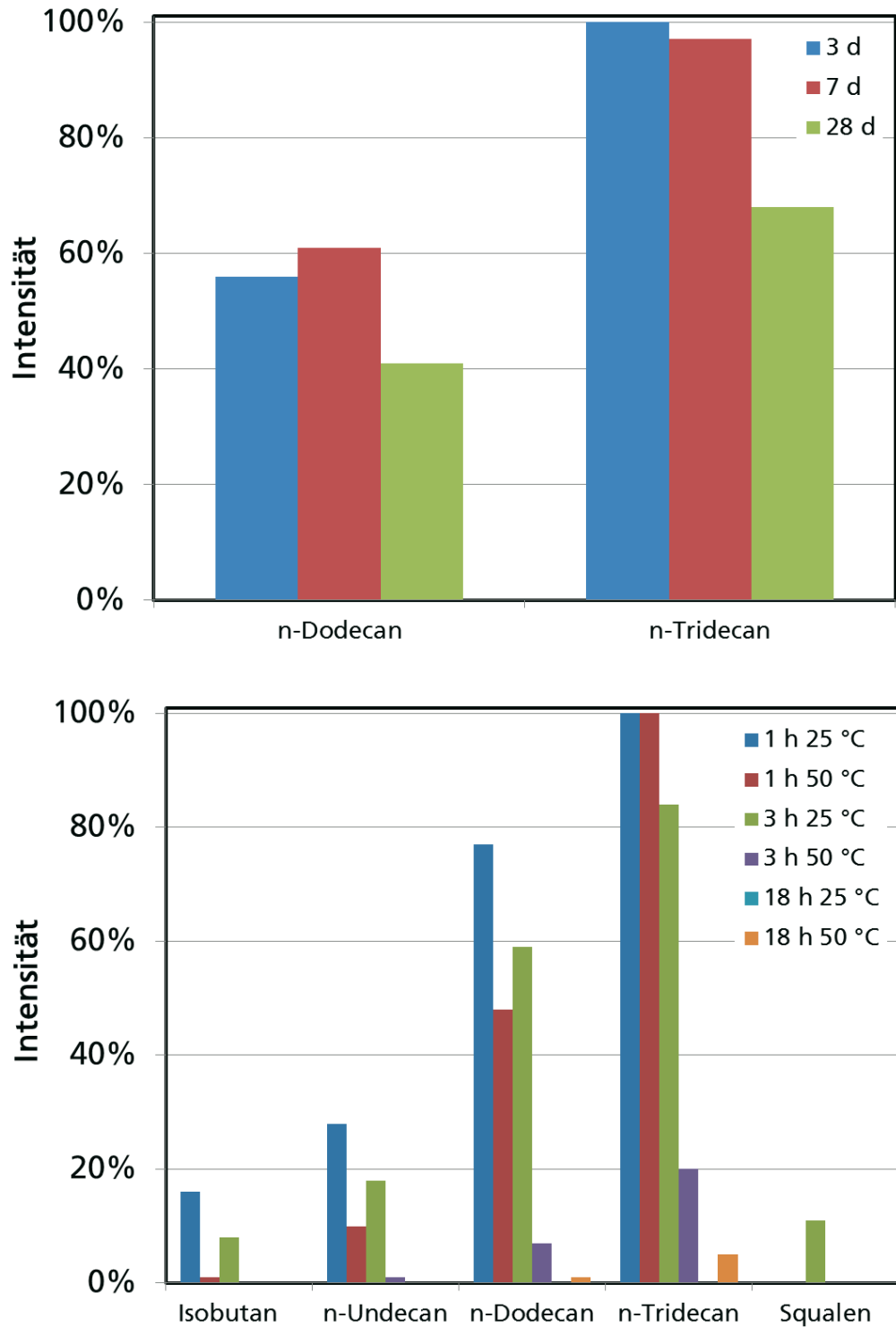


Bild 27: Gegenüberstellung der Ergebnisse von Prüfkammeruntersuchung (oben) und Thermoextraktionsuntersuchung (unten) des Lüftungsrohres mit Muffe (E2360-6). Es sind nur die Stoffe dargestellt, deren Emissionsrate bei mindestens einer Messung $\geq 10\%$ der höchsten gemessenen Emissionsrate betrug.

5 Verfahrensvorschlag

Sowohl europäisch (DIN EN 16516) als auch national (DIN EN ISO 16000-9) werden Emissionsuntersuchungen an Bauprodukten mit einem Emissionsprüfkammerverfahren untersucht. Diese Herangehensweise ist auch bei Lüftungsleitungen und Dichtungsbändern so lange zielführend, wie es sich um Produkte handelt, die aus einschichtigem Material bestehen. Bei Lüftungsleitungen, die im Innern eine Anti-Staub-Beschichtung besitzen, können weitergehende Aufbauten erforderlich sein, um die Emissionen der Rohraußenseite und der Innenseite getrennt zu erfassen.

Die DIN EN 16516 und die Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik [DIBt 2010] gehen von einem Szenario aus, bei dem das zu prüfende Bauprodukt im Referenzraum entsprechend seines ausgelobten Verwendungszwecks eingebaut wird (intended use). Bei Lüftungsanlagen und deren Komponenten sind deshalb Annahmen zu treffen, die dem realen Anwendungsfall möglichst nahe kommen und trotzdem noch eine sinnhafte Messung ermöglichen. Abhängig davon, ob die Lüftungsanlage im Rahmen eines Neubaus geplant und eingebaut wird oder infolge einer energetischen Sanierung im Bestand notwendig wird, ändert sich auch die Einbausituation der Lüftungsanlage und ihrer Komponenten. Im Fall des Neubaus kann davon ausgegangen werden, dass die Komponenten wie Leitungen und Verteiler überwiegend im Mauerwerk eingebaut werden. D. h. die Emissionen der Außenseiten der Lüftungsleitungen und der Verteiler können vernachlässigt werden. Im Sanierungsfall werden die Komponenten der Anlage häufig hinter sog. Einkofferungen aus Gipskartonplatten verborgen. Gipskartonplatten sind nicht diffusionsdicht, so dass die Emissionen der Außenseiten der Komponenten durchaus einen Beitrag zur Immissionssituation im Raum liefern können.

5.1 Allgemeine Randbedingungen

Es wird empfohlen, das Raummodell, das dem AgBB-Schema und der harmonisierten Prüfnorm DIN EN 16516 zugrunde liegt, mit den Standardparametern Raumvolumen 30 m^3 , Luftwechselrate $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, rel. Feuchte 50 % und Lufttemperatur $23 \text{ }^\circ\text{C}$ anzusetzen.

5.2 Lüftungsleitungen

Bei der mechanischen Wohnraumlüftung kommen häufig Lüftungsleitungen in drei Querschnitten (DN 75, DN 125 und DN 160) zum Einsatz. Während die Leitungen DN 75 meist vom Lüftungsverteiler zu den Luftein- und -auslassventilen verlegt werden, dienen die großkalibrigen Leitungen überwiegend der Verbindung zwischen Lüftungsgerät und Luftverteiler. Für die Emissionsuntersuchungen an Lüftungsleitungen werden folgende Randbedingungen vorgeschlagen:

- Die Frischluftzufuhr in den Referenzraum erfolgt ausschließlich über die Lüftungsleitung.

- Die Länge der Zuluftleitung beträgt 7 m, das entspricht einer Längs- und einer Querseite im Referenzraum.

Die aus diesen Annahmen resultierenden Werte für die frei emittierende Oberfläche, den Beladungsfaktor im Referenzraum und die flächenspezifische Lüftungsrate sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6:

Frei emittierende Oberflächen, Beladungsfaktor und flächenspezifische Lüftungsraten von Lüftungsleitungen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei einer Rohrlänge von 7 m.

Durchmesser des Lüftungsrohrs/der Lüftungsleitung [mm]	Frei emittierende Oberfläche [m²]	Beladungsfaktor im Referenzraum [m²·m⁻³]	Flächenspezifische Lüftungsrate [m³·m⁻²·h⁻¹]
160	3,5	0,12	4,3
125	2,7	0,1	5,5
75	1,7	0,06	8,9

Vergleicht man die Werte für die Beladungsfaktoren im Referenzraum in Tabelle 6 mit den Vorgaben der DIN EN 16516 (4.2.2 Abmessungen und Beladungsfaktoren im Referenzraum), so liegen die errechneten Beladungsfaktoren zwischen dem für Boden oder Decke (0,4 m²·m⁻³) und für kleine Oberflächen wie Türen oder Fenster (0,05 m²·m⁻³). Hier könnte es sinnvoll sein, einen Beladungsfaktor von 0,1 m²·m⁻³ und eine flächenspezifische Lüftungsrate von 5,5 m³·m⁻²·h⁻¹ einzuführen.

Derartige Entscheidung sollen vom zuständigen Produkt-TC getroffen werden. Für nationale Regelungen ist ein Ansatz denkbar, bei dem das Lüftungsrohr einer Serie mit dem größten Durchmesser untersucht wird und die Länge des Prüfstücks mit 0,23 m·m⁻³ festgelegt wird. Die Außenseite des Prüfstücks kann je nach angenommener Einbausituation mit Aluminiumfolie und emissionsarmem Aluminiumklebeband abgedeckt werden.

5.3 Dichtungsmaterialien

Dichtungsmaterialien kommen an unterschiedlichen Stellen der Lüftungsanlage zum Einsatz:

- Verlängerung von Lüftungsleitungen mittels Muffen

- Anschluss von Lüftungsleitungen an Luftverteiler, Lüftungsgerät oder Schalldämpfer
- Anschluss von Luftauslässen an Lüftungsleitungen

Die Lüftungsleitungen, die zu den Luftauslässen führen, werden überwiegend in DN 75 ausgeführt, die Außenluftleitungen und die Leitungen vom Lüftungsgerät zu den Luftverteilern in DN 125 bzw. DN 160. Die sich bei der Annahme von 10 % Überlappung pro Anschluss ergebenden Längen an Dichtungsband in Abhängigkeit vom Leitungsdurchmesser sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7:

Frei emittierende Oberflächen, Beladungsfaktor und flächenspezifische Lüftungsraten von Dichtungsbändern in Abhängigkeit vom Leitungsdurchmesser.

Außen-durch-messer des Lüftungs-rohrs/der Lüftungs-leitung [mm]	Länge des benö-tigten Dichtungs-bandes [m]		Frei emit-tierende Ober-fläche des Dich-tungs-bandes [m ²]	Beladungs-faktor im Re-ferenzraum [m ² /m ³]	Flächenspezi-fische Lüf-tungsrate [m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹]
	Ohne Über-lap-pung	Inkl. 10 % Über-lap-pung			
160	0,5	0,55	0,028	0,0009	550
125	0,4	0,43	0,021	0,0007	700
75	0,24	0,26	0,013	0,0004	1140

In einem, dem Referenzraum entsprechenden, Innenraum sind üblicherweise ein Luftauslass- und ein Lufteinlassventil eingebaut. Geht man davon aus, dass jede der beiden Leitungen (DN 75) mithilfe einer Muffe einmal innerhalb des Raumes verlängert wurde, so befinden sich im Referenzraum insgesamt 6 Übergänge, die mit Hilfe von Dichtungsbändern abgedichtet wurden. Bei diesem Ansatz ergibt sich eine Gesamtlänge der Dichtungsbänder von 1,44 m (10 % Überlappung der Enden). Bei einer Breite der Dichtungsbänder von 0,05 m errechnet sich die frei emittierende Oberfläche zu 0,07 m². Daraus resultieren ein Beladungsfaktor im Referenzraum von 0,002 m²·m⁻³ und eine flächenspezifische Lüftungsrate von 208 m³·m⁻²·h⁻¹.

Die Vorgaben der DIN EN 16516 (4.2.2 Abmessungen und Beladungsfaktoren im Referenzraum) mit einem Beladungsfaktor von 0,007 m²·m⁻³ bei einem Luftwechsel von 0,5 h⁻¹ für sehr kleine Oberflächen können für Dichtungsbänder prinzipiell angewandt werden, verschiebt jedoch das oben beschriebene Szenario in Richtung einer worst-case-Annahme. Die Wahl eines geringeren Be-

ladungsfaktors führt zu einer erhöhten Messunsicherheit und zu einem Ansteigen der Bestimmungsgrenze. Damit sind die Anforderungen der DIN EN 16516 (8.2.5.3 Berichtsgrenze und Quantifizierungsgrenze) nicht mehr zuverlässig einzuhalten.

5.4 Lüftungsventile

Üblicherweise werden in Räumen mit den Abmessungen des AgBB-Referenzraums zwei Lüftungsventile installiert, eines für die Frischluftzufuhr und eines für die Abluft. Da es sich bei den Ventilen um komplexe Bauteile handelt, müssen diese als Ganzes geprüft werden. Flächen an den Ventilen, die bei der Verwendung weder mit der zugeführten Luft noch mit der Raumluft in Verbindung stehen, können – wenn zugänglich - mit Aluminiumfolie und emissionsarmem Aluminiumklebeband abgedeckt werden, damit sie nicht zur Bauteilemission beitragen.

Das beschriebene Vorgehen widerspricht aber dem Modellraumkonzept, da die Verhältnisse im Modellraum in der Prüfkammer nicht nachgebildet werden können. Festlegungen, wie Lüftungsventile geprüft werden sollen, sollten im Rahmen der harmonisierten Produktnorm vom zuständigen Produkt-TC festgelegt werden. Angesichts der im Vergleich zu den Lüftungsleitungen kleinen Oberfläche wird eine Prüfung der Lüftungsventile als nicht zwingend erforderlich angesehen.

5.5 Lüftungsverteiler

Lüftungsverteiler dienen dazu, die angesaugte, gefilterte und vorgewärmte Frischluft auf die Lüftungsstränge für die einzelnen Räume zu verteilen. Die einzelnen Lüftungsstränge können a) die einzelnen Räume mit Frischluft versorgen oder b) in den einzelnen Räumen nochmals mittels weiterer Lüftungsverteiler aufgeteilt werden. D. h. üblicherweise kann ein Lüftungsverteiler nicht zwingend einem einzelnen Raum zugeordnet werden. Das Emissionsverhalten eines Lüftungsverteilers kann prinzipiell mit einer Prüfkammeruntersuchung ermittelt werden. Allerdings sind hierzu – analog zu den Lüftungsventilen - weitergehende Annahmen und Festlegungen zu treffen, die mit dem zuständigen Produkt-TCs zu diskutieren sind.

5.6 Indirekte Prüfverfahren

Wird der Nachweis der Emissionseigenschaften von Lüftungsleitungen, Luftverteilern und Ventilen für die Hersteller verpflichtend, werden auch schnellere und einfachere Verfahren für die werkseigene Produktionskontrolle oder die Materialentwicklung benötigt. Ein Verfahren, das zwar das Vorhandensein oder die Beauftragung eines analytischen Labors voraussetzt, aber Messergebnisse liefert, die qualitativ recht gut mit der Prüfkammeruntersuchung übereinstimmen, ist die Thermoextraktion (3.5) mittels Mikrokammer. Mit der im Rahmen der Voruntersuchungen angewandten Mikrokammer können flächige Bauteile bis

zu einer Dicke von ca. 20 mm und einem Durchmesser von max. 45 mm untersucht werden. Die Angabe der Ergebnisse erfolgt in diesem Fall als flächenspezifische Emissionsrate. Bei Materialien wie den Lüftungsschläuchen, die keine exakt bestimmbare Oberfläche aufweisen, dann durch eine Bestimmung der Probenmasse eine massenspezifische Emissionsrate angegeben werden. Die Chromatogramme der gaschromatografisch-massenspektrometrischen Analyse der Luftproben aus Prüfkammer- und Mikrokammerexperiment zeigen häufig eine gute qualitative Übereinstimmung, so dass wesentliche Abweichungen im Emissionsverhalten erkennbar sind. Die Untersuchung komplexer Bauteile, die aus Materialkombinationen bestehen, wie z. B. Lüftungsventile, ist mit der Mikrokammer nicht zuverlässig möglich, da die einzubringende Probe häufig nicht repräsentativ für das gesamte Bauteil ist und es so zu großen Schwankungen zwischen den untersuchenden Laboren kommen kann.

5.7 Zusammenfassung

Für die Emissionsuntersuchungen der einzelnen Komponenten einer Anlage zur mechanischen Wohnraumlüftung werden in Abhängigkeit von der zu untersuchenden Komponente folgende Randbedingungen vorgeschlagen:

Tabelle 8:
Randbedingungen für die Prüfkammeruntersuchungen.

Komponente	Szenario	Beladungsfaktor [m ² ·m ⁻³]	Flächenspezifische Lüftungsrate [m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹]
Lüftungsrohr DN 125	7 m Rohr im Referenzraum	0,1	5,5
Dichtungsband	Sehr kleine Oberflächen gemäß DIN EN 16516	0,007	71

Die Entscheidung, inwieweit eine Emissionsuntersuchung von Lüftungsventilen und Lüftungsverteilern angesichts a) der geringen Oberflächen und b) der Tatsache, dass Lüftungsverteiler nicht einzelnen Räumen zugeordnet werden können, überhaupt nötig und zielführend ist, sollte vom zuständigen Produkt-TC bzw. von den Regulatoren getroffen werden.

6 Diskussion

Bei Lüftungsleitungen als Komponenten mechanischer Lüftungsanlagen sind hinsichtlich deren Emissionsverhalten zwei Fragestellungen zu beantworten, nämlich a) wird die dem Innenraum durch diese Leitungen zugeführte Luft hin-

sichtlich ihrer Qualität durch Emissionen aus den Lüftungsleitungen negativ beeinflusst und b) gehen von den Lüftungsleitungen, die häufig hinter nicht diffusionsdichten Verkleidungen verlegt werden, VOC-Emissionen aus, die ihrerseits die Raumluftqualität beeinträchtigen.

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens lassen den Schluss zu, dass sowohl die Thermoextraktion als auch die Prüfkammeruntersuchung geeignete Verfahren sind, um Emissionen aus Lüftungsrohren zu bestimmen. Eine Bewertung dieser Emissionen entsprechend anerkannter Bewertungsverfahren lässt nur die Prüfkammeruntersuchung zu, da alle öffentlichen (z. B. AgBB-Schema, Blauer Engel, abZ) oder privaten Bewertungsverfahren (z. B. GEV Emicode) bislang das Emissionsprüfkammerverfahren als experimentelle Grundlage heranziehen.

Für die Prüfkammeruntersuchung fehlen derzeit noch Festlegungen hinsichtlich der Beladung. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde eine Rohrlänge von 7 m angenommen, das entspricht einer Längs- und einer Querseite des AgBB-Referenzraums, so wie er auch im harmonisierten Normentwurf DIN EN 16516 angesetzt wird. DIN EN 16516 sieht für kleinflächige Produkte, Türen, Fenster oder Heizungssysteme hier explizit genannt, eine Prüfkammerbeladung von $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ vor. In Analogie zu den Heizungssystemen ist dieser Ansatz prinzipiell auch auf Lüftungsleitungen anwendbar. Unter der Annahme einer Leitungslänge von 7 m im Referenzraum ergeben sich Beladungsfaktoren von $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ (DN 75) bis $0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ (DN 160). Gerade bei den Luftverteilerschläuchen mit ihrer gerippten Oberfläche ist es allerdings schwierig, eine exakte Oberfläche zu definieren. Hier ist ein Ansatz, der die Länge des Rohres und nicht dessen Oberfläche berücksichtigt praktikabler. Nicht geklärt ist damit aber die Frage, wie die Beeinflussung der Luftqualität im Falle von auf der Innenseite beschichteten Lüftungsleitungen erfasst und bewertet werden soll. Ein Versuchsaufbau wie er im Rahmen des Vorhabens bei den beschichteten Lüftungsrohren eingesetzt wurde, wird weder durch die DIN EN ISO 16000-9 (Prüfkammeruntersuchung) noch durch die DIN EN 16516 abgedeckt. Damit existiert auch keine Bewertungsgrundlage, denn sowohl das AgBB-Schema als auch die Zulassungsgrundsätze des DIBt legen der Gewinnung der Messergebnisse und deren Beurteilung eine Prüfkammeruntersuchung nach DIN EN ISO 16000-9 bzw. DIN EN 16516 zugrunde. Hier ist das zuständige Produkt-TC für die harmonisierte Produktnorm gefragt, Festlegungen für die Kammerbeladung zu prüfen.

Für das Kaltschrumpfband und vergleichbare Abdichtungsstoffe kann die Beladungsvorgabe der DIN EN 16516 für sehr kleine Oberflächen wie z. B. Dichtstoffe mit $0,007 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ herangezogen werden. Eine mögliche Empfehlung lautet daher, dass das bei CEN für die mechanischen Lüftungsanlagen zuständige technische Komitee entsprechende materialspezifische Änderungen bzw. Ergänzungen zur prEN 16516 in die harmonisierte Produktnorm aufnimmt und ein exaktes Prüfscenario fixiert. Wie die Werte, die mit diesem neu zu schaffen-

den Szenario gewonnen werden, zu bewerten sind, werden zukünftige Abstimmungen der Regulatoren mit den betroffenen Herstellern ergeben müssen.

Unter den Randbedingungen, die im Vorhaben für die Untersuchung der Lüftungsleitungen und des Kaltschrumpfbandes angesetzt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass von den getesteten Produkttypen keine negativen Einflüsse auf die Raumluftqualität ausgehen. Es wird zur Absicherung empfohlen, unter der Federführung des DIBt und unter Einbeziehung möglichst aller in Deutschland aktiver Anbieter eine breit angelegte Emissionsuntersuchung aller am Markt vorhandenen Materialgruppen anzuregen, sobald vom zuständigen Produkt-TC eine Konkretisierung der Prüfbedingungen beschlossen wurde. Ausgehend von den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es wahrscheinlich, dass die Ergebnisse der Reihenuntersuchung den Schluss nahelegen, dass auf eine regelmäßige Emissionsprüfung der Lüftungsrohre aus HDPE und EPP verzichtet werden kann.

7 Ausblick

Im diesem Forschungsvorhaben wurden nur die passiven Komponenten von mechanischen Lüftungsanlagen betrachtet. Aktive Anlagenteile wie Wärmetauscher, Heizregister und Lüftungsgeräte wurden nicht untersucht. Da diese Komponenten elektrische Bauteile enthalten können, die u. a. flammhemmend ausgerüstet werden, sind bei diesen Komponenten unter Betriebsbedingungen höhere und von ihrer stofflichen Zusammensetzung her andere VOC-Emissionen zu erwarten. Es wird daher empfohlen, diese Produkte unter Betriebsbedingungen einer Prüfkammeruntersuchung zu unterziehen, um abzuklären, ob diese Komponenten aufgrund ihrer Emissionseigenschaften einen nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor für die Beschaffenheit der Luft in Innenräumen darstellen.

8 Literatur

[AgBB 2012]

Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten: Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC) aus Bauprodukten; Stand Juni 2012. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/dokumente/agbb-bewertungsschema_2012.pdf, aufgerufen am 21.10.2016.

[AgBB 2015]

Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten: Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten; Stand Februar 2015. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/dokumente/agbb-bewertungsschema_2015_2.pdf, aufgerufen am 21.10.2016.

[DIBt 2010]

Deutsches Institut für Bautechnik: Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen, Teil III, Bewertungskonzepte für spezielle Bauprodukte: Beschichtungen für Parkette und Holzfußböden. URL: https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/Data/Aktuelles_Ref_II_4_10.pdf, aufgerufen am 09.03.2016.

[DIBt 2010]

Deutsches Institut für Bautechnik: Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen, Teile I und II, Stand: Oktober 2010; URL: https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/data/Aktuelles_Ref_II_4_6.pdf, aufgerufen am 09.03.2016.

[DIN EN 16516]

DIN EN 16516 (Normentwurf): Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft; Deutsche und Englische Fassung prEN 16516:2015

[DIN EN ISO 16000-9]

DIN EN ISO 16000-9 (Ausgabe 2008-04): Innenraumluftverunreinigungen - 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

[DIN ISO 16000-3]

DIN ISO 16000-3 (Ausgabe 2013-01): Innenraumluftverunreinigungen - Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern - Probenahme mit einer Pumpe (ISO 16000-3:2011)

[DIN ISO 16000-6]

DIN ISO 16000-6 (Ausgabe 2012-11): Innenraumluftverunreinigungen - Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID (ISO 16000-6:2011)

[EnEV 2014]

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)
Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789) geändert worden ist.

[EU 605/2014]

Verordnung (EU) Nr. 605/2014 der Kommission vom 5. Juni 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und

Gemischen zwecks Einfügung von Gefahren- und Sicherheitshinweisen in kroatischer Sprache und zwecks Anpassung an den technischen und wissenschaftlichen Fortschritt
L167/36 - 49

[EU 2015/491]

Verordnung (EU) 2015/491 der Kommission vom 23. März 2015 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 605/2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen zwecks Einfügung von Gefahren- und Sicherheitshinweisen in kroatischer Sprache und zwecks Anpassung an den technischen und wissenschaftlichen Fortschritt
L78/12 - 13

[EU 2015/1221]

Verordnung (EU) 2015/1221 der Kommission vom 24. Juli 2015 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen zwecks Anpassung an den technischen und wissenschaftlichen Fortschritt
L197/10 – 23

Anhang I – Tabellen

Tabelle 9:
Massenspezifische Emissionsraten; E2360-1.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
2,3,3-Trimethylpentan	560-21-4	9,38	0,001	0,001	-- ¹⁾	0,006	0,002	0,001
Toluol	108-88-3	10,29	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾
1-Octen	111-66-0	12,47	0,002	0,001	-- ¹⁾	0,004	0,004	0,001
Hexamethylcyclotrisiloxan	541-05-9	13,97	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	13475-82-6	21,77	0,049	0,038	0,022	0,279	0,195	0,078
trans-4-Decen	19398-89-1	21,90	0,002	0,001	0,001	0,006	0,005	0,002
Octamethylcyclotetrasiloxan	556-67-2	22,07	0,005	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006
2,2,4,4,-Tetramethyloctan	62183-79-3	23,21	0,005	0,006	0,002	0,025	0,027	0,007
n-Undecan	1120-21-4	25,69	0,001	0,001	0,001	0,019	0,018	0,010
Nonanal	124-19-6	25,84	0,001	0,001	-- ¹⁾	0,002	0,004	-- ¹⁾
Menthol	89-78-1	28,17	0,002	0,001	-- ¹⁾	0,002	0,003	0,001
1-Dodecen	112-41-4	28,62	0,020	0,020	0,019	0,299	0,296	0,200
n-Dodecan	112-40-3	28,87	0,002	0,002	0,002	0,038	0,041	0,025

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
Decanal	112-31-2	29,06	0,001	0,001	-- ¹⁾	0,007	0,009	0,002
Tridecan	629-50-5	31,77	0,001	0,001	0,001	0,023	0,027	0,022
Unbekannter Ester (m/z=71,56,43,83)	-- ²⁾	33,44	-- ¹⁾	0,001	-- ¹⁾	0,002	0,003	0,003
Unbekannter Ester (m/z=71,56,89)	-- ²⁾	33,97	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,001	0,006	0,005	0,005
1-Tetradecen	1120-36-1	34,27	0,008	0,008	0,008	0,268	0,280	0,249
n-Tetradecan	629-59-4	34,48	0,001	0,001	0,000	0,013	0,012	0,007
1-Hexadecen	629-73-2	39,25	0,001	0,001	0,001	0,088	0,092	0,089
1-Octadecen	112-88-9	43,69	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,011	0,012	0,012
Bis-(2-ethylhexyl)-adipat	103-23-1	56,35	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,008	0,010	0,007

1) Stoff konnte nicht nachgewiesen werden oder Stoffmasse kleiner Bestimmungsgrenze; SERM konnte nicht berechnet werden.

2) CAS-Nr. nicht vorhanden.

Tabelle 10:
Massenspezifische Emissionsraten; E2360-2.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
n-Hexan	110-54-3	4,04	0,005	0,004	0,002	0,010	0,007	0,004
Methylcyclopentan	96-37-7	4,63	0,003	0,002	0,001	0,003	0,003	0,002
3-Methylheptan	589-81-1	10,77	0,006	0,005	0,002	0,013	0,011	0,004
1-Methyl-3-ethylcyclopentan	3726-47-4	11,85	0,010	0,008	0,004	0,014	0,011	0,005
Octan	111-65-9	12,49	0,155	0,136	0,070	0,373	0,257	0,095
Hexamethylcyclotrisiloxan	541-05-9	13,97	0,001	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,003	0,001	0,001
Methylnonan	-- ²⁾	20,53	0,005	0,005	0,003	0,008	0,006	0,004
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	13475-82-6	21,77	0,013	0,011	0,006	0,051	0,032	0,010
n-Decan	124-18-5	22,12	0,091	0,085	0,057	0,394	0,311	0,134
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	23,18	0,010	0,001	-- ¹⁾	0,002	0,000	0,005
Nonanal	124-19-6	25,84	0,004	0,001	-- ¹⁾	0,004	0,002	0,003
5-Methylundecan	1632-70-8	27,50	0,002	0,003	0,002	0,009	0,008	0,005
Unbekanntes C 12 Alkan (m/z=57,71,85,99)	-- ²⁾	27,97	0,003	0,002	0,002	0,009	0,008	0,006

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
n-Dodecan	112-40-3	28,88	0,067	0,070	0,056	0,618	0,608	0,473
Decanal	112-31-2	29,07	0,002	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,010	0,006	0,005
Unbekannter Ester (m/z=71,56,43,83)	-- ²⁾	33,44	0,001	0,001	-- ¹⁾	0,004	0,002	0,004
Unbekannter Ester (m/z=71,56,89)	-- ²⁾	33,97	-- ⁴⁾	0,001	0,001	0,005	0,003	0,006
n-Tetradecan	629-59-4	34,48	0,027	0,029	0,025	0,573	0,562	0,508
n-Hexadecan	544-76-3	39,41	0,004	0,005	0,004	0,249	0,246	0,215
Octadecan	593-45-3	43,83	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,039	0,041	0,039
Bis-(2-ethylhexyl)-adipat	103-23-1	54,56	0,001	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,013	0,012	0,012

1) Stoff konnte nicht nachgewiesen werden oder Stoffmasse kleiner Bestimmungsgrenze; SERM konnte nicht berechnet werden.

2) CAS-Nr. nicht vorhanden.

Tabelle 11:
Massenspezifische Emissionsraten; E2360-3.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent								
			25 °C			50 °C					
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h			
Unbekannte Substanz (m/z=41,43,58)	-- 1)	2,97	0,019	0,007	0,007	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)
Essigsäure	64-19-7	3,72	-- 2)	-- 2)	-- 2)	0,002	-- 2)	-- 2)	0,020	-- 2)	-- 2)
2-Butanon	78-93-3	3,99	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)
Unbekannte Substanz (m/z=77,45,78)	-- 1)	6,14	0,004	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)
n-Heptan	142-82-5	6,62				0,001	0,003	0,012			
Toluol	108-88-3	10,29	0,003	0,002	0,002	0,009	-- 2)	0,003			0,003
Unbekanntes Alken (m/z=41,43,55,56,85)	-- 1)	12,46	0,004	0,000	0,001	0,009	-- 2)	0,009			0,009
Hexamethylcyclotrisiloxan	541-05-9	13,96	0,004		-0,005	0,009	0,125	0,016			
Benzaldehyd	100-52-7	20,50	0,000	0,001	0,002	0,027	0,021	0,004			
Octamethylcyclotetrasiloxan	556-67-2	22,06	0,050	-- 2)	-- 2)	0,006	0,432	0,048			
Octanal	124-13-0	22,22	0,001	-- 2)	-- 2)	0,001	-- 2)	0,023			
3-Caren	13466-78-9	22,56	0,006	0,001	0,001	0,008	-- 2)	-- 2)			-- 2)
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	23,17	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	0,021			0,021

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluolläquivalent											
			25 °C			50 °C								
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h			
n-Undecan	1120-21-4	25,69	0,007	0,001	0,001	0,007	0,001	0,001	0,007	0,001	0,004	0,007	0,001	0,004
Nonanal	124-19-6	25,84	0,007	-- 2)	-- 2)	0,005	-- 2)	0,004	0,005	0,004	0,048	-- 2)	0,004	0,048
Campher	464-48-2	27,35	0,008	0,003	0,003	-- 2)	0,006	0,006	-- 2)	0,006	-- 2)	0,006	0,006	-- 2)
Octansäure	124-07-2	27,86	-- 2)	0,003	0,002	0,090	0,002	0,049	0,090	0,049	0,017	0,009	0,049	0,017
Menthol	2216-51-5	28,16	0,014	-- 2)	-- 2)	0,009	-- 2)	-- 2)	0,009	-- 2)	0,007	0,009	-- 2)	0,007
n-Dodecan	112-40-3	28,86	0,033	0,008	0,008	0,031	0,008	0,006	0,031	0,006	0,007	0,031	0,006	0,007
Decanal	112-31-2	29,06	0,008	0,001	0,001	0,008	0,001	0,012	0,008	0,012	0,061	0,008	0,012	0,061
Tridecan	629-50-5	31,77	0,015	0,008	0,008	0,021	0,008	0,013	0,021	0,013	0,004	0,021	0,013	0,004
Unbekannter Ester (m/z=71,56,43,83)	-- 1)	33,43	0,005	0,004	0,004	0,076	0,004	0,002	0,076	0,002	0,049	0,076	0,002	0,049
Unbekannter Ester (m/z=71,56,89)	-- 1)	33,96	0,006	0,006	0,007	0,065	0,007	-- 2)	0,065	-- 2)	0,040	0,065	-- 2)	0,040
n-Tetradecan	629-59-4	34,47	0,015	0,010	0,011	0,051	0,011	0,031	0,051	0,031	0,009	0,051	0,031	0,009
n-Pentadecan	629-62-9	36,96	0,014	0,013	0,012	0,133	0,012	0,085	0,133	0,085	0,033	0,133	0,085	0,033
2,4-Di-tert-butylphenol (oder Isomer)	96-76-4	37,37	0,012	0,009	0,009	0,163	0,009	0,103	0,163	0,103	0,026	0,163	0,103	0,026
Unbekanntes Alkan (m/z=57,71,85,127)	-- 1)	38,05	0,004	0,005	0,005	0,056	0,005	0,027	0,056	0,027	0,011	0,056	0,027	0,011

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
Unbekannte Substanz (m/z=43,57,71,85,99)	-- 1)	41,97	0,002	0,003	0,003	0,059	0,050	0,035
2,6-Diphenylphenol	2432-11-3	52,48	0,006	0,006	0,006	0,010	0,005	0,007
Bis-(2-ethylhexyl)-adipat	103-23-1	54,57	1,014	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)

1) CAS-Nr. nicht vorhanden

2) Stoff konnte nicht nachgewiesen werden oder Stoffmasse kleiner Bestimmungsgrenze; SERM konnte nicht berechnet werden.

Tabelle 12:
Massenspezifische Emissionsraten; E2360-4.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
Isobutan	75-28-5	2,51	0,109	0,083	0,007	0,107	0,024	0,002
Unbekannte Substanz (m/z=41,43,58)	-- 1)	2,96	0,007	0,009	0,003	0,174	-- 2)	-- 2)
Essigsäure	64-19-7	3,73	-- 2)	-- 2)	-- 2)	0,188	0,002	-- 2)
2-Butanon	78-93-3	3,99	-- 2)	-- 2)	-- 2)	0,014	-- 2)	-- 2)
Toluol	108-88-3	10,28	0,001	0,002	0,001	0,088	-- 2)	-- 2)
Hexamethylcyclotrisiloxan	541-05-9	13,95	0,009	-- **)	-- **)	0,016	0,011	0,032
Unbekanntes Alkan (m/z=57,55,69,99)	-- 1)	16,61	0,003	0,002	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)
Cyclohexanon	108-94-1	17,48	0,003	-- 2)	-- 2)	0,022	0,002	0,002
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	13475-82-6	21,75	0,019	0,013	0,004	0,046	0,017	0,001
Octamethylcyclotetrasiloxan	556-67-2	22,06	0,064	0,011	0,002	0,039	0,013	0,098
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	23,16	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)	-- 2)
n-Undecan	1120-21-4	25,68	0,332	0,198	0,052	0,372	0,136	0,001
Nonanal	124-19-6	25,83	0,010	-- 2)	-- 2)	0,049	0,014	-- 2)

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
Unbekanntes C12 Alken (m/z=57,70,83,98)	-- 1)	26,29	0,024	0,014	0,004	0,034	0,015	-- 2)
n-Dodecan	112-40-3	28,87	1,022	0,718	0,220	1,321	0,700	0,014
Decanal	112-31-2	29,06	0,017	0,009		0,082	0,034	0,003
Unbekanntes C12 Alken (m/z=57,70,83,112)	-- 1)	29,26	0,012	0,008	0,001	0,015	0,008	-- 2)
Unbekanntes Alkan (m/z=57,71,85,127,155)	-- 1)	29,34	0,018	0,010	0,002	0,032	0,013	-- 2)
2-Methyldodecan	1560-97-0	30,74	0,042	0,028	0,008	0,037	0,019	-- 2)
Tridecan	629-50-5	31,78	1,265	1,061	0,489	2,906	1,944	0,229
Unbekanntes Alkan C13 (m/z=57,71,85,127)	-- 1)	32,05	0,025	0,019	0,004	0,054	0,033	0,005
Unbekannter Ester (m/z=71,56,43,83)	-- 1)	33,43	0,010	0,009	0,002	0,061	0,050	-- 2)
Unbekannter Ester (m/z=71,56,89)	-- 1)	33,96	0,013	0,014	0,002	0,056	0,064	-- 2)
n-Tetradecan	629-59-4	34,47	0,043	0,039	0,022	0,189	0,143	0,039
2-Methyltetradecan	1560-95-8	36,09	0,041	0,039	0,021	0,095	0,074	0,022
n-Pentadecan	629-62-9	37,01	0,015	0,015	0,009	0,151	0,115	0,044

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
2,4-Di-tert-butylphenol (oder Isomer)	96-76-4	37,36	0,043	0,040	0,011	0,110	0,085	0,023
2-Methylhexadecan	1560-92-5	40,85	0,006	0,007	0,005	0,069	0,084	0,047
Bis-(2-ethylhexyl)-adipat	103-23-1	56,75	0,004	-- 2)	0,007	0,104	-- 2)	-- 2)

1) CAS-Nr. nicht vorhanden.

2) Stoff konnte nicht nachgewiesen werden oder Stoffmasse kleiner Bestimmungsgrenze; SERM konnte nicht berechnet werden.

Tabelle 13:
Massenspezifische Emissionsraten; E2360-5.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
Essigsäure	64-19-7	3,72	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,060	-- ¹⁾	0,049	0,010
2-Butanon	78-93-3	4,00	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,001	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾
Toluol	108-88-3	10,28	0,003	0,002	0,007	0,009	-- ¹⁾	-- ¹⁾
2,4-Dimethylheptan	2213-23-2	13,79	0,027	0,018	0,006	0,147	0,051	0,015
Styrol	100-42-5	17,38	0,011	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,008	0,042	-- ^{*)}
Nicht auftrennbarer Retentionsbereich (> 20 Substanzen)	-- ²⁾	23,4-30,1	7,450	4,022	1,388	21,506	12,157	5,122
Hexylbenzol	1077-16-3	30,76	0,103	0,059	0,021	0,302	0,163	0,047
Unbekannte Substanz (m/z=57,69,112)	-- ²⁾	30,83	0,081	0,044	0,019	0,258	0,140	0,059
Tridecan	629-50-5	31,24	0,120	0,068	0,025	0,377	0,206	0,090
Unbekannte Substanz (m/z=97,69,55,57)	-- ²⁾	31,55	0,172	0,102	0,039	0,533	0,314	0,126
Nicht auftrennbarer Retentionsbereich (> 15 Substanzen)	-- ²⁾	32,0-37,0	11,587	6,784	2,835	35,699	22,363	10,260
Unbekannte Substanz (m/z=57,113,111)	-- ²⁾	37,13	0,472	0,338	0,186	1,978	1,274	0,662

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol	128-37-0	37,54	1,481	1,061	0,541	5,530	3,711	2,038
Unbekannte Substanz (m/z=97,57,123)	-- ²⁾	42,05	0,221	0,198	0,159	1,263	1,024	0,766

1) Stoff konnte nicht nachgewiesen werden oder Stoffmasse kleiner Bestimmungsgrenze; SERM konnte nicht berechnet werden.

2) CAS-Nr. nicht vorhanden.

Tabelle 14:
Massenspezifische Emissionsraten; E2360-6.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
Isobutan	75-28-5	2,52	0,143	0,069	-- ³⁾	0,076	0,004	0,024
2-Butanon	78-93-3	4,00	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ³⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾
Toluol	108-88-3	10,29	0,002	0,001	-- ³⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾
Hexamethylcyclotrisiloxan	541-05-9	13,98	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ³⁾	0,006	0,003	0,034
Unbekanntes Alkan (m/z=43,57,69,99)	-- ²⁾	16,62	0,003	0,002	-- ³⁾			
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	13475-82-6	21,77	0,012	0,007	-- ³⁾	0,024	0,004	0,017

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent					
			25 °C			50 °C		
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
n-Decan	124-18-5	22,12	0,020	0,014	-- ³⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,013
n-Undecan	1120-21-4	25,69	0,255	0,166	-- ³⁾	0,593	0,058	0,012
Nonanal	124-19-6	25,84	0,007	0,001	-- ³⁾	0,062		0,056
Unbekanntes C12 Alken (m/z=57,70,83,98)	-- ²⁾	26,30	0,019	0,011	-- ³⁾	0,038	0,006	-- ¹⁾
Menthol	2216-51-5	28,17	0,014	0,005	-- ³⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾	0,006
n-Dodecan	112-40-3	28,88	0,701	0,538	-- ³⁾	2,945	0,425	0,069
Decanal	112-31-2	29,07	0,011	0,007	-- ³⁾	0,104	0,002	0,085
Unbekanntes C12 Alken (m/z=57,70,83,112)	-- ²⁾	29,27	0,007	0,005	-- ³⁾	0,020	0,003	-- ¹⁾
Unbekanntes Alkan (m/z=57,71,85,127,155)	-- ²⁾	29,34	0,013	0,009	-- ³⁾	0,043	0,007	-- ¹⁾
2-Methyldodecan	1560-97-0	30,75	0,023	0,017	-- ³⁾	0,093	0,015	0,015
Tridecan	629-50-5	31,78	0,909	0,766	-- ³⁾	6,180	1,235	0,311
Unbekanntes Alkan C13 (m/z=57,71,85,127)	-- ²⁾	32,05	0,017	0,012	-- ³⁾	0,076	0,011	0,010
Unbekannter Ester (m/z=71,56,43,83)	-- ²⁾	33,44	0,008	0,008	-- ³⁾	0,087	0,015	0,052

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Massenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] Toluoläquivalent								
			25 °C			50 °C					
			1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h	1 h	3 h	18 h
Unbekannter Ester (m/z=71,56,89)	-- 2)	33,97	0,013	0,013	-- 3)	0,084	0,011	0,052			
n-Tetradecan	629-59-4	34,48	0,035	0,028	-- 3)	0,427	0,104	0,057			
Unbekannte Substanz (m/z=57,69,83,97,111,125)	-- 2)	35,83	0,015	0,013	-- 3)	0,078	0,020	0,024			
2-Methyltetradecan	1560-95-8	36,10	0,030	0,026	-- 3)	0,223	0,058	0,046			
n-Pentadecan	629-62-9	37,01	0,014	0,012	-- 3)	0,282	0,073	0,100			
2,4-Di-tert-butylphenol (oder Iso- mer)	96-76-4	37,37	0,028	0,024	-- 3)	0,258	0,057	0,040			
n-Hexadecan	544-76-3	39,40	0,003	0,003	-- 3)	0,073	0,024	0,046			
2-Methylhexadecan	1560-92-5	40,85	0,006	0,007	-- 3)	0,119	0,039	0,107			
n-Heptadecan	629-78-7	41,67	0,002	0,004	-- 3)	0,159	0,040	0,113			
Palmitinsäure	57-10-3	47,04	-- 1)	0,041	-- 3)	-- 1)	-- 1)	-- 1)			
Squalen	111-02-4	59,32	-- 1)	0,098	-- 3)	-- 1)	-- 1)	-- 1)			

1) Stoff konnte nicht nachgewiesen werden oder Stoffmasse kleiner Bestimmungsgrenze; SERM konnte nicht berechnet werden.

2) CAS-Nr. nicht vorhanden.

3) Probe zerstört.

Tabelle 15:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-1a Rohraußenseite.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüfkammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]			
			3 d	7 d	28 d	
Aceton ¹⁾	67-64-1	16,8	2	7	< BG ²⁾	
N,N-Dimethylacetamid	127-19-5	16,2	0,3	0,1	< BG ²⁾	
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	13475-82-6	21,7	0,2	0,1	0,1	
2-(2-Butoxyethoxy)-ethanol	112-34-5	28,5	5,6	1,2	< BG ²⁾	
Heptanal ¹⁾	111-71-7	35,2	< BG ²⁾	1	< BG ²⁾	
Nonanal ¹⁾	124-19-6	36,1	< BG ²⁾	2	< BG ²⁾	
1-Dodecen	112-41-4	28,6	0,6	0,2	0,1	
n-Dodecan	112-40-3	28,8	0,8	0,2	0,2	
2-[2-(2-Ethoxyethoxy)ethoxy]-ethanol	112-50-5	31,3	< BG ²⁾	< BG ²⁾	< BG ²⁾	
1-Tetradecen	1120-36-1	34,2	0,5	0,2	0,2	
n-Tetradecan	629-59-4	34,4	1,0	0,5	0,1	
1-Hexadecen	629-73-2	39,2	0,1	< BG ²⁾	0,1	
n-Hexadecan	544-76-3	39,4	0,2	< BG ²⁾	0,1	

1) Bestimmung mittels HPLC/DAD.

2) Messwert kleiner der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Tabelle 16:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-1b Rohrinneenseite.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüf- kammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
			3 d	7 d	28 d
Aceton ¹⁾	67-64-1	16,8	3	7	< BG ²⁾
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	13475-82-6	21,7	1,1	0,5	0,4
1-Dodecen	112-41-4	28,6	1,1	0,4	0,2
n-Dodecan	112-40-3	28,8	0,9	0,2	0,6
1-Tetradecen	1120-36-1	34,2	1,1	0,5	0,3
n-Tetradecan	629-59-4	34,4	0,8	0,4	0,2
1-Hexadecen	629-73-2	39,2	0,2	0,2	0,2
n-Hexadecan	544-76-3	39,4	0,1	0,2	0,2

1) Bestimmung mittels HPLC/DAD.

2) Messwert kleiner der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Tabelle 17:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-2a Rohraußenseite.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüf- kammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]				
			3 d	7 d	28 d	56 d	84 d
2-Butanon ¹⁾	78-93-3	23,8	< BG ²⁾	< BG ²⁾	5	5	5
n-Dodecan	112-40-3	31,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,6
n-Tetradecan	629-59-4	37,6	1,7	2,2	1,7	1,4	1,2

1) Bestimmung mittels HPLC/DAD.

2) Messwert kleiner der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Tabelle 18:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-2b Rohrinneenseite.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüf- kammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]				
			3 d	7 d	28 d	56 d	84 d
2-Butanon ¹⁾	78-93-3	23,8	< BG ²⁾	< BG ²⁾	5	5	5
n-Dodecan	112-40-3	31,7	2,0	1,1	0,8	0,4	0,6
n-Tetradecan	629-59-4	37,6	6,4	3,6	1,3	1,3	1,3
n-Hexadecan	544-76-3	43,1	1,9	1,4	0,8	1,0	0,6

1) Bestimmung mittels HPLC/DAD.

2) Messwert kleiner der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Tabelle 19:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-3.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüfkammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
			3 d	7 d	28 d
Aceton ¹⁾	67-64-1	16,8	4	< BG ²⁾	< BG ²⁾

1) Bestimmung mittels HPLC/DAD.

2) Messwert kleiner der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Tabelle 20:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-4.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüfkammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
			3 d	7 d	28 d
Aceton ¹⁾	67-64-1	16,8	4	< BG ²⁾	< BG ²⁾
n-Undecan	1120-21-4	25,6	0,3	0,2	0,2
n-Dodecan	112-40-3	28,8	0,7	0,4	0,2
n-Tridecan	629-50-5	31,7	1,2	0,9	0,6

1) Bestimmung mittels HPLC/DAD.

2) Messwert kleiner der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Tabelle 21:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-5.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüfkammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
			3 d	7 d	28 d
Unbekanntes Alken (m/z=68,97,109,124,180)	-- 1)	28,2	0,1	0,2	< BG 2)
Unbekanntes Alken (m/z=57,83,113)	-- 1)	37,1	0,3	0,2	0,1
2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol	128-37-0	37,5	0,7	0,5	0,2
Unbekannter Schwefelsäureester (m/z=97,57,55)	-- 1)	39,7	0,2	0,1	< BG 2)
Unbekannte Verbindung (m/z=97,57,83)	-- 1)	42,0	0,3	0,2	0,1
Unbekannte Verbindung (m/z=99,57,155)	-- 1)	42,8	0,2	0,2	0,3
Unbekannter Schwefelsäureester (m/z=57,113,111)	-- 1)	44,6	0,1	0,1	0,1

1) Keine CAS-Nummer vorhanden.

2) Messwert kleiner der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens.

Tabelle 22:
Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchung; E2360-6.

Stoff	CAS-Nr.	RT [min]	Stoffkonzentration in der Prüf- kammerluft [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
			3 d	7 d	28 d
n-Dodecan	112-40-3	28,8	0,7	0,8	0,5
n-Tridecan	629-50-5	31,7	1,3	1,2	0,9