

TEXTE

155/2026

**Abschlussbericht**

# **Zusammenhang zwischen Bau- produktemissionen und Innen- raumluftqualität: Experimente in Referenzprüfräumen und nu- merische Simulation**

**von:**

Dr. Alexandra Schieweck, Dr. Jiangyue Zhao, Nicole Schulz, Sebastian Wientzek, Alexander Omelan,  
Dr. Erik Uhde

Fraunhofer WKI, Fachbereich Materialanalytik und Innenluftchemie, Braunschweig

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt



TEXTE 155/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3721 62 207 0

Abschlussbericht

## **Zusammenhang zwischen Bauproduktemissionen und Innenraumluftqualität: Experimente in Referenzprüfräumen und numerische Simulation**

von

Dr. Alexandra Schieweck, Dr. Jiangyue Zhao, Nicole  
Schulz, Sebastian Wientzek, Alexander Omelan, Dr. Erik  
Uhde

Fraunhofer WKI, Fachbereich Materialanalytik und Innen-  
luftchemie, Braunschweig

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### **Durchführung der Studie:**

Fraunhofer WKI  
Riedenkamp 3  
38108 Braunschweig

### **Abschlussdatum:**

Dezember 2025

### **Redaktion:**

Fachgebiet II 1.3 Innenraumhygiene, gesundheitsbezogene Umweltbelastungen  
Dr. Ana Maria Scutaru  
Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen  
Outi Ilvonen

### **DOI:**

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8249>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2026

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

**Kurzbeschreibung: Zusammenhang zwischen Bauproduktemissionen und Innenraumluftqualität: Experimente in Referenzprüfräumen und numerische Simulation**

Da sich in modernen Industriegesellschaften die Menschen den größten Teil des Tages in Innenräumen unterschiedlicher Nutzung aufhalten, kommen der Gesundheit und dem Wohlbefinden bei Aufenthalt in Innenräumen eine besondere Bedeutung zu. Dabei ist auch die Luftqualität im Hinblick auf mögliche Fremd- und/oder Geruchsstoffe ein entscheidender Faktor. Neben dem Eintrag von Luftfremdstoffen über die Außenluft zählen Emissionen aus den im Innenraum verbauten Konstruktions- und Ausstattungsmaterialien zu den wichtigsten Quellen. Folglich rückte in den letzten Jahrzehnten die Relevanz der gesundheitlichen Auswirkungen von Werkstoffemissionen und deren notwendiger Bewertung in den Fokus und führte zur Entwicklung von Prüfvorgaben, die sich allerdings auf die Bewertung eines einzelnen Materials beziehen und keine Rückschlüsse auf die resultierende Innenraumluftqualität bei Verbau der Materialien zulassen. Ausgehend von einer Literaturrecherche zum Thema und Interviews mit ausgewählten Kommunen zum Thema Freigabemessungen hat sich das Vorhaben daher im Schwerpunkt mit dem Zusammenhang von Emissionen und Immissionen beschäftigt. Die chemischen Emissionen und der Geruch von im Handel erhältlichen Baumaterialien mit und ohne Zertifizierung wurden in einem ersten Schritt gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) bewertet. In einem zweiten Schritt wurden die Materialien zu Wand-, Decken- und Bodenelementen analog realer Konstruktionen verbaut und in einem dritten Schritt zu drei Modellräumen zusammengeführt, deren Maße denen des europäischen Referenzraums (EN 16516) entsprachen. Parallel zu den Experimenten wurden Simulationsansätze entwickelt, um auf Basis von Messdaten den Zusammenhang zwischen Emissionen von Einzelmaterialien, Verbundkonstruktionen und Modellräumen abbilden zu können.

**Abstract: Relationship between building product emissions and indoor air quality: Experiments in model rooms and numerical simulation**

In modern industrial societies, people spend most of the day indoors with different usage patterns. Thus, health, well-being and thermal comfort are important aspects to consider for indoor environments. Also, indoor air quality is of high relevance with regard to airborne volatiles and odorous substances. In addition to the ingress of outdoor pollutants by ventilation, emissions from construction and building materials are the most important emission sources indoors. Consequently, the evaluation of the health impacts of material emissions has come into focus in the recent decades, leading to the development of test protocols. However, these relate just to the assessment of a single material and do not allow any conclusions to be drawn about the resulting indoor air quality, when installing the materials. Based on a literature review on the topic and interviews with selected municipalities on indoor air measurements, the project focused on the relationship between material emissions and resulting indoor air quality. In a first step, chemical emissions and odours of commercially available building materials with and without certification were assessed according to the AgBB evaluation scheme (06/2021). Subsequently, the materials were installed to form wall, ceiling and floor elements analogous to real constructions. In a third step, selected elements were combined to form three model rooms whose dimensions corresponded to those of the European reference room (EN 16516). In parallel to the experiments, simulation approaches were developed to model the relationship between individual material emissions, composite structures and the resulting indoor air quality in model rooms based on experimental data.

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildungsverzeichnis.....                                                                 | 8  |
| Tabellenverzeichnis .....                                                                  | 16 |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                                                | 20 |
| Zusammenfassung.....                                                                       | 22 |
| Summary .....                                                                              | 28 |
| 1 Einleitung.....                                                                          | 32 |
| 1.1 Relevanz von Bauproduktemissionen im Innenraum .....                                   | 32 |
| 1.2 Problemstellung .....                                                                  | 33 |
| 1.3 Ziel und Gegenstand der vorliegenden Studie.....                                       | 34 |
| 2 Aktueller Stand der Wissenschaft .....                                                   | 35 |
| 2.1 Bekannte Zusammenhänge zwischen Emissionen und Immissionen in Innenräumen .....        | 35 |
| 2.2 Bislang existierende Modellsysteme und deren bisherige Anwendung.....                  | 35 |
| 3 Erfahrungen von Kommunen mit Freigabemessungen.....                                      | 38 |
| 3.1 Derzeitige Umsetzung von Freigabemessungen in der Baupraxis.....                       | 39 |
| 3.2 Bekannte Schwierigkeiten und Auffälligkeiten .....                                     | 43 |
| 3.2.1 Neubauten Bildungsbereich: Holzmodul-/Holzcontainerbauten .....                      | 43 |
| 3.2.2 Schwierigkeiten hinsichtlich bestimmter Materialien bzw. Produkte .....              | 43 |
| 3.3 Lösungsansätze .....                                                                   | 44 |
| 3.4 Bisherige, wesentliche Erfahrungswerte .....                                           | 45 |
| 4 Emissionskammermessungen von Baumaterialien, Verbundkonstruktionen und Modellräumen..... | 47 |
| 4.1 Auswahl der zu untersuchenden Prüfkörper .....                                         | 47 |
| 4.1.1 Werkstoffe und Bauprodukte (Einzelmaterialien) .....                                 | 47 |
| 4.1.2 Verbundkonstruktionen .....                                                          | 55 |
| 4.1.3 Modellräume .....                                                                    | 59 |
| 4.2 Durchführung der Emissionsprüfungen .....                                              | 66 |
| 4.2.1 Vorbereitung der Prüfkörper und Prüfkammerbedingungen .....                          | 66 |
| 4.2.2 Verbundaufbauten .....                                                               | 68 |
| 4.2.3 Modellräume .....                                                                    | 69 |
| 4.2.4 Luftprobenahme und Analytik .....                                                    | 71 |
| 4.3 Ergebnisse .....                                                                       | 72 |
| 4.3.1 Einzelmaterialien .....                                                              | 72 |

|       |                                                                                                                         |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.2 | Verbundkonstruktionen                                                                                                   | 88  |
| 4.3.3 | Modellräume                                                                                                             | 107 |
| 5     | Geruchliche Bewertung von Baumaterialien, Verbundkonstruktionen und Modellräumen – sensorische Prüfungen .....          | 127 |
| 5.1   | Empfundene Intensität (EI) .....                                                                                        | 127 |
| 5.2   | Hedonische Wirkung .....                                                                                                | 128 |
| 5.3   | Geruchsart .....                                                                                                        | 128 |
| 5.4   | Zumutbarkeit .....                                                                                                      | 129 |
| 5.5   | Durchführung der Geruchsbewertung .....                                                                                 | 129 |
| 5.6   | Ergebnisse der Geruchsbewertungen .....                                                                                 | 130 |
| 5.6.1 | Einzelmaterialien                                                                                                       | 130 |
| 5.6.2 | Verbundaufbauten                                                                                                        | 149 |
| 5.6.3 | Modellräume                                                                                                             | 152 |
| 5.7   | Gegenüberstellung der Zumutbarkeit, ermittelt mit trainierten und untrainierten Personengruppen .....                   | 166 |
| 5.8   | Zusammenfassung der sensorischen Parameter .....                                                                        | 168 |
| 6     | Simulation der Emissionen von Einzelmaterialien, Verbundkonstruktionen sowie der Raumluftqualität in Modellräumen ..... | 174 |
| 6.1   | Simulation von Materialemissionen .....                                                                                 | 174 |
| 6.2   | Anwendung des empirischen Modells .....                                                                                 | 175 |
| 6.2.1 | Simulation der Emissionen von Einzelmaterialien                                                                         | 175 |
| 6.2.2 | Simulation der Emission von Verbundkonstruktionen                                                                       | 177 |
| 6.2.3 | Simulation der Luftfremdstoffkonzentration in einem Modellraum                                                          | 179 |
| 6.3   | Entwicklung des Massentransfermodells .....                                                                             | 180 |
| 6.3.1 | Modellbeschreibung und Parameterschätzung                                                                               | 180 |
| 6.3.2 | Modellvalidierung                                                                                                       | 182 |
| 6.3.3 | Simulation der Emissionen von Einzelmaterialien                                                                         | 184 |
| 6.3.4 | Simulation der Emissionen aus Verbundkonstruktionen                                                                     | 186 |
| 6.3.5 | Simulation der Emissionen im Modellraum                                                                                 | 188 |
| 6.3.6 | Grenzen des Simulationsmodells                                                                                          | 190 |
| 7     | Diskussion und Zusammenfassung .....                                                                                    | 193 |
| 8     | Quellenverzeichnis .....                                                                                                | 197 |

## Abbildungsverzeichnis

|               |                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1:  | Übersicht über den Ablauf des Forschungsvorhabens.....                                                                                                                                  | 34 |
| Abbildung 2:  | Relevante Teilaspekte für die Simulation von Mechanismen in einem Innenraum. ....                                                                                                       | 37 |
| Abbildung 3:  | Modellraum 1/Holzrahmenbau – Außenwand, Schnitt. ....                                                                                                                                   | 59 |
| Abbildung 4:  | Modellraum 1/Holzrahmenbau – Innenwand, tragend, Schnitt. ....                                                                                                                          | 60 |
| Abbildung 5:  | Modellraum 1/Holzrahmenbau – Innenwand, nicht tragend, Schnitt.....                                                                                                                     | 60 |
| Abbildung 6:  | Modellraum 1/Holzrahmenbau – Decke, Schnitt.....                                                                                                                                        | 61 |
| Abbildung 7:  | Modellraum 1/Holzrahmenbau – Fußboden, Schnitt. ....                                                                                                                                    | 61 |
| Abbildung 8:  | Modellraum 2/Lehmbau – Außenwand, Schnitt. ....                                                                                                                                         | 62 |
| Abbildung 9:  | Modellraum 2/Lehmbau – Innenwand, tragend, Schnitt.....                                                                                                                                 | 62 |
| Abbildung 10: | Modellraum 2/Lehmbau – Innenwand, nicht tragend, Schnitt. ....                                                                                                                          | 63 |
| Abbildung 11: | Modellraum 2/Lehmbau – Decke, Schnitt.....                                                                                                                                              | 63 |
| Abbildung 12: | Modellraum 2/Lehmbau – Fußboden, Schnitt. ....                                                                                                                                          | 63 |
| Abbildung 13: | Modellraum 3/Holzhybridbau – Außenwand, Schnitt. ....                                                                                                                                   | 64 |
| Abbildung 14: | Modellraum 3/Holzhybridbau – Innenwand, tragend, Schnitt. ....                                                                                                                          | 64 |
| Abbildung 15: | Modellraum 3/Holzhybridbau – Innenwand, nicht tragend, Schnitt.....                                                                                                                     | 65 |
| Abbildung 16: | Modellraum 3/Holzhybridbau – Decke, Schnitt. ....                                                                                                                                       | 65 |
| Abbildung 17: | Modellraum 3/Holzhybridbau – Fußboden, Schnitt.....                                                                                                                                     | 65 |
| Abbildung 18: | Beladung einer 30m <sup>3</sup> -Edelstahlprüfkammer mit einem Wandelement. ....                                                                                                        | 70 |
| Abbildung 19: | Beladung einer 30m <sup>3</sup> -Edelstahlprüfkammer mit einem Bodenelement. ....                                                                                                       | 71 |
| Abbildung 20: | Emissionsprüfungen Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen..... | 73 |
| Abbildung 21: | Emissionsprüfungen Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). R-Werte nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen. ....         | 74 |
| Abbildung 22: | Einzelmaterialien, die den Anforderungswert an den TVOC-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen überschritten und ursächliche Leitsubstanzen.....                                     | 81 |
| Abbildung 23: | Einzelmaterialien, die den Anforderungswert an den R-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen überschritten und ursächliche Leitsubstanzen.....                                        | 83 |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 24: | Wiederholungsmessungen von Einzelmaterialien, TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 84 |
| Abbildung 25: | Wiederholungsmessungen von Einzelmaterialien, TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 85 |
| Abbildung 26: | Wiederholungsmessungen von Einzelmaterialien, Ri-Werte nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 86 |
| Abbildung 27: | Probe Sperrholzplatte Birke (Sperr-P1 Birke), Emissionsprüfungen über jeweils 3 Tage, Wiederholungsmessungen, TVOC-Wert und Leitsubstanzen. Messreihe und Messzeitraum (Monat/Jahr).....                                                                                                                                                                                                                                | 87 |
| Abbildung 28: | Probe Mehrzweckdämmplatte (EPS), Emissionsprüfungen über jeweils 3 Tage, Wiederholungsmessungen, TVOC-Wert und Leitsubstanzen. Messreihe und Messzeitraum (Monat/Jahr)..                                                                                                                                                                                                                                                | 88 |
| Abbildung 29: | Wandkonstruktionen. TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. Aus technischen Gründen keine 3-Tage-Werte für Wand 1 und Wand 2 verfügbar. ....                                                                                                                                                                                                                                                             | 92 |
| Abbildung 30: | Wandkonstruktionen. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Aus technischen Gründen keine 3-Tage-Werte für Wand 1 und Wand 2 verfügbar. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS) und DNPH (HPLC/DAD). ....                                                                                                                                                 | 93 |
| Abbildung 31: | Wandkonstruktionen. Aufsummierter Ri-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 94 |
| Abbildung 32: | Wandkonstruktionen. Ri-Werte von Substanzen, die maßgeblich zur Bildung des R-Wertes beigetragen haben, nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS) und DNPH (HPLC/DAD). ....                                                                                                                                                                             | 95 |
| Abbildung 33: | Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 7 und 28 Tagen. 3-Tage-Messwerte nicht verfügbar. Flächenspezifische Emissionsraten (SER <sub>A</sub> ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts)..... | 96 |
| Abbildung 34: | Konstruktion Wand 2/Lehmbau. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 7 und 28 Tagen. 3-Tage-Messwerte nicht verfügbar. Flächenspezifische Emissionsraten (SER <sub>A</sub> ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax®                                                                                                                                                                       |    |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|               | TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....                                                                                                                                                                                                                     | 97  |
| Abbildung 35: | Deckenkonstruktionen. TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 98  |
| Abbildung 36: | Deckenkonstruktionen. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). ....                                                                                                                                            | 99  |
| Abbildung 37: | Deckenkonstruktionen. Aufsummierter Ri-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 100 |
| Abbildung 38: | Deckenkonstruktionen. Ri-Werte von Substanzen, die maßgeblich zur Bildung des R-Wertes beigetragen haben, nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). ....                                                                                                                        | 101 |
| Abbildung 39: | Konstruktion Decke 1/Holzrahmenbau. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten (SER <sub>A</sub> ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....       | 102 |
| Abbildung 40: | Konstruktion Decke 3/Holzbau. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten (SER <sub>A</sub> ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). .... | 103 |
| Abbildung 41: | Bodenkonstruktionen. TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 104 |
| Abbildung 42: | Bodenkonstruktionen. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten (SER <sub>A</sub> ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). ....                                                                                                  | 105 |
| Abbildung 43: | Bodenkonstruktionen. Aufsummierter Ri-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 106 |
| Abbildung 44: | Bodenkonstruktionen. Ri-Werte von Substanzen, die maßgeblich zur Bildung des R-Wertes beigetragen haben, nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver                                                                                                                                                                                                            |     |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|               | Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 107 |
| Abbildung 45: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), TVOC-Wert nach 3d, 28d und ggf. 91d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).....                                                                                                                                                                     | 112 |
| Abbildung 46: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021), R-Wert nach 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....                                                                                                                                                                                           | 113 |
| Abbildung 47: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten (SER <sub>A</sub> ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). .... | 114 |
| Abbildung 48: | Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), TVOC-Wert nach 3d und 28d (Wand: 7d). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).....                                                                                                                                                                          | 119 |
| Abbildung 49: | Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), R-Wert nach 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....                                                                                                                                                                                              | 120 |
| Abbildung 50: | Modellraum 2/Lehmbau. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten (SER <sub>A</sub> ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....          | 121 |
| Abbildung 51: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), TVOC-Wert nach 3d und 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....                                                                                                                                                                              | 124 |
| Abbildung 52: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021), R-Wert nach 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....                                                                                                                                                                                           | 125 |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 53: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SER_A$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). .... | 126 |
| Abbildung 54: | Skalierung zur Bewertung der empfundenen Intensität ( $S_{mILe}$ : smell intensity level).....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 128 |
| Abbildung 55: | Skalierung zur Bewertung der hedonischen Wirkung einer Geruchsprobe. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 128 |
| Abbildung 56: | Indirekte Geruchsbewertung einer Luftprobe aus einer Prüfkammer.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 130 |
| Abbildung 57: | Empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 134 |
| Abbildung 58: | Empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 135 |
| Abbildung 59: | Zumutbarkeit der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer 7 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 136 |
| Abbildung 60: | Zumutbarkeit der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 137 |
| Abbildung 61: | Hedonische Wirkung und empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 138 |
| Abbildung 62: | Hedonische Wirkung und empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 140 |
| Abbildung 63: | Hedonische Wirkung und Zumutbarkeit der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 141 |
| Abbildung 64: | Hedonische Wirkung und Zumutbarkeit der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 142 |
| Abbildung 65: | Zumutbarkeit und empfundene Intensität der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 143 |
| Abbildung 66: | Zumutbarkeit und empfundene Intensität der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 144 |
| Abbildung 67: | Vergleich der empfundenen Intensität (EI) der Einzelmaterialien (Erst- und Wiederholungsprüfung) nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                  | 146 |
| Abbildung 68: | Differenzen ( $\Delta \pi$ ) der empfundenen Intensität (EI) der Einzelmaterialien (Erst- und Wiederholungsprüfung) nach Bauproduktgruppen unterteilt. ....                                                                                                                                                                                                                               | 148 |
| Abbildung 69: | Empfundene Intensität (EI) der verbauten Verbundmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 150 |
| Abbildung 70: | Zumutbarkeit der verbauten Verbundmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 151 |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 71: | Modellraum 1-3/Holzrahmenbau/Lehmbau/Holzhybridbau.<br>Empfundene Intensität (EI) nach einer Prüfdauer von 7 und 28<br>Tagen. ....                                                                                                                                                                   | 152 |
| Abbildung 72: | Modellraum 1-3/Holzrahmenbau/Lehmbau/Holzhybridbau.<br>Zumutbarkeit nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                    | 153 |
| Abbildung 73: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Empfundene Intensität (EI) im<br>Vergleich zu den Messwerten der Verbundaufbauten und<br>Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.<br>Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von<br>unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). .... | 157 |
| Abbildung 74: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Empfundene Intensität (EI)<br>nach einer Prüfdauer von 7, 28, 56 und 91 Tagen. ....                                                                                                                                                                                      | 159 |
| Abbildung 75: | Modellraum 2/Lehmbau. Empfundene Intensität (EI) des<br>Modellraums, der Verbundaufbauten und der verbauten<br>Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.<br>Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von<br>unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). ....       | 162 |
| Abbildung 76: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Empfundene Intensität (EI) des<br>Modellraums, der Verbundaufbauten und der verbauten<br>Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.<br>Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von<br>unten/innen (links) nach oben/außen (rechts). .... | 165 |
| Abbildung 77: | Bewertung der Zumutbarkeit trainierter (TP) und untrainierter<br>Personen (UTP) von verschiedenen<br>Einzelmaterialien/Konstruktionen nach einer Prüfdauer von 7<br>und 28 Tagen. ....                                                                                                               | 167 |
| Abbildung 78: | Vergleich der Zumutbarkeit von trainierten Personen (TP) zu<br>untrainierten Personen (UTP) von 26 Bewertungen. ....                                                                                                                                                                                 | 167 |
| Abbildung 79: | Empfundene Intensität (EI) der drei Modellräume, der<br>dazugehörigen Verbundaufbauten und der verbauten<br>Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                | 169 |
| Abbildung 80: | Zumutbarkeit der drei Modellräume, der dazugehörigen<br>Verbundaufbauten und der verbauten Einzelmaterialien nach<br>einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                              | 170 |
| Abbildung 81: | Hedonische Wirkung gegen empfundene Intensität (EI) der drei<br>Modellräume, der dazugehörigen Verbundaufbauten und der<br>verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28<br>Tagen. ....                                                                                                    | 171 |
| Abbildung 82: | Hedonische Wirkung gegen Zumutbarkeit der Modellräume 1 -<br>3, der dazugehörigen Verbundaufbauten und der verbauten<br>Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                    | 172 |
| Abbildung 83: | Zumutbarkeit gegen empfundene Intensität (EI) der drei<br>Modellräume, der dazugehörigen Verbundaufbauten und der                                                                                                                                                                                    |     |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|               | verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. ....                                                                                                                                                                                                                                     | 173 |
| Abbildung 84: | Simulation der Emissionsraten einzelner Materialien auf Grundlage von (a) täglich erhobenen Messdaten (Daily) und gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) vorgesehenen Messpunkten (3,7,28d), exemplarisch dargestellt anhand von drei Materialien. Punkte: Messdaten, Linien: Simulationsergebnisse..... | 176 |
| Abbildung 85: | Emissionsraten von Formaldehyd für die gleichen Einzelmaterialien, die für die Emissionsprüfung der Einzelmaterialien (EPE), der Verbundkonstruktionen (EPV) und für die Modellräume (EPM) gekauft wurden, dargestellt am Beispiel von Modellraum 1/Holzrahmenbau. ....                                 | 176 |
| Abbildung 86: | Schematische Darstellung einer Verbundkonstruktion (Beispiel Fußboden) und möglicher VOC-Emissionsprozesse in der Prüfkammer: 1) externe Desorption, 2) Diffusionsprozesse im Materialverbund.....                                                                                                      | 178 |
| Abbildung 87: | Gemessene und simulierte Emissionsraten ausgewählter Substanzen, die aus Verbundkonstruktionen und aus der Summe der in der Konstruktion verbauten Einzelmaterialien emittiert wurden. ....                                                                                                             | 178 |
| Abbildung 88: | Schematische Darstellung eines Modellraums und der möglichen Emissions-/Adsorptionsprozesse in der Emissionsprüfkammer. ....                                                                                                                                                                            | 179 |
| Abbildung 89: | Konzentrationen verschiedener, in den Modellräumen freigesetzter Substanzen und deren simulierte Konzentrationen auf Grundlage von Emissionsdaten für die verbauten Einzelmaterialien. ....                                                                                                             | 180 |
| Abbildung 90: | Simulierte Emissionsraten und -konzentrationen von Benzol, das von einem Sperrholz emittiert wurde. Vergleich der Simulationsergebnisse anhand des in diesem Vorhaben entwickelten Massentransfermodells mit dem Modell gemäß Haghighat und Huang (2003).....                                           | 183 |
| Abbildung 91: | Simulierte Konzentration von Dekan, freigesetzt aus einer zwei- und dreischichtigen Bodenkonstruktion. Vergleich der Simulationen anhand des in diesem Vorhaben entwickelten Massentransfermodells mit dem Modell gemäß Haghighat und Huang (2003). ....                                                | 184 |
| Abbildung 92: | Flächenspezifische Emissionsrate von beta-Pinen, freigesetzt von der Probe Holzfaser/120. Simulation auf Grundlage der Messdaten für die Einzelmaterialien, die für die Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien (EPE) und für den Bau der Verbundkonstruktion (EPV) angekauft wurden.....              | 185 |

|                |                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 93:  | Konzentrationsverteilung von beta-Pinen in der Probe<br>Holzfaser/120. ....                                                                                                                                                                                           | 185 |
| Abbildung 94:  | Emissions- und Verlustprozesse in der Konstruktion Wand<br>1/Holzrahmenbau sowie Diffusionsprozesse in und zwischen<br>den einzelnen Materialschichten. ....                                                                                                          | 186 |
| Abbildung 95:  | Emissionsraten von beta-Pinen, Simulation auf Grundlage der<br>Messdaten für die Einzelmaterialien, die für die<br>Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien (EPE) und für den<br>Bau der Verbundkonstruktion (EPV) - Wand 1/Holzrahmenbau<br>- angekauft wurden. .... | 187 |
| Abbildung 96:  | Diffusion von beta-Pinen innerhalb der Konstruktion Wand<br>1/Holzrahmenbau.....                                                                                                                                                                                      | 187 |
| Abbildung 97:  | Gemessene und simulierte flächenspezifische Emissionsraten<br>von beta-Pinen, freigesetzt von der Konstruktion Wand<br>1/Holzrahmenbau. Die Simulation erfolgte auf Basis des<br>Massentransfermodells. ....                                                          | 188 |
| Abbildung 98:  | Gemessene und simulierte flächenspezifische Emissionsraten<br>von Octanal, freigesetzt von der Konstruktion Decke<br>6/Holzhybridbau. Die Simulation erfolgte auf Basis des<br>Massentransfermodells. ....                                                            | 188 |
| Abbildung 99:  | Modellraum 3/Holzhybridbau. a) Gemessene und simulierte<br>flächenspezifische Emissionsrate von alpha-Pinen aus den<br>Materialien. b) Simulierte Verlustrate von alpha-Pinen an<br>Wand-, Decken- und Bodenflächen.....                                              | 189 |
| Abbildung 100: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Gemessene und simulierte<br>flächenspezifische Emissionsrate von Essigsäure aus den<br>Materialien. ....                                                                                                                                  | 190 |
| Abbildung 101: | Beispiele für Substanzen, die von Einzelmaterialien freigesetzt<br>wurden und keinen typischen exponentielle Abklingkurve<br>aufwiesen. Punkte: Messdaten, Linien: Simulationsergebnisse.<br>.....                                                                    | 191 |
| Abbildung 102: | Beispiele für Substanzen, deren flächenspezifische<br>Emissionsraten bei Freisetzung aus Verbundkonstruktionen<br>höher waren als die aufsummierten Emissionsraten der<br>verbauten Einzelmaterialien. ....                                                           | 192 |

## Tabellenverzeichnis

|             |                                                                                                                                                                                                                                |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1:  | Detailmodelle zur Simulation von chemischen Reaktionen im Innenraum. ....                                                                                                                                                      | 36 |
| Tabelle 2:  | Übersicht über Durchführung und Umsetzung von Freigabemessungen in den befragten Kommunen/Bundesländern. ....                                                                                                                  | 41 |
| Tabelle 3:  | Übersicht über die für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählten Einzelmaterialien und Werkstoffe, aufgelistet nach Werkstoffgruppen. ....                                                         | 48 |
| Tabelle 4:  | Zusammenstellung der wesentlichen Merkmale der ausgewählten sechs Baukonstruktionstypen .....                                                                                                                                  | 55 |
| Tabelle 5:  | Für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählte Wandkonstruktionen. Bauliche Schichtabfolge (innen-außen) und Schichtstärken.....                                                                     | 56 |
| Tabelle 6:  | Für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählte Deckenkonstruktionen. Bauliche Schichtabfolge (oben: Anschluss zum darüberliegenden Boden - unten: im Innenraum sichtbare Decke) und Schichtstärken.. | 57 |
| Tabelle 7:  | Für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählte Bodenkonstruktionen. Bauliche Schichtabfolge (oben-unten) und Schichtstärken. ....                                                                    | 58 |
| Tabelle 8:  | Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien, Prüfparameter der Erstmessungen. ....                                                                                                                                                | 66 |
| Tabelle 9:  | Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien, Prüfparameter der Wiederholungsmessungen. ....                                                                                                                                       | 67 |
| Tabelle 10: | Übersicht über die Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) sowie Vergleichbarkeit der erhobenen Emissionsdaten. ....                                                                                          | 68 |
| Tabelle 11: | Emissionsprüfungen der Verbundkonstruktionen, Prüfparameter. ....                                                                                                                                                              | 69 |
| Tabelle 12: | Modellräume: Maße, Beladungsfaktoren und Prüfbedingungen gemäß DIN EN 16516:2020-10 (DIN) und angepasst im Projekt (P).....                                                                                                    | 70 |
| Tabelle 13: | Emissionsprüfung Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die Auswertung nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen. n.n.: nicht nachweisbar. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....          | 74 |
| Tabelle 14: | Emissionsprüfung Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die Auswertung nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. n.n.: nicht nachweisbar. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem            |    |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | R-Wert nach Rundung. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 77  |
| Tabelle 15: | Auswertung der Emissionsmessungen der Verbundkonstruktionen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.....                                                                                                                                                                                              | 89  |
| Tabelle 16: | Auswertung der Emissionsmessungen der Verbundkonstruktionen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. ....                                                                                                                          | 90  |
| Tabelle 17: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundaufbauten und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.....                                                                                                                                     | 108 |
| Tabelle 18: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundaufbauten und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....                      | 109 |
| Tabelle 19: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Substanzen, die zur Überschreitung von Anforderungswerten des AgBB-Bewertungsschema (06/2021) führten, sowie Kammerkonzentration nach 28 Tagen und NIK-Wert gemäß NIK-Werte-Liste (2020). Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. Überschreitungen in rot und fett markiert. .... | 111 |
| Tabelle 20: | Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.....                                                                                                                                      | 115 |
| Tabelle 21: | Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....                       | 117 |
| Tabelle 22: | Modellraum 2/Lehmbau. Substanzen, die zur Überschreitung von Anforderungswerten des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) führten, sowie Kammerkonzentration nach 28 Tagen und NIK-Wert gemäß NIK-Werte-Liste (2020). Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....      | 118 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tabelle 23: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.....122                                                                     |
| Tabelle 24: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. ....123 |
| Tabelle 25: | Emissionsprüfung Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für die Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....130                     |
| Tabelle 26: | Emissionsprüfung Verbundkonstruktionen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert.....149                                            |
| Tabelle 27: | Modellraum 1-3/Holzrahmenbau/Lehmbau/Holzhybridbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....154                                                       |
| Tabelle 28: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für den Modellraum, die Verbundaufbauten und die Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....155            |
| Tabelle 29: | Modellraum 1/Holzrahmenbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert über eine Prüfdauer von 91 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....158                                                                                |
| Tabelle 30: | Modellraum 2/Lehmbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für den Modellraum 2, die Verbundaufbauten und die Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....160                |
| Tabelle 31: | Modellraum 3/Holzhybridbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für den Modellraum 3, die Verbundaufbauten und die Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert. ....163          |
| Tabelle 32: | Geruchsrelevante Verbindungen die ausschließlich in Modellraum 3/Holzhybridbau, Verbundaufbau Boden                                                                                                                                                                             |

|             |                                                                                                                                                                                                      |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tabelle 33: | 6/Nadelfilz und im Dispersionsklebstoff (Dispersions-K) nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen nachgewiesen wurden.166                                                                              |
|             | Modellparameter für die Simulation der Emission von Dekan aus einer dreischichtigen Bodenkonstruktion: Vinyl/Kleber/Plattenholz. Die Daten wurden von Haghighat und Huang (2003) übernommen. ....183 |

## Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung     | Erläuterung                                                                                 |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ABG</b>    | Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes                         |
| <b>AgBB</b>   | Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten                                   |
| <b>AP</b>     | Arbeitspaket                                                                                |
| <b>BauPVO</b> | Bauproduktenverordnung                                                                      |
| <b>BG</b>     | Bestimmungsgrenze                                                                           |
| <b>BIT</b>    | 1,2-Benzothiazol-3-on                                                                       |
| <b>BRCW</b>   | Basic Requirements for Construction Works                                                   |
| <b>CIT</b>    | 5-Chlor-2-methyl-2H-isothiazol-3-on                                                         |
| <b>DGNB</b>   | Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen                                                |
| <b>DIBt</b>   | Deutsches Institut für Bautechnik                                                           |
| <b>DNPH</b>   | 2,4-Dinitrophenylhydrazin                                                                   |
| <b>EI</b>     | Empfundene Intensität                                                                       |
| <b>EuGH</b>   | Europäischer Gerichtshof                                                                    |
| <b>GC</b>     | Gaschromatographie                                                                          |
| <b>HPLC</b>   | Hochleistungsflüssigkeitschromatographie                                                    |
| <b>IBR</b>    | Institut für Baubiologie Rosenheim GmbH                                                     |
| <b>IC</b>     | Ionenchromatographie                                                                        |
| <b>KVH</b>    | Konstruktionsvollholz                                                                       |
| <b>MIT</b>    | 2-Methyl-4-isothiazolin-3-on                                                                |
| <b>MUF</b>    | Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz                                                          |
| <b>MVV TB</b> | Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen                                     |
| <b>NIK</b>    | Niedrigste interessierende Konzentration                                                    |
| <b>PF</b>     | Phenol-Formaldehyd-Harz                                                                     |
| <b>Pi</b>     | Perceived intensity                                                                         |
| <b>RAL</b>    | Reichsausschuss für Lieferbedingungen                                                       |
| <b>SER</b>    | Spezifische Emissionsrate                                                                   |
| <b>SVOC</b>   | Semi-volatile Organic Compounds (schwerflüchtige organische Verbindungen)                   |
| <b>TSVOC</b>  | Total Semi-volatile Organic Compounds (Summe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen) |
| <b>TVOC</b>   | Total Volatile Organic Compounds (Summe der flüchtigen organischen Verbindungen)            |

| Abkürzung | Erläuterung                                                               |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|
| UF        | Harnstoff-Formaldehyd-Harz                                                |
| UBA       | Umweltbundesamt                                                           |
| VOC       | Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)            |
| VVOC      | Very Volatile Organic Compounds (leichtflüchtige organische Verbindungen) |
| WKI       | Wilhelm-Klauditz-Institut                                                 |

## Zusammenfassung

In modernen Industriegesellschaften verbringt der Mensch den größten Teil des Tages in Innenräumen. Die Innenraumluftqualität, insbesondere in Bezug auf mögliche Fremdstoffe und/oder Gerüche, beeinflusst maßgeblich die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen. Innenraumluftverunreinigungen können aus verschiedenen Quellen stammen. Neben dem Eintrag von Schadstoffen über die Außenluft zählen Emissionen aus den im Innenraum verwendeten Bau- und Ausstattungsmaterialien zu den wichtigsten Ursachen.

Die Bedeutung der gesundheitlichen Auswirkungen von Materialemissionen und die Notwendigkeit ihrer Bewertung wurde bereits 1989 in der europäischen Bauproduktenrichtlinie berücksichtigt (Rat der Europäischen Gemeinschaften, 1989). In Deutschland bildet seit dem Jahr 2000 das AgBB-Bewertungsschema die Grundlage für eine einheitliche und objektive Bewertung von Emissionen aus Bauprodukten. In der Praxis können jedoch gesundheitliche Beschwerden und unangenehme Gerüche auch nach Emissionsprüfungen und Produktbewertungen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Daher sind weiterführende Untersuchungen zu den Zusammenhängen von Bauproduktemissionen und resultierender Raumluftqualität erforderlich.

Forschungsvorhaben zu Emissionen und Immissionen in Innenräumen konzentrierten sich bisher hauptsächlich auf einzelne Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Luftwechselrate, Temperatur oder Materialemissionen, während die Gesamtkomplexität von Innenräumen selten umfassend betrachtet wurde (Holøs et al., 2019; Huangfu et al., 2019; Kraus and Senitkova, 2019). Für die Simulation von Emissionen aus Einzelmaterialeinheiten und Baukonstruktionen können grundsätzlich empirische und massentransportbasierte Modelle zur Anwendung kommen. Empirische Modelle ermöglichen die Validierung mit einer großen Menge an experimentellen Daten, bilden jedoch keine physikalischen Prozesse ab, während Massentransportmodelle Emissionsprozesse auf Basis von Materialeigenschaften und Diffusionsmechanismen beschreiben. Darüber hinaus existieren verschiedene Innenraummodelle, die die Simulation von physikalisch-chemischen Prozessen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad erlauben. Um Materialemissionen und Innenraumluftqualität realitätsnah zu verknüpfen und abzubilden, ist daher die Integration verschiedener Modellierungsansätze unerlässlich.

Zu Beginn des Vorhabens wurden Interviews mit mehreren deutschen Kommunen zu ihren Erfahrungen mit Freimessungen der Innenraumluft in Neubauten und sanierten bzw. renovierten Bestandsgebäuden durchgeführt. An der Untersuchung beteiligten sich Kommunen aus Niedersachsen, Berlin/Brandenburg, Hessen, Thüringen und Bayern sowie das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Die Ergebnisse zeigten, dass besonders in Holzgebäuden (Schulen, Kindergärten) Probleme auftreten können, wie Überhitzung und erhöhte TVOC-Werte, die primär auf die Substanzgruppen der Terpene, Aldehyde und Säuren zurückgeführt werden konnten. Enge Bauzeiten, unklare Messzeitpunkte und eingeschränkte Lüftungsmöglichkeiten stellten wiederkehrende Herausforderungen dar. Als Lösungen wurden Lüftungsstrategien, Wiederholungsmessungen und gegebenenfalls Materialaustausch durchgeführt. Die Kommunen betonten die Notwendigkeit klarer Richtlinien, interdisziplinärer Zusammenarbeit und praxisorientierter Checklisten.

Der experimentelle Hauptteil des Vorhabens bestand darin, Zusammenhänge zwischen Emissionen aus Einzelmaterialeinheiten, daraus hergestellten Baukonstruktionen (Wand/Decke/Boden) und der resultierenden Raumluftqualität bei Verwendung dieser Konstruktionen in Modellräumen zu untersuchen. Dabei wurde sowohl die Freisetzung des gesamten Spektrums von (leicht) flüchtigen organischen Verbindungen betrachtet als auch der Geruch bewertet.

In Vorbereitung der experimentellen Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit Architekt\*innen, Planer\*innen und öffentlichen Bauverwaltungen, die den projektbegleitenden Arbeitskreis bildeten, auf dem Markt erhältliche Materialien ausgewählt, die für die Konstruktion von öffentlichen Gebäuden, Schulen/Kindergärten und Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden. Nachfolgend wurden Baukonstruktionen (Wand/Boden/Decke) festgelegt, die aus den zuvor ausgewählten Einzelmaterialelementen gebaut werden sollten. Bei den Baukonstruktionen handelte es sich um nachhaltige Bauweisen: Holzrahmenbau, Holzhybridbau, Holzmassivbau, Skelettbau, Holzbau und Lehmbau. Insgesamt wurden vier Wand-, sechs Decken- und sechs Bodenaufbauten konstruiert.

Um Informationen über mögliche Änderungen im Emissionsverhalten von Bauprodukten als Einzelmaterialelement und im verbauten Zustand zu gewinnen, wurden zunächst einzelne Bauprodukte auf Emissionen geprüft. Die insgesamt 56 Einzelmaterialelemente entstammten den Werkstoffgruppen der Holz/Holzwerkstoffe, Gipswerkstoffe, Putze, Dämmstoffe, Bauplatten, Bodenbeläge/-beschichtungen, Folien, Wandfarben und Klebstoffe sowie Dicht- und Spachtelmassen. Bei der Produktauswahl wurden sowohl zertifizierte, d.h. mit einem Qualitätszeichen ausgezeichnete Werkstoffe (z.B. Blauer Engel) als auch nicht zertifizierte Produkte berücksichtigt. Die Beschaffung der Materialelemente erfolgte in Baumärkten und über Baustoffhändler, so dass keine Informationen über den Herstellungsprozess, die Lagerzeit und die Lagerbedingungen bis zum Verkauf vorlagen. In einem dritten Schritt wurde der Frage nach der entstehenden Innenraumluftqualität nachgegangen, indem drei Modellräume durch die entsprechenden Wand-, Boden- und Deckenelemente konstruiert wurden, die die Bauarten Holzrahmenbau, Lehmbau und Holzhybridbau repräsentierten.

Abschließend erfolgten numerische Simulationen, um die Emissionen aus Einzelmaterialelementen und Verbundkonstruktionen sowie die entstehende Innenraumluftqualität modellieren zu können. Dabei stand die Fragestellung im Fokus, ob anhand von Emissionsdaten, die im Rahmen von Einzelmaterialelementprüfungen erhoben wurden, das Emissionsverhalten von Konstruktionen und die Raumluftqualität in einem Modellraum berechnet werden kann.

Die Emissionsprüfungen der (i) Einzelmaterialelemente, (ii) Verbundkonstruktionen und (iii) Modellräume erfolgten jeweils gemäß dem AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Die Beladungsfaktoren und Prüfbedingungen entsprachen den Vorgaben der DIN EN 16516:2020-10. Um ausreichende Datensätze für die Simulationen zu erhalten, wurden zusätzlich zu den im AgBB-Bewertungsschema festgelegten Probenahmezeiten (3 und 28 Tage) täglich weitere Luftproben entnommen. Analysiert wurde das gesamte Spektrum organischer Emittenten: leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC), flüchtige organische Verbindungen (VOC), niedermolekulare Aldehyde und C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-Carbonsäuren, um ein möglichst umfassendes Datenset über die von den Prüfkörpern freigesetzten organischen Verbindungen zu gewinnen. Darüber hinaus wurden neben der derzeit als optional im AgBB-Bewertungsschema (06/2021) verankerten sensorischen Prüfung auf Basis der empfundenen Intensität (EI) die Parameter der Hedonik, der Geruchsart und der Zumutbarkeit bewertet.

Um einen Überblick über die im freien Markt erhältlichen Werkstoffe zu erhalten und um lange Lagerzeiten im Fraunhofer WKI zu vermeiden (Abklingen von Emissionen), wurden alle Werkstoffe jeweils kurz vor Beginn der Emissionsprüfungen bzw. vor dem Bau der Verbundkonstruktionen und Modellräume beschafft. Diese Vorgehensweise erforderte allerdings jeweils erneute Emissionsmessungen um zu prüfen, ob das Emissionsspektrum eines Produktes bei wiederholtem Neuankauf vergleichbar ist und somit für den Vergleich von (i) Einzelmaterialelementen, (ii) Verbundkonstruktionen und (iii) Modellräumen, besonders hinsichtlich der Simulationen, vergleichbare Datensätze zu erhalten.

Nach einer Prüfzeit von 3 Tagen erfüllten alle geprüften Einzelmaterialien mit einer Ausnahme die Anforderungen an den TVOC-Wert. Nach einer Prüfzeit von 28 Tagen entsprachen 50 von insgesamt 56 Einzelmaterialien den Anforderungen des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021). Die Wiederholungsmessungen bei Neuankauf von Baumaterialien wurden ebenfalls über einen Prüfzeitraum von 28 Tagen durchgeführt, um für vergleichbare, komplette Datensätze zu erzeugen. Die Ergebnisse dieser Wiederholungsmessungen zeigten jedoch teils deutliche Unterschiede sowohl in der Emissionsstärke als auch im freigesetzten Substanzspektrum. Dies betraf primär holzbasierte Werkstoffe, aber auch Kunststoffe, wie beispielsweise expandiertes Polystyrol (EPS). Die im Vorhaben gemessenen Schwankungsbreiten zeigten, dass die auf dem Markt erhältlichen Produkte hinsichtlich der Emissionsstärke häufig nicht vergleichbar sind.

Alle untersuchten Verbundkonstruktionen (Wand/Boden/Decke) erfüllten nach 3 und 28 Tagen die Anforderungen des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021). Die Emissionsprofile wurden meistens von Substanzgruppen dominiert, die von den verbauten holzbasierten Werkstoffen freigesetzt wurden (Aldehyde, Terpene, Carbonsäuren). Darüber hinaus waren auch die Treibmittel der in der Konstruktion eingesetzten Dämmstoffe im Emissionsspektrum der Baukonstruktion identifizierbar (z.B. iso-, n-Pentan, Cyclopentan aus EPS). Allerdings war die von den Konstruktionen freigesetzten Konzentrationen niedriger, als die Summe der verbauten Einzelmaterialien hätte erwarten lassen, insbesondere bei Verbau starker Emissionsquellen.

Auch die drei Modellräume (Holzrahmen-, Lehm- und Holzhybridbau) erfüllten nach 3 Tagen die Anforderungen des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021). Nach 28 Tagen überschritten zwei Modellräume (Holzrahmenbau, Lehmhaus) die Anforderungen an den R-Wert aufgrund von Furfural- und Essigsäureemissionen geringfügig, während der dritte Modellraum (Holzhybridbau) alle Anforderungen einhielt. Ursächlich für die Freisetzung von Furfural und Essigsäure war sehr wahrscheinlich die eingebaute Holzfaserdämmung.

Basierend auf den in diesem Vorhaben untersuchten Einzelmaterialien, den ausgewählten Verbundkonstruktionen und den Modellräumen hat sich in der Zusammenschau der Messergebnisse gezeigt, dass

- ▶ der Verbau hochemittierender Materialien nicht zwangsläufig zu hochemittierenden Konstruktionen (Verbundaufbauten, Modellräume) führte,
- ▶ Modellräume eine niedrigere Emissionsquelle sein können als die Verbundkonstruktionen, aus denen der jeweilige Raum besteht,
- ▶ die Verbundkonstruktionen wiederum eine niedrigere Emissionsquelle sein können als die (Summe der) Einzelmaterialien, aus denen sie gebaut wurden.

Diese Schlussfolgerungen sind auf die im Vorhaben untersuchten Konstruktionen und auf einen Untersuchungszeitraum von 28 Tagen begrenzt. Damit sind die Ergebnisse nicht repräsentativ. Inwieweit sie auch auf andere Konstruktionstypen sowie längere Prüfintervalle und auf reale Bauvorhaben übertragen werden können, sollte Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein.

Unabhängig von den erzielten Ergebnissen sind regelmäßige Emissionsprüfungen von Bauprodukten und Werkstoffen seitens der herstellenden Unternehmen unverändert ein wichtiges und unverzichtbares Werkzeug, um Informationen über das Emissionsverhalten dieser Materialien sowie beeinflussender (Umgebungs-)Faktoren und damit wichtige Erkenntnisse für die werkseigene Qualitätskontrolle und fortwährende Produktverbesserungen zu erhalten. Darüber hinaus liefern möglichst aktuell vorliegende Emissionsprüfergebnisse wichtige Hinweise auf die potentielle(n) Emissionsquelle(n) im Beschwerdefall.

## 1 + 1 ≠ 2

Angesichts der oben getroffenen Kernaussagen hat sich gezeigt, dass ein „einfacher“ Rückschluss aus dem Emissionsverhalten von einzelnen Materialien auf die Quellstärke daraus gefertigter Baukonstruktionen bzw. Modellräume nicht möglich ist. Vielmehr hat sich angesichts der Ergebnisse gezeigt, dass

- ▶ die „Vorhersage“ der Emissionseigenschaften der untersuchten Verbundkonstruktionen und Modellräume schwierig war, insbesondere hinsichtlich vielschichtiger Verbundkonstruktionen mit mehr als drei Materialschichten,
- ▶ die oberste, zuletzt verbaute Materialschicht nicht zwangsläufig das Emissionsverhalten der gesamten Konstruktion dominierte, mit Ausnahme der untersuchten Fußbodenkonstruktionen,
- ▶ die Tatsache, dass Verbundkonstruktionen und Modellräume deutlich niedrigere Emissionen zeigten als von den verbauten Einzelmaterialein in Summe zu erwarten gewesen wäre, deutete auf mögliche Senkeneffekte hin. Hinsichtlich des Modellraums Holzrahmenbau wären daher weiterführende Untersuchungen zum Zusammenspiel Gipsfaserplatte und Holzfaserdämmung sinnvoll, hinsichtlich des Modellraums Leimbau zum Zusammenspiel Lehmprodukte und Holzfaserdämmung. Im Rahmen von Folgeuntersuchungen sollte geklärt werden, ob (a) tatsächlich Senkeneffekte bestehen und (b) wie lange diese anhalten bzw. wann die aus der Dämmebene freigesetzten Verbindungen durchbrechen werden.

Analog zu den Emissionsergebnissen lassen auch die Ergebnisse der Geruchsprüfung bei der Gegenüberstellung der empfundenen Intensität von (i) Einzelmaterialein, (ii) Verbundkonstruktionen und (iii) Modellräumen darauf schließen, dass Einzelmaterialein mit einem weiten geruchsaktiven Substanzspektrum nicht zwingend zu sensorisch deutlich bis stark wahrzunehmenden Verbundkonstruktionen bzw. Modellräumen führten. Auch bei den sensorischen Parametern könnten mögliche Senkeneffekte von Bauprodukten eine Rolle spielen. Ausnahmen gab es lediglich hinsichtlich eines Bodens (Nadelfilz)- und eines Deckenaufbaus (Holzhybridbau). Hier gab es Hinweise darauf, dass verbaute Einzelmaterialein (Dispersionskleber, Gipsfaserplatte) einen sensorischen Effekt auf die dazugehörigen Verbundkonstruktionen hatten.

Bei Vergleich der erhobenen Ergebnisse hinsichtlich der sensorischen Parameter empfundene Intensität, Zumutbarkeit und Hedonik ergaben sich folgende Aussagen:

- ▶ Proben mit steigender empfundener Intensität wurden durch die Probanden tendenziell als unangenehmere Geruchsquelle empfunden.
- ▶ Analog dazu wurden Proben mit einer Zumutbarkeit  $\geq 70$  % überwiegend als „angenehm“ bis „weder angenehmen noch unangenehmen“ Geruchsquellen bewertet.
- ▶ Im Gegensatz dazu wurden Luftproben mit einer hohen Intensität von den Probanden zwar als ausschließlich unzumutbar empfunden, jedoch wurde eine Vielzahl an Materialien mit einer geringeren Intensität mit einer Zumutbarkeit  $< 70$  % bewertet und somit als unzumutbare Geruchsquellen wahrgenommen. Dieser Sachverhalt lässt sich möglicherweise auf Substanzen mit niedrigen Geruchsschwellen und/oder unangenehmem Geruchscharakter zurückführen.

Eine genauere Klärung der Frage, welche geruchsaktiven Verbindungen im Spurenkonzentrationsbereich ursächlich für eine unzumutbare Geruchsempfindung trotz niedriger EI sind, würde das Hinzuziehen analytischer Methoden mit deutlich niedrigeren Nachweisgrenzen und folglich

einer höheren Empfindlichkeit erfordern, als durch die im Vorhaben eingesetzten Verfahren möglich waren. Um geruchsaktive Komponenten im Spurenkonzentrationsbereich zu detektieren, bietet der Q-TOF als Detektor eine deutlich höhere Auflösung und eine bessere Nachweisstärke als herkömmliche GC/MS-Analysentechniken.

Auf Basis der erhobenen Messdaten im Rahmen der Emissionsprüfungen wurde das jeweilige Emissionsprofil (i) der Einzelmaterialien, (ii) der Verbundkonstruktionen und (iii) der Modellräume simuliert und die Ergebnisse mit den Messdaten verglichen. Zur Simulation der Emissionen aus einzelnen Materialien und Verbundstrukturen sowie der resultierenden Konzentrationen in Modellräumen wurden ein empirisches Modell und ein Massentransfermodell herangezogen. Die erzielten Ergebnisse zeigten, dass anhand von empirischen Modellen die Emissionsmuster der meisten Einzelmaterialien gut simuliert werden konnten. Die Emissionen von komplexen Verbundkonstruktionen und die Konzentrationen in den Modellräumen konnten mit Hilfe empirischer Methoden, ausgehend von den Messdaten der Einzelmaterialprüfungen, nicht gut simuliert werden. Im Vorhaben eigneten sich daher die empirischen Modelle nur für die Simulation von Materialemissionen in Innenräumen in sehr einfachen Fällen, wie z. B. bei einschichtigen Wand-, Decken- und Bodenkonstruktionen.

Mit dem Massentransfermodell ließen sich dagegen Diffusionsprozesse von Substanzen in Einzelmaterialien und Verbundkonstruktionen sowie die Luftkonzentrationen in den Modellräumen erfolgreich simulieren. Voraussetzung dafür waren allerdings die Erfüllung nachfolgender Bedingungen:

- ▶ die einzelnen Materialien sind homogen,
- ▶ die Materialfeuchte befindet sich im Gleichgewichtszustand,
- ▶ es gibt keine signifikanten Unterschiede innerhalb verschiedener Chargen des gleichen Materials,
- ▶ es finden keine chemischen Reaktionen statt.

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigten, dass das Massentransfermodell auch für die Simulation von Emissionen aus komplexen Baukonstruktionen für eine Reihe von Substanzen geeignet ist. Je mehr grundlegende Daten über Bauprodukte verfügbar sind und je mehr chemisch-physikalische Prozesse einbezogen werden, desto genauere Simulationsergebnisse können perspektivisch erzielt werden. Daher ist das Massentransfermodell noch nicht endgültig validierbar bzw. sind verlässliche Simulationen noch nicht möglich, bis belastbare, reproduzierbare Emissionsmessdaten vorliegen.

Angesichts der erhobenen Emissionsmessdaten der Einzelmaterialien wurde im Vorhaben deutlich, dass diese Datensätze in Abhängigkeit von der Werkstoffkategorie, den Produktionschargen und dem Lagerungsprozess großen Schwankungen unterworfen sind. Für die Qualitätskontrolle und Gewährleistung einer gleichbleibenden Qualität bezüglich des Emissionsverhaltens für die Endverbraucher\*innen kommt regelmäßig durchgeführten Emissionsprüfungen eine unverändert hohe Relevanz zu. Für Produkte, die mit einem Qualitätszeichen ausgezeichnet sind, werden abhängig von der Werkstoffkategorie perspektivisch in regelmäßigen, aber kürzeren Zeitabständen durchzuführende Emissionsprüfungen wichtig sein. Dabei könnten Proben berücksichtigt werden, die sowohl direkt vom herstellenden Unternehmen als auch aus dem Baustoffhandel bezogen wurden.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens können in Gesundheitsschutzstandards innerhalb nationaler und europäischer Bauvorschriften einfließen und auch zur Überarbeitung bestehender Prüfverfahren, wie des AgBB-Bewertungsschemas, beitragen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse in einem praxisorientierten Leitfaden zusammengefasst, der Planer\*innen und Architekt\*innen Informationen zum Umgang mit Materialemissionen und Raumluftqualität bietet.

## Summary

People in modern industrial societies spend most of their day indoors. Indoor air quality in terms of possible foreign substances and/or odours strongly influence people's health and well-being. Indoor air pollution can come from a variety of sources. In addition to the entry of air-borne contaminants via the outside air, emissions from the construction and furnishing materials used indoors are one of the most important sources.

The significance of the health effects of material emissions and the need to evaluate them have already been taken into account in regulations with a long history (1989 in the European Construction Products Directive, Council of the European Communities). In Germany, the AgBB evaluation scheme has formed the basis for the uniform and objective evaluation of emissions from construction products since 2000. In reality, however, the occurrence of health complaints and unpleasant odours cannot be ruled out even after emission tests and product evaluations. Therefore, appropriate assessment methods and in-depth research into the emission interactions of building products within real indoor spaces are still needed.

Research on indoor emissions and immissions has mainly focused on individual factors such as ventilation rate, temperature, and material emissions, while the overall complexity of indoor environments has rarely been addressed (Holøs et al., 2019; Huangfu et al., 2019; Kraus and Senitkova, 2019). Existing models for VOC emissions from building materials include empirical and mass transfer models. Empirical models can be validated using a large amount of experimental data, but they do not represent physical processes, whereas mass transport models describe emission processes based on material properties and diffusion mechanisms. Several indoor air models are existing with different focus on simulating detailed chemical and physical indoor processes. To realistically link and represent material emission and indoor air quality, integrating different modeling approaches is essential.

To gain a better practical understanding of the issue, interviews were conducted with several German municipalities about their experiences with clearance measurements for indoor air in new and renovated buildings. The study included municipalities from Lower Saxony, Berlin/Brandenburg, Hesse, Thuringia, and Bavaria, Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs, and Spatial Development (BBSR), and German Sustainable Building Council (DGNB). The results show that problems frequently occurred in wooden school and kindergarten buildings, where high TVOC levels (terpenes, aldehydes, acids) and overheating were common. Tight construction schedules, unclear measurement timing, and limited ventilation were frequent challenges. Solutions involved ventilation strategies, repeated measurements, and material replacement when necessary. Municipalities emphasised the need for clear guidelines, interdisciplinary cooperation, and checklists.

In collaboration with architects, planners, and public building authorities, materials for public buildings, schools/kindergartens, and residential buildings were selected, including materials for wood frame, clay, and wood-hybrid building constructions. Representative composite structures were also selected for corresponding building construction types. In order to obtain information about possible changes in the emission behaviour of building products as single materials and as part of the assembled structure, building materials and products were first tested for emissions individually and then for composite structures. A total of 56 single materials were tested, both certified (e.g., Blue Angel) and non-certified products. In a further step, composite structures (walls, ceilings, floors) were constructed from selected single materials and their emission behaviour was tested. The selected composite structures included four walls, six ceil-

ings, and six floor structures. In a third step, the wall, ceiling, and floor elements of three representative building structures (wood frame, clay, and wood-hybrid constructions) were examined in the form of model rooms with regard to the resulting indoor air quality.

The emission tests on (i) single materials, (ii) composite structures, and (iii) model rooms were conducted in accordance with the AgBB evaluation scheme (06/2021). The load factors and test conditions complied with the specifications of DIN EN 16516:2020-10. To obtain sufficient datasets for the simulations, additional air samples were collected on every working day beyond the two sampling periods (3 and 28 days) specified in the AgBB evaluation scheme. The analysed substances included VOCs, VVOCs, volatile aldehydes, and C1–C2 carboxylic acids, ensuring the most comprehensive dataset possible on the organic compounds emitted by the test samples. In addition to the sensory test based on perceived intensity (EI) required by the AgBB scheme, the parameters of hedonic, odour type, and acceptance were also evaluated.

The single materials were purchased shortly before the start of the emission tests or before the composite structures and model rooms were constructed. After a testing period of 3 days, with the exception of the silicone sample, all tested single materials met the TVOC requirements according to the AgBB evaluation scheme (06/2021). After a testing period of 28 days, 50 out of a total of 56 single materials met the requirements of the AgBB evaluation scheme (06/2021).

The materials newly purchased for the construction of composite structures and model rooms were retested for emissions on day 3 after being placed in the chamber. However, the results of the retest measurements of the same materials showed significant differences both in terms of emission behaviour and in terms of the total concentration of released compounds. This was particularly true for wood-based materials. The ranges of variation measured in the project show that the products available on the market are not comparable in terms of emission intensity.

All composite structures (walls, ceilings, and floors) met the requirements of the AgBB evaluation scheme (06/2021) after a testing period of 3 and 28 days. Emission profiles were dominated by typical wood-based compounds—aldehydes, terpenes, and light carbonyls. Despite the use of high-emission single materials, the composite structures showed lower overall emissions, indicating absorption and interaction between layers.

All model rooms (wood frame, clay, and wood-hybrid constructions) met the requirements of the AgBB evaluation scheme (06/2021) after 3 days. After 28 days, wood frame and clay model rooms slightly exceeded the R-value due to furfural and acetic acid emissions, while wood-hybrid model room complied with all requirements. The release of furfural and acetic acid was most likely caused by the wood fiber insulation used in the construction. The results show that high-emitting materials do not necessarily lead to high room emissions, as interactions within layered constructions (e.g., absorption by gypsum or clay boards) influence overall emissions. All three of the model rooms were low-emission systems over a testing period of 28 days.

Based on the single materials examined in this project, the selected composite structures, and model rooms, an overview of the respective emission behaviour has shown that

- the use of high-emission materials did not necessarily lead to high-emission structures (composite structures),
- model rooms can be a lower source of emissions than the composite structures of which the room is made,
- composite structures can in turn be a lower source of emissions than the (sum of the) single materials from which they were built.

These conclusions are limited to the structures examined in the project and to a test period of 28 days. Whether they can also be applied to other types of structures and longer test intervals should be the subject of further investigation.

Regardless of the results achieved, regular emission testing of construction products and materials by manufacturing companies remains an important and indispensable tool for obtaining information about the emission behaviour of these materials and influencing (environmental) factors, and thus important insights for in-house quality control and continuous product improvement. In addition, the most recent emission test results available provide important information about the potential emission source(s) in the event of a complaint.

### **1 + 1 ≠ 2**

In view of the key statements made above, it has become apparent that it is not possible to draw a “simple” conclusion from the emission behaviour of single materials to the source strength of structures or model rooms constructed from them. Rather, the results have shown that

- ▶ It was difficult to “predict” the emission properties of the composite structures and model rooms examined, especially in the case of multi-layer composite structures with more than three material layers,
- ▶ The topmost, last installed material layer did not necessarily determine the emission behaviour of the entire construction, with the exception of the floor constructions examined,
- ▶ The fact that composite constructions and model rooms showed significantly lower emissions than would have been expected from the sum of the single materials used indicated possible reduction effects. With regard to wood frame model room, further investigations into the interaction between gypsum fiberboard and wood fiber insulation would therefore be useful, and with regard to clay model room, into the interaction between clay products and wood fiber insulation. Follow-up studies should clarify whether (a) sink effects actually exist and (b) how long they last or when the compounds released from the insulation layer will break through.

Similar to the emission results, a comparison of the perceived intensity of (i) single materials, (ii) composite structures, and (iii) model rooms shows that single materials with a wide range of odour-active substances did not necessarily lead to composite structures or model rooms that were clearly or strongly perceptible to the senses. Possible sink effects of building products could also play a role in the sensory parameters. The only exceptions were the composite constructions needle felt floor and wood-hybrid ceiling. Based on the data sets collected, it can be assumed that the single materials used (dispersion adhesive, gypsum fiber board) could have a sensory effect on the associated composite constructions.

A comparison of the results obtained for the sensory parameters of perceived intensity, acceptability, and hedonic value yielded the following conclusions:

- ▶ Samples with increasing perceived intensity tended to be perceived by the test subjects as more unpleasant odour sources.
- ▶ Similarly, samples with an acceptability  $\geq 70\%$  were predominantly rated as “pleasant” to “neither pleasant nor unpleasant” odour sources.
- ▶ In contrast, although air samples with a high intensity were perceived by the test subjects as exclusively unacceptable, a large number of materials with a lower intensity were rated as having an acceptability  $< 70\%$  and were therefore perceived as unacceptable odour sources.

This may be attributable to substances with low odour thresholds and/or unpleasant odour characteristics.

A more precise clarification of the question of which odour-active compounds in the trace concentration range are responsible for an unacceptable odour sensation despite low EI would require the use of analytical methods with significantly lower detection limits and, consequently, higher sensitivity than was possible with the methods used in the project. In order to detect odour-active components in the trace concentration range, the Q-TOF detector offers significantly higher resolution and better detection sensitivity than conventional GC/MS analysis techniques.

Based on the measurement data collected during the emission tests, the respective emission profiles (i) of the single materials, (ii) of the composite structures, and (iii) of the model rooms were simulated and the results were compared with the measurement data. An empirical model and a mass transfer model were used to simulate the emissions from single materials and composite structures as well as the resulting concentrations in model rooms. The results obtained showed that empirical methods were able to simulate most of the emission patterns of the substances emitted by single materials well. However, empirical methods using emission data from single materials were not able to simulate the emissions from complex composite structures and model rooms. Empirical models may only be suitable for simulating indoor air concentrations in very simple cases, such as single-layer walls, ceilings, and floor coverings.

In contrast, the mass transfer model was able to successfully simulate the diffusion processes of substances in single materials and composite structures, as well as the air concentration in the model rooms. However, this required the following conditions to be met:

- ▶ the single materials are homogeneous,
- ▶ the material moisture is in a state of equilibrium,
- ▶ there are no significant differences within different batches of the same material,
- ▶ no chemical reactions take place.

The results of this project show that the mass transfer model is also suitable for simulating emissions from complex, realistic building constructions for a range of substances. The more basic data on building products is available and the more chemical-physical processes are included, the more accurate simulation results can be achieved in the future. Therefore, the model cannot be definitively validated, and reliable simulations are not possible until robust, reproducible emission measurement data is available. In view of the emission measurement data collected for the single materials, it became clear in the project that these data sets are subject to large fluctuations depending on the material category, production batches, and storage process. Regular emission tests remain highly important for quality control and ensuring consistent quality in terms of emission behaviour for end users. For products that have been awarded a quality mark, emission tests carried out at regular but shorter intervals will be important in the future, depending on the material category. Samples obtained directly from the manufacturing company as well as from building material suppliers could be taken into account.

The research findings of this work provide a valuable foundation for enhancing health protection standards within national and European building regulations. The collected data will support the further refinement of existing testing frameworks, such as the AgBB evaluation scheme. Moreover, the results have been compiled into a practical guide offering planners and architects clear recommendations for selecting low-emission and health-conscious building materials.

# 1 Einleitung

In modernen Industriegesellschaften verbringt der Mensch den größten Teil des Tages in Innenräumen, der häufig auf über 90 % beziffert wird. In Abhängigkeit von dem individuellen Tagesablauf variiert die Art und Nutzung der Innenräume, u. a. private Wohnräume, Transportmittel, Arbeitsplätze, Bildungseinrichtungen und Freizeitstätten. Um diesem Umstand gerecht zu werden, hat Ott (1985) ein einfaches Summenmodell für die individuelle Exposition gegenüber Luftfremdstoffen gemäß Gleichung (1-1) vorgeschlagen:

$$E_i = \sum_{j=1}^n (C_j \cdot t_{ij}) \quad (1-1)$$

mit  $E_i$  = Gesamtexposition eines Individuums  $i$ ,  $C_j$  = Luftkonzentration einer organischen Substanz am Ort  $j$  und  $t_{ij}$  = Tagesanteil, den das Individuum  $i$  an Ort  $j$  verbringt.

Die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen in Innenräumen hängt nicht nur von den raumklimatischen Parametern (Temperatur, relative Luftfeuchte, Luftwechsel), sondern auch von der Luftqualität im Hinblick auf mögliche Fremd- und/oder Geruchsstoffe ab. Dabei können die Verunreinigungen der Innenraumluft aus unterschiedlichen Quellen stammen. Neben dem Eintrag von Luftfremdstoffen und Partikeln über die Außenluft zählen Emissionen aus den im Innenraum verbauten Konstruktions- und Ausstattungsmaterialien zusammen mit eingebrachten Materialien und Konsumgütern des täglichen Bedarfs zu den wichtigsten Quellen. Dieser Umstand ist insbesondere angesichts der Energieeinsparverordnung von zunehmender Bedeutung. Um die Energieeffizienz zu steigern und den Primärenergiebedarf von Gebäuden zu senken, werden diese stärker als bisher gegen die Außenluft isoliert mit daraus resultierenden, deutlich niedrigeren Luftwechselraten.

## 1.1 Relevanz von Bauproduktemissionen im Innenraum

Die Relevanz der gesundheitlichen Auswirkungen von Werkstoffemissionen und deren notwendiger Bewertung wurde erstmals 1989 in der europäischen Bauproduktenrichtlinie berücksichtigt (Rat der Europäischen Gemeinschaften, 1989). Seit 2013 ist die Begrenzung und Vermeidung von Schadstoffen in Innenräumen in der europäischen Bauproduktenverordnung unter den formulierten, acht wesentlichen Anforderungen (BRCW: basic requirements for construction works) als dritter Punkt (BRCW 3: Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz) ausdrücklich genannt und gilt somit auch als Auflage im Zusammenhang mit der möglichen Freisetzung von flüchtigen Verbindungen aus Werkstoffen (EU-BauPVO, 2024). Zwar ist mit der DIN EN 16516:2020-10 die Vorgehensweise bei der Prüfung von Bauproduktemissionen auf europäischer Ebene harmonisiert, eine Umsetzung in harmonisierten Produktnormen mit Leistungserklärung und CE-Kennzeichnung ist allerdings bislang nicht erfolgt. Mit der EU-Gebäuderichtlinie (Richtlinie (EU) 2024/1275 EPBD, Energy Performance of Building Directive) werden aber Anforderungen an die Raumluftqualität im Rahmen der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden adressiert. Die in der EPBD (2024) definierte Raumklimaqualität beinhaltet neben Temperatur, relativer Luftfeuchte und Luftwechselrate auch explizit das Vorhandensein von Kontaminanten. Der Energiebedarf ist gemäß der Richtlinie auch in Bezug auf Gesundheit und Raumluftqualität, einschließlich Komfort, zu optimieren.

In Deutschland existiert mit dem sog. AgBB-Bewertungsschema seit dem Jahr 2000 eine Grundlage für die einheitliche und objektive Bewertung von Emissionen aus Bauprodukten. Das AgBB-Bewertungsschema wurde in der Folge durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) in den Zulassungsgrundsätzen zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen umgesetzt (DIBt, 2010). Allerdings erklärte der Europäische Gerichtshof (EuGH) im Oktober 2014 die Unvereinbarkeit der in Deutschland umgesetzten nationalen Regelungen, die über die

CE-Kennzeichnung hinausgehende nationale Verwendbarkeitsnachweise fordern, mit dem europarechtlichen Marktbehinderungsverbot. Wenn es für ein Bauprodukt keine harmonisierte Norm gibt oder das herstellende Unternehmen freiwillige Angaben zur Produktleistung über die CE-Kennzeichnung hinaus machen möchte, ist dies über einen Prüfnachweis ohne Kennzeichnung möglich, wie beispielsweise anhand eines DIBt-Gutachtens. Im Gegensatz dazu sind die Anforderungen an die Gebäude unverändert verpflichtend. Über die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) fand das AgBB-Bewertungsschema Eingang als Grundlage für die sog. Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes (ABG; Anhang 8) (DIBt, 2023). Die Regelungen der MVV TB dienen als Vorlage für die entsprechenden Landesvorschriften. Gemäß Anhang 8 bestehen Anforderungen für Bauprodukte hinsichtlich der Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen, „...wenn die Produkte in Aufenthaltsräumen und in baulich nicht davon abgetrennten Räumen Verwendung finden.“ (DIBt, 2023). Neben u.a. Bodenbelägen, Bodenbelagskonstruktionen und deren Bestandteilen, Wandbekleidungen und -beschichtungen (dickschichtig, auf Kunststoffbasis) sowie Deckenverkleidungen und -konstruktionen auf Kunststoffbasis gilt dies auch für Klebstoffe, Dämmstoffe (Phenolharzschäume und UF-Ortschäume), OSB-Platten (oriented strand board), kunstharzgebundenen Spanplatten und HPL-Platten (dekorative Hochdruck-Schichtpressstoffplatten) (DIBt, 2023).

Unternehmen der Holzwerkstoffindustrie haben in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg gegen die in Anhang 8 (AGB) enthaltenen Anforderungen an das Emissionsverhalten geklagt. Der Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg erklärte die für Span- und OSB-Platten geltenden Anforderungen an das Emissionsverhalten teilweise für unwirksam, da sie nicht der Gefahrenabwehr dienen (VGH BW, Entscheidung vom 07.10.2020, Aktenzeichen 8 S 2959/18). Auch der Bayerische Verwaltungsgerichtshof München gab einer entsprechenden Klage im November 2021 gegen die in den Bayerischen Technischen Baubestimmungen (BayTB) verankerten Grenzwerte für OSB-Platten teilweise statt, da diese nicht gesichert zur Abwehr gesundheitlicher Gefahren beitragen würden (VGH München, Urteil v. 24.11.2021 – 2 N 21.2173). Der Aspekt der Abwehr von Gesundheitsgefahren für die Allgemeinbevölkerung in Aufenthaltsräumen, dem durch die Wahl der Kriterien des AgBB-Bewertungsschemas Rechnung getragen wird, ist daher in der zuletzt überarbeiteten Version des Schemas (09/2024) explizit verankert.

## 1.2 Problemstellung

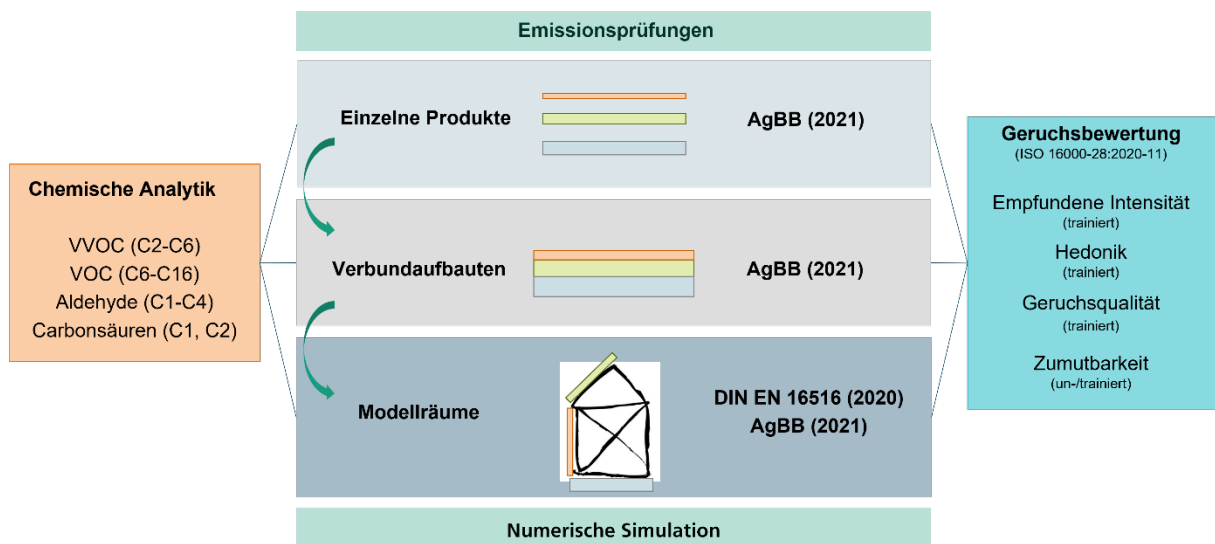
Auch wenn es Ansätze für eine gesundheitliche Bewertung von Bauproduktemissionen gibt, so ist es für Gebäudeplaner und -architekten kaum möglich, diese zu überprüfen. Als besondere Erschwernis kommt hinzu, dass das Auftreten von gesundheitlichen Beschwerden und von Fehlgerüchen auch bei einer erfolgten Emissionsprüfung und ggf. Produktbewertung nicht ausgeschlossen werden kann. Zwar liefern entsprechende Prüfungen Hinweise auf Auffälligkeiten bezüglich freigesetzter Fremdstoffkonzentrationen und ggf. als problematisch einzustufender Substanz(grupp)en und stellen daher eine wichtige Entscheidungsgrundlage bei der Produktauswahl dar, allerdings erlauben sie keine direkten Rückschlüsse auf die Luftqualität in realen Innenräumen. Im AgBB-Bewertungsschema wird folglich darauf hingewiesen, dass „vielmehr zusätzlich die unter Praxisbedingungen zu erwartenden Raumluftsituationen berücksichtigt werden müssen“ (AgBB, 2021). Die DIN EN 16516:2020-10 definiert daher bewusst einen Referenzraum mit einem festgelegten Emissionsszenario und hebt hervor, dass dieser Raum ein Modell und keinen realen Raum darstellt. Mit dem in der DIN EN 16516:2020-10 festgelegten Prüfverfahren lässt sich die Emissionsrate von in der Gasphase befindlichen organischen Verbindungen aus einem Bauprodukt in die Innenraumluft berechnen. Als Brücke zwischen Emissionsprüfungen von Einzelprodukten und Luftmessungen in Realräumen kann die zusätzliche Emissionsprüfung von

Systemaufbauten bzw. ganzer Raumbauteile in Betracht gezogen werden. Für eine Planungssicherheit ist es daher notwendig, zukünftig geeignete Instrumente bereitzustellen, die eine Abschätzung und folglich Prognose realer Raumluftszenarien erlauben.

### 1.3 Ziel und Gegenstand der vorliegenden Studie

Angesichts des unter **Punkt 1** dargestellten Hintergrunds ist es notwendig, weiterführende Kenntnisse über das Zusammenspiel von Bauproduktemissionen in realen Innenräumen zu gewinnen, die perspektivisch zu einer stärkeren Gewichtung des Gesundheitsschutzes in Planungsprozessen beitragen können. In der vorliegenden Studie wurden daher Modellräume konstruiert, die jeweils eine unterschiedliche Bauweise repräsentieren. Die Beladungsfaktoren und Prüfbedingungen entsprachen den Vorgaben der DIN EN 16516:2020-10. Um einen Rückschluss der in den Modellräumen erhobenen Daten auf spezifische Bauprodukte zu ermöglichen, wurde im Vorfeld eine Vielzahl an Bauprodukten sowohl einzeln als auch in Materialkonstruktionen (Außen-/Innenwände, Boden-/Deckenaufbauten) bezüglich Emissionen und Gerüchen untersucht. Diese Aufbauten repräsentierten verschiedene Formen von Baukonstruktionen. Parallel zu den Emissionsprüfungen wurde auf Basis der erhobenen Messdaten versucht, die Emissionsprozesse von Einzelmaterialeinheiten und Verbundkonstruktionen sowie die Raumluftqualität in den Modellräumen durch Modellsimulationen abzubilden. Dies erfolgte unter Verwendung bereits existierender Modellsysteme, die bei Bedarf punktuell modifiziert wurden. Die Simulationen berücksichtigten auch chemisch-physikalische Reaktionen in der Raumluft und potentieller Senkeneffekte, d. h. die temporäre Deposition schwerflüchtiger Verbindungen an Oberflächen. **Abbildung 1** gibt eine Übersicht über den Ablauf des Forschungsvorhabens und folglich über die durchgeführten Untersuchungsschritte.

**Abbildung 1: Übersicht über den Ablauf des Forschungsvorhabens.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die Forschungsergebnisse sollen dazu beitragen, das gesundheitliche Schutzniveau im Rahmen bauordnungsrechtlicher Anforderungen sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene zu erweitern und stärker zu verankern. Die erhobenen Daten sollen daher in die Weiterentwicklung bestehender Prüfschemata, wie dem AgBB-Bewertungsschema, einfließen. Weiterhin wurden die Ergebnisse des Vorhabens in verständlicher und anschaulicher Form in einem Leitfaden aufbereitet, mit dem Planern und Architekten Orientierungshilfen und Handlungsempfehlungen zur Auswahl von geeigneten Baumaterialien zur Verfügung gestellt werden.

## 2 Aktueller Stand der Wissenschaft

### 2.1 Bekannte Zusammenhänge zwischen Emissionen und Immissionen in Innenräumen

Die meisten Publikationen fokussieren auf Teilaspekte der in einem Innenraum ablaufenden und für die Abschätzung der Immission wichtigen Parameter und Mechanismen, wie beispielsweise auf den Einfluss der Luftwechselrate auf den TVOC-Wert (Kraus and Senitkova, 2019; Rackes and Waring, 2016), Abhängigkeiten zwischen Luftfremdstoff-Konzentrationen, Lüftung und Temperatur (Huangfu et al., 2019), Emissionsraten von VOC in Neubauten und nach Renovierungen in Abhängigkeit von der Lüftung (Holøs et al., 2019) oder der Beitrag einer Emissionsquelle hinsichtlich der Luftqualität (Jensen Zhang et al., 2019). Weiterhin wurde in einer Vielzahl an Studien die Luftqualität in Gebäuden durch Raumluftmessungen überprüft. Dabei war es u.a. von Interesse, ob die Verwendung von bekannten, teilweise als niedrig-emittierend zertifizierten Materialien bzw. Bauprodukten zu der Einhaltung von bestimmten Richtwerten oder Zielkonzentrationen in der Raumluft führte (Järnström et al., 2006). Über die Messung von festgelegten Substanzen in der Raumluft in verschiedenen Bauphasen energieeffizienter Holzrahmengebäude wurden Rückschlüsse auf bestimmte Emissionsquellen vorgenommen und in Bezug zu deren Emissionskinetik gesetzt (Plaisance et al., 2017).

Die Komplexität eines Innenraums unter Berücksichtigung aller Teilaspekte wurde kaum betrachtet. Die Ergebnisse einiger Vorhaben zeigten, dass Zusammenhänge nur schwer herzustellen sind und die Realexposition unter Nutzungsbedingungen nur durch Luftmessungen in Realräumen zu beurteilen ist (Höllbacher et al., 2015).<sup>1</sup>

### 2.2 Bislang existierende Modellsysteme und deren bisherige Anwendung

Hinsichtlich der Emissionen von organischen Verbindungen aus Baustoffen und Mobiliar wurden bislang verschiedene Modellierungsansätze entwickelt, die unterschiedliche Schwerpunkte und daher variierende Möglichkeiten und Grenzen aufweisen. Im Wesentlichen sind zwei Arten von Modellen zu differenzieren: (i) die empirischen Modelle und (ii) das Stofftransfermodell (Massentransportmodell). Das empirische Modell simuliert den zeitlichen Abfall der Emissionen durch Anpassen der experimentellen Daten. Dabei sind exponentielle Abklingfunktionen der ersten und zweiten Ordnung am gebräuchlichsten. Empirische Modelle können gut an existierende experimentelle Daten angepasst und dann zur Vorhersage bei ähnlichen Materialien genutzt werden, sie repräsentieren jedoch nicht den physikalischen Emissionsmechanismus. Eine Extrapolation eines empirischen Modells auf reale Gebäudebedingungen wäre daher mit großen Unsicherheiten behaftet.

Das Massentransfermodell nimmt dagegen an, dass VOC-Emissionen durch die anfängliche Konzentration flüchtiger Verbindungen im Material ( $C_0$ ), den Diffusionskoeffizienten ( $D$ ) und den Material-/Luft-Verteilungskoeffizienten ( $P$ ) als die drei entscheidenden Parameter gesteuert werden. Das Modell wurde ursprünglich zur Bewertung der Auswirkungen der VOC-Emissionen von Bauprodukten entwickelt und setzt Gleichgewichtsbedingungen an der Luft-Material-Grenzschicht sowie Fick'sche Diffusion innerhalb des Materials voraus (Little et al., 1994). Das Modell wurde unter Berücksichtigung des Stoffübergangswiderstands an der Luftphasengrenzschicht überarbeitet (Haghighat et al., 2002; Xu and Zhang, 2003, 2004). Basierend auf Ansätzen des Massentransfers wurden Modelle zur Berechnung von Emissionsraten aus Innenraumquellen

---

<sup>1</sup> Erarbeitung eines objektiven Verfahrens unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Holz und Holzwerkstoffen bei der Bewertung ihres Einflusses auf die Innenraumluftqualität – Teilprojekt 2: Vergleich von Untersuchungen in kleinen Prüfkammern bis 1 m<sup>3</sup> mit Großkammerversuchen. FKZ: 22005615, Laufzeit: 04/2016-12/2019.

entwickelt (Cox et al., 2002; Sparks et al., 1996). Auch wurde eine Vorgehensweise zur Abschätzung der entscheidenden Modellierungsparameter  $C_0$ ,  $D$  und  $P$  aus Kammerprüfungsdaten publiziert (Liu et al., 2021).

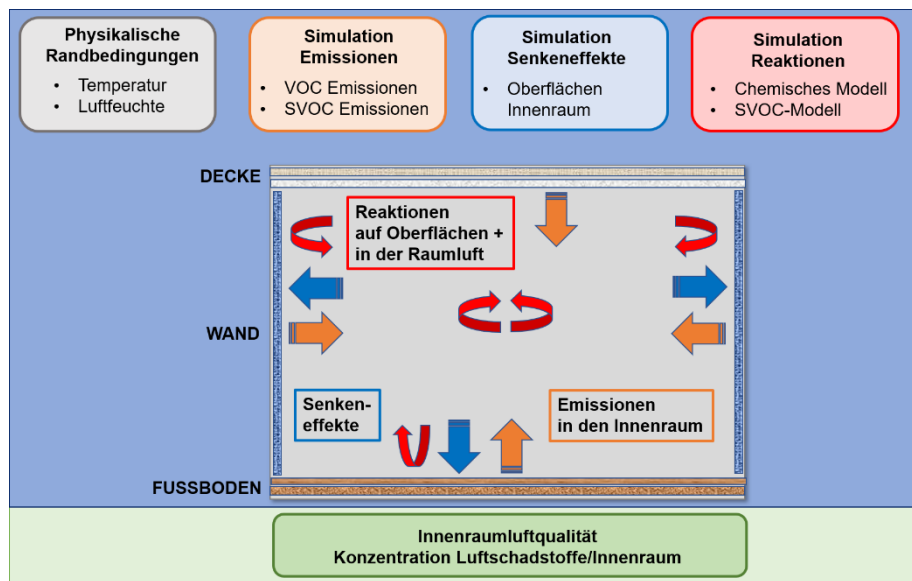
Für die vorliegende Fragestellung des Zusammenhangs zwischen Emissionen und Immissionen im Baubereich ist die Betrachtung der Emissionen von Baumaterialien prioritär. In Bezug auf die Emissionen von organischen Verbindungen aus Baustoffen und Mobiliar stehen zahlreiche Emissionsmodelle für verschiedene Arten von Materialien zur Verfügung, bei denen jedoch jeweils die Anwendbarkeit auf bestimmte Materialarten und die erforderlichen physikochemischen Kenndaten berücksichtigt werden müssen. Eine erste Übersicht über wichtige Publikationen bietet **Tabelle 1**.

**Tabelle 1: Detailmodelle zur Simulation von chemischen Reaktionen im Innenraum.**

| Modellname                                                                                                 | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>INCA</b><br><i>IN</i> teraction with <b>C</b> hemistry and <b>A</b> erosols                             | Zeitaufgelöstes Indoor-Air-Box-Modell, das die Hauptmechanismen in einem Innenraum berücksichtigt, einschließlich Emissionen, Gasphasenchemie, heterogene Chemie, Luftwechsel (Innen-/Außenluft), Deposition und Sorption (Mendez et al., 2015).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>INDCM</b><br><i>D</i> etailed <b>C</b> hemical <b>M</b> odel for <i>IN</i> door air                     | Indoor-Air-Box-Modell, das auf einem umfassenden Master Chemical Mechanism (MCM, v3.2) basiert. Das Modell behandelt den Abbau von 142 Substanzen aus der Gruppe der VOC und simuliert die Bildung von Hydroxyl (OH-) Radikalen in der Innenraumluft, die zur Bildung sog. sekundärer organischer Aerosole (SOA) beitragen. Das Modell beinhaltet Tausende an verschiedenen Reaktionen und Einzelsubstanzen (Carslaw, 2007; Carslaw et al., 2017; Carslaw et al., 2012).                                                                                             |
| <b>MOCCIE</b><br><i>M</i> odelling Consortium for <b>C</b> hemistry of <i>IN</i> door <b>E</b> nvironments | Umfassendes, integriertes physikalisch-chemisches Modell unter Berücksichtigung detaillierter Abläufe im Innenraum, einschließlich Gasphasen-, Partikelphasen- und Oberflächenchemie. Darüber hinaus werden auch Einflüsse der Nutzer (Aktivitäten) und des Gebäudes betrachtet. Kombination vier verschiedener Modelle, die verschiedene zeitliche Abläufe und Mechanismen betrachten: (i) Molekulardynamik, (ii) kinetische Prozesse, (iii) Gasphasenchemie und organische Aerosole, (iv) CFD (computational fluid dynamics)-Berechnungen (Shiraiwa et al., 2019). |

Die bisherigen Modellansätze fokussieren primär auf einzelne Aspekte, wie beispielsweise physikalische Randbedingungen, Emissionsmechanismen, Senkeneffekte und chemisch-physikalische Wechselwirkungen bzw. Reaktionen. Um die Simulierung der Innenraumluftqualität und folglich die Mechanismen in einem Referenzraum abbilden zu können, ist daher eine Verknüpfung verschiedener Modellansätze notwendig, wie in **Abbildung 2** dargestellt.

**Abbildung 2: Relevante Teilaspekte für die Simulation von Mechanismen in einem Innenraum.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 3 Erfahrungen von Kommunen mit Freigabemessungen

Im Rahmen von Interviews mit ausgewählten Kommunen in Deutschland wurden die bisherigen Erfahrungen mit sogenannten Freigabemessungen, d. h. mit Raumluftmessungen bei Bauvorhaben, abgefragt. Die Interviews wurden im Zeitraum Mitte September bis Mitte Oktober 2021 per Telefon oder Videokonferenz geführt. Den Gesprächen lag ein im Vorfeld erarbeiteter Fragebogen zugrunde, der das Grundgerüst darstellte, um zielgerichtet wichtige Parameter zu erfassen. In Abhängigkeit vom Interviewpartner und den individuellen Erfahrungen wurde der Fragebogen modifiziert und erweitert.

#### Interviews mit Kommunen zum Thema Freigabemessungen – Fragenkatalog

##### Durchführung und Umsetzung von Freigabemessungen (Innenraumluftmessungen)

- ▶ Bei Neubauten, Sanierungen, Beschwerdefällen?
- ▶ Vor oder während der Nutzung?
- ▶ In welcher Form werden die Messungen durchgeführt? Ablauf, ausführendes Labor, Bewertungsgrundlagen
- ▶ Existieren rechtliche Rahmenbedingungen oder landes-/kommunenspezifische Besonderheiten, die als Grundlage dienen?

##### Bekannte Schwierigkeiten und Auffälligkeiten

- ▶ Wurden bereits Probleme bezüglich der Innenraumluftqualität identifiziert?
- ▶ Wenn ja, in welchem Zusammenhang?
- ▶ Wurden die Schwierigkeiten von bestimmten Materialien bzw. Produkten hervorgerufen?

##### Lösungsansätze

- ▶ Welche Lösungsansätze standen zur Auswahl und welche Lösungswege wurden umgesetzt?
- ▶ Wie haben sich die am Bauvorhaben beteiligten Parteien über Lösungsmöglichkeiten informiert?

##### Erfahrungswerte

- ▶ Gibt es wesentliche Erfahrungen aus der praktischen Umsetzung?
- ▶ Worin bestehen aktuelle Probleme, Hürden und Hindernisse?
- ▶ Welche Schwierigkeiten gibt es bei der Berücksichtigung des Themas „Emissionen und Raumluftqualität“ in Planungsprozessen und in der praktischen Umsetzung?

Um einen repräsentativen Überblick zu erhalten und ggf. bundeslandspezifische Abweichungen zu erfassen, wurden fünf Kommunen im deutschen Bundesgebiet in folgenden Bundesländern ausgewählt:

- ▶ Niedersachsen
- ▶ Berlin/Brandenburg

- Hessen
- Thüringen
- Bayern

Darüber hinaus wurden bundesweit agierende Institute als Interviewpartner hinzugezogen:

- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) e.V.

In Absprache mit den Interviewpartnern werden die konkreten Kommunen und Ansprechpartner\*innen im vorliegenden Bericht nicht genannt.

Die Ergebnisse dienen als wichtige Ausgangsgrundlage für den zu erstellenden Leitfaden, um diesen anhand des durch die Kommunen formulierten Bedarfs sowie kommunizierter Fragen und derzeit bestehender Hürden und Hindernisse zielgerichtet auf die Bedürfnisse von Kommunen, Planer und Architekten und weiteren Personengruppen abzustimmen, die mit der Planung und Durchführung von Bauvorhaben betraut sind.

### **3.1 Derzeitige Umsetzung von Freigabemessungen in der Baupraxis**

Freigabemessungen, d. h. Messungen der Innenraumluftqualität, wurden in den ausgewählten Kommunen der oben genannten Bundesländer zum Zeitpunkt der Befragung vor Bezug von Neubauten oder vor Bezug von sanierten bzw. renovierten Bestandsgebäuden durchgeführt. Bei den Neubauten fokussierten sich die Messungen in Hessen und Berlin auf Schulen und Kindergärten, die zum Zeitpunkt der Befragung primär in Holzbauweise (Container-, Modulbauten) ausgeführt wurden. In Brandenburg und Bayern wurden Freigabemessungen bei Neubauten bzw. nach Sanierung öffentlicher bzw. städtisch genutzter Gebäude durchgeführt. In Thüringen fanden Untersuchungen ausschließlich im Rahmen von Beschwerdefällen statt, die dem Gesundheitsamt zugetragen wurden oder die diesem selbst im Rahmen ihrer Hygieneüberprüfung auffielen. In einigen Kommunen dienten die Messungen auch als Argumentationshilfe, falls es zukünftig zu Nutzerbeschwerden kommen sollte. Teilweise erfolgten Messungen auch bei Geruchsbeschwerden, wobei diese Fälle aufgrund des subjektiven Geruchseindrucks jeder einzelnen Person als schwer handhabbar gelten.

Der Messzeitpunkt lag zum Gesprächszeitpunkt in allen befragten Kommunen nach der Baufertigstellung und vor Bezug und somit auch vor der Möblierung. Nach Aussage der befragten Kommunen liegt dieser Zeitpunkt in einem Zeitfenster von frühestens 2-4 Wochen nach Fertigstellung und zwischenzeitlichem, starken Lüften. Der Innenausbau ist zu diesem Zeitpunkt in der Regel fertiggestellt. Die Durchführung der Messungen oblag entweder externen, akkreditierten Fachlaboren oder wurden durch das eigene Fachlabor vorgenommen. Die Festlegung der Messpunkte erfolgte meistens repräsentativ bei vor Ort-Begehungen oder anhand von Planungsunterlagen (z. B. Grundrisse). Sollten die Gebäude über eine raumluftechnische Anlage (RLT-Anlage) verfügen, war diese während der Messdurchführung üblicherweise in Betrieb oder wurde für eine erste Messung ausgeschaltet, um ein „Worst-Case-Szenario“ abzubilden. In diesem Fall erfolgte wenige Wochen später eine zweite Messung, bei der die RLT-Anlage in Betrieb war. In einigen der befragten Kommunen wurden Informations- bzw. Merkblätter über die Freigabemessungen erarbeitet, die den Planern transparente Hinweise über die notwendigen Messvorbereitungen, die Messdurchführung und die Bewertungsgrundlagen geben. In natürlich belüfteten Gebäuden wurden die Messvorbereitung und -durchführung in Anlehnung an die DIN EN 16000-5:2007-05 vorgenommen. Die Messungen umfassten in der Regel die Probenahme auf

flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Formaldehyd. Eine Probenahme auf Carbonsäuren wurde nur bei offensichtlichen Quellen, wie beispielsweise holzbasierten Werkstoffen, durchgeführt.

Als Bewertungsgrundlage dienten in fast allen befragten Kommunen die Referenz- und Richtwerte des Ausschusses für Innenraumrichtwerte (AIR), der am Umweltbundesamt (UBA) angesiedelt ist: das damalige TVOC-Leitwertkonzept (gültig bis 2024) und die Innenraumrichtwerte.

In Niedersachsen wurde zum Gesprächszeitpunkt Ende 2021 den Vorgaben des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) des Bundes gefolgt, das durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) entwickelt wurde. Das BNB-System war zu dieser Zeit gemäß BBSR in Berlin und Baden-Württemberg vollständig für den Landesbereich eingeführt, in Rheinland-Pfalz wurde es eingeführt, in Brandenburg und Schleswig-Holstein befand es sich in der Pilotphase. Die DGNB e. V. betrachtete ausschließlich Messungen, die im Rahmen der DGNB-Zertifizierung vorgenommen wurden. In wenigen Ausnahmefällen bezogen sich die befragten Kommunen auch auf Orientierungswerte für VOC der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) e. V. Dies war meist dann der Fall, wenn das ausführende Messlabor sich an diesen Werten orientierte.

Die Beurteilung der Messwerte wurde somit in den meisten Fällen bereits durch die ausführenden Labore vorgenommen. Eine Beurteilung der beauftragenden Kommunen erfolgte nicht, teilweise wurden die Daten bei großen Baumaßnahmen in umfassende Berichte eingebunden. Gesundheitsämter wurden nur in Ausnahmefällen bei Auffälligkeiten oder anhaltenden Schwierigkeiten bei der Reduzierung der Luftfremdstoffkonzentration hinzugezogen.

Weder in Deutschland noch in den einzelnen Bundesländern existierten im Gesprächszeitraum (09-10/2021) rechtliche Vorgaben bzw. Rahmenbedingungen für Freigabemessungen. Die Vorgaben erfolgten durch die Kommunen selbst über die erstellten Informations- bzw. Merkblätter oder die Vorgaben des BNB (verbindlich für Bundesgebäude) oder der DGNB e. V. Laut Auskunft der befragten Kommunen können auch die Innenraumrichtwerte des AIR zum Vertragsbestand gemacht werden und sind dann gegenüber dem Gebäudeersteller bzw. den ausführenden Firmen rechtlich bindend.

Eine Übersicht über die wichtigsten Angaben zur Durchführung und Umsetzung von Freigabemessungen (Innenraumluftmessungen) in den befragten Kommunen/Bundesländern bietet **Tabelle 2**.

**Tabelle 2: Übersicht über Durchführung und Umsetzung von Freigabemessungen in den befragten Kommunen/Bundesländern.**

| Bundesland    | Gebäudetypen                                                                                                                                                                             | Messzeitpunkt                                                                               | Messdurchführung                                                                                                                                                                                                         | Bewertungsgrundlage                                                                                                                             |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Niedersachsen | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bestandsbauten: Schadstoffsanierungen</li> <li>Neubauten: Raumzellenbauten</li> <li>Argumentationshilfe hinsichtlich Nutzerbeschwerden</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vor Nutzung</li> <li>Unmöblierter Zustand</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gemäß Steckbriefen des BNB</li> <li>Im Planungsprozess über Ausschreibungen verankert (Vereinbarung von Zielvereinbarungen)</li> <li>Repräsentativ ausgewählte Räume</li> </ul>   | Vorgaben des BNB                                                                                                                                |
| Berlin        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Neubauten von Schulen/Kindergärten (meist Holzmodulbauten)</li> </ul>                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vor Nutzung</li> <li>Unmöblierter Zustand</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Eigenes Labor</li> <li>(Informationsblatt über Freigabemessungen)</li> <li>Repräsentativ ausgewählte Räume</li> </ul>                                                             | Referenz- und Richtwerte des AIR <ul style="list-style-type: none"> <li>TVOC-Leitwertkonzept (bis 2024)</li> <li>Innenraumrichtwerte</li> </ul> |
| Brandenburg   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bestandsbauten öffentlicher Gebäude: Sanierung/Renovierung</li> <li>In Beschwerdefällen</li> </ul>                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vor Nutzung</li> <li>Unmöblierter Zustand</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Eigenes Labor</li> <li>(Informationsblatt über Freigabemessungen)</li> <li>Repräsentativ ausgewählte Räume</li> </ul>                                                             | Referenz- und Richtwerte des AIR <ul style="list-style-type: none"> <li>TVOC-Leitwertkonzept (bis 2024)</li> <li>Innenraumrichtwerte</li> </ul> |
| Hessen        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Neubauten von Schulen/Kindergärten (Holzbauweise: Container, Module)</li> <li>Nach Sanierungen (wegen Alter des Gebäudes)</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vor Nutzung</li> <li>Unmöblierter Zustand</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Akkreditierte Messlabore</li> <li>Gebäude mit Lüftungsanlage: in Betrieb</li> <li>Gebäude ohne Lüftungsanlage: Vorbereitung in Anlehnung an DIN EN ISO 16000-5:2007-05</li> </ul> | Referenz- und Richtwerte des AIR <ul style="list-style-type: none"> <li>TVOC-Leitwertkonzept (bis 2024)</li> <li>Innenraumrichtwerte</li> </ul> |
| Thüringen     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ausschließlich bei Beschwerdefällen</li> </ul>                                                                                                    | -                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Eigenes Labor</li> </ul>                                                                                                                                                          | Referenz- und Richtwerte des AIR <ul style="list-style-type: none"> <li>TVOC-Leitwertkonzept (bis 2024)</li> <li>Innenraumrichtwerte</li> </ul> |

| Bundesland | Gebäudetypen                                                                                                                                                                                                                   | Messzeitpunkt                                                                                                           | Messdurchführung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Bewertungsgrundlage                                                                                                                                                                                                                          |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bayern     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nach Generalsanierungen bzw. Neubau städtisch genutzter Gebäude</li> <li>• Büro-/Verwaltungsgebäude ohne Lüftungsanlage</li> <li>• Schulen/Kindergärten mit Lüftungsanlage</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nach Baufertigstellung, vor Nutzung</li> <li>• Unmöblierter Zustand</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akkreditierte Messlabore bzw. eigenes Labor (je nach Kommune)</li> <li>• 2 Messungen, Messung 1 ohne Lüftungsanlage in Betrieb („worst-case“)</li> <li>• Repräsentativ ausgewählte Räume</li> <li>• Stadt München: Merkblatt für Freigabemessungen und Bauleitfaden (Informationen über Verwendung von Materialien und Bewertungsgrundlage bei Freigabemessungen)</li> </ul> | <p>Referenz- und Richtwerte des AIR</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• TVOC-Leitwertkonzept (bis 2024)</li> <li>• Innenraumrichtwerte</li> <li>• Freigabe bei Stufe 1 oder 2</li> <li>• Überschreitung RW II unzulässig</li> </ul> |
| DGNB e.V.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neubauten</li> </ul>                                                                                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spätestens 4 Wochen nach Baufertigstellung und Möblierung</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akkreditierte Messlabore</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | DGNB System, Kriterienkatalog Innenräume                                                                                                                                                                                                     |
| BBSR       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neubauten öffentliche Gebäude</li> </ul>                                                                                                                                              | -                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akkreditierte Messlabore</li> <li>• Gemäß Nutzung (mit/ohne Lüftungsanlage)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <p>Referenz- und Richtwerte des AIR</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• TVOC-Leitwertkonzept (bis 2024)</li> <li>• Innenraumrichtwerte</li> <li>• CO<sub>2</sub>-Wert</li> </ul> <p>Gemäß BNB, Steckbrief 3.1.3</p>                 |

## 3.2 Bekannte Schwierigkeiten und Auffälligkeiten

In den Interviews wurden von den befragten Kommunen ähnlich gelagerte Schwierigkeiten und Auffälligkeiten geschildert.

### 3.2.1 Neubauten Bildungsbereich: Holzmodul-/Holzcontainerbauten

Neubauten von Bildungseinrichtungen (Schulen, Kindergärten) wurden im Gesprächszeitraum (09-10/2021) verstärkt in Holzmodul- bzw. Holzcontainerbauweise errichtet. In den Innenräumen wurden häufig erhöhte Werte der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen, des sog. TVOC-Wertes, nachgewiesen. Diese erhöhten Messwerte waren primär auf die Substanzgruppen der Terpene, Aldehyde und Carbonsäuren als Leitkomponenten zurückzuführen, bei denen es sich um charakteristische Emittenten von Vollhölzern und holzbasierten Werkstoffen handelt. Auch hinsichtlich des menschlichen Wohlbefindens wurde das Innenraumklima in diesen Holzbauten als problematisch geschildert. Bei Modul- und Containerbauten handelt es sich um eine schnelle, günstige Bauweise, die häufig als Passivbau ausgelegt ist. Da es sich um keinen Massivbau handelt, kam es nach Aussage der befragten Kommunen in diesen Bauten zu einer schnellen Erwärmung der Innenräume bereits ab dem Frühjahr. Wurden die Gebäude im Winter gelüftet, kühlten sie schnell aus und ließen sich kaum wieder erwärmen. In Hessen wurden diese Gebäude daher standardmäßig mit mobilen Lüftungsgeräten ausgestattet, die Außenluft in den Raum leiten und flexibel eingesetzt werden können (ein Gerät pro Raum, repräsentativ im Gesamtgebäude verteilt). Die Geräte ermöglichten allerdings keine Kühlung.

In Berlin verfügten Kindergärten dagegen immer über eine raumluftechnische (RLT-)Anlage, so dass bis zum Zeitpunkt des Interviews keine Auffälligkeiten dokumentiert wurden. Dagegen wurde von Schwierigkeiten bei Freigabemessungen (hoher TVOC-Wert, Richtwert-Überschreitungen) in Schulen berichtet. Angesichts dieser waren mehrere Wiederholungsmessungen erforderlich. Als Ursache für die geschilderten Beschwerden wurden eingeschränkte Lüftungsmöglichkeiten genannt, da in den Schulen die Fenster nur gekippt werden konnten, eine Stoßlüftung war daher nicht möglich. Auch hätten eingebaute Regensensoren eine wirksame Lüftung erschwert, da die Fenster bei Regen automatisch schließen.

Mit RLT-Anlagen ausgestattete Gebäude erzielten aufgrund einer besseren Innenraumluftqualität gemäß den Erfahrungen der befragten Kommunen bessere Messwerte als manuell belüftete Gebäude.

### 3.2.2 Schwierigkeiten hinsichtlich bestimmter Materialien bzw. Produkte

Für Schwierigkeiten mit bestimmten Baumaterialien und Produkten wurden in Bezug auf Holzmodul-/Holzcontainerbauten von Bildungseinrichtungen Linoleumfußböden und Klebstoffe von Bodenbelägen genannt. Allgemein wurden Fußbodenaufbauten als schwer einschätzbar eingestuft, da die Aufbauten bei Emissionsprüfungen von Einzelmaterialien nicht abgebildet werden. Somit könnten emissionsarme Materialien im Verbund dennoch hohe Emissionen freisetzen. Auch wurde von Geruchsauffälligkeiten bei Bodenbelagserneuerungen berichtet. In der Konsequenz wurde der Bodenbelag entweder ausgebaut oder alte Materialien wurden abgeschliffen mit einem anschließenden Neuaufbau des Belags. Ein Neuaufbau wurde insbesondere dann vorgenommen, wenn eine nachhaltige Reduzierung der Fehlgerüche nicht in absehbarer Zeit möglich war. Beispielsweise wurde im Fall einer Freisetzung von 2-Chlorpropan aus Dämmplatten im Bodenaufbau dieser bis zur Betondecke aus- und wieder neu aufgebaut. Zusätzlich wurden verstärkte Lüftungsmaßnahmen umgesetzt. Als weitere, problematische Emissionsquellen nannten die befragten Kommunen neutral-vernetzende Silikondichtmassen aufgrund ihrer Freisetzung von Ketoximen oder Aldoximen sowie die Emission von Formaldehyd aus Akustikplatten

oder perforierten Holzwerkstoffen. Auch der Eintrag von Styrol und Essigsäure wurde in der Vergangenheit auf bestimmte Materialien oder Verbundsysteme, wie Fußboden- oder Wandaufbauten, zurückgeführt. In einem Einzelfall wurde für die Überschreitung des geltenden Richtwerts II von Styrol eine Polyurethan (PU)-Dichtmasse als Quelle vermutet. Als wichtige, die Innenraumluftqualität maßgeblich beeinflussende Emissionsquelle wurden zusätzlich die Kombination von Holzkonstruktionen mit Oberflächenbehandlungen, wie Öle, Wachse oder Lasuren, ebenso wie Brandschutz- und Korrosionsbeschichtungen genannt.

#### **3.2.2.1 Bestandsbauten**

Auch in Bestandsbauten wurde von Auffälligkeiten in Zusammenhang mit Linoleumfußböden berichtet. Weiterhin kam es in einigen Kommunen zu Problemen aufgrund von teerhaltigen Klebstoffen im Fußbodenaufbau sowie zur Freisetzung aromatischer Verbindungen (Kresol, Phenol) durch einen PVC-Bodenbelag. Auch Abbauprodukte von eingesetzten Weichmachern, wie 2-Ethyl-1-hexanol, wurden als bekannte Problematik aufgeführt.

#### **3.2.2.2 Allgemeine Aspekte**

Allgemein wurde das während Bauvorhaben häufig enge Zeitfenster zwischen Fertigstellung und Nutzungsbeginn als problematisch für die Vorbereitung und Durchführung von Freigabemessungen erachtet. Eine wichtige Komponente stellte der häufig hohe Zeitdruck im Bauablauf dar, durch den sowohl notwendige Trocknungs- und Aushärtungszeiten von verbauten Materialien und Produkten als auch Lüftungszeiten stark verkürzt oder missachtet wurden.

Weiterhin stellten sich einige Kommunen die Frage nach dem richtigen Zeitpunkt für eine Freigabemessung, da die Materialien bzw. Produkte nicht zeitgleich, sondern zu unterschiedlichen Zeiten und damit gestaffelt eingebracht werden. Außerdem ist das Emissionsverhalten bestimmter Materialien und Produkte bekannt, sodass das abklingende Emissionsverhalten der Werkstoffe bei der Messplanung Berücksichtigung finden sollte.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Umsetzung stellten in verschiedene Bauabschnitte unterteilte Bauvorhaben dar, da zum Zeitpunkt der Messung einige Bauabschnitte unter Umständen bereits in Nutzung waren.

Weiterhin wurde von Hindernissen bei der praktischen Umsetzung der Freigabemessungen berichtet. Nicht immer stießen die Kommunen bei den Nutzern auf Verständnis für die notwendigen Messvorbereitungen, sodass diese nicht oder nur eingeschränkt umgesetzt werden konnten. Teilweise wurden trotz Informations- bzw. Merkblätter die ausgewählten Räume als Lager für Mobiliar verwendet und Absprachen zur vorherigen Lüftung der Räume nicht eingehalten. Die Messvorbereitungen wurden von einigen Nutzern auch als zusätzliche Arbeitsbelastung betrachtet. In anderen Fällen wurde das Thema Freigabemessung hinsichtlich der Innenraumluftqualität emotional bewertet, so dass die Messungen unter Umständen am Wochenende außerhalb der Nutzung durchgeführt wurden, z. B. außerhalb des schulischen Betriebs. Darüber hinaus schätzen einige Kommunen Messungen an Sommertagen aufgrund der Sonneneinstrahlung in den Holzmodul-/Holzcontainerbauten als problematisch ein, da die Sonneneinstrahlung, ebenso wie ein Beheizen im Winter, zu einer Bauteilerwärmung am Tag vor der Messung führen kann.

### **3.3 Lösungsansätze**

In den Interviews sind keine einheitlichen Vorgehensweisen oder Strategien hinsichtlich praktizierter Lösungsansätze deutlich geworden. Sollte eine Freigabe nicht erfolgen können, wurden in den befragten Kommunen Nachmessungen meistens nach drei bis sechs Monaten oder längstens innerhalb eines Jahres vorgenommen, dazwischen war ein konsequentes Lüftungskonzept umzusetzen, um die Konzentrationen von Einzelsubstanzen, Substanzgruppen oder des TVOC-

Wertes zu reduzieren. Das Lüftungskonzept sah meistens eine Lüftung in bestimmten Zeitintervallen oder die Einschaltung der RLT-Anlage vor, insofern vorhanden.

Alle Kommunen nannten als allgemeinen Lösungsansatz das Implementieren eines Lüftungskonzeptes, das für die individuelle Situation erarbeitet und empfohlen wird. Nachmessungen erfolgten meistens nach drei bis sechs Monaten oder längstens innerhalb eines Jahres. Hatte das Lüftungskonzept langfristig zu keiner Verbesserung der Innenraumluftqualität beigetragen, wurden starke Emissionsquellen durch einen Austausch des betreffenden Materials bzw. Produkts entfernt.

Aufgrund des problematischen Innenraumklimas in Holzmodul- bzw. Holzcontainerbauten für Schulen und Kindergärten wurde in Hessen die Notwendigkeit gesehen, die Gebäude mit direktanzeigenden Messgeräten für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Temperatur auszustatten. Die Nutzer werden in Terminen vor Ort über die Bauweise und die damit verbundenen Besonderheiten aufgeklärt und erhalten Handlungsanweisungen zum Bedienen der Messgeräte und zu einem angepassten Lüftungsverhalten.

Einige Kommunen nannten bei auffälligen Messwerten auch die Versuche, eine Quellensuche auf Basis von Sicherheitsdatenblättern durchzuführen. Dies wurde allerdings als sehr mühsam und zeitaufwändig geschildert, da die Informationen erst bei den ausführenden Unternehmen angefragt werden mussten. Entsprechende Datenblätter wurden gemeinsam mit Unterlagen zu Qualitätszeichen bei einigen kommunalen Bauvorhaben zur Detailplanung herangezogen, um möglichst auf kritische Materialien und Produkte zu verzichten. Dies musste allerdings in der (Ausführungs-)Planung berücksichtigt werden und führte daher ggf. zu einem erhöhten Kontrollaufwand auf Seiten der Bauleitung, da hier die Kontrolle der gelieferten Materialien und Produkte sehr wichtig ist (entspricht die Lieferung auch der Bestellung?).

Durchaus als positiv wurden die durch die pandemische Situation in den Jahren 2020 bis 2022 bedingten Begleitumstände bewertet. Diese erlaubten längere Zeiträume während und nach des Bauprozesses und haben zu einer höheren Sensibilisierung und Aufmerksamkeit gegenüber der Thematik geführt, wodurch eine verstärkte Lüftungstätigkeit auch über lange Zeiträume realisiert werden konnte.

### **3.4 Bisherige, wesentliche Erfahrungswerte**

Auf Basis ihrer bisherigen Erfahrungen nannten die befragten Kommunen das Erstellen von Checklisten, Informations-/Merkblättern und Leitfäden als wichtige Instrumente, um über das Thema aufzuklären und Bauleiter, Planer und Architekten gezielt zu informieren. Diese erschienen einigen Kommunen als meistens wenig interessiert. Häufig hatten die Kommunen den Eindruck, dass Erfahrungswerte und Kenntnisse bezüglich der verwendeten Materialien und ihres Emissionspotentials fehlten. Andere Gesprächspartner erlebten sie allerdings als zunehmend sensibilisiert, da die Relevanz des Gesundheitsschutzes im Bauwesen zunimmt. Allerdings erschienen den meisten Planern und Architekten die mit dem Themenkomplex „Emissionen – Raumluftqualität“ verbundenen Kosten als zu hoch. Gute Erfahrungen wurden mit Gesprächsgruppen gemacht, bei denen alle bauverantwortlichen Partner eingebunden und auch Vertreter der Politik beteiligt waren. In diesen Gremien wurden verbindliche Grundlagen zur Implementierung des Themas in Bauvorhaben entwickelt und festgelegt sowie feste Ansprechpartner\*innen benannt, sodass der Prozess für alle Beteiligten transparent war und Zuständigkeiten klar definiert werden konnten. Die Einbindung aller Parteien war daher für alle befragten Kommunen eine wichtige Grundlage, um über das Thema aufzuklären und die Akzeptanz zu erhöhen.

Als ein weiteres Instrument, um dem Thema Gewicht zu verleihen und Freigabemessungen mit Nachdruck umzusetzen, wurde die Übertragung der Messkosten auf den Bauunternehmer genannt, wenn es zu Problemen und Auffälligkeiten kommt. Dies führt im Prozess zu einem hohen Druck und einer Auseinandersetzung mit dem Thema. Auch Nutzer empfinden den Erfahrungen der befragten Kommunen zufolge das Thema Materialemissionen und Raumluftqualität teilweise als störend.

In Bayern (Stadt München) wurde ein sog. Bauleitfaden erarbeitet, der einen ökologischen Kriterienkatalog für den Bau von Kindergärten, Schulen und anderen öffentlichen Einrichtungen enthält. Er ist allerdings nicht für den Wohnungsbau vorgesehen. Die im Bauleitfaden enthaltenen materialökologischen Vorgaben wurden in das Leistungsverzeichnis der Bauplaner aufgenommen.

Auch wenn Holzbauten aufgrund der aktuellen Schwerpunkte auf Energieeinsparung und Nachhaltigkeit politisch gewollt sind, wurden Holzmodul- bzw. Holzcontainerbauten aufgrund der geschilderten Schwierigkeiten und Auffälligkeiten teilweise als problematisch und für die Nutzung als Bildungseinrichtung nur begrenzt geeignet empfunden, da die Nutzung der Räume stoßweise erfolgt (Räume leer oder für kurze Zeiträume mit vielen Personen belegt). Außerdem ist aus Sicht einzelner Kommunen die Passivbauweise schwierig in der Handhabung, da viel Technik verbaut ist und es somit eines funktionierenden Netzwerkes bedarf, um bei Versagen der Technik zeitnah reagieren zu können. Die bekannten Eigenemissionen von holzbasierten Werkstoffen wurden seitens der Kommunen als Hemmnis gegenüber der Realisierung von Holzbauten seitens der Planer und Architekten empfunden.

## 4 Emissionskammermessungen von Baumaterialien, Verbundkonstruktionen und Modellräumen

Um Informationen über mögliche Änderungen im Emissionsverhalten von Bauprodukten als Einzelmaterial und in der verbauten Konstruktion zu erhalten, wurden gemäß **Abbildung 1** zuerst Baumaterialien und -produkte einzeln (siehe **Abschnitt 4.2.1**) und anschließend in repräsentativ ausgewählten Verbundaufbauten (Wand, Boden, Decke) auf Emissionen geprüft (siehe **Abschnitt 4.2.2**). In einem dritten Schritt wurden die Wand-, Boden- und Deckenelemente von drei repräsentativ ausgewählten Baukonstruktionen in Form von Modellräumen hinsichtlich der entstehenden Luftqualität untersucht (siehe **Abschnitt 4.2.3**).

### 4.1 Auswahl der zu untersuchenden Prüfkörper

Sowohl die Einzelmaterialien als auch die Verbundaufbauten und Modellräume wurden in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern (Vertreter\*innen von Architektur- und Planungsbüros sowie von Bauunternehmen) und dem projektbegleitenden Fachbeirat (Vertreter\*innen städtischer Baureferate bzw. Baumanagements) ausgewählt und festgelegt. Die Kooperationspartner und Mitglieder des Fachbeirats stellten umfassende Informationen über in jüngster Vergangenheit umgesetzte Gebäudekonstruktionen und die jeweils eingesetzten Werkstoffe zur Verfügung.

In Rücksprache mit dem Umweltbundesamt (UBA) wurden folgende Bauformen berücksichtigt:

- ▶ Öffentlicher Bau (Büro/Verwaltung)
- ▶ Modulares Bauen (Schulen/Kindergärten)
- ▶ Wohnungsbau, Großprojekte

Kleinwohnungsbau sowie Ein- und Zweifamilienhäuser wurden nicht betrachtet.

#### 4.1.1 Werkstoffe und Bauprodukte (Einzelmaterialien)

Für die Emissionsprüfung von Einzelmaterialien wurden Baumaterialien und -produkte ausgewählt, die üblicherweise in den o. g. Bauformen Verwendung finden.

Die Werkstoffe wurden ausschließlich aus dem allgemeinen Handel bezogen (Baumaterialhändler, Baumärkte, etc.). Es lagen daher weder Informationen über das Produktionsdatum noch über die Lagerdauer und die Lagerbedingungen der Materialien beim jeweiligen Zwischenhändler vor. Der Ankauf erfolgte jeweils zeitnah vor Beginn der Emissionsprüfung bzw. vor Konstruktion der Verbundelemente und Modellräume, um längere Lagerzeiten im Fraunhofer WKI zu vermeiden. Eine Neuanschaffung bot darüber hinaus die Möglichkeit, Wiederholungsmessungen der neu gekauften Materialien durchzuführen und somit die Messdaten auf Reproduzierbarkeit zu überprüfen.

Darüber hinaus berücksichtigte die Materialauswahl Materialien mit und ohne Qualitätszeichen, um mögliche Unterschiede hinsichtlich des Emissionsverhaltens feststellen zu können. Qualitätszeichen geben den Verbraucher\*innen einen Hinweis, dass damit ausgezeichnete Produkte bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen, beispielsweise an Inhaltsstoffe oder an das Emissionsverhalten. Diese Qualitätsanforderungen sind in den jeweiligen Vergabegrundlagen der Qualitätszeichen verankert. Die meisten dieser Kennzeichnungen sind freiwillig.

Abweichend zu den im Vorhaben ursprünglich geplanten 40 Einzelmaterialien wurden insgesamt 56 Werkstoffe und Produkten auf Emissionen gemäß des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) mit NIK-Werte-Liste (2020) untersucht und bewertet.

**Tabelle 3** gibt eine Übersicht über die ausgewählten Materialien und Werkstoffe, die in anonymer Form ohne Nennung von Produktnamen und herstellenden Unternehmen und unterteilt nach Werkstoffgruppen aufgeführt werden.

**Tabelle 3: Übersicht über die für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählten Einzelmaterialien und Werkstoffe, aufgelistet nach Werkstoffgruppen.**

| Materialbezeichnung                            | Abkürzung       | Qualitätszeichen                                                                 | Inhaltsstoffe gemäß Herstellerangaben                                                      |
|------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vollholz</b>                                |                 |                                                                                  |                                                                                            |
| Konstruktionsvollholz /Lattung, 160 mm         | KVH/160         | -                                                                                | Fichte/Tanne                                                                               |
| Konstruktionsvollholz /Lattung, Tanne 60 mm    | KVH/60/80       | -                                                                                | -                                                                                          |
| Konstruktionsvollholz /Lattung, Fichte, 160 mm | KVH Fichte/160  | -                                                                                | -                                                                                          |
| <b>Holzbasierte Werkstoffe</b>                 |                 |                                                                                  |                                                                                            |
| OSB-Platte 1                                   | OSB-1.1         | AgBB                                                                             | -                                                                                          |
| OSB-Platte 1                                   | OSB-1.2         | AgBB                                                                             | -                                                                                          |
| OSB-Platte 2                                   | OSB-2           | Blauer Engel (DE-UZ 76)<br>Sentinel Haus Institut (Produkte aus Holzwerkstoffen) | Rundholz (Nadelholz), unbehandelt, ent-rindet; PMDI (polymeres Diphenylmethan-diisocyanat) |
| OSB-Platte 3                                   | OSB-3           | Blauer Engel (DE-UZ 76)<br>Sentinel Haus Institut (Produkte aus Holzwerkstoffen) | Rundholz (Nadelholz), unbehandelt, ent-rindet; PMDI (polymeres Diphenylmethan-diisocyanat) |
| Massivholzplatte Fichte                        | Massiv-P Fi     | E1 gemäß DIN EN 13986                                                            | Fichte                                                                                     |
| 3-Schichtplatte Fichte                         | 3-Schicht Fi    | -                                                                                | -                                                                                          |
| Sperrholzplatte Birke                          | Sperr-P1 Birke  | -                                                                                | Birke                                                                                      |
| Sperrholzplatte Pappel                         | Sperr-P2 Pappel | -                                                                                | Pappel                                                                                     |

| Materialbezeichnung          | Abkürzung           | Qualitätszeichen                                                                                                                | Inhaltsstoffe gemäß Herstellerangaben                                                                                                                                                        |
|------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Spanplatte 1                 | Span-P1             | Blauer Engel (DE-UZ 76)<br>Sentinel Haus Institut (Produkte aus Holzwerkstoffen)<br>Qualitätszeichen<br>Holzwerkstoffe: Premium | Vorwiegend Nadelholz; Bindemittel (UF, MUF, PF); Paraffine; Harnstoff; Brandhemmer                                                                                                           |
| Spanplatte 2                 | Span-P2             | E1 gemäß DIN EN 13986                                                                                                           | -                                                                                                                                                                                            |
| <b>Dämmstoffe</b>            |                     |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                              |
| Steinwolle                   | Steinwolle          | Blauer Engel (DE-UZ 132)<br>Sentinel Haus Institut (Dämmstoffe)                                                                 | Steinwolle (Diabas, Basalt); harnstoffmodifiziertes Phenol-Formaldehyd-Harz (PF) mit Glukose; Mineralöl; Haftvermittler                                                                      |
| Holzfaserdämmplatte 120 mm   | Holzfaser/120       | Französisches VOC-Label: A+, IBR                                                                                                | -                                                                                                                                                                                            |
| Holzfaserdämmplatte 40 mm    | Holzfaser/40        | IBR (Institut für Bau-biologie Rosenheim GmbH)                                                                                  | -                                                                                                                                                                                            |
| Fassadendämmplatte           | Glaswolle           | Blauer Engel (DE-UZ 132)                                                                                                        | Glaswolle (Recyclingglas, Dolomit, Lalk, Sand, Soda, Borate); harnstoffmodifiziertes Phenol-Formaldehyd-Harz (PF) oder pflanzliche Stärke; Mineralöl; Haftvermittler; Hydrophobierungsmittel |
| Spannfilz                    | Mineralwolle        | Blauer Engel (DE-UZ 132), Sentinel Haus Institut (Dämmstoffe)                                                                   | -                                                                                                                                                                                            |
| Mehrzweckdämmplatte          | EPS                 | -                                                                                                                               | Extrudiertes Polystyrol                                                                                                                                                                      |
| Trennwandplatte              | Steinwoll-P         | RAL (Reichsausschuss für Lieferbedingungen) Gütezeichen, DGNB, Blauer Engel (DE-UZ 132)                                         | -                                                                                                                                                                                            |
| Dämmunterlage                | PU-Trittschall      | Blauer Engel (DE-UZ 156)                                                                                                        | -                                                                                                                                                                                            |
| Hanf Nadelfilzstreifen 10 mm | Hanf-Trittschall/10 | -                                                                                                                               | -                                                                                                                                                                                            |
| Hanf Nadelfilzstreifen 5 mm  | Hanf-Trittschall/5  | -                                                                                                                               | -                                                                                                                                                                                            |
| <b>Gipswerkstoffe</b>        |                     |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                              |
| Gipskartonplatte             | GK                  | Französische Verordnung A+, AgBB                                                                                                | Gips; Karton; Stärke; Tenside; Faserzusatz; mineralische Zuschlagsstoffe                                                                                                                     |

| Materialbezeichnung                    | Abkürzung       | Qualitätszeichen                                                                                                                                         | Inhaltsstoffe gemäß Herstellerangaben     |
|----------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Gipsfaserplatte                        | GF              | eco-INSTITUT-Label (mineralische Bauprodukte)<br>Französisches VOC-Label: A+                                                                             | Recycelte Papierfasern; Gips              |
| <b>Putze</b>                           |                 |                                                                                                                                                          |                                           |
| Gipsputz                               | Gipsputz        | Sentinel Haus Institut (Sonstige Bauprodukte), IBR                                                                                                       | -                                         |
| Lehmputz                               | Lehmputz        | eco-INSTITUT-Label                                                                                                                                       | -                                         |
| <b>Bodenbeläge/<br/>Beschichtungen</b> |                 |                                                                                                                                                          |                                           |
| Vinyl                                  | Vinyl-1         | E1 gemäß DIN EN 13986<br>Französisches VOC-Label: A+                                                                                                     | -                                         |
| Vinyl                                  | Vinyl-2         | Blauer Engel (DE-UZ 120), Französisches VOC-Label: A+, M1-Emission Classification of Building Materials, Nordic Ecolabel, Österreichisches Umweltzeichen | Bodenbelag ohne PVC, Linoleum             |
| Laminat                                | Laminat         | Blauer Engel (DE-UZ 176), E-Klassifizierung: E1                                                                                                          | -                                         |
| Parkett Eiche                          | Parkett Eiche-1 | AgBB                                                                                                                                                     | -                                         |
| Parkett Eiche                          | Parkett Eiche-2 | Blauer Engel (DE-UZ 176)<br>Sentinel Haus Institut<br>frz. VOC-Label: A+<br>E1 gemäß DIN EN 13986                                                        | -                                         |
| Nadelfilz                              | Nadelfilz       | GUT-Prüfsiegel                                                                                                                                           | Polypropylen                              |
| Teppichboden                           | Velours         | Französisches VOC-Label: A+, GUT-Prüfsiegel                                                                                                              | Polyamid                                  |
| Epoxidharz-Beschichtung                | Epoxidharz      | -                                                                                                                                                        | -                                         |
| Bodenausgleichsmasse                   | Bodenausgleich  | Französisches VOC-Label: A+, GEV-EMI-CODE: EC1 Plus                                                                                                      | Spezialzement mit Zusätzen, 1-komponentig |

| Materialbezeichnung                   | Abkürzung             | Qualitätszeichen                                                                                                          | Inhaltsstoffe gemäß Herstellerangaben                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estrichbeton                          | Estrichbeton          | GEV-EMICODE: EC1 Plus                                                                                                     | -                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Wandfarben</b>                     |                       |                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                  |
| Acryldispersionsfarbe                 | Acryldispersion-F     | Blauer Engel (DE-UZ 102)                                                                                                  | Polyacrylatharz; Alkaliwasserglas; Silikate; Titandioxid; Calciumcarbonat; Additive; Wasser                                                                                                                                      |
| Mineralsilikatfarbe                   | Mineralsilikat-F      | Naturplus, TÜV NORD Prüfzeichen                                                                                           | Kaliwasserglas mit organischen Zusätzen                                                                                                                                                                                          |
| Mineralfarbe                          | Dispersions-silikat-F | Französisches VOC-Label: A+, TÜV SÜD Prüfzeichen, Österreichische Umweltzeichen, Umwelt-Etikette Schweizer Stiftung Farbe | Polymerdispersion; anorganisches Bindemittel; Titandioxid; mineralische Füllstoffe; silikatische Füllstoffe; Wasser; Alkohole; Hydrophobierungsmittel; Verdicker; Stabilisatoren; Entschäumer; Netzmittel                        |
| Dispersionsfarbe                      | Dispersion-F          | Französisches VOC-Label: A+, TÜV SÜD Prüfzeichen, Umwelt-Etikette Schweizer Stiftung Farbe                                | Polymerdispersion; Titandioxid; mineralische Füllstoffe, silikatische Füllstoffe; Wasser; Dispergiermittel; Verdicker; Entschäumer; Netzmittel; Lagerungsschutzmittel auf Basis BIT/ZPT; Lagerungsschutzmittel auf Basis CIT/MIT |
| <b>Klebstoffe</b>                     |                       |                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                  |
| Dispersionsklebstoff                  | Dispersions-K         | Blauer Engel (DE-UZ 113)<br>GEV-EMICODE: EC1                                                                              | Kunstharz-Dispersion                                                                                                                                                                                                             |
| Parkettklebstoff                      | Polymer-K             | Blauer Engel (DE-UZ 113)<br>GEV-EMICODE: EC1 <sup>Plus</sup>                                                              | Silanmodifizierte Polymere (SMP); mineralische Füllstoffe, Additive                                                                                                                                                              |
| <b>Dichtmassen</b>                    |                       |                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                  |
| Silikon                               | Silikon               | -                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                                                                                |
| Acryl                                 | Acryl                 | Blauer Engel (DE-UZ 123)<br>GEV-EMICODE: EC1 <sup>Plus</sup>                                                              | 1-Komponenten-Acryldispersion                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Bauplatten</b>                     |                       |                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                  |
| Zementgebundene Leichtbeton-Bauplatte | ZLB-P                 | eco-INSTITUT-Label (mineralische Bauprodukte)<br>Französisches VOC-Label: A+ IBR                                          | Portlandzement; Steinkohlenflugasche; Blähton; Blähtgasgranulat; Hilfs-/Zusatzstoffe; Hydrophobierungsmittel; Fließmittel; Stabilisator; Luftporenbildner                                                                        |
| Lehmbauplatte                         | Lehmbau-P             | natureplus                                                                                                                | Baulehm; Ton; Perlite; Schilfrohr; Hanf; Jutegewebe                                                                                                                                                                              |

| Materialbezeichnung               | Abkürzung         | Qualitätszeichen                                                                                    | Inhaltsstoffe gemäß Herstellerangaben |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Zementputzträgerplatte Außenwände | Zement-P          | IBR                                                                                                 |                                       |
| <b>Folien</b>                     |                   |                                                                                                     |                                       |
| Dampfbremsfolie                   | Dampf-bremse      | -                                                                                                   | Polypropylen; Polyethylen-Copolymer   |
| Baufolie                          | Baufolie          | -                                                                                                   | -                                     |
| <b>Spachtelmassen</b>             |                   |                                                                                                     |                                       |
| Füll-/Feinspachtel                | Feinspachtel      | Französische VOC-Verordnung A+, EC1+ Emicode, AgBB, belgische Verordnung, DE-UZ 113, Prüfsiegel IBR | -                                     |
| Lehmfüll-/flächen-spachtel        | Lehm-spachtel     | eco-INSTITUT                                                                                        | -                                     |
| <b>Schüttungen/<br/>Einstreu</b>  |                   |                                                                                                     |                                       |
| Trockenschüttung                  | Trocken-schüttung | eco-INSTITUT                                                                                        | -                                     |
| Weißkalkhydrat                    | Weißkalk          | -                                                                                                   | -                                     |
| Lehm-Holz-Trocken-schüttung       | Lehmschüttung     | -                                                                                                   | -                                     |
| <b>Bauzubehör</b>                 |                   |                                                                                                     |                                       |
| Armierungsgitter                  | Armierung         | -                                                                                                   | -                                     |
| UW-Rahmenprofil                   | Rahmenprofil-1    | -                                                                                                   | -                                     |

#### 4.1.1.1 Qualitätszeichen

Im Rahmen der gesundheitsbezogenen Bewertung von Bauprodukten wurden bislang verschiedene Qualitätszeichen auf nationaler und internationaler Ebene entwickelt. Neben den durch regulatorische Vorgaben veranlassten Entwicklungen von Prüfzeichen gibt es eine Vielzahl an Kennzeichnungen, denen sich die herstellenden Unternehmen auf freiwilliger Basis unterordnen können. Nachfolgend werden die wesentlichen Anforderungskriterien der Qualitätszeichen aufgeführt, mit denen einige der ausgewählten Materialien und Werkstoffe ausgezeichnet waren.

##### Blauer Engel

Das Umweltzeichen „Blauer Engel“ kennzeichnet besonders umweltschonende Produkte und Dienstleistungen und bietet den Verbraucher\*innen somit eine Orientierungshilfe. Die Prüfkriterien unterscheiden sich je nach Produktgruppe und sind in den jeweiligen Vergabekriterien hinterlegt. In der Regel wird das Emissionsverhalten der Werkstoffe anhand der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) im Retentionsbereich C6-C16 (siehe Kapitel 4.2.4), der Summe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen im Retentionsbereich >C16-C22

(TSVOC), der Freisetzung krebserzeugender Stoffe, Summe aller VOC mit und ohne NIK, des sogenannten R-Werts und anhand der Freisetzung von Formaldehyd bewertet. Abhängig von den Materialgruppen werden weitere Anforderungen an die Emissionswerte gestellt, beispielsweise an die Freisetzung von Einzelsubstanzen. Die Emissionsprüfungen werden für den Großteil der Produktgruppen nach den Vorgaben der DIN EN 16516:2020-10 sowie des AgBB-Bewertungsschemas in der jeweils gültigen Form nach 3 und 28 Tagen durchgeführt. Im Folgenden sind die für das Forschungsprojekt relevanten Vergabekriterien aufgeführt:

- ▶ DE-UZ 76 „Emissionsarme plattenförmige Werkstoffe (Bau- und Möbelplatten) für den Innenausbau“
- ▶ DE-UZ 102 „Emissionsarme Innenwandfarben“
- ▶ DE-UZ 113 „Emissionsarme Bodenbelagsklebstoffe und andere Verlegewerkstoffe“
- ▶ DE-UZ 120 „Elastische Fußbodenbeläge“
- ▶ DE-UZ 123 „Emissionsarme Dichtstoffe für den Innenraum“
- ▶ DE-UZ 132 „Emissionsarme Wärmedämmstoffe und Unterdecken für Innenanwendungen“
- ▶ DE-UZ 156 „Emissionsarme Verlegeunterlagen für Bodenbeläge“
- ▶ DE-UZ 176 „Emissionsarme Bodenbeläge, Paneele und Türen aus Holz und Holzwerkstoffen für Innenräume“

#### **Sentinel Haus Institut**

Das Sentinel Haus Institut kennzeichnet emissions- und schadstoffarme Produkte mit dem Ziel, eine gute Innenraumluftqualität zu schaffen und am Bau beteiligten Personen eine Orientierungshilfe zur Verfügung zu stellen. Die Emissionsprüfungen sind nach 3 und 28 Tagen gemäß DIN EN ISO 16000-9:2008-04 sowie DIN EN 16516:2020-10 durchzuführen. Die Anforderungen an die Emissionswerte unterscheiden sich abhängig von der Produktgruppe. Die Bewertungskriterien beinhalten unter anderem die vom Produkt freigesetzte Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC), Summe VOC ohne NIK, die Summe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen (TSVOC), den sogenannten R-Wert sowie die Emission von Formaldehyd. Zudem sind Grenzwerte für bestimmte Substanzgruppen und Einzelsubstanzen festgelegt.

#### **eco-INSTITUT-Label**

Das eco-INSTITUT-Label ist ein Umwelt- und Gesundheitssiegel der eco-INSTITUT Germany GmbH, Köln, mit dem Ziel, eine Schadstoffminimierung in Innenräumen zu erlangen. Die Emissionsprüfungen sind gemäß DIN EN ISO 16000-9:2008-04 und DIN EN 16516:2020-10 nach 3 und 28 Tagen durchzuführen. Die Prüfparameter unterscheiden sich je nach Produktgruppe und umfassen unter anderem die vom Produkt freigesetzte Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC), Summe VOC ohne NIK, die Summe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen (TSVOC), den R-Wert sowie die Freisetzung von Formaldehyd. Zudem ist eine Vorgabe für bestimmte Substanzgruppen und Einzelsubstanzen definiert.

#### **E-Klassifizierung**

Holzwerkstoffe werden gemäß der DIN EN 13986:2015-06 in E-Klassen eingeteilt. Die Emissionsprüfungen werden über einen Zeitraum von 15 Tagen durchgeführt. Die E1-Klassifizierung erfolgt, wenn nach dem vorgegebenen Prüfzeitraum die Konzentration von Formaldehyd in der Prüfkammerluft die Konzentration von 0,1 ppm unterschreitet. Liegt die

Freisetzung von Formaldehyd oberhalb dieser Konzentration, überschreitet aber nicht 0,3 mg/m<sup>3</sup>, werden die Produkte in die Klasse E2 eingestuft.

### **Französisches VOC-Label**

Die Vorgaben der Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO, 2024) wurden in Frankreich mit einem VOC-Label umgesetzt. Seit 2012 müssen Einrichtungs- und Ausstattungsmaterialien sowie Bauprodukte, die neu auf den französischen Markt kommen, hinsichtlich des Emissionsverhaltens klassifiziert und gekennzeichnet werden. Die Klassifizierung erfolgt über vier Stufen von A+ (emissionsarm) bis C (emissionsstark). Die Emissionsprüfungen sind gemäß DIN EN 16516:2020-10 über eine Prüfdauer von 28 Tagen durchzuführen. Dabei werden die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) und 10 Einzelstoffe einschließlich Formaldehyd betrachtet. Im Gegensatz zum deutschen AgBB-Bewertungsschema können Produkte die Prüfvorgaben nicht erfüllen bzw. nicht abgelehnt werden.

### **GEV-EMICODE®**

Der GEV-EMICODE® ist ein Produktklassifizierungssystem und Umweltzeichen. Das Ziel besteht in dem Gesundheitsschutz und der Umweltverträglichkeit, ohne die Produktqualität dabei zu beeinflussen. Gekennzeichnete Produkte sollen eine Orientierungshilfe für Verbraucher\*innen geben. Die Klassifizierung erfolgt über die drei Stufen EC1<sup>Plus</sup> (sehr emissionsarm<sup>Plus</sup>), EC1 (sehr emissionsarm) und EC2 (emissionsarm). Die Emissionen werden nach 3 und 28 Tagen bewertet. Die Bewertungskriterien umfassen die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC), die Summe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen (TSVOC), flüchtige kanzerogene Substanzen mit separaten Anforderungskriterien für Formaldehyd und Acetaldehyd, VOC ohne NIK und nicht identifizierbare VOC sowie den R-Wert gemäß des aktuellen AgBB-Bewertungsschemas nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.

### **Qualitätszeichen Holzwerkstoffe**

Das Qualitätszeichen Holzwerkstoffe wird von der Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe (QG HWS) an die herstellenden Unternehmen von Span- und Faserplatten sowie von Sperrholz und Holz-Polymer-Werkstoffen (WPC) mit dem Ziel vergeben, Gesundheit und Umwelt zu schützen. Die Einteilung erfolgt anhand der Klassifizierung in Top Qualität und Premium Qualität und wird durch unabhängige Prüflabore geprüft und bestätigt. Die Prüfkriterien umfassen unter anderem die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen, die Summe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen und Formaldehyd und sind für die Mitglieder der Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe verbindlich.

### **IBR-Prüfsiegel**

Das Prüfsiegel „Geprüft und empfohlen“ wurde im Jahr 1982 vom Institut für Baubiologie Rosenheim GmbH (IBR) entwickelt, um Endverbraucher\*innen die Möglichkeit zu geben, gesundheitliche Beeinträchtigungen im Wohnumfeld durch Baustoffe und Einrichtungsgegenstände zu vermeiden. Emissionsprüfungen sind gemäß DIN EN ISO 16000-9:2008-04 und DIN EN 16516:2020-10 durchzuführen. Das AgBB-Bewertungsschema wird als Bewertungsgrundlage verwendet, bei Neuzertifizierungen auch gemäß dem französischen VOC-Label. Darüber hinaus sind produktspezifisch auch Prüfungen hinsichtlich Radioaktivität, bioziden Wirkstoffe, Phthalate, Schwermetalle und Feinstäube vorgesehen.

#### 4.1.2 Verbundkonstruktionen

Gemeinsam mit den Kooperationspartnern und dem Fachbeirat wurden insgesamt sechs Baukonstruktionen ausgewählt, die in den Verbundelementen für Wände, Decken und Fußböden abgebildet werden sollen. Eine Zusammenstellung und Erklärung der Konstruktionstypen findet sich in **Tabelle 4**.

**Tabelle 4: Zusammenstellung der wesentlichen Merkmale der ausgewählten sechs Baukonstruktionstypen**

| Konstruktionstyp | Charakteristika                                                                                                                                                                                                                      | Typische Einsatzbereiche                                                     |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Holzrahmenbau    | Ständerwände als eigenständige Bauteile durch umlaufenden Rahmen; Traggerippe von Hölzern mit möglichst gleichen Querschnitten (Konstruktionsvollholz, KVH), die zumeist mit Holztafelementen flächig beplankt werden.               | Einfamilienhaus, mehrgeschossige Gebäude, Aufstockungen                      |
| Holzskelettbau   | Tragendes Gerüst aus senkrechten Stützen und waagerechten Trägern mit Aussteifungen, Wände nicht tragend. Typische Materialien: KVH, Brettschichtholz (BSH), Holztafelemente.                                                        | Mehrgeschossige Gebäude, größere Spannweiten wie bei Hallen-/Industriebauten |
| Holzbau          | Rahmen, Tafel, Massivplatten<br>Brettsperrholz, Brettschichtholz, Blockbau                                                                                                                                                           | Wohnungsbau, Bürogebäude, Modulbau                                           |
| Lehmbau          | Primär tragende Konstruktion aus Lehmbausteinen, Stampflehm, Wellerbau, unter Umständen mit zusätzlicher Holzrahmenbauweise. Tragende Wände und Decken aus Lehm, in Kombination mit anderen Baustoffen (häufig Holz, Stroh, Bambus). | Ein- bis zweigeschossige Bauten, aber auch mehr möglich                      |
| Holzhybridbau    | Kombination aus Holz und Beton bzw. Stahlbeton (z.B. in Bodenplatten, Kernen, Decken). Typische Materialien: Brettsperrholz (CLT), Brettschichtholz (BSH), KVH, Holz-Beton-Verbundsysteme.                                           | Mehrgeschossige Gebäude, Gebäude mit hohen Brand-/Schallschutzanforderungen  |
| Holzmassivbau    | Tragende Konstruktion aus Brettstapel-, Dübelholz- und Brettschichtholzelementen. Typische Materialien: Tragende Wände und Decken aus Massivholz, Brettsperrholz (CLT) oder Brettstapelholz.                                         | Einfamilienhaus, mehrgeschossige Gebäude (hoher Holzverbrauch)               |

Es wurden vier Wandelemente und jeweils sechs Decken- und Bodenelemente konstruiert und auf ihr Emissionsverhalten untersucht. Eine Übersicht über die ausgewählten Konstruktionen gibt nachfolgend **Tabelle 5-6**. Die im späteren Projektverlauf in den Modellräumen eingesetzten Verbundkonstruktionen sind in den nachfolgenden Tabellen dunkelgrün gekennzeichnet.

**Tabelle 5: Für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählte Wandkonstruktionen. Bauliche Schichtabfolge (innen-außen) und Schichtstärken.**

| Schicht   | Wand 1<br>Holzrahmenbau      | Wand 2<br>Lehmbau            | Wand 3<br>Holz-Hybridbau                                            | Wand 4<br>Holzmassivbau                      |
|-----------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1 – Innen | Mineralsilikatfarbe          | Lehmputz                     | Acryl-Dispersionsfarbe                                              | Dispersionsfarbe                             |
| 2         | Füll-/ Feinspachtel          | Lehmfüll-/ Flächenspachtel   | Füll-/ Feinspachtel                                                 | Füll-/ Feinspachtel                          |
| 3         | Gipsfaserplatte (12,5 mm)    | Lehmbauplatte (22 mm)        | Gipskartonplatte (Feuerschutzplatte) (15 mm)                        | Gipskartonplatte (Feuerschutzplatte) (15 mm) |
| 4         | OSB-Platte (15 mm)           | Holzfaserdämmplatte (120 mm) | OSB-Platte (15 mm)                                                  | Mineralwolle (200 mm)                        |
| 5         | Holzfaserdämmplatte (120 mm) | KVH (160 mm)                 | Steinwolle (120 mm)                                                 | KVH (160 mm)                                 |
| 6         | KVH (160 mm)                 |                              | KVH (160 mm)                                                        | 3-Schichtplatte Fichte (20 mm)               |
| 7         |                              |                              | Zementgebundene Leichtbeton-Bauplatte (Zementfaserplatte) (12,5 mm) | Mineralwolle (200 mm)                        |
| 8 – Außen |                              |                              |                                                                     | Gipsfaserplatte (12,5 mm)                    |

**Tabelle 6:** Für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählte Deckenkonstruktionen. Bauliche Schichtabfolge (oben: Anschluss zum darüberliegenden Boden - unten: im Innenraum sichtbare Decke) und Schichtstärken.

| Schicht           | Decke 1<br>Holzrahmenbau            | Decke 2<br>Skelettbau               | Decke 3<br>Holzbau                  | Decke 4<br>Holzmassivbau            | Decke 5<br>Lehmbau             | Decke 6<br>Holzhybridbau  |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| <b>1 – Oben</b>   | Dampfbremsfolie (0,2 mm)            | Dampfbremsfolie (0,2 mm)            | Dampfbremsfolie (0,2 mm)            | Dampfbremsfolie (0,2 mm)            | Hanf Nadelfilzstreifen (10 mm) | Acryldispersionsfarbe     |
| 2                 | Steinwolle (120 mm)                 | Mineralwolle (200 mm)               | EPS-Dämmplatte (40 mm)              | Steinwolle (120 mm)                 | Weißkalkhydrat                 | Füll-/ Feinspachtel       |
| 3                 | Trockenschüttung (Perlite) (120 mm) | Trockenschüttung (Perlite) (120 mm) | Trockenschüttung (Perlite) (120 mm) | Trockenschüttung (Perlite) (120 mm) | Hanf Nadelfilzstreifen (5 mm)  | Gipsfaserplatte (12,5 mm) |
| 4                 | Dampfbremsfolie (0,2 mm)            | Dampfbremsfolie (0,2 mm)            | 3-Schichtplatte Fichte (20 mm)      | Dampfbremsfolie (0,2 mm)            | 3-Schichtplatte Fichte (20 mm) | OSB-Platte (15 mm)        |
| 5                 | Sperrholzplatte Birke (15 mm)       | 3-Schichtplatte Fichte (20 mm)      |                                     | 3-Schichtplatte Fichte (20 mm)      | KVH Fichte (160 mm)            | Trockenschüttung (120 mm) |
| 6                 | KVH Fichte (160 mm)                 | KVH Fichte (160 mm)                 |                                     |                                     |                                | EPS-Dämmplatte (40 mm)    |
| 7                 | Mineralwolle (200 mm)               |                                     |                                     |                                     |                                | Dampfbremsfolie (0,2 mm)  |
| 8                 | Spanplatte (10 mm)                  |                                     |                                     |                                     |                                | KVH Fichte (160 mm)       |
| 9                 | Gipsfaserplatte (12,5 mm)           |                                     |                                     |                                     |                                |                           |
| 10                | Füll-/ Feinspachtel                 |                                     |                                     |                                     |                                |                           |
| <b>11 – Unten</b> | Mineralsilikatfarbe                 |                                     |                                     |                                     |                                |                           |

**Tabelle 7:** Für Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) ausgewählte Bodenkonstruktionen. Bauliche Schichtabfolge (oben-unten) und Schichtstärken.

| Schicht          | Boden 1              | Boden 2                      | Boden 3              | Boden 4                      | Boden 5                            | Boden 6              |
|------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------|
|                  | Nadelfilz            | Parkett                      | Vinyl                | Laminat                      | Laminat/Lehm                       | Nadelfilz            |
| <b>1 – Oben</b>  | Nadelfilz (4 mm)     | Parkett Eiche (14 mm)        | Vinyl (2,5 mm)       | Laminat (7 mm)               | Laminat (7 mm)                     | Nadelfilz (4 mm)     |
| 2                | Dispersionsklebstoff | PU-Trittschalldämmung (2 mm) | Dispersionsklebstoff | PU-Trittschalldämmung (2 mm) | PU-Trittschalldämmung (2 mm)       | Dispersionsklebstoff |
| 3                | Estrichbeton (40 mm) | Bodenausgleichsmasse (30 mm) | Estrichbeton (40 mm) | Estrichbeton (40 mm)         | 3-Schichtplatte Fichte (20 mm)     | Metallplatte         |
|                  |                      | Estrichbeton (40 mm)         |                      |                              | Lehm-Holz-Trockenschüttung (80 mm) |                      |
| <b>4 – Unten</b> |                      |                              |                      |                              | KVH-Lattung (60*80 mm)             |                      |

Bodenkonstruktion 6/Nadelfilz wurde für die Verwendung im Modellraum 3/Holzhybridbau konstruiert und nochmals separat geprüft. Statt auf Estrich erfolgte der Bodenaufbau auf einer Metallplatte.

### 4.1.3 Modellräume

Nach der Prüfung von (i) einzelnen Werkstoffen und Bauprodukten sowie von (ii) konstruktiven Aufbauten (Wand, Boden, Decke) wurden in einem dritten Schritt die Emissionen von insgesamt drei Modellräumen untersucht, deren Konstruktionen jeweils eine unterschiedliche Bauweise repräsentierten. Die Auswahl der Baukonstruktionen erfolgte wiederum in enger Abstimmung mit den Planungs- und Architekturbüros, die das Projekt begleiteten, sowie mit dem Umweltbundesamt (UBA). Durch die beratende Tätigkeit der Planungs- und Architekturbüros wurde außerdem sichergestellt, dass die nachzubildenden Modellräume realistischen Baukonstruktionen entsprachen. Es wurden folgende Bauformen ausgewählt:

- ▶ Modellraum 1/Holzrahmenbau
- ▶ Modellraum 2/Lehmbau
- ▶ Modellraum 3/Holzhybridbau

Modellraum 1 und 3 stellten dabei übliche Bauformen unter primärer Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen dar, wobei es sich überwiegend um holzbasierte Werkstoffe handelte. Mit Modellraum 2 wurde eine nachhaltige, alternative Bauweise abgebildet, die nach Vorstellung der Planungs- und Architekturbüros auch zukünftig bei öffentlichen Bauten angewendet werden soll.

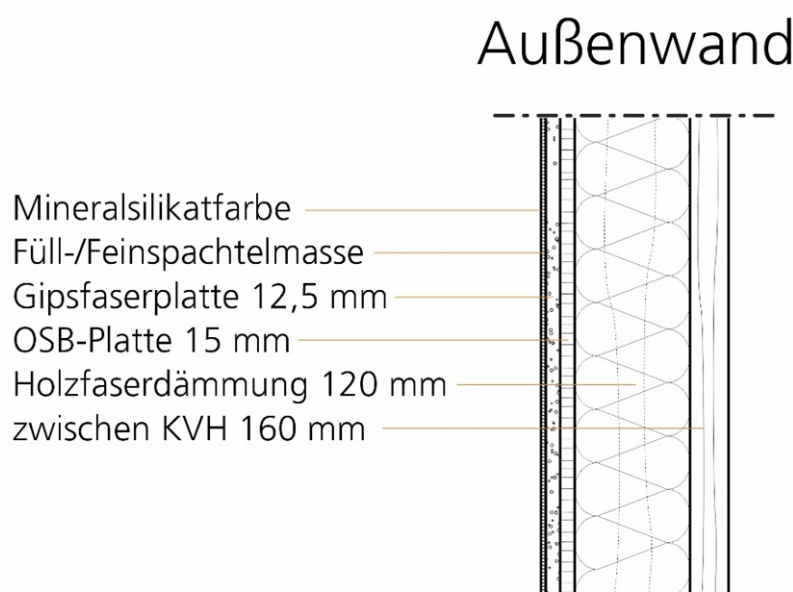
Es wurden für jeden Modellraum jeweils eine Außenwand, eine tragende Wand, zwei nichttragende Wände sowie drei Boden- und Deckenkonstruktionen zusammen in der Prüfkammer getestet.

#### 4.1.3.1 Modellraum 1/Holzrahmenbau

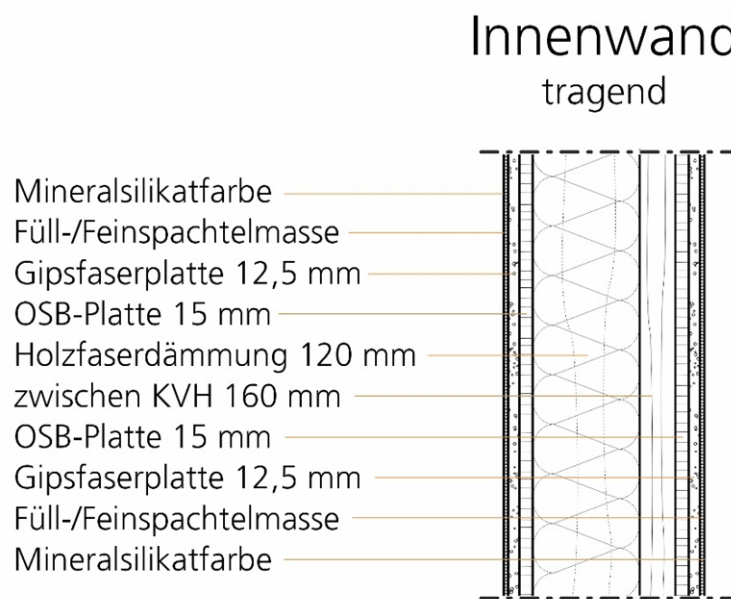
Der erste Modellraum wurde in Holzrahmenbauweise konstruiert. Die Konstruktionen der Außenwand, der tragenden und nicht tragenden Innenwände sowie der Decke und des Fußbodens sind nachfolgend als technische Zeichnungen (Schnitt) in **Abbildung 3-7** dargestellt.

**Abbildung 3: Modellraum 1/Holzrahmenbau – Außenwand, Schnitt.**

---

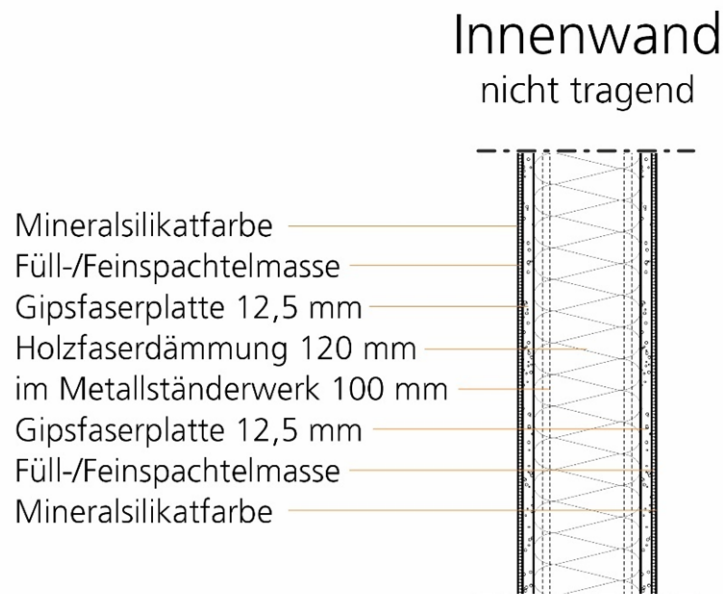


**Abbildung 4: Modellraum 1/Holzrahmenbau – Innenwand, tragend, Schnitt.**



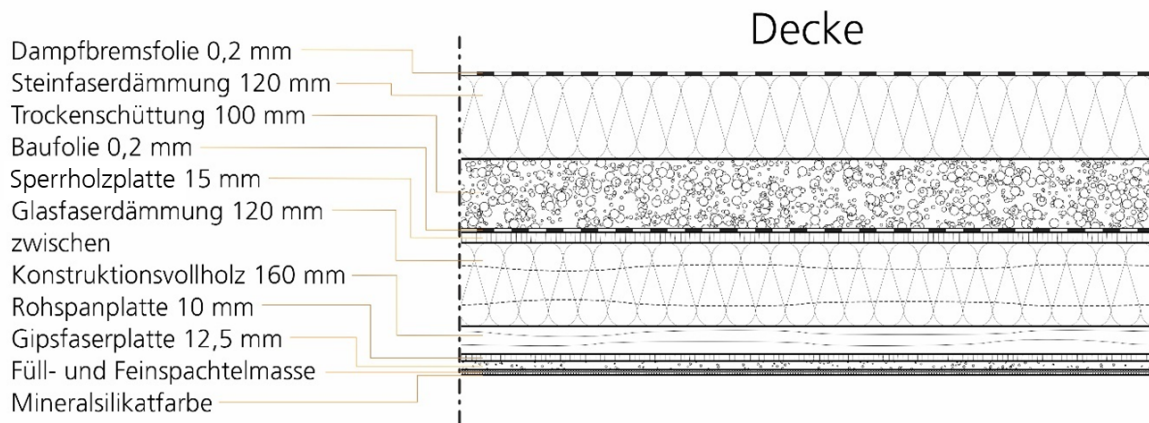
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 5: Modellraum 1/Holzrahmenbau – Innenwand, nicht tragend, Schnitt.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 6: Modellraum 1/Holzrahmenbau – Decke, Schnitt.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 7: Modellraum 1/Holzrahmenbau – Fußboden, Schnitt.**

Cross-section of floor structure: 14 mm pre-finished parquet, 2 mm insulating underlay, metal plate.

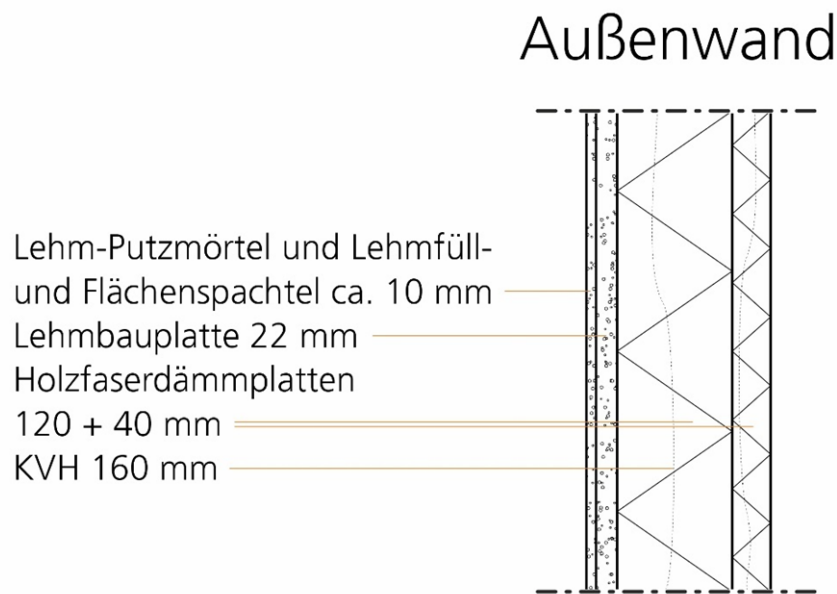


[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 4.1.3.2 Modellraum 2/Lehmbau

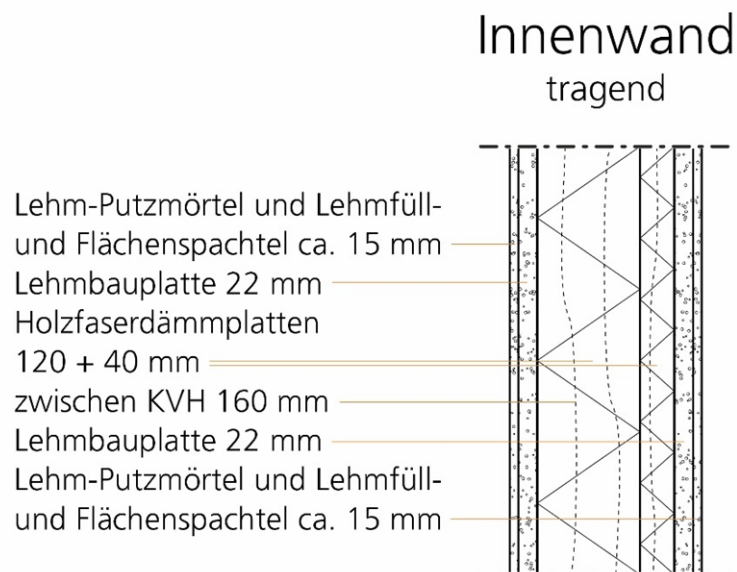
Modellraum 2 wurde in Lehm-bauweise konstruiert. Die Konstruktionen der Außenwand, der tragenden und nicht tragenden Innenwände sowie der Decke und des Fußbodens sind nachfolgend als technische Zeichnungen (Schnitt) in **Abbildung 8-12** dargestellt.

**Abbildung 8: Modellraum 2/Lehmba4u – Außenwand, Schnitt.**



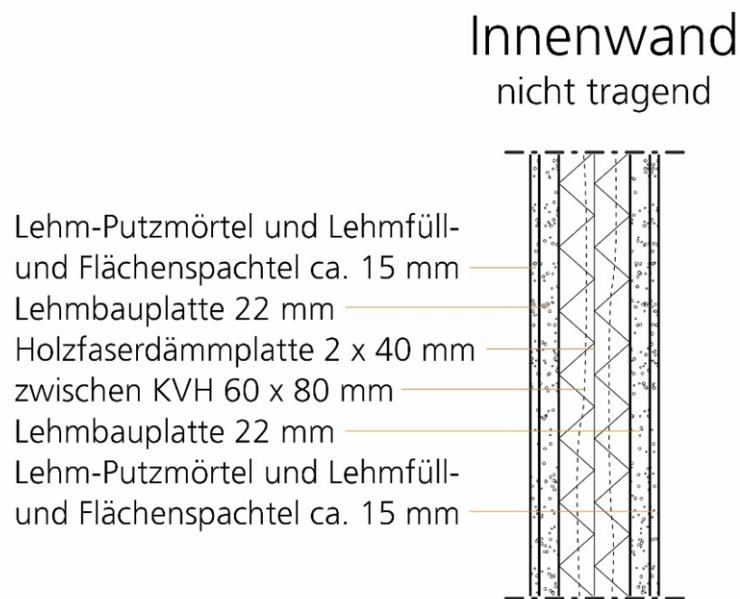
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 9: Modellraum 2/Lehmbau – Innenwand, tragend, Schnitt.**



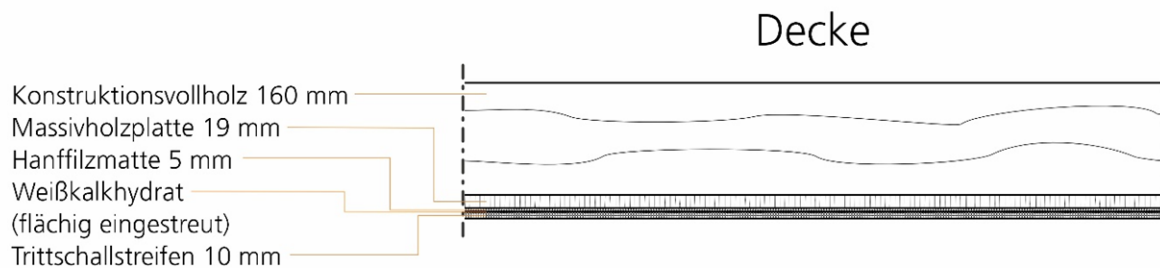
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 10: Modellraum 2/Lehmbau – Innenwand, nicht tragend, Schnitt.**



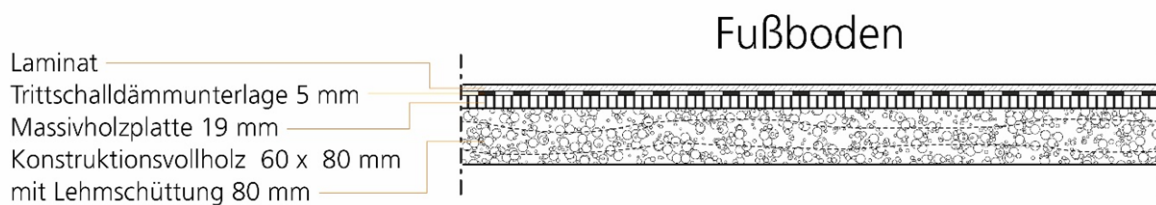
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 11: Modellraum 2/Lehmbau – Decke, Schnitt.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 12: Modellraum 2/Lehmbau – Fußboden, Schnitt.**



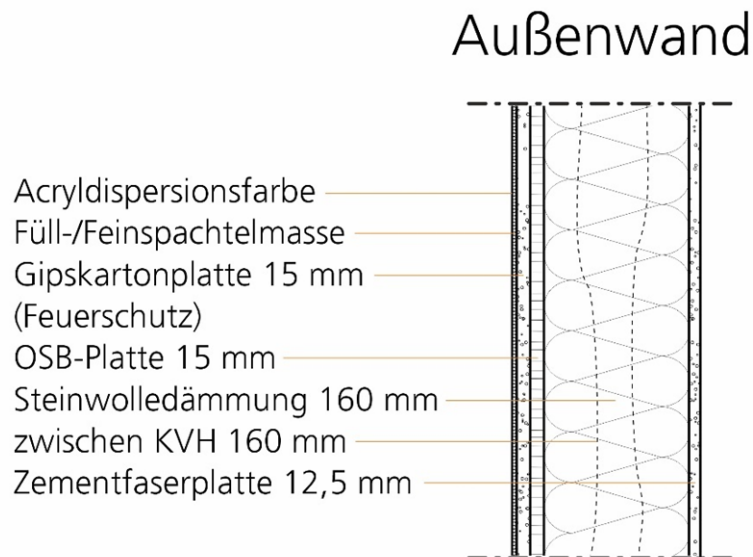
[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 4.1.3.3 Modellraum 3/Holzhybridbau

Modellraum 3 wurde in Holzhybridbauweise konstruiert. Die Konstruktionen der Außenwand, der tragenden und nicht tragenden Innenwände sowie der Decke und des Fußbodens sind nachfolgend als technische Zeichnungen (Schnitt) in **Abbildung 13-17** dargestellt.

**Abbildung 13: Modellraum 3/Holzhybridbau – Außenwand, Schnitt.**

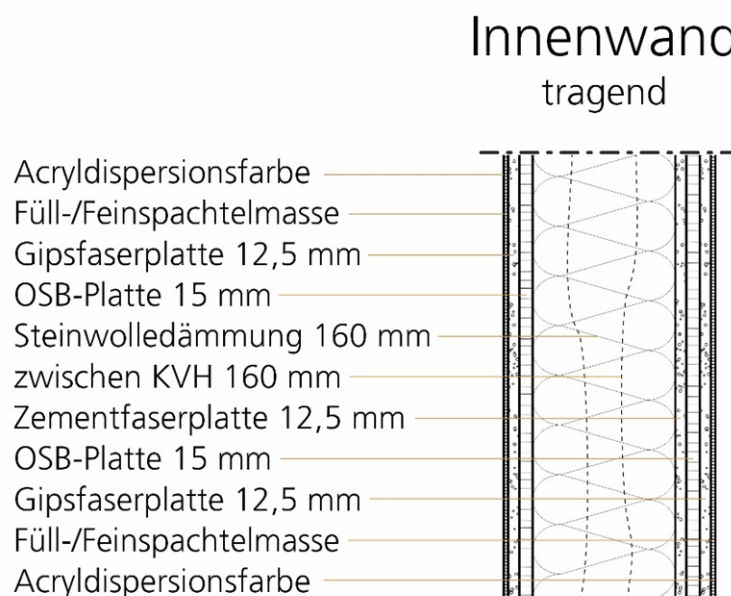
---



[Quelle: Fraunhofer WKI]

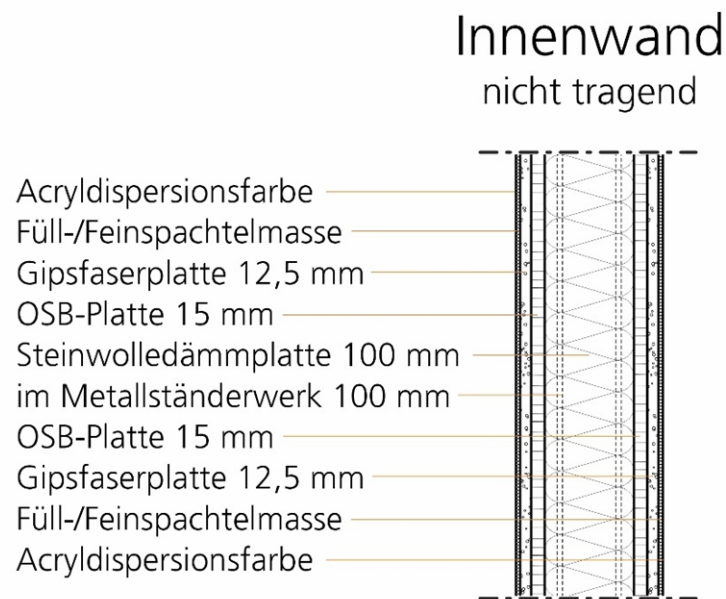
**Abbildung 14: Modellraum 3/Holzhybridbau – Innenwand, tragend, Schnitt.**

---



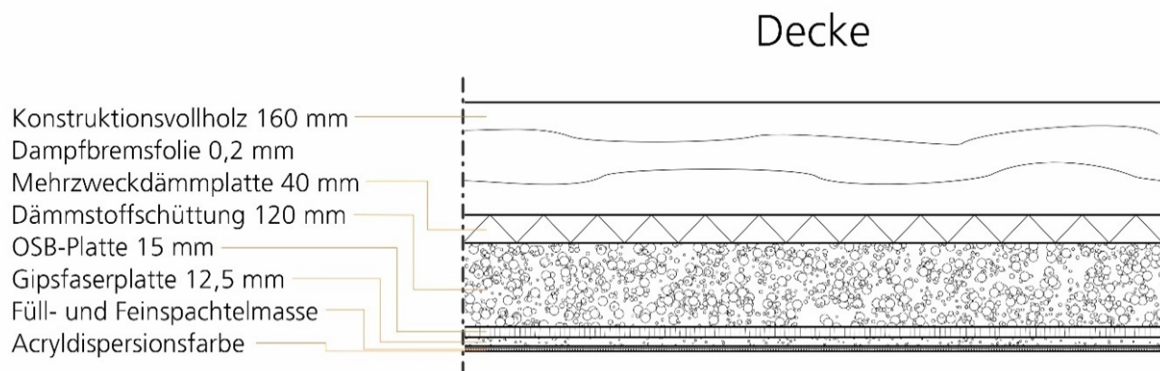
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 15: Modellraum 3/Holzhybridbau – Innenwand, nicht tragend, Schnitt.**



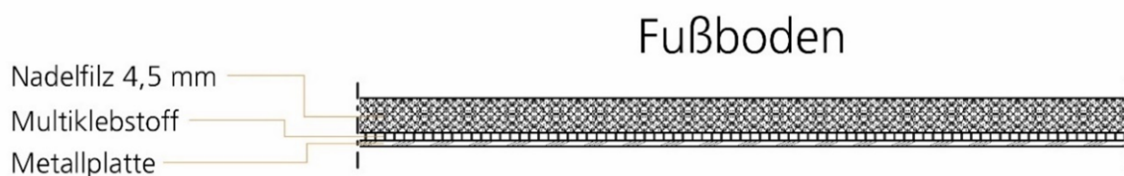
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 16: Modellraum 3/Holzhybridbau – Decke, Schnitt.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 17: Modellraum 3/Holzhybridbau – Fußboden, Schnitt.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 4.2 Durchführung der Emissionsprüfungen

Die Emissionsprüfungen der (i) Einzelmaterialien, (ii) Verbundkonstruktionen und (iii) Modellräume wurden jeweils gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) durchgeführt. Um ausreichend Datensätze für die Simulationen zu erheben (siehe **Abschnitt 6**), erfolgten über die im Schema vorgesehenen zwei Probenahmezeitpunkte (3, 28 Tage) hinaus täglich zusätzliche Luftprobenahmen. Außerdem wurden neben den im AgBB-Bewertungsschema (06/2021) vorgesehenen Probenahmen auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) und leichtflüchtige Aldehyde aktive Probenahmen auf die Gruppe der leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VVOC) und auf die C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-Carbonsäuren vorgenommen, um einen möglichst umfassenden Datensatz über die von den Prüfkörpern freigesetzten, organischen Verbindungen zu erhalten. Darüber hinaus wurden neben der derzeit als optional im AgBB-Bewertungsschema (06/2021) verankerten sensorischen Prüfung auf Basis der empfundenen Intensität (EI) zusätzlich die Parameter der Hedonik, der Geruchsart und der Zumutbarkeit bewertet (siehe **Abschnitt 5**).

### 4.2.1 Vorbereitung der Prüfkörper und Prüfkammerbedingungen

#### 4.2.1.1 Werkstoffe und Bauprodukte (Einzelmaterialien), Erstmessungen

Die Vorbereitung der Prüfkörper erfolgte gemäß DIN EN ISO 16000-11:2006-06 und DIN EN 16516:2020-10. Die Bauprodukte wurden bis zur Prüfung emissionsdicht verpackt klimatisiert gelagert. Kurz vor der Emissionsprüfung wurden die Prüfkörper entpackt und ihre Größe gemäß des Beladungsfaktors angepasst. Mit Ausnahme von Klebstoffen und Wandfarben wurden die Materialkanten und Unterseiten mit Aluminiumfolie oder emissionsarmem Klebeband versiegelt. Die Dichtmassen wurden in U-Profilen (Breite: 10 mm, Tiefe: 3 mm) aus inertem Material vorbereitet. Für die flüssigen Materialien erfolgte eine Vorkonditionierung über drei Tage. Die Klebstoffe und die Wandfarbe wurden gemäß Herstellerangaben eingewogen, auf Glasplatten aufgetragen und in Klimakammern vorkonditioniert.

Die Prüfungen erfolgten in einer 1m<sup>3</sup>-Emissionsprüfkammer bei einer Temperatur von 23±1°C und einer relativen Luftfeuchte von 50±3 %.

Gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) wurde für die meisten Materialien der Beladungsfaktor gemäß des Szenarios Wand gewählt ( $L = 1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,  $\lambda = 0,5 \text{ h}^{-1}$ ). Da für die Geruchsprobenahmen eine höhere Luftwechselrate hilfreich ist, wurden die Parameter angepasst. Eine Übersicht über die Prüfparameter je Werkstoffgruppe gibt **Tabelle 8**.

**Tabelle 8: Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien, Prüfparameter der Erstmessungen.**

| Werkstoffgruppe                                                                                     | Beladungsfaktor [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] | Luftwechselrate [h <sup>-1</sup> ] |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|
| Vollholz, holzbasierte Werkstoffe, Gipswerkstoffe, andere Plattenwerkstoffe, Dämmstoffe, Wandfarben | 1,5                                               | 0,75                               |
| Bodenbeläge, Klebstoffe                                                                             | 0,6                                               | 0,75                               |
| Dichtmassen                                                                                         | 0,007                                             | 1                                  |
| Folien                                                                                              | 1,6                                               | 0,8                                |

#### 4.2.1.2 Werkstoffe und Bauprodukte (Einzelmaterialien), Wiederholungsmessungen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit von Messdaten

Wie unter **Abschnitt 4.1.1** erläutert, erfolgte der Ankauf der Einzelmaterialien jeweils zeitnah vor Beginn der Emissionsprüfung bzw. vor Konstruktion der Verbundelemente und Modellräume, um längere Lagerzeiten zu vermeiden. Diese Vorgehensweise bot darüber hinaus die Möglichkeit, Wiederholungsmessungen der jeweils neu gekauften Materialien durchzuführen und somit die Messdaten auf Reproduzierbarkeit zu überprüfen.

Analog zu **Abschnitt 4.2.1.1** wurden die neuangekauften Einzelmaterialien wiederum gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) auf Emissionen geprüft bei derselben Probenvorbereitung und denselben Beladungsfaktoren. Im Gegensatz zu den ersten Messungen (siehe **Abschnitt 4.2.1.1**), die über einen Zeitraum von 28 Tagen durchgeführt wurden, erfolgten diese Wiederholungsmessungen anfangs über einen Prüfzeitraum von 3 Tagen, da dies für einen Abgleich der Emissionsstärke der Materialien und des freigesetzten Substanzspektrums grundsätzlich ausreichend ist. Allerdings zeigten die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen derselben, jeweils zeitnah (i) vor dem Beginn der Emissionsmessungen der Einzelmaterialien bzw. (ii) vor Konstruktion und Beginn der Emissionsmessungen der Verbundkonstruktionen neu angekauften Einzelmaterialien deutliche Unterschiede sowohl hinsichtlich des Spektrums freigesetzter Verbindungen als auch hinsichtlich der Emissionsstärke. Dies galt insbesondere für holzbasierte Werkstoffe (siehe **Abschnitt 4.3.1.1**).

Um Aussagen zu Zusammenhängen von Emissionsmessdaten aus Einzelmaterialmessungen und Raumluftqualität in einem Modellraum treffen und um diesbezüglich Modellsimulationen anwenden und entwickeln zu können, war der Vergleich von Emissionsmessdaten von (i) Einzelmaterialien, (ii) Verbundkonstruktionen und (iii) Modellräumen eine zwingende Voraussetzung. Um folglich eine Vergleichbarkeit der Messdaten (einzelne Werkstoffe *versus* verbaute Konstruktionen) zu gewährleisten, war es daher hinsichtlich der im dritten Schritt durchzuführenden Emissionsmessungen der Modellräume notwendig, alle hierfür benötigten Einzelmaterialien nochmals zu prüfen. Diese erneuten Emissionsprüfungen der für die Konstruktion der Modellräume angekauften Werkstoffe erfolgten parallel zu den Untersuchungen des jeweiligen Modellraums und umfassten das komplette Messprogramm gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) über 28 Tage inklusive Geruchsbewertung. Diese Vorgehensweise ermöglichte den direkten Vergleich der Messergebnisse hinsichtlich chemischer Emissionen und Geruchsbewertung von Verbundkonstruktionen und verbauten Einzelmaterialien bzw. Modellräumen und verbauten Einzelmaterialien, da die nochmals untersuchten Einzelmaterialien demselben Ankauf und damit wahrscheinlich derselben Charge entstammten.

Abweichend zu den Erstmessungen erfolgten die Wiederholungsmessungen in 500L-Emissionsprüfkammern aus Edelstahl bei einer Temperatur von  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchte von  $50 \pm 5\%$ . Daraus ergaben sich die in **Tabelle 9** aufgeführten Prüfparameter. Die flächenspezifische Belüftungsrate  $q$  war bei den Erst- und Wiederholungsmessungen gleich ( $q=0,5$ ).

**Tabelle 9: Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien, Prüfparameter der Wiederholungsmessungen.**

| Werkstoffgruppe                                                                         | Beladungsfaktor [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ] | Luftwechselrate [ $\text{h}^{-1}$ ] |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| Vollholz, holzbasierte Werkstoffe, Gipswerkstoffe, andere Plattenwerkstoffe, Dämmstoffe | 1,0                                         | 0,5                                 |
| Wandfarben                                                                              | 0,8                                         | 0,4                                 |
| Bodenbeläge, Klebstoffe, Füllmassen                                                     | 0,4                                         | 0,5                                 |

In **Tabelle 10** sind die durch die Ergebnisunterschiede der Einzelmaterialeprüfungen notwendig gewordenen Messungen je Arbeitsschritt bzw. Messreihe aufgeführt. Wurden Verbundkonstruktionen bereits in Messreihe 2 geprüft, erfolgte aus Zeitgründen keine erneute Wiederholungsmessung in Messreihe 3.

**Tabelle 10: Übersicht über die Emissionsprüfungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) sowie Vergleichbarkeit der erhobenen Emissionsdaten.**

| Messreihe              | Einzelmaterialien      | Verbundaufbauten       | Modellräume            | Anmerkungen                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prüfdauer / Prüfumfang | Prüfdauer / Prüfumfang | Prüfdauer / Prüfumfang | Prüfdauer / Prüfumfang |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1                      | 28d / V(VOC), Geruch   | - / -                  | - / -                  | Erstmessung Einzelmaterialien                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2                      | 3d / (V)VOC            | 28d / V(VOC), Geruch   | - / -                  | 1. Wiederholungsmessungen Einzelmaterialien; dieselbe Charge; Daten nur sehr eingeschränkt vergleichbar; unvollständig, da nur 3d-Messung der Materialien                                                                                                                                |
| 3                      | 28d / V(VOC), Geruch   | 28d / V(VOC), Geruch   | 28d / V(VOC), Geruch   | 2. Wiederholungsmessungen Einzelmaterialien; dieselbe Charge; Daten vergleichbar; Bei mehrfacher Verwendung eines Materials in einer Konstruktion: mehrfache Wiederholungsmessungen; nicht alle Verbundkonstruktionen neu geprüft, dann Daten aus Messreihe 2 zum Vergleich herangezogen |

#### 4.2.2 Verbundaufbauten

Die Wandaufbauten wurden einen Tag vor Beginn der Emissionsprüfungen konstruiert, da die Spachtelmassen (Füll-/Feinspachtelmasse, Lehmfüll-/flächenspachtel) über einen Zeitraum von 24 Stunden trocknen mussten. Während der Trocknungsphase wurden die Wandaufbauten unverpackt in einem nicht klimatisierten Innenraum gelagert. Am Folgetag und somit an dem Tag, an dem mit der Emissionsprüfung begonnen wurde, wurden die Wandfarben und der Lehmputz aufgetragen. Trocknungsphasen für die Wandfarben und den Lehmputz wurden nicht berücksichtigt, um einen möglichst umfassenden Datensatz über das Emissionsverhalten zu erhalten.

Die Deckenkonstruktionen wurden am Tag der Beladung konstruiert und die Materialkanten und Unterseiten mit Aluminiumblechen, -folie und emissionsarmem Klebeband abgedichtet.

Für die Aufbauten Boden 1/Nadelfilz, Boden 2/Parkett, Boden 3/Vinyl und Boden 4/Laminat wurde ein Estrich gemäß Herstellerangaben vorbereitet, in Edelstahlwannen eingebracht und über einen Zeitraum von vier Wochen unverpackt im Innenraum (unklimatisiert) getrocknet.

Nach der Trocknungsphase erfolgte der Bodenaufbau. Die Bodenaufbauten 1/Nadelfilz, 3/Vinyl und 4/Laminat wurden am Tag der Beladung ausgeführt. Die Konstruktion von Boden 2/Parkett begann einen Tag vor der Emissionsprüfung, da die Bodenausgleichsmasse über einen Zeitraum von 24 Stunden trocknen musste. Während der Trocknungsphase wurde der Bodenaufbau unverpackt im Innenraum (unklimatisiert) gelagert. Die Materialkanten wurden mit emissionsarmem Klebeband abgedichtet. Da die Eigenemissionen des Estrichs vernachlässigbar waren und um die Konstruktion zu vereinfachen, wurde Boden 6/Nadelfilz auf einer Metallplatte als Träger aufgebaut.

Die Beladungsfaktoren wurden entsprechend der Vorgaben des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) für die Szenarien Wand oder Boden und Decke gewählt. Die Prüfungen der Verbundkonstruktionen erfolgten in 4 m<sup>3</sup>-Emissionsprüfkammern aus Edelstahl mit daraus resultierenden Wandflächen von jeweils 2 m<sup>2</sup> und Decken- und Bodenflächen von jeweils 1,6 m<sup>2</sup>. Die Prüfparameter sind in **Tabelle 11** aufgeführt.

**Tabelle 11: Emissionsprüfungen der Verbundkonstruktionen, Prüfparameter.**

| Verbundaufbauten | Temperatur [°C] | Rel. Luftfeuchte [%] | Beladungsfaktor [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] | Luftwechselrate [h <sup>-1</sup> ] |
|------------------|-----------------|----------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|
| Wände            | 23±1            | 50±5                 | 0,5                                               | 0,25                               |
| Decken           | 23±1            | 50±5                 | 0,4                                               | 0,5                                |
| Böden            | 23±1            | 50±5                 | 0,4                                               | 0,5                                |

#### 4.2.3 Modellräume

Die Modellräume entsprachen in ihren Maßen den Abmessungen des in der DIN EN 16516:2020-10 verankerten Referenzraums mit einem Volumen von 30 m<sup>3</sup> mit den darauf basierenden Beladungsfaktoren für Wand-, Boden- und Deckenelemente. Die Wandelemente umfassten dabei eine Außenwand-, eine tragende Innenwand- und zwei nicht-tragende Innenwandkonstruktionen. Die Maße und Beladungsfaktoren der Wand-, Boden- und Deckenelemente in den Modellräumen entsprachen den in der DIN EN 16516:2020-10 vorgegebenen Abmessungen. Demzufolge wurden die Kammerprüfungen in einer 30 m<sup>3</sup>-Edelstahlprüfkammer vorgenommen. Auch der Luftwechsel und die klimatischen Bedingungen während der Kammerprüfungen der Modellräume folgten den Vorgaben der DIN EN 16516:2020-10. Die Prüfungen wurden gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) über einen Gesamtzeitraum von 28d durchgeführt und berücksichtigten sowohl die Freisetzung organischer Verbindungen als auch die Geruchsbewertung. Als Ausnahme wurde Modellraum 1/Holzrahmenbau über einen Zeitraum von 3 Monaten (91d) geprüft, um die Tendenz des Langzeitemissionsverhaltens der entsprechenden Baukonstruktion zu erfassen. Die Beladungsfaktoren und Prüfbedingungen gemäß DIN EN 16516:2020-10 und die für die Modellräume angepassten Parameter sind **Tabelle 12** zu entnehmen.

**Tabelle 12: Modellräume: Maße, Beladungsfaktoren und Prüfbedingungen gemäß DIN EN 16516:2020-10 (DIN) und angepasst im Projekt (P).**

| Konstruktion/<br>Parameter                | A<br>[m <sup>2</sup> ] (DIN) | B*H [m]<br>(DIN) | L<br>[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]<br>(DIN) | A<br>[m <sup>2</sup> ] (P) | B*H [m]<br>(P) | L<br>[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]<br>(P) |
|-------------------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------------------|
| Wand                                      | 31,4                         | 12,56*2,5        | 1,0                                             | 15,7                       |                | 0,52                                          |
| Decke/Boden, je                           | 12                           | 3*4              | 0,4                                             | 12                         | 1*2<br>(3fach) | 0,4                                           |
| Tür                                       | 1,6                          | 0,8*2            | 0,05                                            |                            |                |                                               |
| Fenster                                   | 2                            |                  | 0,05                                            |                            |                |                                               |
| Sehr kleine Flächen                       | 0,2                          |                  | 0,007                                           |                            |                |                                               |
| Gesamtwandfläche<br>(abzgl. Fenster, Tür) | 31,4                         |                  |                                                 | 15,7                       |                |                                               |
| Gesamtfläche<br>(abzgl. Fenster, Tür)     | 55,4                         |                  |                                                 | 27,7                       |                |                                               |
| Gesamtvolumen [m <sup>3</sup> ]           | 30                           |                  |                                                 | 30                         |                |                                               |
| Temperatur [°C]                           |                              |                  |                                                 |                            |                |                                               |
| Relative Luftfeuchte [%]                  |                              |                  |                                                 |                            |                |                                               |
| Luftwechselrate [h <sup>-1</sup> ]        | 0,5                          |                  |                                                 | 0,25                       |                |                                               |

Die nachfolgenden **Abbildung 18-19** zeigen die Beladung einer 30m<sup>3</sup>-Edelstahlprüfkammer mit konstruktiven Elementen eines Modellraums.

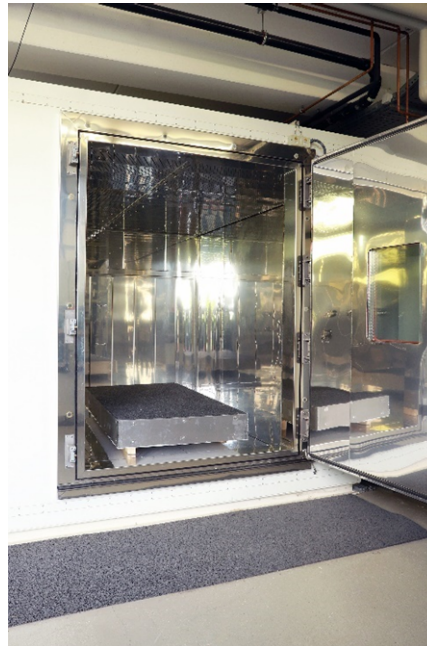
**Abbildung 18: Beladung einer 30m<sup>3</sup>-Edelstahlprüfkammer mit einem Wandelement.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 19: Beladung einer 30m<sup>3</sup>-Edelstahlprüfkammer mit einem Bodenelement.**

---



[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### **4.2.4 Luftprobenahme und Analytik**

##### **4.2.4.1 Leichtflüchtige organische Verbindungen (VVOC)**

Der Nachweis von leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VVOC) erfolgte durch Luftprobenahme auf mit Carbograph 5TD gefüllten Adsorptionsröhrchen. Nach Thermodesorption und Transfer auf eine mittelpolare GC-Kapillarsäule werden die Komponenten gaschromatographisch getrennt und massenspektrometrisch nachgewiesen. Die Identifikation der Substanzen wurde mit Hilfe von Spektrenbibliotheken (NIST, Wiley) vorgenommen. Das beschriebene Verfahren erfasst die leichtflüchtigen organischen Verbindungen von C<sub>3</sub> bis C<sub>6</sub>. C<sub>1</sub>- und C<sub>2</sub>-Substanzen (z. B. Ethanol) werden ebenfalls erfasst und bei analytischer Belastbarkeit angegeben. Bei einem Probenahmevolumen von 4 l und einer Luftdurchflussrate von 125 ml/min liegen die Bestimmungsgrenzen (BG) substanzspezifisch zwischen 1 µg/m<sup>3</sup> und 8 µg/m<sup>3</sup>. Für weiterführende Informationen zur analytischen Methode wird verwiesen auf Schieweck et al. (2018).

##### **4.2.4.2 Flüchtige organische Verbindungen (VOC)**

Für den Nachweis von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) wurden Luftproben mittels mit Tenax® TA gefüllten Probenröhrchen entnommen. Nach Thermodesorption und Transfer auf eine unpolare GC-Kapillarsäule wurden die Komponenten gaschromatographisch getrennt und massenspektrometrisch nachgewiesen. Die Identifikation der Substanzen wurde mit Hilfe von Spektrenbibliotheken (NIST, Wiley) vorgenommen. Freigesetzte organische Verbindungen wurden gegen die jeweilige Referenzsubstanz quantifiziert. Das beschriebene Verfahren erfasst die flüchtigen organischen Verbindungen in einem Retentionsbereich von C<sub>5</sub> bis C<sub>22</sub>. Im vorliegenden Bericht werden die Substanzen von C<sub>6</sub> bis C<sub>16</sub> als flüchtige organische Verbindungen (VOC), die vorher eluierenden als leichtflüchtige organische Verbindungen (VVOC) und die nach C<sub>16</sub> – C<sub>22</sub> detektierten Verbindungen als schwerflüchtige Verbindungen (SVOC) angegeben. Ein Teil an VVOC wird bei dieser Analytik miterfasst. Die separate Analytik auf VVOC ermöglicht die Identifizierung eines breiteren Substanzspektrums und erzielt validere Messdaten. Das Probenahmevolumen betrug 4 l bei einer Luftdurchflussrate von 125 ml/min. Die Quantifizierung der NIK-Substanzen erfolgte gegen die Originalsubstanzen, die Substanzen ohne NIK-Wert wurden

mit Toluol quantifiziert. Das analytische Verfahren hat eine Bestimmungsgrenze (BG) von ca.  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Messungen wurden gemäß DIN ISO 16000-6:2022-03 und DIN EN 16516:2020-10 vorgenommen.

#### 4.2.4.3 C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>-Carbonyle

Die Probenahme der C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>-Carbonyle (Formaldehyd, Acetaldehyd, Propanal, Butanal) erfolgte gemäß DIN ISO 16000-3:2013-01 auf Kartuschen, gefüllt mit 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) beschichtetem Kieselgel. Das Probenahmenvolumen betrug 75 l bei einer Luftdurchflussrate von 1 l/min. Nach Elution mit Acetonitril erfolgte die Analyse des Eluats mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC/DAD). Die Bestimmungsgrenze liegt bei  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 4.2.4.4 C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-Carbonsäuren

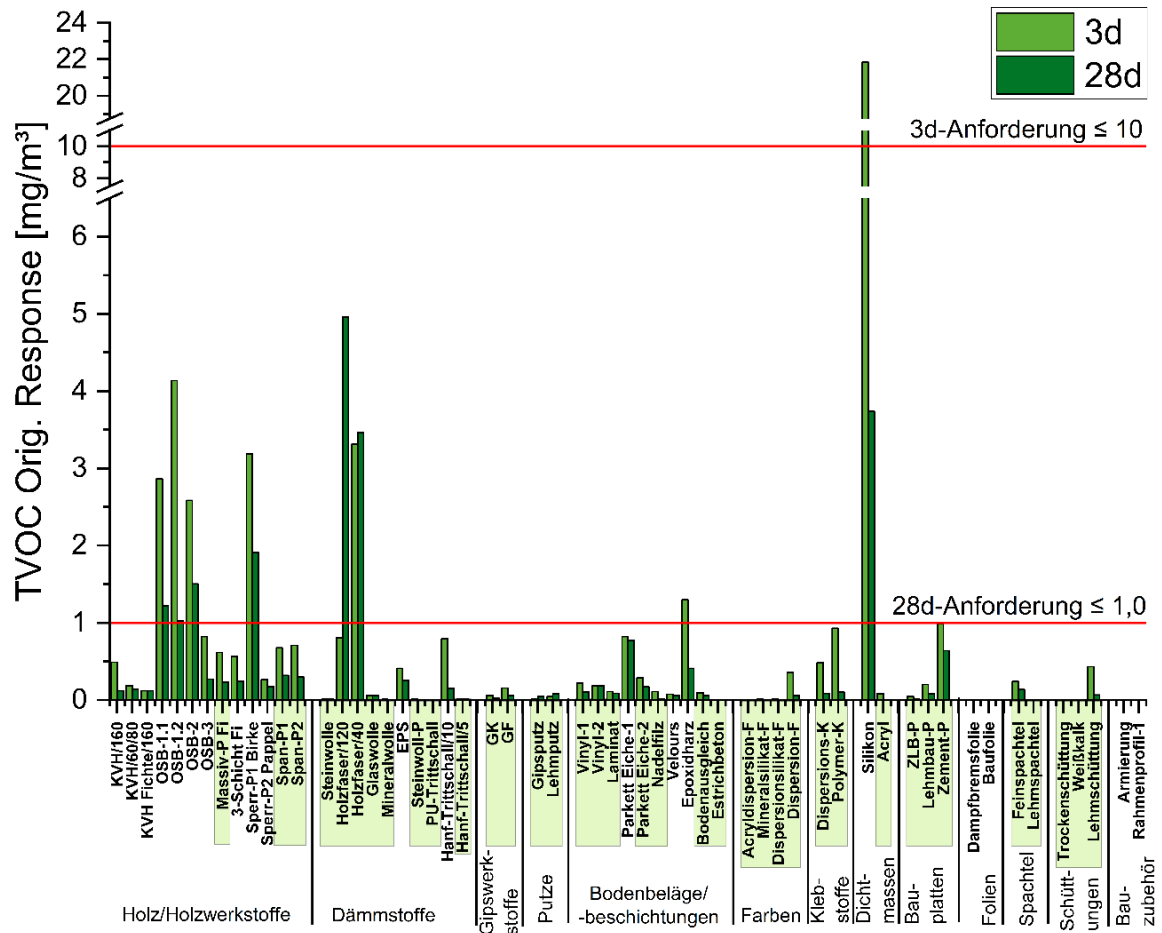
Die Bestimmung der C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-Carbonsäuren (Ameisensäure, Essigsäure) erfolgte gemäß VDI 4301 Blatt 7:2018-10 auf mit Silicagel gefüllten Röhrchen und anschließender Analyse mittels Ionenchromatographie (IC). Das Probenahmenvolumen betrug 75 l bei einer Luftdurchflussrate von 1 l/min. Die Bestimmungsgrenze liegt bei  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 4.3 Ergebnisse

#### 4.3.1 Einzelmaterialien

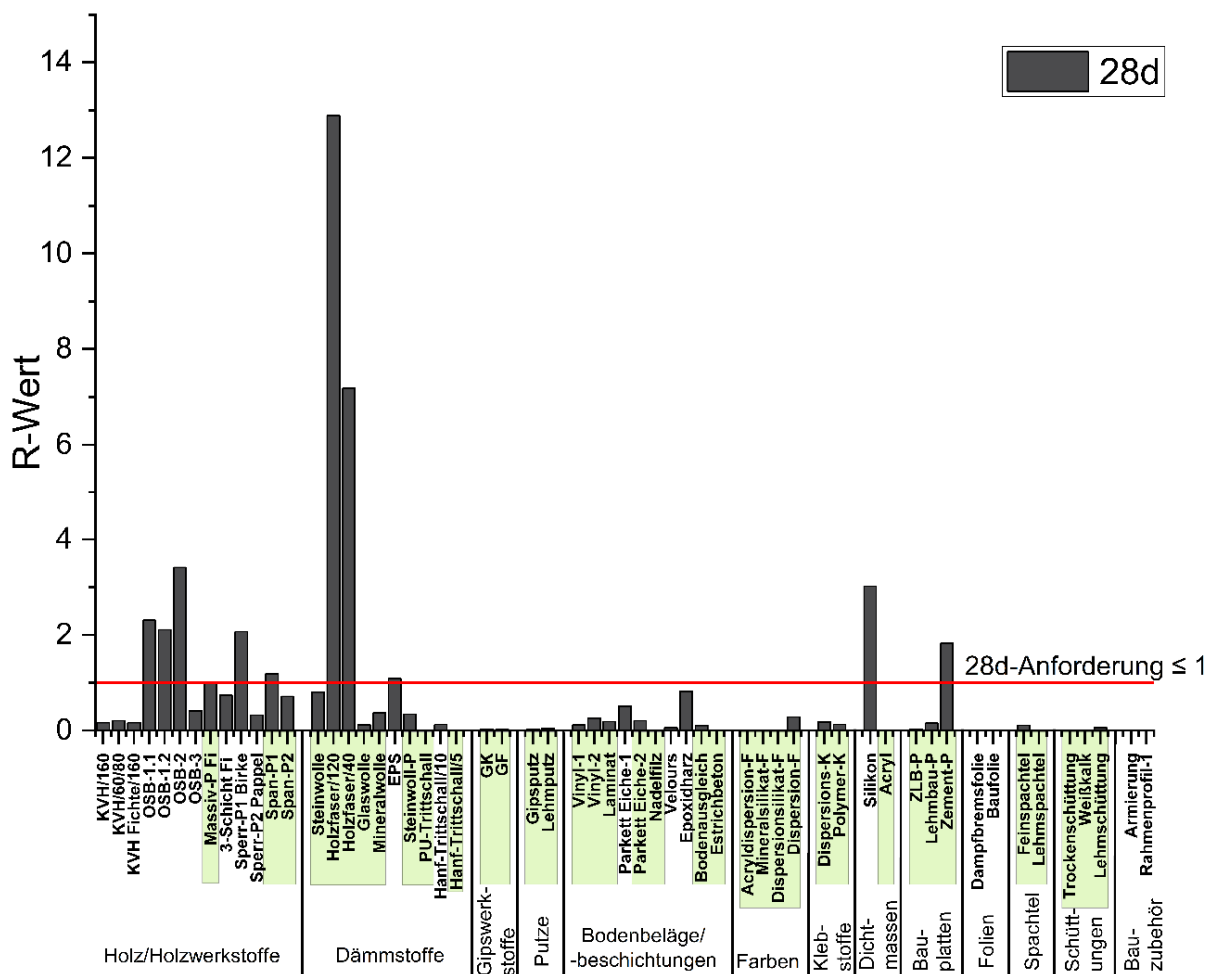
Die gemessenen TVOC-Werte nach einer Prüfdauer von 3 Tagen und 28 Tagen sind in **Abbildung 20** dargestellt, **Abbildung 21** zeigt die R-Werte. Die in den Abbildungen grün hinterlegten Einzelmaterialien waren mit einem Qualitätszeichen gekennzeichnet, siehe auch **Tabelle 3**.

**Abbildung 20: Emissionsprüfungen Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 21: Emissionsprüfungen Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). R-Werte nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

In **Tabelle 13** ist eine Übersicht über die Anforderungsparameter gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) und die erhobenen Messwerte nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen aufgeführt. Messwerte, die die jeweiligen Anforderungen überschritten haben, sind **rot** markiert.

**Tabelle 13: Emissionsprüfung Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die Auswertung nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen. n.n.: nicht nachweisbar. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.**

| Anforderungsparameter/-wert     | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Probe</b>                    | <b><math>\leq 10</math></b>    | <b><math>\leq 0,01</math></b>           |
| <b>Vollholz</b>                 |                                |                                         |
| KVH/160                         | 0,49                           | < 0,001                                 |
| KVH/60/80                       | 0,19                           | < 0,001                                 |
| KVH Fichte/160                  | 0,12                           | < 0,001                                 |
| <b>Holzbaasierte Werkstoffe</b> |                                |                                         |

| Anforderungsparameter/-wert        | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ] |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| Probe                              | ≤ 10                           | ≤ 0,01                                  |
| OSB-1.1                            | 2,86                           | < 0,001                                 |
| OSB-1.2                            | 4,14                           | < 0,001                                 |
| OSB-2                              | 2,58                           | < 0,001                                 |
| OSB-3                              | 0,82                           | < 0,001                                 |
| Massiv-P Fi                        | 0,62                           | < 0,001                                 |
| 3-Schicht Fi                       | 0,56                           | < 0,001                                 |
| Sperr-P1 Birke                     | 3,19                           | < 0,001                                 |
| Sperr-P2 Pappel                    | 0,27                           | < 0,001                                 |
| Span-P1                            | 0,68                           | < 0,001                                 |
| Span-P2                            | 0,71                           | < 0,001                                 |
| <b>Dämmstoffe</b>                  |                                |                                         |
| Steinwolle                         | 0,01                           | < 0,001                                 |
| Holzfaser/120                      | 0,81                           | 0,002                                   |
| Holzfaser/40                       | 3,31                           | < 0,001                                 |
| Glaswolle                          | 0,06                           | < 0,001                                 |
| Mineralwolle                       | 0,01                           | < 0,001                                 |
| EPS                                | 0,41                           | < 0,001                                 |
| Steinwoll-P                        | 0,01                           | < 0,001                                 |
| PU-Trittschall                     | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| Hanf-Trittschall/10                | 0,79                           | < 0,001                                 |
| Hanf-Trittschall/5                 | 0,01                           | < 0,001                                 |
| <b>Gipswerkstoffe</b>              |                                |                                         |
| GK                                 | 0,06                           | < 0,001                                 |
| GF                                 | 0,15                           | < 0,001                                 |
| <b>Putze</b>                       |                                |                                         |
| Gipsputz                           | 0,02                           | < 0,001                                 |
| Lehmputz                           | 0,04                           | < 0,001                                 |
| <b>Bodenbeläge/-beschichtungen</b> |                                |                                         |
| Vinyl-1                            | 0,22                           | < 0,001                                 |
| Vinyl-2                            | 0,18                           | < 0,001                                 |
| Laminat                            | 0,11                           | < 0,001                                 |

| Anforderungsparameter/-wert | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| Probe                       | ≤ 10                           | ≤ 0,01                                  |
| Parkett<br>Eiche-1          | 0,82                           | < 0,001                                 |
| Parkett<br>Eiche-2          | 0,29                           | < 0,001                                 |
| Nadelfilz                   | 0,12                           | < 0,001                                 |
| Velours                     | 0,17                           | < 0,001                                 |
| Epoxidharz                  | 1,30                           | < 0,001                                 |
| Bodenausgleich              | 0,09                           | < 0,001                                 |
| Estrichbeton                | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| <b>Wandfarben</b>           |                                |                                         |
| Acryldispersion-F           | 0,01                           | < 0,001                                 |
| Mineralsilikat-F            | 0,01                           | < 0,001                                 |
| Dispersionsilikat-F         | 0,02                           | < 0,001                                 |
| Dispersion-F                | 0,36                           | < 0,001                                 |
| <b>Klebstoffe</b>           |                                |                                         |
| Dispersions-K               | 0,48                           | < 0,001                                 |
| Polymer-K                   | 0,93                           | < 0,001                                 |
| <b>Dichtmassen</b>          |                                |                                         |
| Silikon                     | 21,84                          | < 0,001                                 |
| Acryl                       | 0,08                           | < 0,001                                 |
| <b>Bauplatten</b>           |                                |                                         |
| ZLB-P                       | 0,05                           | < 0,001                                 |
| Lehmbau-P                   | 0,20                           | < 0,001                                 |
| Zement-P                    | 0,93                           | < 0,001                                 |
| <b>Folien</b>               |                                |                                         |
| Dampfbremsfolie             | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| Baufolie                    | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| <b>Spachtelmassen</b>       |                                |                                         |
| Feinspachtel                | 0,24                           | < 0,001                                 |
| Lehmspachtel                | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| <b>Schüttungen</b>          |                                |                                         |
| Trockenschüttung            | < 0,005                        | < 0,001                                 |

| Anforderungsparameter/-wert | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Probe</b>                | <b>≤ 10</b>                    | <b>≤ 0,01</b>                           |
| Weißkalk                    | n.n.                           | n.n.                                    |
| Lehmschüttung               | 0,43                           | < 0,001                                 |
| <b>Bauzubehör</b>           |                                |                                         |
| Armierung                   | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| Rahmenprofil-1              | < 0,005                        | < 0,001                                 |

Nach einer Prüfzeit von 3 Tagen erfüllten mit Ausnahme der Probe Silikon (1-K-säurevernetzende Silikondichtmasse) alle geprüften Werkstoffe die Anforderungen an den TVOC-Wert gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Mit einem gemessenen TVOC-Wert von 21,844 mg/m<sup>3</sup> überschreitet die Silikondichtmasse (Silikon) den Anforderungswert von ≤ 10 mg/m<sup>3</sup>. Die hohe Emissionsstärke ist auf den Aushärtungsprozess der Einkomponenten-Dichtmasse (RTV-1) zurückzuführen, da dieser unter Einfluss der Luftfeuchte unter Freisetzung sogenannter Vernetzer- bzw. Abgangsgruppen abläuft. Diese Gruppen verhindern eine ungewollte Vernetzung der Silikonmasse in der Kartusche (Schieweck and Salthammer, 2009).

Im Rahmen der Emissionsprüfung der Holzfaserdämmung/120 (Holzfaser/120) wurde eine als kanzerogen eingestufte Substanz detektiert. Das Karzinogen der Kategorie 1B eingestufte 2-Nitropropan wurde in einer Konzentration von 2 µg/m<sup>3</sup> (3d) freigesetzt. Der Grenzwert von 0,01 mg/m<sup>3</sup> wurde jedoch nicht überschritten. Da durch den Ankauf im Baumarkt bzw. im Baustoffhandel keine weiterführenden Informationen über die Holzfaserdämmung vorlagen, konnte keine Aussage über die Ursache der Freisetzung von Nitropropan getroffen werden.

**Tabelle 14** gibt einen Überblick über die Anforderungsparameter gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) und die erhobenen Messwerte nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Messwerte, die die jeweiligen Anforderungen überschritten haben, sind **rot** markiert. Zusätzlich sind in der Tabelle die gemessenen Formaldehyd-Konzentrationen nach einem Zeitraum von 28d informativ aufgeführt. Zwecks Informationserhalt sind abweichend vom Anforderungswert einige TVOC-Werte und VOC-ohne NIK mit zwei Dezimalstellen angegeben.

**Tabelle 14:** Emissionsprüfung Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die Auswertung nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. n.n.: nicht nachweisbar. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.

| Anforderungsparameter/-wert | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | TSVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ] | VOC ohne NIK [mg/m <sup>3</sup> ] | ΣRi (R-Wert) | Formaldehyd [mg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------------------------------|
| <b>Probe</b>                | <b>≤1,0</b>                    | <b>≤0,1</b>                     | <b>≤0,001</b>                           | <b>≤0,1</b>                       | <b>≤1</b>    | <b>informativ</b>                |
| <b>Vollholz</b>             |                                |                                 |                                         |                                   |              |                                  |
| KVH/160                     | 0,1                            | < 0,005                         | < 0,001                                 | < 0,005                           | 0,165 (0)    | 0,007                            |
| KVH/60/80                   | 0,1                            | < 0,005                         | < 0,001                                 | < 0,005                           | 0,205 (0)    | 0,006                            |
| KVH Fichte/160              | 0,1                            | < 0,005                         | < 0,001                                 | < 0,005                           | 0,164 (0)    | 0,005                            |

| Anforderungsparameter/-wert     | TVOC-Wert<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤1,0 | TSVOC-Wert<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,1 | Kanzerogene<br>Stoffe<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,001 | VOC ohne<br>NIK [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,1 | ΣRi<br>(R-Wert)<br>≤1 | Formaldehyd<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>informativ |
|---------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Probe</b>                    |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| <b>Holzbaasierte Werkstoffe</b> |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| OSB-1.1                         | 1,2                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | 0,01                                         | 2,305 (2)             | 0,010                                             |
| OSB-1.2                         | 1,0                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | 0,01                                         | 2,110 (2)             | 0,010                                             |
| OSB-2                           | 1,5                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | 0,01                                         | 3,408 (3)             | 0,009                                             |
| OSB-3                           | 0,3                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,411 (0)             | 0,007                                             |
| Massiv-P Fi                     | 0,2                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 1,015 (1)             | 0,079                                             |
| 3-Schicht Fi                    | 0,2                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,735 (1)             | 0,052                                             |
| Sperr-P1 Birke                  | 1,9                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | 0,01                                         | 2,066 (2)             | 0,004                                             |
| Sperr-P2 Pappel                 | 0,2                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,322 (0)             | 0,012                                             |
| Span-P1                         | 0,3                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 1,190 (1)             | 0,082                                             |
| Span-P2                         | 0,3                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,710 (1)             | 0,042                                             |
| <b>Dämmstoffe</b>               |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| Steinwolle                      | 0,01                                      | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,804 (1)             | 0,079                                             |
| Holzfaser/120                   | 5,0                                       | < 0,005                                    | 0,001                                                   | 0,02                                         | 12,885 (13)           | 0,006                                             |
| Holzfaser/40                    | 3,5                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 7,176 (7)             | 0,005                                             |
| Glaswolle                       | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | 0,03                                         | 0,117 (0)             | 0,006                                             |
| Mineralwolle                    | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,370 (0)             | 0,037                                             |
| EPS                             | 0,3                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 1,083 (1)             | < 0,002                                           |
| Steinwoll-P                     | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,340 (0)             | 0,034                                             |
| PU-Trittschall                  | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |
| Hanf-Trittschall/10             | 0,2                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,127 (0)             | < 0,002                                           |
| Hanf-Trittschall/5              | 0,01                                      | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,008 (0)             | < 0,002                                           |
| <b>Gipswerkstoffe</b>           |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| GK                              | 0,03                                      | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,021 (0)             | < 0,002                                           |
| GF                              | 0,1                                       | 0,1                                        | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,025 (0)             | 0,004                                             |
| <b>Putze</b>                    |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| Gipsputz                        | 0,04                                      | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,021 (0)             | < 0,002                                           |
| Lehmputz                        | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,041 (0)             | < 0,002                                           |

| Anforderungsparameter/-wert             | TVOC-Wert<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤1,0 | TSVOC-Wert<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,1 | Kanzerogene<br>Stoffe<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,001 | VOC ohne<br>NIK [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,1 | ΣRi<br>(R-Wert)<br>≤1 | Formaldehyd<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>informativ |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Probe</b>                            |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| <b>Bodenbeläge/<br/>-beschichtungen</b> |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| Vinyl-1                                 | 0,1                                       | 0,01                                       | < 0,001                                                 | 0,02                                         | 0,114 (0)             | < 0,002                                           |
| Vinyl-2                                 | 0,2                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,258 (0)             | < 0,002                                           |
| Laminat                                 | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,182 (0)             | 0,005                                             |
| Parkett Eiche-1                         | 0,8                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,511 (1)             | 0,002                                             |
| Parkett Eiche-2                         | 0,2                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,203 (0)             | 0,006                                             |
| Nadelfilz                               | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,017 (0)             | < 0,002                                           |
| Velours                                 | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,061 (0)             | 0,003                                             |
| Epoxidharz                              | 0,4                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | 0,02                                         | 0,821 (1)             | 0,005                                             |
| Bodenausgleich                          | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,106 (0)             | 0,008                                             |
| Estrichbeton                            | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |
| <b>Farben</b>                           |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| Acryldispersion-F                       | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |
| Mineralsilikat-F                        | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |
| Dispersionsilikat-F                     | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |
| Dispersion-F                            | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,280 (0)             | 0,021                                             |
| <b>Klebstoffe</b>                       |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| Dispersions-K                           | 0,4                                       | 0,02                                       | < 0,001                                                 | 0,01                                         | 0,180 (0)             | < 0,002                                           |
| Polymer-K                               | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,124 (0)             | < 0,002                                           |
| <b>Dichtmassen</b>                      |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| Silikon                                 | 3,7                                       | 2,4                                        | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 3,022 (3)             | < 0,002                                           |
| Acryl                                   | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |
| <b>Bauplatten</b>                       |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| ZLB-P                                   | 0,02                                      | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,025 (0)             | < 0,002                                           |
| Lehmbau-P                               | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,150 (0)             | 0,004                                             |
| Zement-P                                | 0,6                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | 0,01                                         | 1,823 (2)             | < 0,002                                           |
| <b>Folien</b>                           |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                   |
| Dampfbremsfolie                         | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |
| Baufolie                                | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                           |

| Anforderungspa-<br>rameter/-wert | TVOC-Wert<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤1,0 | TSVOC-Wert<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,1 | Kanzerogene<br>Stoffe<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,001 | VOC ohne<br>NIK [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤0,1 | ΣRi<br>(R-Wert)<br>≤1 | Formalde-<br>hyd [mg/m <sup>3</sup> ]<br>informativ |
|----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Probe</b>                     |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                     |
| <b>Spachtelmassen</b>            |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                     |
| Feinspachtel                     | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,110 (0)             | < 0,002                                             |
| Lehmspachtel                     | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                             |
| <b>Schüttungen</b>               |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                     |
| Trockenschüt-<br>tung            | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                             |
| Weißkalk                         | n.n.                                      | n.n.                                       | n.n.                                                    | n.n.                                         | n.n.                  | n.n.                                                |
| Lehmschüttung                    | 0,1                                       | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,058 (0)             | 0,003                                               |
| <b>Bauzubehör</b>                |                                           |                                            |                                                         |                                              |                       |                                                     |
| Armierung                        | n.n.                                      | n.n.                                       | n.n.                                                    | n.n.                                         | n.n.                  | n.n.                                                |
| Rahmenprofil-1                   | < 0,005                                   | < 0,005                                    | < 0,001                                                 | < 0,005                                      | 0,000 (0)             | < 0,002                                             |

Nach einer Prüfzeit von 28 Tagen wurden die Anforderungskriterien des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) von 50 aus insgesamt 56 Werkstoffen erfüllt. Drei OSB-Platten (OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2), eine Sperrholzplatte (Sperr-P1 Birke), die Holzfaserdämmstoffe (Holzfaser/120, Holzfaser/40) und die Silikondichtmasse (Silikon) erfüllten die Kriterien aufgrund der Überschreitung der Anforderungen für den TVOC- und den R-Wert nicht. Die Silikondichtmasse (Silikon) erfüllte mit einem TSVOC-Wert von 2,4 mg/m<sup>3</sup> zusätzlich nicht die Anforderungen an den TSVOC-Wert (≤ 0,1 mg/m<sup>3</sup>). Die Dichtmasse setzte bereits nach einer Prüfdauer von 3 Tagen sehr hohe Konzentrationen (21,84 mg/m<sup>3</sup>) frei, die allerdings über die gesamte Prüfdauer abnahmen. Nicht näher identifizierbare, gesättigte Kohlenwasserstoffe trugen als Leitsubstanzen ebenfalls zu den hohen TVOC- und TSVOC-Werten bei.

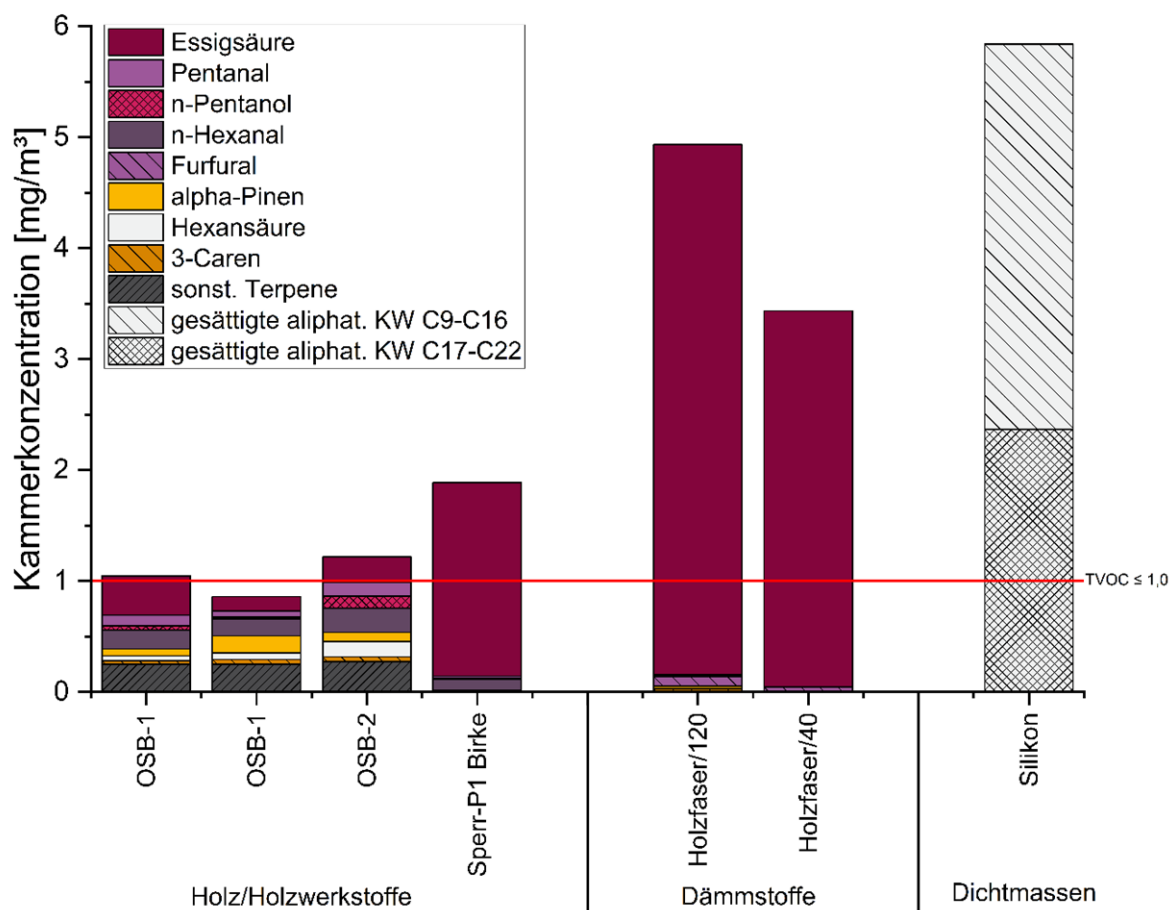
Analog zu den Ergebnissen nach einer Prüfzeit von 3 Tagen emittierte die Holzfaserdämmung/120 (Holzfaser/120) die als Karzinogen der Kategorie 1B eingestufte Substanz 2-Nitrop-ropan (28d: 0,001 mg/m<sup>3</sup>). Dennoch wurde Anforderung des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) an kanzerogene Stoffe von 0,001 mg/m<sup>3</sup> nicht überschritten. Wie aus **Tabelle 13** und **Tabelle 14** ersichtlich, nahm die Emissionsstärke der beiden Holzfaserdämmstoffe (Holzfaser/120, Holzfaser/40) über den Prüfzeitraum von 28 Tagen zu. Als Leitsubstanzen innerhalb der Gruppe der VOC wurden Furfural und Essigsäure detektiert, deren Konzentrationen über den Untersuchungszeitraum anstiegen und die für die jeweils hohen TVOC- und R-Werte verantwortlich waren. Die relative Luftfeuchte in der Prüfkammer sackte nach dem Beladen der Probe Holzfaser/120 auf ca. 15% und bei Holzfaser/40 auf ca. 25% ab, möglicherweise begründet durch die Hygroskopizität des Materials. Erst nach einer Prüfzeit von ca. 12 Tagen lag die relative Luftfeuchte wieder bei ca. 50%. Das starke Absinken und langsame Ansteigen der relativen Luftfeuchte könnte eine Erklärung für den starken Anstieg der Essigsäurekonzentration von 0,451 mg/m<sup>3</sup> (3d) auf 4,775 mg/m<sup>3</sup> (28d) sein. Es ist nicht auszuschließen, dass durch die stei-

gende Materialfeuchte während der Kammerprüfung die hydrolytische Spaltung der Hemicellulosen begünstigt wurde. Für die Prüfung von hygroskopischen Materialien kann grundsätzlich eine Vorkonditionierung in Betracht gezogen werden.

Schwerflüchtige organische Verbindungen (SVOC) wurden auch durch die Produkte Gipsfaserplatte (GF), Vinylbodenbelag 1 (Vinyl-1), den Dispersionsklebstoff (Dispersions-K) und die Silikondichtmasse (Silikon) freigesetzt. Der Anforderungswert von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  wurde jedoch nicht überschritten.

**Abbildung 22** zeigt die Werkstoffe, deren Emissionen den TVOC-Anforderungswert von  $\leq 1,0 \text{ mg/m}^3$  nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen überschritten haben, und die detektierten Leitsubstanzen, die ursächlich für diese Überschreitung waren. Die in **Abbildung 22** gezeigten Konzentrationen an Essigsäure wurden über aktive Probenahme auf Tenax® TA und anschließender Analyse mittels TDS-GC/MS erhoben, wie entsprechend AgBB-Bewertungsschema (06/2021) vorgeschrieben.

**Abbildung 22: Einzelmaterialeien, die den Anforderungswert an den TVOC-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen überschritten und ursächliche Leitsubstanzen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Das identifizierte Emissionsspektrum der drei OSB-Platten war charakteristisch für die Emissionen von Holzwerkstoffplatten und daher sehr ähnlich, wobei die Probe OSB-2 die stärkste Emissionsquelle war (TVOC (28d):  $1,5 \text{ mg/m}^3$ ). Bei den nachgewiesenen Leitsubstanzen handelte es

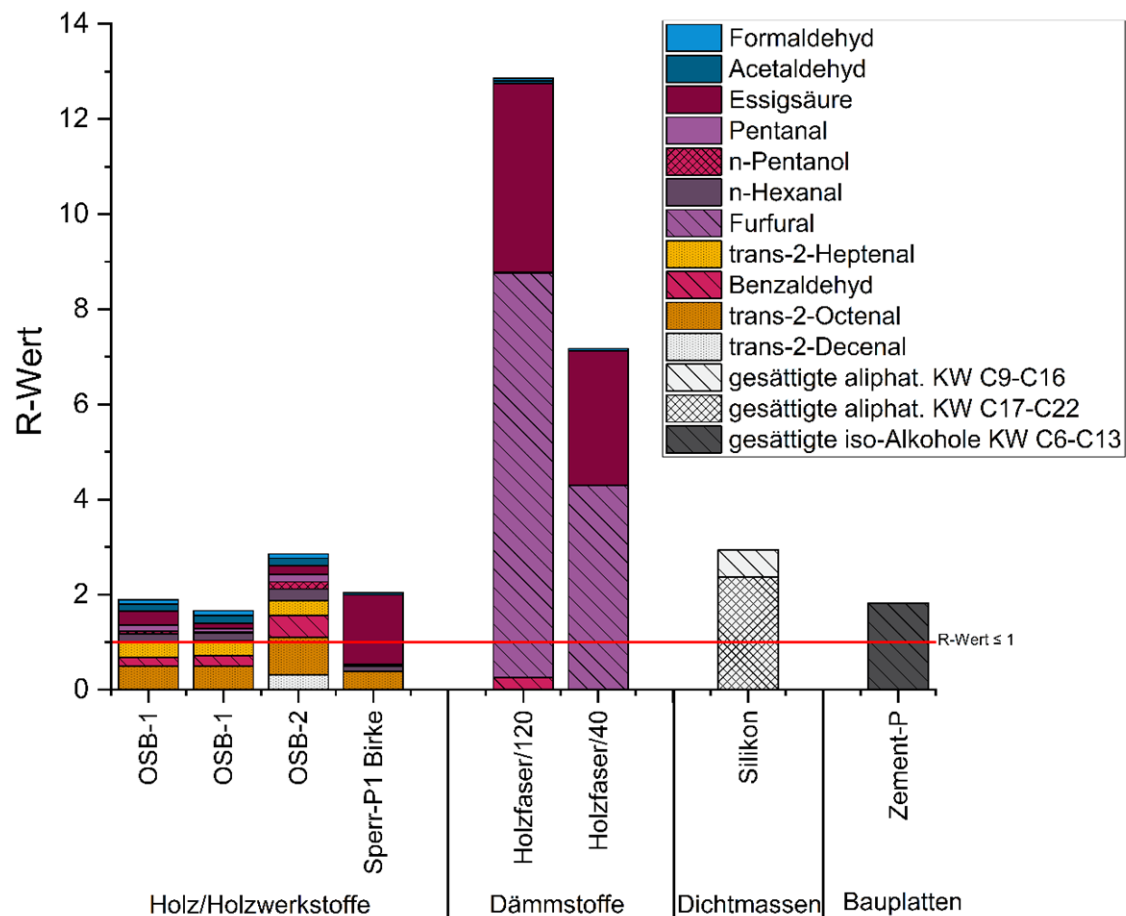
sich primär um die Terpene alpha-Pinen und 3-Caren, die Carbonsäuren Essigsäure und Hexansäure sowie um die Aldehyde n-Hexanal und Pentanal. Die Probe OSB-2 war mit einem Blauen Engel zertifiziert (RAL-UZ 76), dessen Anforderungskriterien nicht eingehalten wurden. Im Rahmen der im Vorhaben durchgeführten Emissionsprüfung wurden die Anforderung an den TVOC-Wert nach 28 Tagen ( $\leq 0,8 \text{ mg/m}^3$ ) und an den R-Wert ( $\leq 1$ ) nicht erfüllt. Als Folge der Nicht-Konformität wurde die Zertifizierung ausgesetzt.

Beide Holzfaserdämmstoffe setzten nach einer Prüfzeit von 28 Tagen Essigsäure in äußerst hohen Konzentrationen frei (Holzfaser/120:  $4,775 \text{ mg/m}^3$ ; Holzfaser/40:  $3,388 \text{ mg/m}^3$ ), sodass die TVOC-Anforderung nicht erfüllt wurde. Die Probe Holzfaser/120 war gemäß dem französischen VOC-Label mit der Emissionsklasse A+ ausgezeichnet. Die dort hinterlegte Anforderung an den TVOC-Wert ( $< 1000 \text{ µg/m}^3$ ) wurde durch die Probe allerdings nicht erfüllt. Beide Holzfaserproben (Holzfaser/120 und Holzfaser/40) waren außerdem mit dem Prüfsiegel des Instituts für Baubiologie Rosenheim GmbH (IBR) „Geprüft und Empfohlen vom IBR“ ausgezeichnet. Dieses Prüfsiegel orientiert sich bei der Bewertung der Freisetzung von VOC an den Kriterien des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021). Allerdings wurden in dem Prüfgutachten des IBR die Essigsäureemissionen nicht berücksichtigt, so dass die Produkte die Anforderungen des IBR-Prüfsiegels nach Abzug der Essigsäurekonzentrationen erfüllten.

Die Silikondichtmasse setzte sehr hohe Konzentrationen an gesättigten, aliphatischen Kohlenwasserstoffen (C9-C16; C17-C22) frei und überschritt daher die TVOC-Anforderungswerte nach 3 Tagen und nach 28 Tagen.

**Abbildung 23** zeigt die Werkstoffe, die den Anforderungswert für den sog. R-Wert ( $\leq 1$ ) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen überschritten, und die detektierten Leitsubstanzen, die ursächlich für diese Überschreitung waren.

**Abbildung 23: Einzelmaterialeien, die den Anforderungswert an den R-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen überschritten und ursächliche Leitsubstanzen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Zu der R-Wertüberschreitung trugen hinsichtlich der OSB-Platten im Wesentlichen die Leitsubstanzen bei, die auch zu einer Überschreitung der Anforderung an den TVOC-Wert führten. Beispielsweise hatte 2-Octenal gemäß NIK-Werte-Liste 2020 einen NIK-Wert von  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sodass sich bereits bei Freisetzung von geringen Konzentrationen ein hoher  $R_i$ -Wert ergab. Darüber hinaus trugen auch die niedermolekularen Carbonylverbindungen Formaldehyd und Acetaldehyd (NIK-Werte:  $100$  bzw.  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) zu der Überschreitung des R-Wertes bei. Hinsichtlich der Probe Sperr-P1 Birke reichte allein die Freisetzung von Essigsäure in hoher Konzentration (28 d:  $1743 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; NIK-Wert:  $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) zu einer Überschreitung des R-Wertes von 1 ( $\sum R_i$ : 1,453). Hinsichtlich der beiden Holzfaserdämmstoffe führten neben den hohen Konzentrationen an Essigsäure besonders die Furfural-Emissionen aufgrund des niedrigen NIK-Wertes von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu hohen R-Werten.

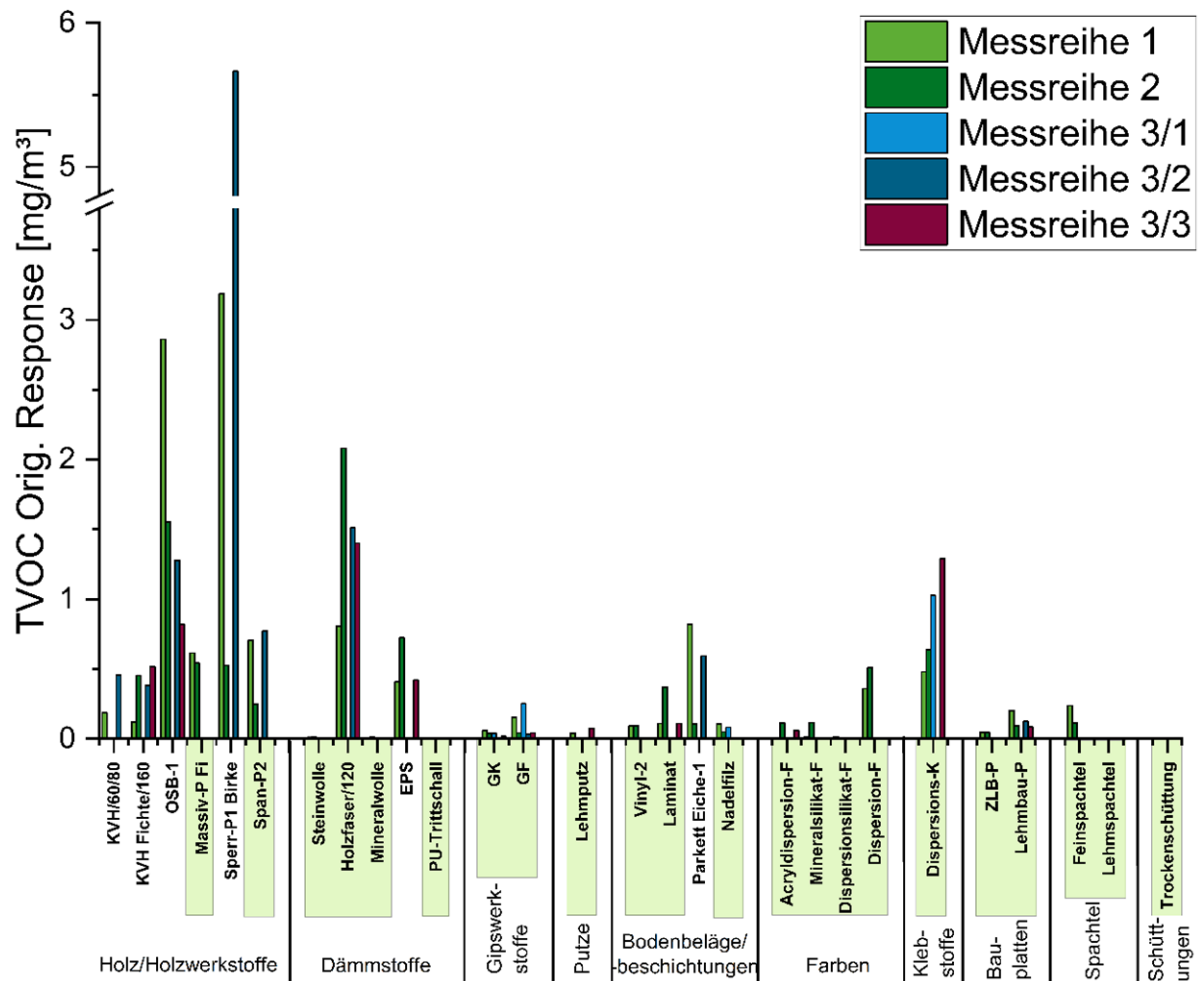
Bezüglich der Silikondichtmasse waren dieselben Leitsubstanzen sowohl für die Überschreitung des TVOC- als auch des R-Wert-Anforderungswertes verantwortlich. Die Zementputzträgerplatte Außenwände (Zement-P) erfüllte zwar die Anforderungen an den TVOC-Wert, aufgrund der Emission von anderen C9-C13 gesättigten iso-Alkoholen ( $R_i$ : 1,820) nicht die Anforderungen an den R-Wert.

#### 4.3.1.1 Wiederholungsmessungen

Wie unter **Abschnitt 4.2.1.2** erläutert, waren wiederholende Emissionsprüfungen aller Einzelmaterialeien, die in den Verbundkonstruktionen und Modellräumen verbaut wurden, parallel zu

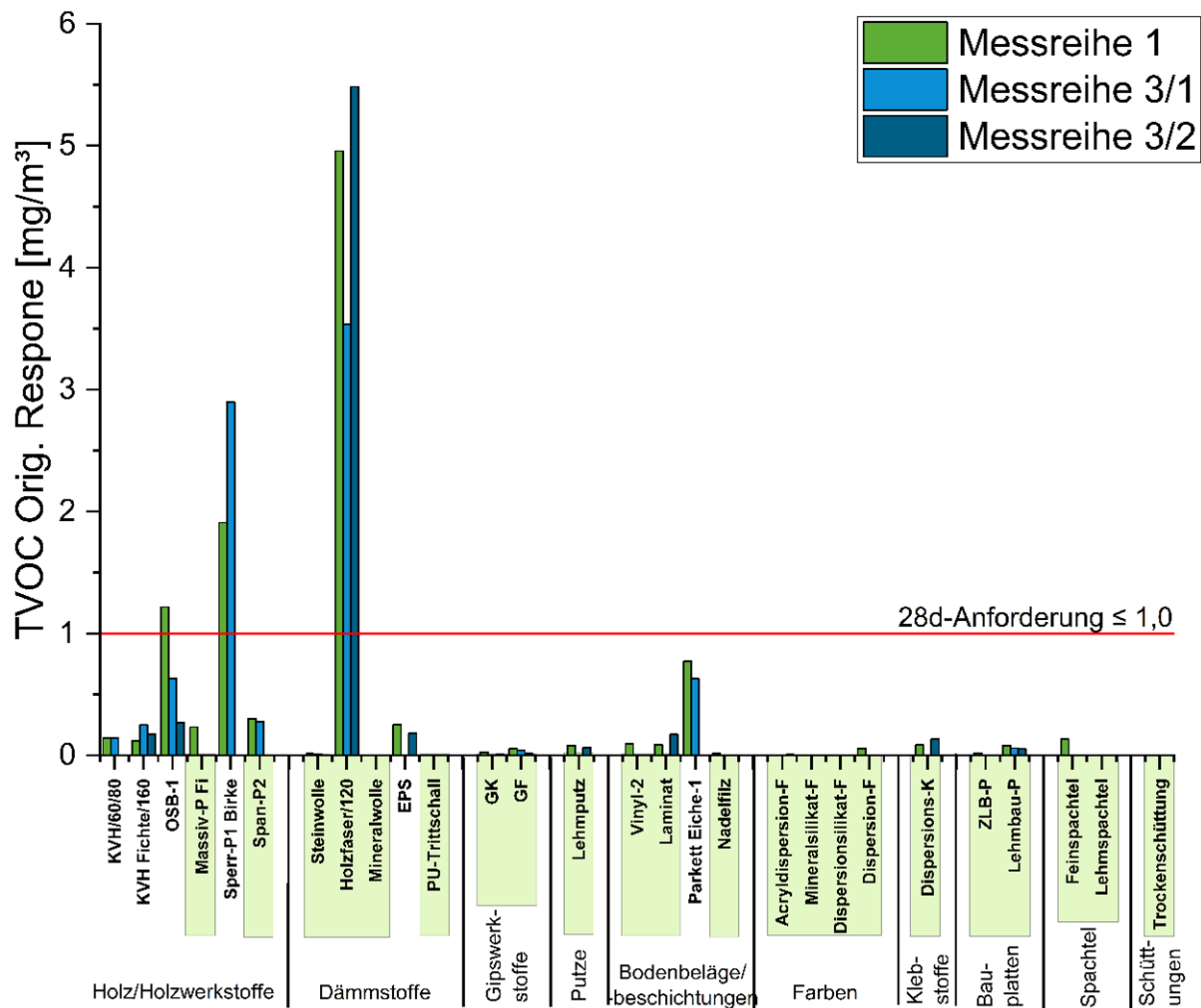
den jeweiligen Emissionsprüfungen notwendig. Die Materialien entstammten demselben Ankauf und stammten damit wahrscheinlich aus derselben Charge, sodass eine direkte Vergleichbarkeit der Messdaten gewährleistet war. In Abhängigkeit davon, wie oft ein Einzelmaterial verbaut wurde, wurde dieses bis zu viermal einer Emissionsprüfung unterzogen. Die Unterschiede hinsichtlich der Emissionsstärke der verschiedenen Werkstoffe im Rahmen der Wiederholungsmessungen sind in **Abbildung 24** (Messwerte nach 3 Tagen) und **Abbildung 25** (Messwerte nach 28 Tagen) anhand der jeweiligen TVOC-Werte dargestellt.

**Abbildung 24: Wiederholungsmessungen von Einzelmaterialien, TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

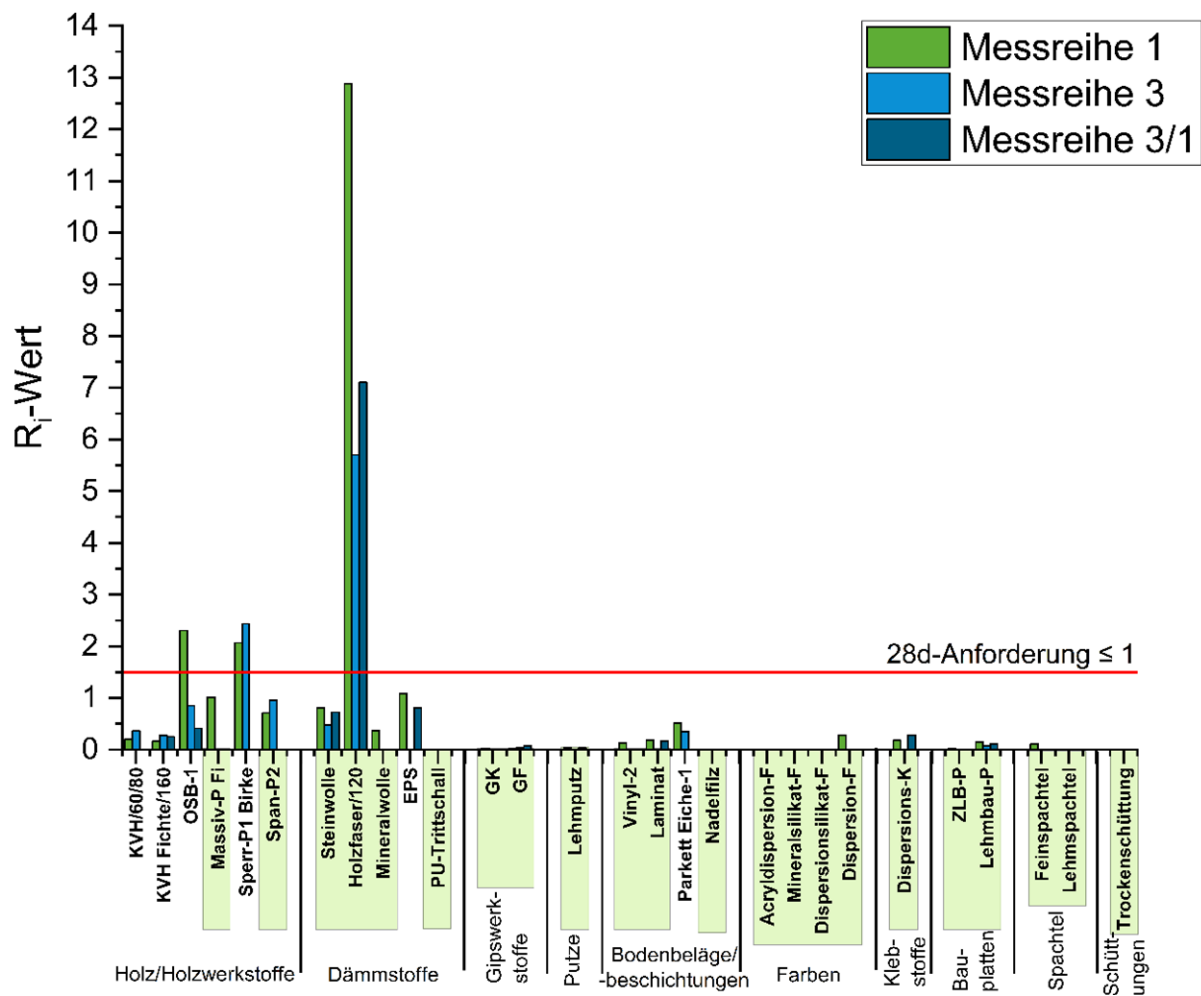
**Abbildung 25: Wiederholungsmessungen von Einzelmaterialien, TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die im Vorhaben gemessenen Schwankungsbreiten zeigen, dass die auf dem Markt erhältlichen Produkte hinsichtlich der Emissionsstärke nicht vergleichbar sind. Dies muss nicht zwingend Auswirkungen auf Produktbewertungen und folglich auf Zertifizierungen haben. Nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen wurden die größten Unterschiede im Emissionsverhalten für holzbauierte Werkstoffe, die Holzfaserdämmung und den Dispersionsklebstoff detektiert. Besonders bei den Proben OSB-1, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120 und Dispersions-K variierten die TVOC-Werte auch bei mehrfachen Wiederholungsmessungen stark. Bei den vier durchgeführten Messungen des Dispersionsklebstoffs zeigte sich mit jeder Messung eine höhere Emissionsstärke. Angesichts des TVOC-Anforderungswertes von  $\leq 10 \text{ mg/m}^3$  gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) hatten diese Schwankungen zwar keine Auswirkungen auf die Produktbewertung, allerdings nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen hinsichtlich der Anforderungen an den TVOC- und an den R-Wert (siehe **Abbildung 26**). Demzufolge hätte die Probe OSB-1 sowohl die AgBB-Anforderungen an den TVOC-Wert ( $\leq 1,0 \text{ mg/m}^3$ ) als auch an den R-Wert ( $\leq 1$ ) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen im Rahmen der ersten Messreihe 1 nicht bestanden, allerdings bei den Wiederholungsmessungen in der dritten Messreihe. Die Holzfaserdämmung (Holzfaser/120) hätte beide Anforderungen im Rahmen keiner Prüfung erfüllt.

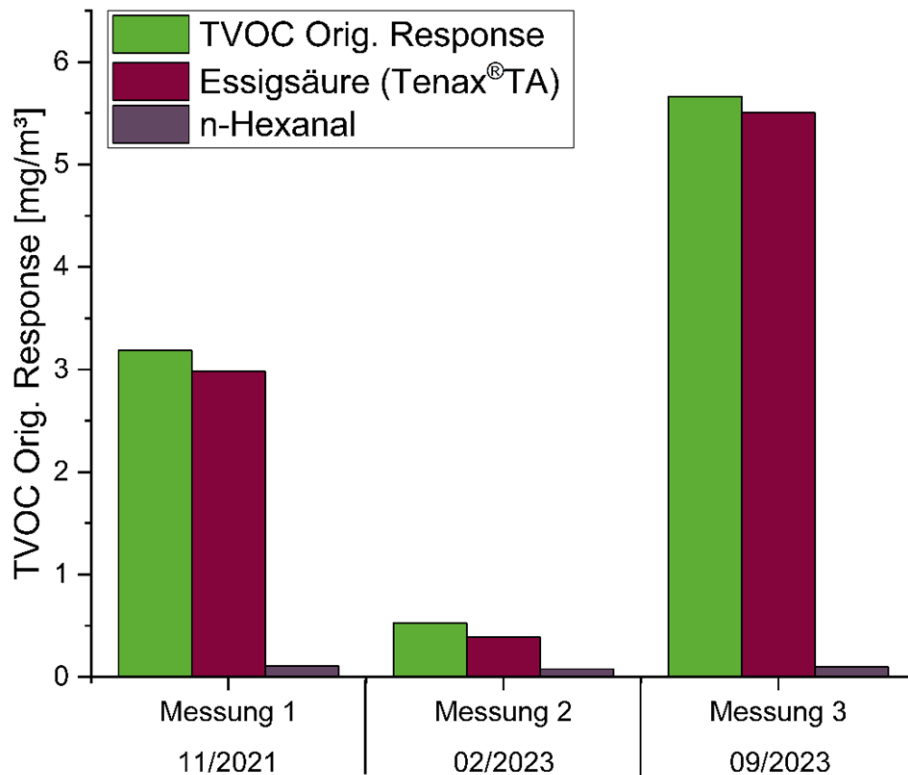
**Abbildung 26: Wiederholungsmessungen von Einzelmaterialien, Ri-Werte nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Grün markierte Materialien mit Qualitätszeichen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die unterschiedlichen Emissionsstärken waren auf die von den betreffenden Werkstoffen freigesetzten Leitsubstanzen zurückzuführen, wie anhand des Beispiels der Probe Sperr-P1 Birke in **Abbildung 27** deutlich wurde. Die Holzwerkstoffplatte wurde im Rahmen aller drei Messreihen erneut auf Emissionen geprüft. In der Abbildung ist neben der Messreihe auch der Zeitraum der Messung vermerkt (Monat/Jahr). Die Probe setzte als Leitsubstanz Essigsäure frei, deren Konzentration nahezu der TVOC-Konzentration entsprach, sodass sich Schwankungen in der Emission von Essigsäure direkt auf die Höhe des TVOC-Wertes auswirkten.

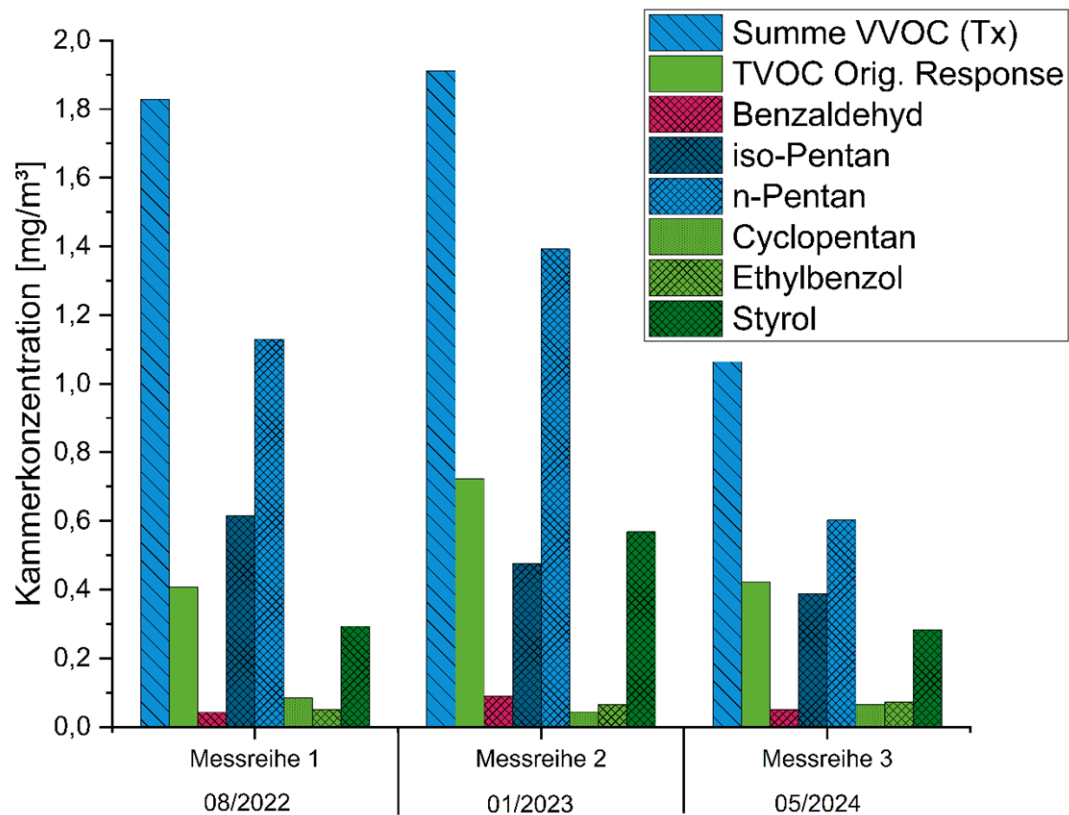
**Abbildung 27: Probe Sperrholzplatte Birke (Sperr-P1 Birke), Emissionsprüfungen über jeweils 3 Tage, Wiederholungsmessungen, TVOC-Wert und Leitsubstanzen. Messreihe und Messzeitraum (Monat/Jahr).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Neben holzbasierten Werkstoffen (Platten, Dämmstoff) wurden auch hinsichtlich rein synthetischer Produkte größere Schwankungen im Emissionsverhalten detektiert. Neben dem Dispersionsklebstoff (Probe: Dispersions-K) setzte auch eine aus expandiertem Polystyrol bestehende Mehrzweckdämmplatte (Probe: EPS) neben den zur Substanzgruppe der VVOC zählenden Verbindungen iso-Pentan und n-Pentan als Treibmittel auch Styrol als Leitsubstanz innerhalb der Gruppe der VOCs frei mit entsprechender Auswirkung auf den TVOC-Wert (siehe **Abbildung 28**).

**Abbildung 28: Probe Mehrzweckdämmplatte (EPS), Emissionsprüfungen über jeweils 3 Tage, Wiederholungsmessungen, TVOC-Wert und Leitsubstanzen. Messreihe und Messzeitraum (Monat/Jahr).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 4.3.2 Verbundkonstruktionen

Die Messwerte gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen und 28 Tagen und die jeweils geltenden Anforderungswerte sind **Tabelle 15** und **Tabelle 16** zu entnehmen. In **Tabelle 16** ist zusätzlich informativ die jeweilige Formaldehyd-Konzentration in der Prüfkammer nach einem Zeitraum von 28 Tagen aufgeführt. Zwecks Informationserhalt sind abweichend vom Anforderungswert einige TVOC-Werte und VOC-ohne NIK mit zwei Dezimalstellen angegeben. Die in den Modellräumen eingesetzten Verbundkonstruktionen (siehe **Abschnitt 4.1.3**) sind in den nachfolgenden Tabellen hellgrün gekennzeichnet.

Nach einer Prüfzeit von 3 Tagen erfüllten alle Verbundkonstruktionen die Anforderungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Kanzerogene Stoffe oberhalb der analytischen Nachweisgrenzen von  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wurden nicht nachgewiesen.

Aufgrund eines technischen Fehlers konnte kein 3-Tage-Wert bei der Prüfung von Wand 1/Holzrahmenbau erfasst werden. Bei der Prüfung von Wandaufbau 2/Lehmbau konnten erst nach einer Prüfzeit von 6 Tagen Luftprobenahmen durchgeführt werden, da die relative Luftfeuchte in der Prüfkammer ca. 94 % betrug. Dies ist auf den anhaltenden Trocknungsprozess des noch feuchten Lehms zurückzuführen, der erst kurz vor der Beladung aufgetragen wurden.

**Tabelle 15: Auswertung der Emissionsmessungen der Verbundkonstruktionen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.**

| Verbundkonstruktion         | Anforderungswerte<br>TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤ 10 | Anforderungswerte<br>Kancerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤ 0,01 |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Wandkonstruktionen</b>   |                                                             |                                                                        |
| Wand 1 – Holzrahmenbau      | n.a.                                                        | n.a.                                                                   |
| Wand 2 – Lehmnbau           | n.a.                                                        | n.a.                                                                   |
| Wand 3 – Holzhybridbau      | 0,74                                                        | < 0,001                                                                |
| Wand 4 – Holzmassivbau      | 0,45                                                        | < 0,001                                                                |
| <b>Deckenkonstruktionen</b> |                                                             |                                                                        |
| Decke 1 – Holzrahmenbau     | 0,33                                                        | < 0,001                                                                |
| Decke 2 – Skelettbau        | 0,78                                                        | < 0,001                                                                |
| Decke 3 – Holzbau           | 0,23                                                        | < 0,001                                                                |
| Decke 4 – Holzmassivbau     | 0,27                                                        | < 0,001                                                                |
| Decke 5 - Lehmnbau          | 0,48                                                        | < 0,001                                                                |
| Decke 6 - Holzhybridbau     | 0,60                                                        | < 0,001                                                                |
| <b>Bodenkonstruktionen</b>  |                                                             |                                                                        |
| Boden 1 – Nadelfilz         | 0,80                                                        | < 0,001                                                                |
| Boden 2 – Parkett           | 0,27                                                        | < 0,001                                                                |
| Boden 3 – Vinyl             | 0,22                                                        | < 0,001                                                                |
| Boden 4 – Laminat           | 0,02                                                        | < 0,001                                                                |
| Boden 5 – Laminat/Lehm      | 0,20                                                        | < 0,001                                                                |
| Boden 6 - Nadelfilz         | 1,32                                                        | < 0,001                                                                |

n.a. nicht auswertbar

**Tabelle 16:** Auswertung der Emissionsmessungen der Verbundkonstruktionen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung.

| Verbund-konstruktion        | TVOC [mg/m³] | TSVOC [mg/m³] | Kanzerogene Stoffe [mg/m³] | VOC ohne NIK [mg/m³] | ΣRi (R-Wert) | Formaldehyd [mg/m³] |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|----------------------|--------------|---------------------|
| Anforderungswerte           | ≤1,0         | ≤0,1          | ≤0,001                     | ≤0,1                 | ≤1           | informativ          |
| <b>Wandkonstruktionen</b>   |              |               |                            |                      |              |                     |
| Wand 1 – Holzrahmenbau      | 0,77         | < 0,005       | < 0,001                    | 0,01                 | 1,190 (1)    | 0,011               |
| Wand 2 – Lehm-bau           | 0,30         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,597 (1)    | 0,005               |
| Wand 3 – Holzhybridbau      | 0,66         | < 0,005       | < 0,001                    | 0,01                 | 1,039 (1)    | 0,017               |
| Wand 4 – Holzmassivbau      | 0,33         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,926 (1)    | 0,050               |
| <b>Deckenkonstruktionen</b> |              |               |                            |                      |              |                     |
| Decke 1 – Holzrahmenbau     | 0,13         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,259 (0)    | 0,009               |
| Decke 2 – Skelettbau        | 0,40         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,748 (1)    | 0,037               |
| Decke 3 – Holzbau           | 0,08         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,655 (1)    | 0,056               |
| Decke 4 – Holzmassivbau     | 0,14         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,380 (0)    | 0,026               |
| Decke 5 - Lehm-bau          | 0,17         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,373 (0)    | 0,024               |
| Decke 6 – Holzhybridbau     | 0,35         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,442 (0)    | 0,007               |
| <b>Bodenaufbauten</b>       |              |               |                            |                      |              |                     |
| Boden 1 – Nadelfilz         | 0,10         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,080 (0)    | 0,002               |
| Boden 2 – Parkett           | 0,27         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,196 (0)    | 0,004               |
| Boden 3 – Vinyl             | 0,10         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,128 (0)    | < 0,002             |
| Boden 4 – Laminat           | 0,03         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,127 (0)    | 0,007               |

| Verbund-konstruktion   | TVOC [mg/m³] | TSVOC [mg/m³] | Kanzerogene Stoffe [mg/m³] | VOC ohne NIK [mg/m³] | ΣRi (R-Wert) | Formaldehyd [mg/m³] |
|------------------------|--------------|---------------|----------------------------|----------------------|--------------|---------------------|
| Anforderungswerte      | ≤1,0         | ≤0,1          | ≤0,001                     | ≤0,1                 | ≤1           | informativ          |
| Boden 5 – Laminat/Lehm | 0,09         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,271 (0)    | 0,010               |
| Boden 6 – Nadelfilz    | 0,02         | < 0,005       | < 0,001                    | < 0,005              | 0,069 (0)    | < 0,002             |

Nach einer Prüfzeit von 28 Tagen wurden die Anforderungskriterien des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) von allen Verbundaufbauten erfüllt. Kanzerogene Stoffe oberhalb der Nachweisgrenze von 1 µg/m³ wurden nicht nachgewiesen.

Um die Emissionsdaten der Einzelmateriale mit denen der Verbundaufbauten vergleichen zu können, wurden die ermittelten Kammerkonzentrationen gemäß **Gleichung (4-1)** in flächenspezifische Emissionsraten umgerechnet:

$$SER_A = C * q \quad (4-1)$$

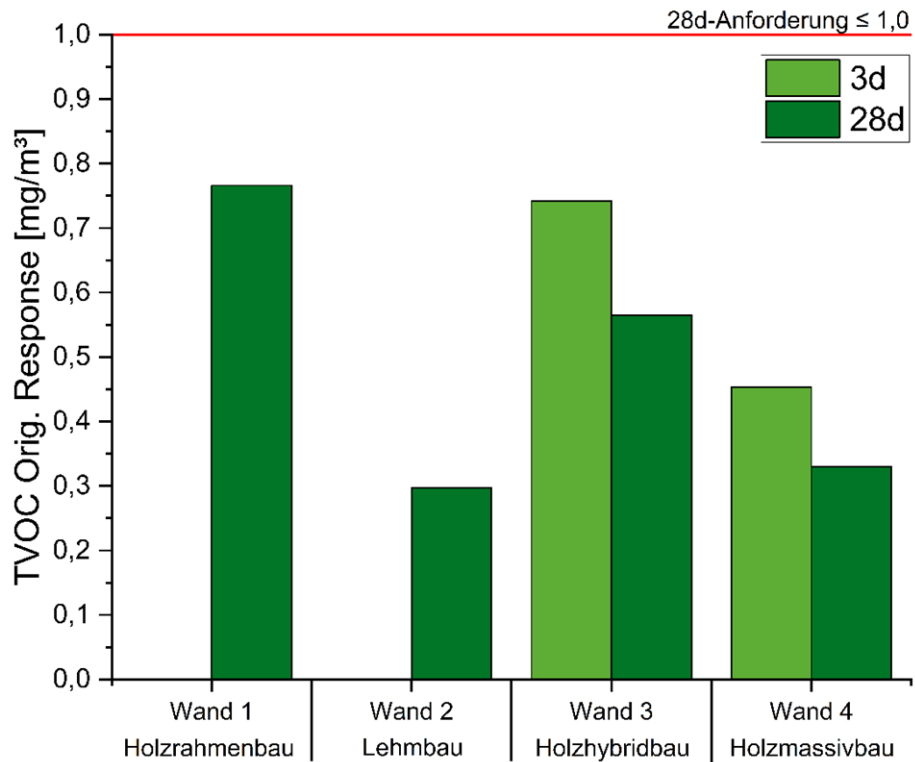
mit  $SER_A$  = flächenspezifische Emissionsrate,  $C$  = Kammerkonzentration und  $q$  = flächenspezifische Lüftungsrate

#### 4.3.2.1 Wandkonstruktionen

Die gemessenen TVOC-Werte der Wandkonstruktionen nach Prüfzeiträumen von 3 und 28 Tagen zeigt **Abbildung 29**. Die detektierten Leitsubstanzen, die zum TVOC-Wert maßgeblich beigetragen haben, sind **Abbildung 30** zu entnehmen. Wie oben erläutert, konnten aus technischen Gründen keine 3-Tage-Werte für die Konstruktionen Wand 1/Holzrahmenbau und Wand 2/Lehmbau erhoben werden. In **Abbildung 30** sind daher zusätzlich die Messwerte nach einem Zeitraum von 7 Tagen aufgeführt.

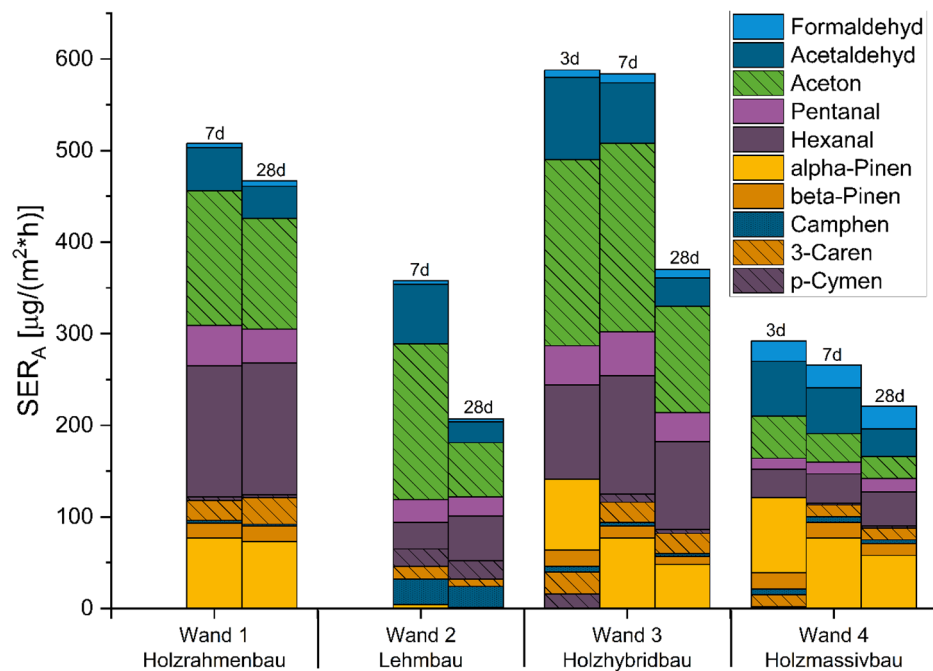
Alle vier Wandkonstruktionen erfüllten den TVOC-Anforderungswert nach 28 Tagen. Die Emissionsstärke der Wände nahm über diesen Untersuchungszeitraum ab, wobei Wand 1/Holzrahmenbau die stärkste und Wand 2/Lehmbau die schwächste Emissionsquelle darstellte. Da es sich bei allen Aufbauten um holzbasierte Konstruktionen handelte, wurden für Holz und Holzwerkstoffe charakteristische Leitsubstanzen detektiert: Aldehyde (Pentanal und n-Hexanal), die leichtflüchtigen Carbonyle Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton sowie die Terpene alpha-Pinen, beta-Pinen, Camphen, 3-Caren und p-Cymen.  $C_1$ - $C_2$ -Carbonsäuren wurden von allen vier Konstruktionen nur in sehr niedrigen Konzentrationen (z. B. Wand 3/Holzhybridbau, Essigsäure (28d): 11 µg/(m²\*h)) oder im Bereich der analytischen Bestimmungsgrenze (5 µg/m³) freigesetzt. Die Abnahme des TVOC-Wertes über 28 Tage Prüfdauer war im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass Aceton in geringeren Konzentrationen im Vergleich zu der 3-Tage-Messung freigesetzt wurde. Die emittierten Konzentrationen der anderen Leitsubstanzen blieben nahezu konstant auf einem ähnlichen Niveau oder nahmen leicht zu (z. B. n-Hexanal).

**Abbildung 29: Wandkonstruktionen. TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen.**  
Aus technischen Gründen keine 3-Tage-Werte für Wand 1 und Wand 2 verfügbar.



[Quelle: Fraunhofer WKI]

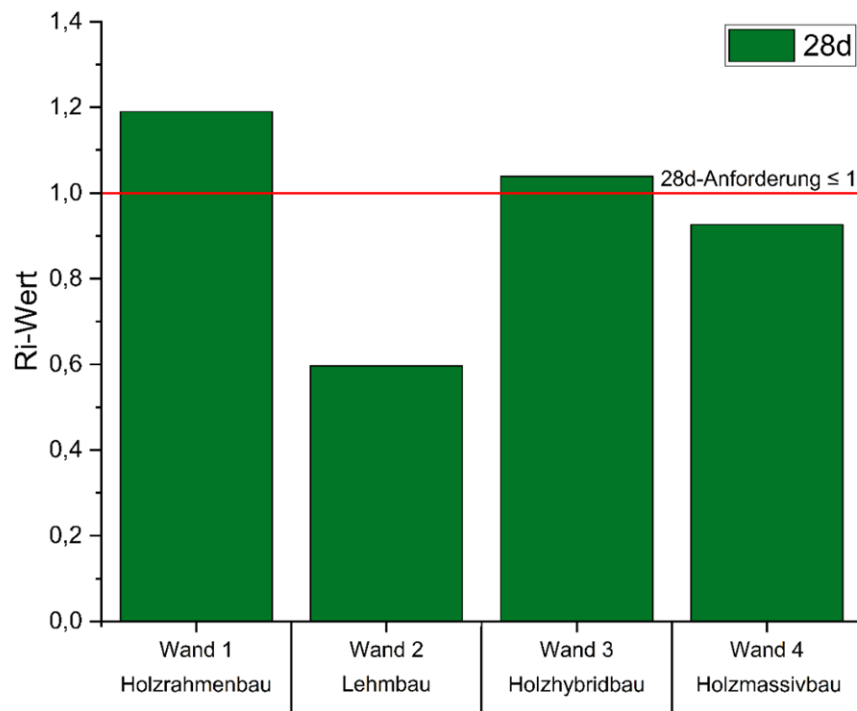
**Abbildung 30: Wandkonstruktionen. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Aus technischen Gründen keine 3-Tage-Werte für Wand 1 und Wand 2 verfügbar. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS) und DNPH (HPLC/DAD).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

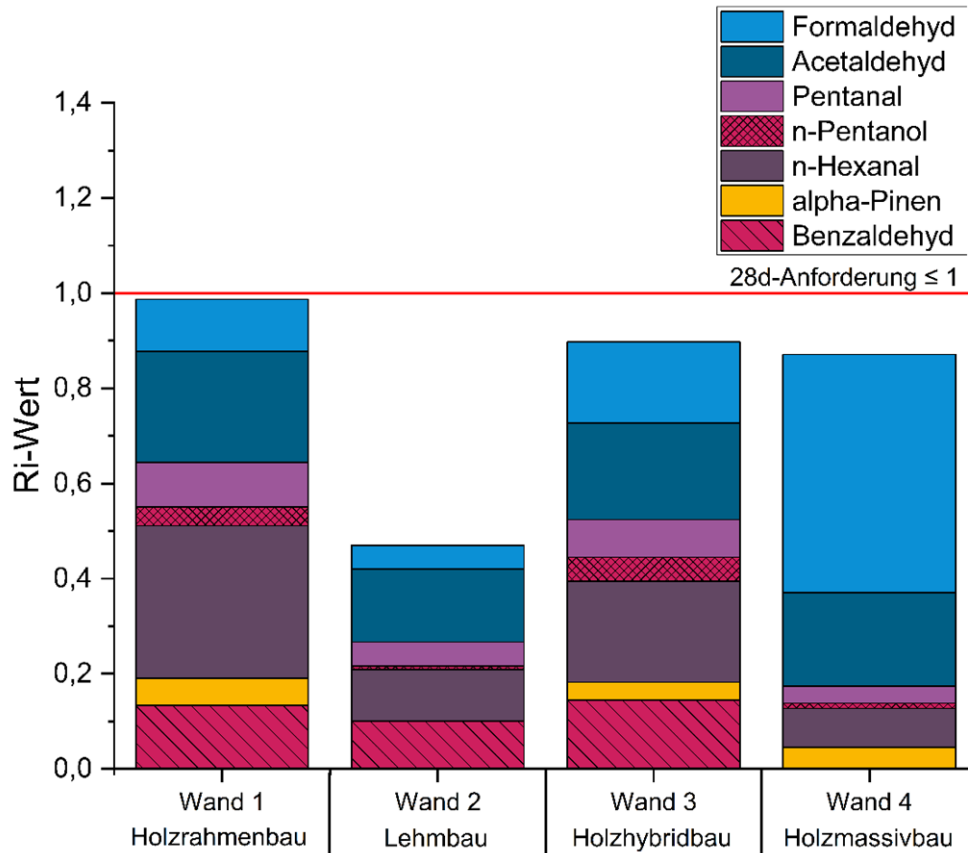
Auch die Anforderung an den R-Wert (28 d) wurde von allen Konstruktionen erfüllt. **Abbildung 31** zeigt die aufsummierten Ri-Werte, die der Bildung des R-Wertes nach einer Prüfdauer von 28 Tagen zugrunde liegen. Die R-Werte lagen für alle Wandaufbauten bei 1. **Abbildung 32** zeigt die Substanzen, die den R-Wert im Wesentlichen beeinflussen haben.

**Abbildung 31: Wandkonstruktionen. Aufsummierter Ri-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 32: Wandkonstruktionen. Ri-Werte von Substanzen, die maßgeblich zur Bildung des R-Wertes beigetragen haben, nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS) und DNPH (HPLC/DAD).**

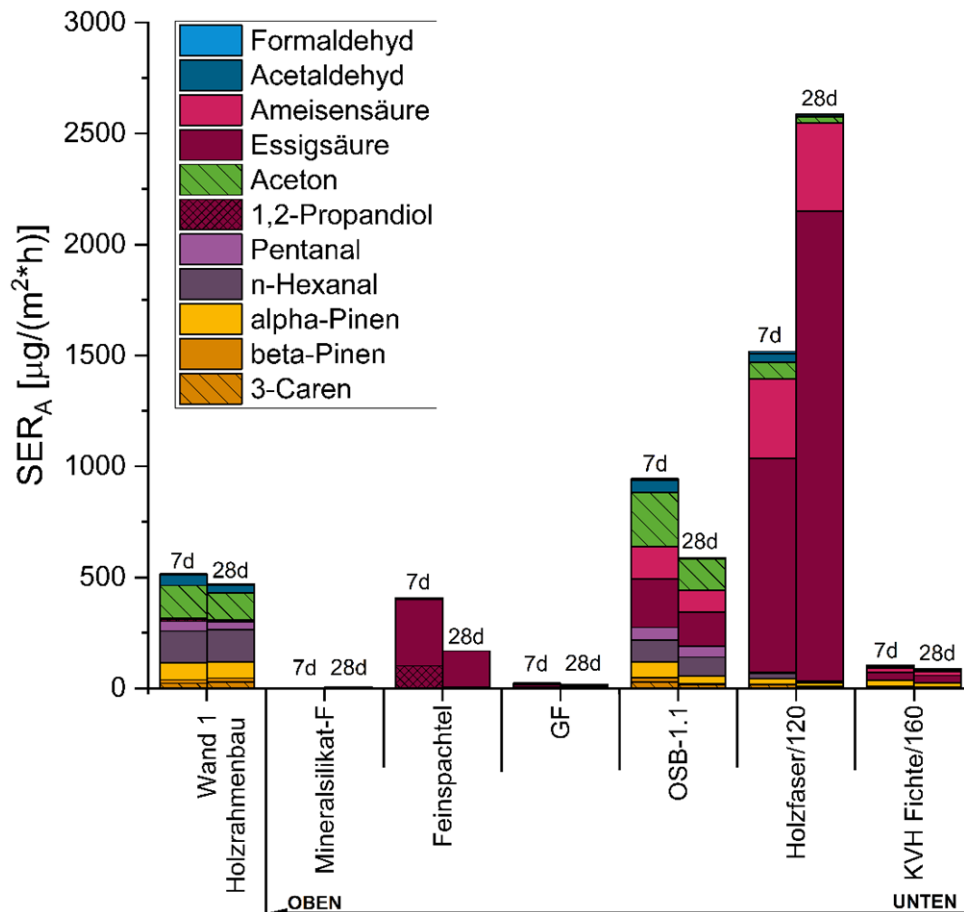


[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die R-Werte der Wandkonstruktionen wurden im Wesentlichen durch die für Holzbauweisen typischen Emittenten der Aldehyde (Formaldehyd, Acetaldehyd, Pentanal, n-Hexanal) und Terpene (alpha-Pinen) bedingt. Benzaldehyd, das sich aufgrund eines NIK-Wertes von  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (NIK-Werte-Liste 2020) auch in geringen Konzentrationen auf den R-Wert auswirkt, wurde in den Konstruktionen Wand 1-3 im Wesentlichen von der verbauten OSB-Platte, der Holzfaserdämmung und der Lehmbauplatte freigesetzt, in niedrigen Konzentrationen auch den abschließenden Farbauftrag bei Wand 1/Holzrahmenbau (Mineralsilikat-F) sowie in Wand 4/Holzmassivbau von der verbauten Gipsfaser- und der Gipskartonplatte. Die Konzentrationen lagen allerdings nach einer Prüfdauer von 28 Tagen unterhalb von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sodass Benzaldehyd keine Relevanz für den R-Wert hatte.

Wie sich die einzelnen, in der Konstruktion verbauten Materialien auf das Emissionsverhalten der Gesamtkonstruktion auswirkte, ist beispielhaft in **Abbildung 33** für die Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau und in **Abbildung 34** für die Konstruktion Wand 2/Lehmnbau gezeigt. Aufgrund der fehlenden Messwerte nach 3 Tagen sind in beiden Abbildungen zur Verdeutlichung des zeitabhängigen Emissionsverhaltens stattdessen die 7-Tage-Werte aufgeführt.

**Abbildung 33: Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 7 und 28 Tagen. 3-Tage-Messwerte nicht verfügbar. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SE_{RA}$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



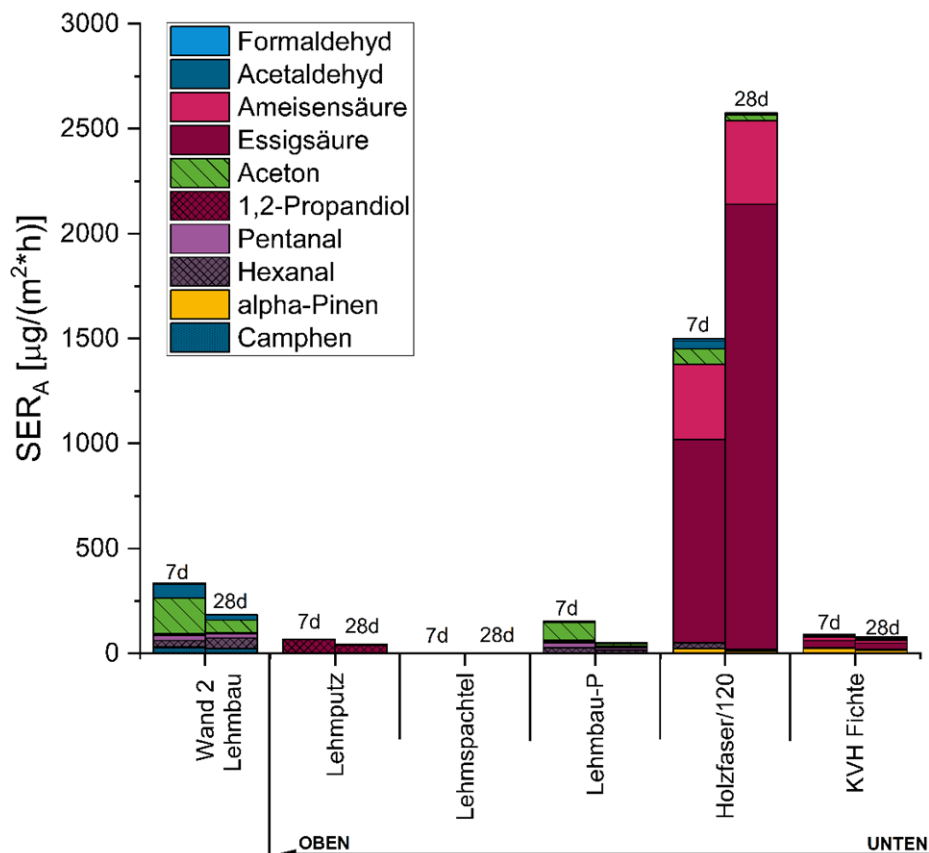
[Quelle: Fraunhofer WKI]

Auch wenn sich das Emissionsspektrum der Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau auf die verbauten Einzelmaterialien zurückführen ließ, so lag die Emissionsstärke deutlich niedriger als die einiger Materialien und folglich auch niedriger als die Emissionsstärke aller Materialien zusammen betrachtet. Die niedermolekularen Aldehyde Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton wurden in der Konstruktion von den holzbasierten Materialien Konstruktionsvollholz (KVH Fichte/160), Holzfaserdämmung (Holzfaser/120) und OSB-Platte (OSB-1.1) freigesetzt, wobei die Konzentrationen in einem ähnlichen Bereich liegen, wie sie durch die Probe OSB-1.1 emittiert wurden. Dasselbe galt für die Freisetzung von Terpenen. Da mit der Holzfaserdämmung (Holzfaser/120) eine starke Quelle für Essigsäure verbaut wurde ( $SE_{RA}$  (3-28d): 297-2119 µg/(m²\*h)), wäre eine nennenswerte Freisetzung von Essigsäure durch die Wandkonstruktion nicht ausgeschlossen gewesen. Diese setzte die C2-Carbonsäure allerdings in nur sehr geringen Konzentrationen frei, die über den Untersuchungszeitraum nahezu konstant blieben ( $SE_{RA}$  (3-28d): 5-4 µg/(m²\*h)). Angesichts der Messergebnisse von Wandkonstruktion 1/Holzrahmenbau könnte angenommen werden, dass die gespachtelte und mit Mineralsilikatfarbe gestrichene Gipsfaserplatte als oberste Beplankung niedermolekulare Carbonylverbindungen sowie C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-Carbonsäuren absorbieren und somit ursächlich für die niedrigen Emissionen des Gesamtverbunds sein könnte. Allerdings zeigen auch die Prüfdaten von **Wandaufbau 2 (Lehmbau)**, dass

sich starke Emissionsquellen nicht zwingend im Emissionsverhalten eines konstruktiven Aufbaus widerspiegeln müssen.

**Abbildung 34** gibt eine Übersicht über die  $SER_A$  der freigesetzten VOC-Leitsubstanzen der Konstruktion **Wand 2/Lehmbau** und der verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen. Hinsichtlich des Lehmputzschichtes lagen die ausgewählten Leitsubstanzen unterhalb der jeweiligen analytischen Bestimmungsgrenze. Der Wandaufbau emittierte primär Acetaldehyd und Aceton in hohen Konzentrationen (Acetaldehyd: 65 bzw. 23  $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  nach 7d bzw. 28d; Aceton: 170 bzw. 59  $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  nach 7d bzw. 28d). Darüber hinaus setzte er Pentanal, n-Hexanal, Camphen und p-Cymen in erhöhten Konzentrationen frei. Die Emissionen von Pentanal und n-Hexanal konnten auf die verbaute Lehmputzplatte zurückgeführt werden. Die detektierten Terpene sowie Acetaldehyd und Aceton wurden ebenfalls als Leitsubstanzen von der verbauten Holzfaserdämmung (Holzfaser/120) freigesetzt, sodass diese bestimmend für das Emissionsverhalten der Lehmputzwand waren. Vergleichbar mit der Wandkonstruktion 1/Holzrahmenbau spiegelte sich die Holzfaserdämmung als sehr starke Emissionsquelle nicht im Emissionsverhalten der Wandkonstruktion wider. Im Gegenteil lagen die Konzentrationen von Ameisensäure und Essigsäure sowohl nach 7d als auch nach 28d Prüfzeit jeweils unterhalb der analytischen Nachweisgrenze (5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Abbildung 34: Konstruktion Wand 2/Lehmbau. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 7 und 28 Tagen. 3-Tage-Messwerte nicht verfügbar. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SER_A$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



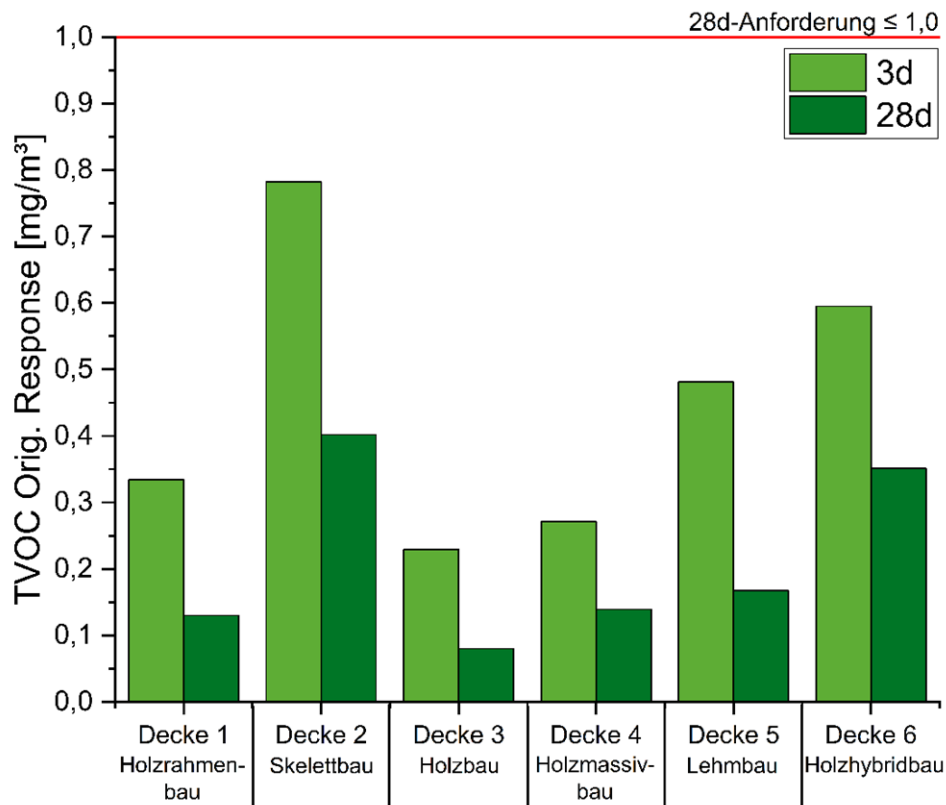
[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 4.3.2.2 Deckenkonstruktionen

Die gemessenen TVOC-Werte der Deckenkonstruktionen nach Prüfzeiträumen von 3 und 28 Tagen zeigt **Abbildung 35**. Die detektierten Leitsubstanzen, die zum TVOC-Wert maßgeblich beigetragen haben, sind **Abbildung 36** zu entnehmen.

Ebenso wie die Wandkonstruktionen erfüllten auch die untersuchten Deckenelemente den TVOC-Anforderungswert nach 28 Tagen. Die Emissionsstärke der Decken nahm über diesen Untersuchungszeitraum ab, wobei Decke 2/Skelettbau die stärkste und Decke 3/Holzbau die schwächste Emissionsquelle darstellte. Decke 3/Holzbau verfügte mit nur vier Materialschichten über den einfachsten konstruktiven Aufbau (siehe auch **Tabelle 6**). Aufgrund der holzbasierten Konstruktionen wurden charakteristische Leitsubstanzen ähnlich zu den Wandaufbauten detektiert: leichtflüchtige Carbonylverbindungen (Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton), Aldehyde (Pentanal, n-Hexanal), Terpene (alpha-Pinen, beta-Pinen, 3-Caren, Limonen) sowie die C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-Carbonsäuren. Diese wurden im Vergleich zu den anderen Konstruktionen nicht von Decke 1/Holzrahmenbau freigesetzt. Hier lagen die Konzentrationen von Ameisensäure und Essigsäure unterhalb oder im Bereich der analytischen Bestimmungsgrenze (5 µg/m<sup>3</sup>).

**Abbildung 35: Deckenkonstruktionen. TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen.**



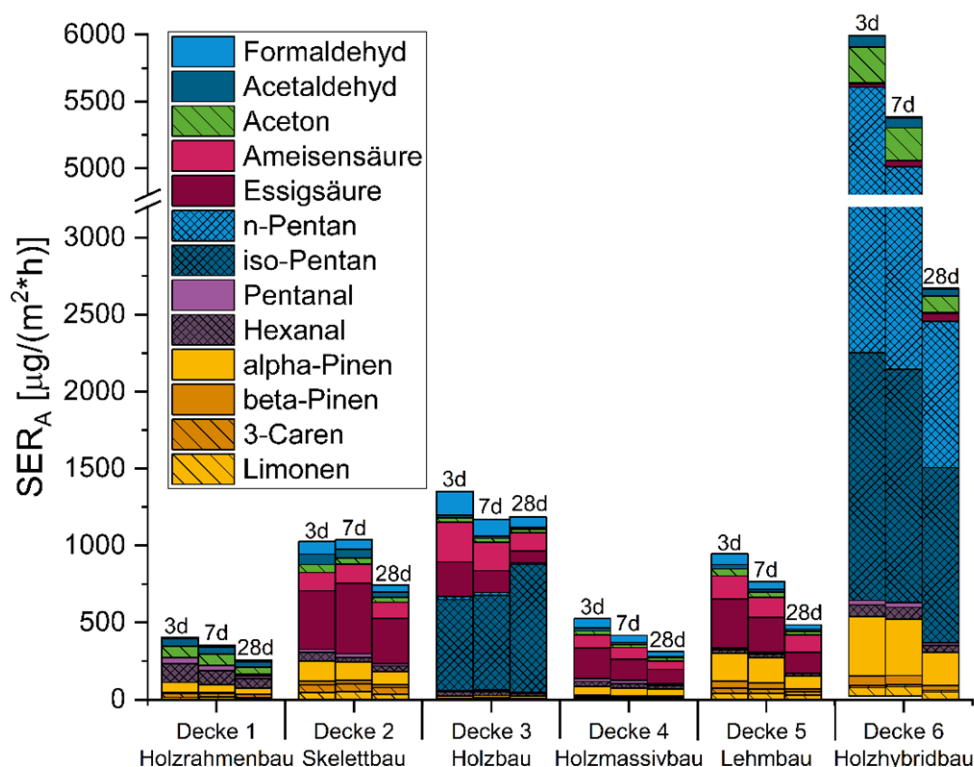
[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die meisten der detektierten Leitsubstanzen ließen sich auf das verbaute Konstruktionsvollholz (KVH) und die eingesetzten Plattenwerkstoffe zurückführen (gesättigte Aldehyde, Terpene, Carbonsäuren). Auch für die Emission von Aceton waren die Plattenwerkstoffe ursächlich. Diese Materialien beeinflussten daher maßgeblich das Emissionsverhalten der Deckenkonstruktionen. Darüber hinaus waren sowohl die Stein- als auch die Mineralwolldämmung starke Emissionsquellen für Formaldehyd (verbaut in Decke 1/Holzrahmenbau, Decke 2/Skelettbau, Decke 4/Holzmassivbau). Abweichend zu den Emissionsspektren der anderen Konstruktionen setzten

Decke 3/Holzbau und Decke 6/Holzhybridbau die zu der Gruppe der VVOC zählenden Verbindungen n-Pentan und iso-Pentan frei. Beide Substanzen werden als Treibmittel eingesetzt und konnten daher auf das in beiden Deckenelementen verbaute expandierte Polystyrol (EPS) als Dämmebene zurückgeführt werden. Da es sich um leichtflüchtige Verbindungen handelt, fließen sie nicht in die Bildung des TVOC-Wertes ein, sodass Decke 3/Holzbau bei ausschließlicher Betrachtung der Gruppe der VOC der Aufbau mit der geringsten Emissionsstärke war.

Auf Grundlage der im Rahmen der Einzelmaterialprüfungen erhobenen Messdaten ist grundsätzlich eine Identifizierung charakteristischer, die Gesamtkonstruktion beeinflussender Werkstoffe möglich. Wenn allerdings mehrere Emissionsquellen für eine Substanz verbaut wurden, wie beispielsweise Plattenwerkstoffe und anorganische Dämmstoffe als potentielle Quellen für Formaldehyd, kann auf Basis der Messergebnisse nicht auf das die Konstruktion stärker beeinflussende Material geschlossen werden. Einerseits kann die Emissionsstärke eines einzelnen Materials je nach Charge unterschiedlich sein. Andererseits können zwischen den benachbarten Schichten potenzielle Senken auftreten. Folglich resultierte die Emissionsstärke der Gesamtkonstruktion nicht aus einem „Aufsummieren“ des Emissionspotentials der verbauten Werkstoffe. Vielmehr lagen die durch den Deckenaufbau freigesetzten Konzentrationen bezüglich der detektierten Verbindungen sowohl über- oder unterhalb als auch in einem ähnlichen Bereich wie die durch die Einzelwerkstoffe emittierten Konzentrationen. In den Abschnitten 6.2.2 und 6.3.4 wurde der Zusammenhang zwischen dem Emissionsverhalten von Einzelmaterialien und Verbundkonstruktionen weiter untersucht.

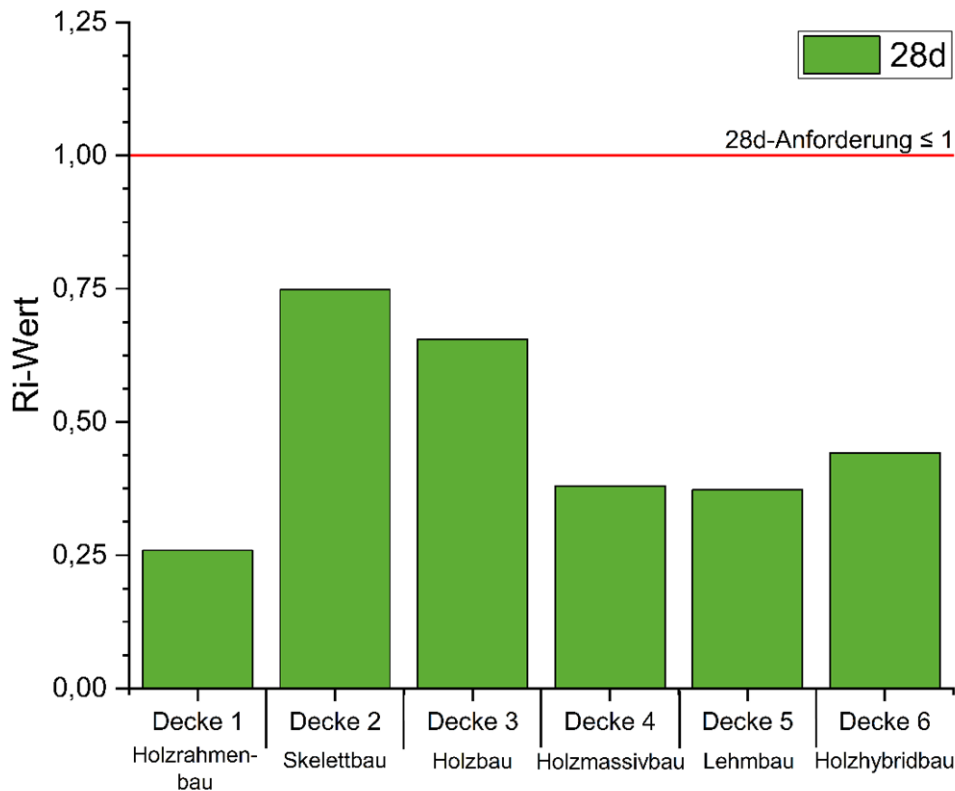
**Abbildung 36: Deckenkonstruktionen. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Auch die Anforderung an den R-Wert (28 d) wurde von allen Deckenkonstruktionen erfüllt. **Abbildung 37** zeigt die aufsummierten Ri-Werte, die der Bildung des R-Wertes nach einer Prüfdauer von 28 Tagen zugrunde liegen. Die R-Werte lagen für alle Deckenaufbauten unter 1. **Abbildung 38** zeigt die Substanzen, die den R-Wert im Wesentlichen beeinflusst haben.

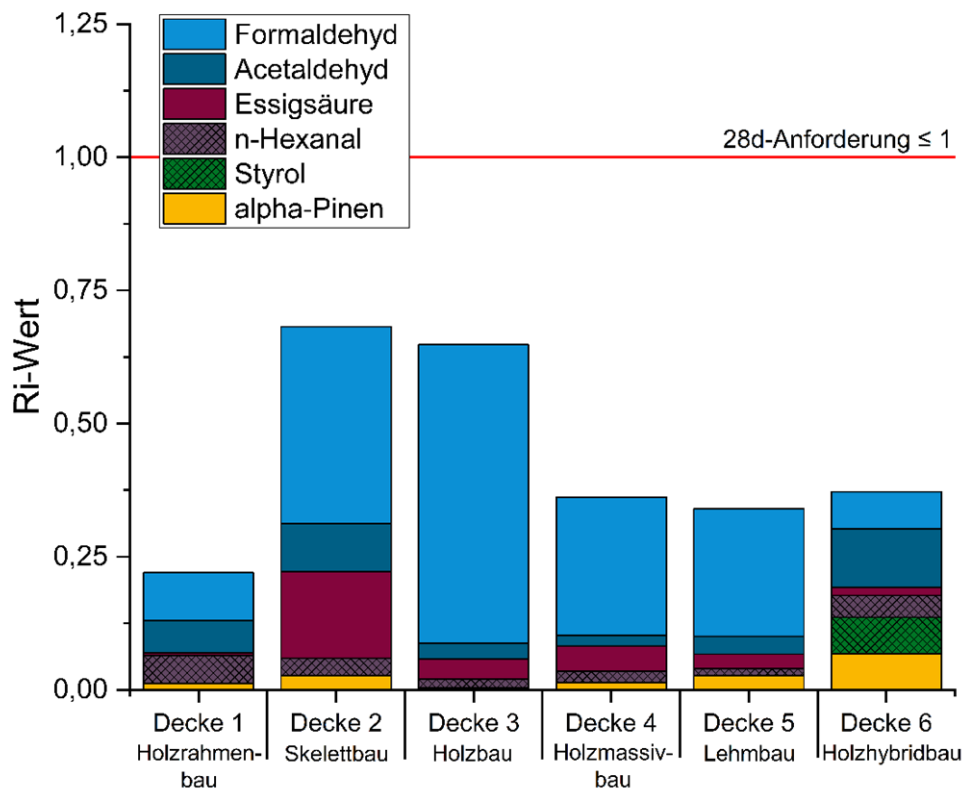
**Abbildung 37: Deckenkonstruktionen. Aufsummierter Ri-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die R-Werte der Deckenkonstruktionen wurden primär durch die leichtflüchtigen Carbonylverbindungen Formaldehyd und Acetaldehyd beeinflusst mit NIK-Werten von 100 bzw. 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  gemäß NIK-Werte-Liste 2020. Als Substanzen ohne NIK-Werte waren die VVOC n-Pentan und iso-Pentan für die Bildung des R-Wertes nicht relevant. Das auch von der Dämmebene (EPS) freigesetzte Styrol wurde von Decke 3/Holzbau nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen in einer Konzentration unterhalb von 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  freigesetzt und wurde daher im Gegensatz zum Aufbau Decke 6/Holzhybridbau beim R-Wert nicht berücksichtigt.

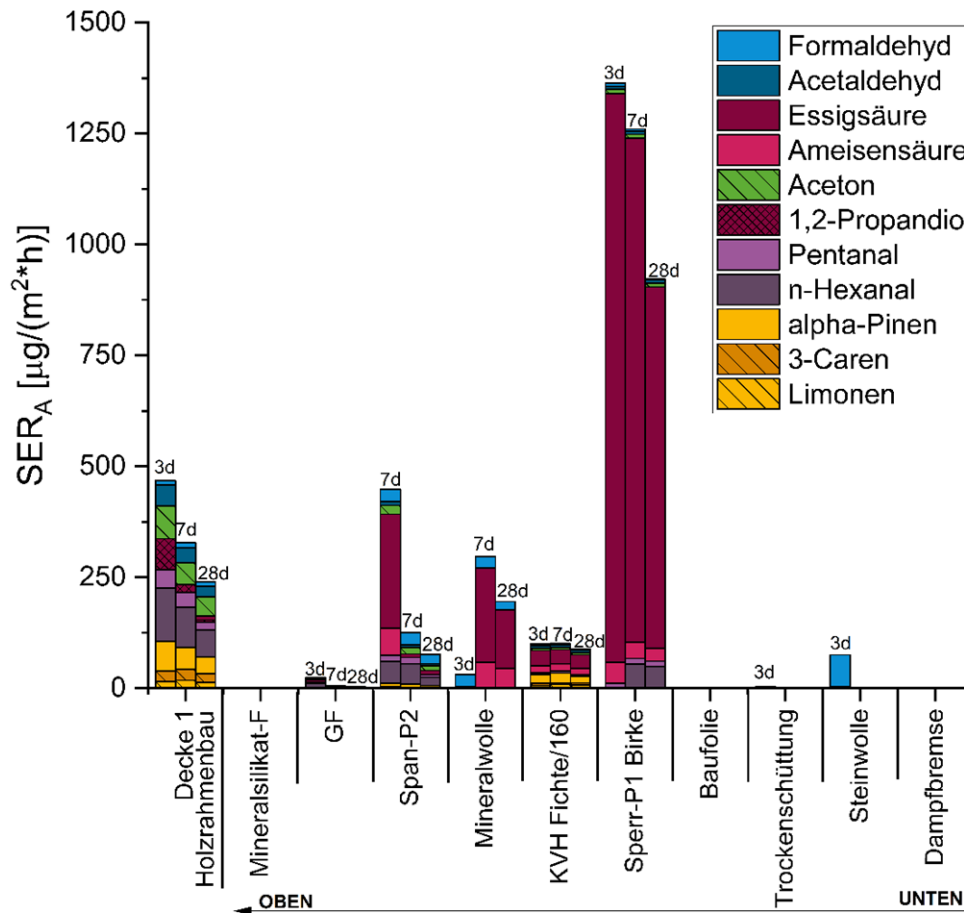
**Abbildung 38: Deckenkonstruktionen. Ri-Werte von Substanzen, die maßgeblich zur Bildung des R-Wertes beigetragen haben, nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Basierend auf den Messergebnissen ließ sich analog zu den Wandkonstruktionen feststellen, dass der Verbau starker Emissionsquellen nicht zwangsläufig zu einer stark emittierenden Konstruktion führte. Beispielsweise wurden in der Konstruktion Decke 1/Holzrahmenbau mit der Rohspanplatte (Span-P2) und der Sperrholzplatte (Sperr-P1 Birke) starke Emissionsquellen für Essigsäure verbaut. Bei Prüfung der Gesamtkonstruktion konnte Essigsäure dagegen erst nach 28 Tagen in einer Konzentration von  $21 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  nachgewiesen werden. Nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen und 7 Tagen lagen die Essigsäurewerte jeweils unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Gleiches galt für Ameisensäure, deren Konzentration nach allen drei Prüfzeiträumen jeweils unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) lag, obwohl das Konstruktionsvollholz (KVH Fichte/160), die Plattenwerkstoffe Rohspanplatte (Span-P2) und Sperrholzplatte (Sperr-P1 Birke) sowie die Dämmebene (Mineralwolle) als Einzelmateriale Ameisensäure in deutlichen Konzentrationen freisetzen (siehe **Abbildung 39**). Analog zu den Messergebnissen von Wandkonstruktion 1/Holzrahmenbau (siehe **Abbildung 33**) könnte angenommen werden, dass auch bei der Decke 1/Holzrahmenbau die mit Mineralsilikatfarbe gestrichene Gipsfaserplatte als oberste Beplankung wiederum niedermolekulare Carbonylverbindungen sowie C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-Carbonsäuren absorbiert hat und somit ursächlich für die niedrigen Emissionen des Gesamtverbunds sein könnte. Auch Formaldehyd wurde von der Deckenkonstruktion trotz verbauter Emissionsquellen (Span-P2, Mineralwolle) in deutlich niedrigeren Konzentrationen als von den einzelnen Werkstoffen freigesetzt. Dagegen lagen die für Acetaldehyd und Aceton erhobenen Messwerte über den Emissionen der Einzelmateriale.

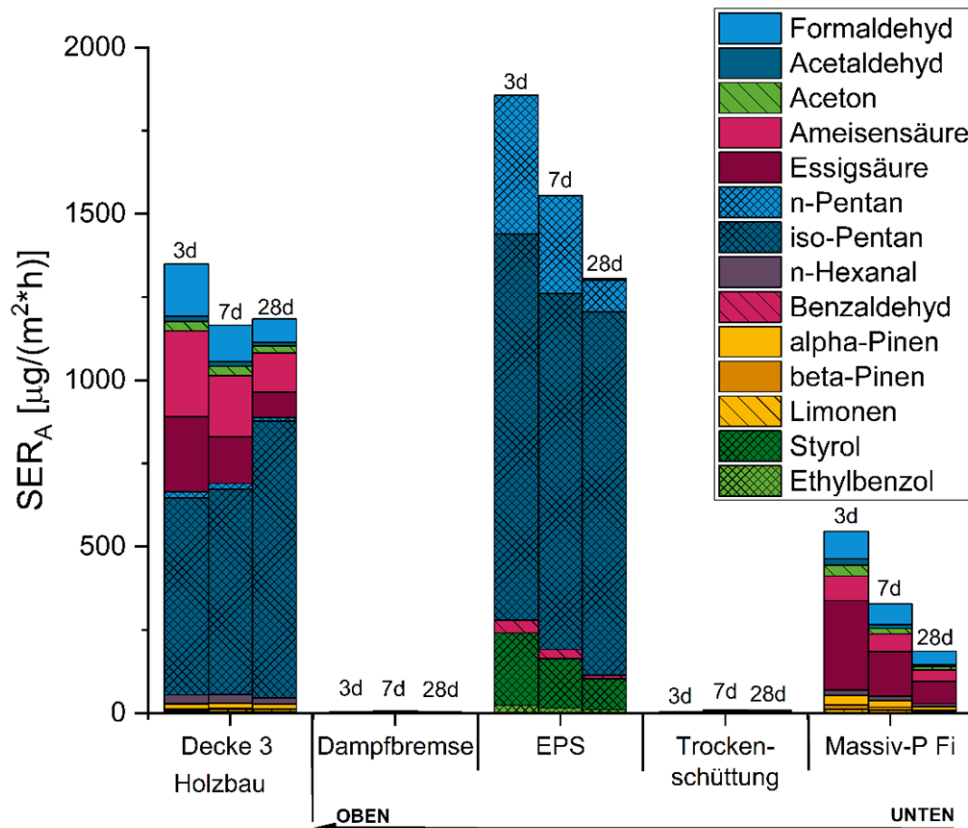
**Abbildung 39: Konstruktion Decke 1/Holzrahmenbau. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SER_A$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silica-gel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Wie bereits oben erläutert, wurde in den Konstruktionen Decke 3/Holzbau und Decke 6/Holzhybridbau expandiertes Polystyrol (EPS) als Dämmschicht verbaut, sodass diese im Gegensatz zu den anderen Deckenelementen zu den VVOC gehörenden Substanzen in deutlichen Konzentrationen freisetzen. Wie in **Abbildung 40** dargestellt, lagen dabei die durch die Gesamtkonstruktion Decke 3/Holzbau freigesetzten Konzentrationen der als Treibmittel in EPS verwendeten Substanzen n-Pentan und iso-Pentan zu allen Messzeitpunkten (3d, 7d, 28d) deutlich unterhalb der von der EPS-Dämmung als Einzelwerkstoff emittierten Konzentrationen. Die ebenfalls vom EPS in deutlichen Konzentrationen freigesetzten Substanzen Benzaldehyd, Styrol und Ethylbenzol wurden bei Prüfung von Decke 3/Holzbau nur in Spurenkonzentrationen detektiert ( $\leq 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Abbildung 40: Konstruktion Decke 3/Holzbau. Detektierte Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SER_A$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Der Pfeil zeigt die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



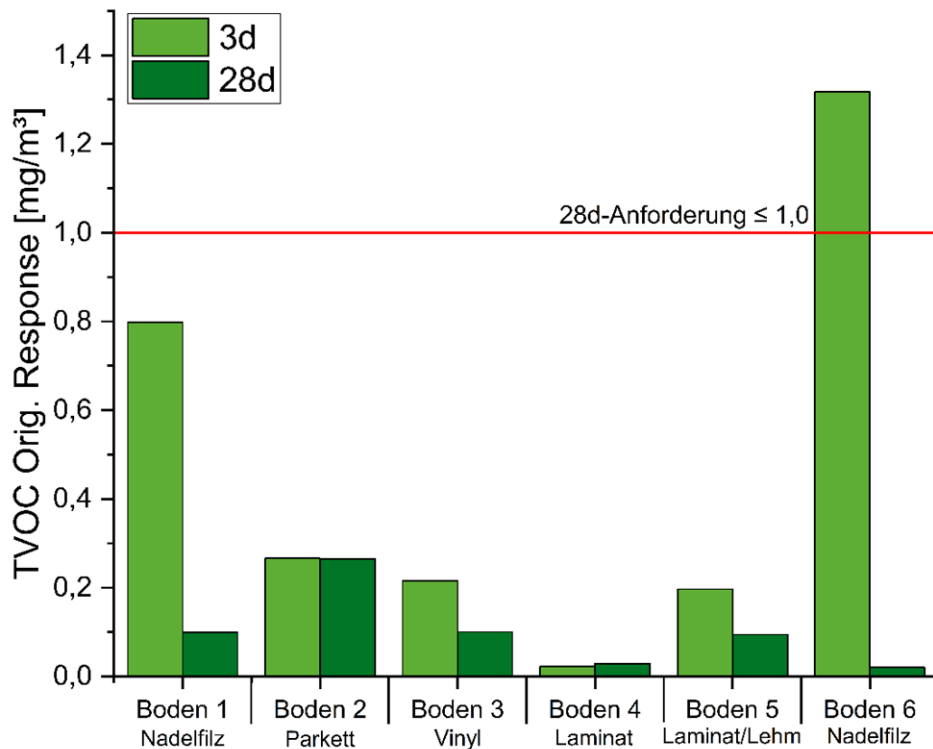
[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 4.3.2.3 Bodenkonstruktionen

Die gemessenen TVOC-Werte der Bodenkonstruktionen nach Prüfzeiträumen von 3 und 28 Tagen zeigt **Abbildung 41**. Die detektierten Leitsubstanzen, die zum TVOC-Wert maßgeblich beigetragen haben, sind **Abbildung 42** zu entnehmen.

Ebenso wie die Wand- und Deckenkonstruktionen erfüllten auch die untersuchten Fußbodenaufbauten den TVOC-Anforderungswert nach 28 Tagen und konnten insgesamt als schwache Emissionsquellen bewertet werden. Die Emissionsstärke von Aufbau Boden 2/Parkett blieb über den gesamten Prüfzeitraum nahezu konstant, stellte aber nach 28 Tagen die stärkste Emissionsquelle dar. Das niedrigste Emissionspotential wurde für Boden 4/Laminat über den gesamten Prüfzeitraum gemessen. Die Konstruktionen mit Nadelfilz als obersten Belag (Boden 1/Nadelfilz, Boden 6/Nadelfilz) setzten nach 3 Tagen hohe TVOC-Konzentrationen frei, die über 28 Tage stark abfielen. Besonders Boden 6/Nadelfilz war eine starke Emissionsquelle nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen. Der gemessene TVOC-Wert lag oberhalb dessen von Boden 1/Nadelfilz. Mit Ausnahme des Trägermaterials (Estrich vs. Metallplatte) war der konstruktive Aufbau derselbe. Analog zu den Ergebnissen der Einzelmaterialeprüfungen (siehe **Abschnitt 4.3.1**) war auch hier eine Reproduzierbarkeit der Emissionsmessdaten nicht möglich.

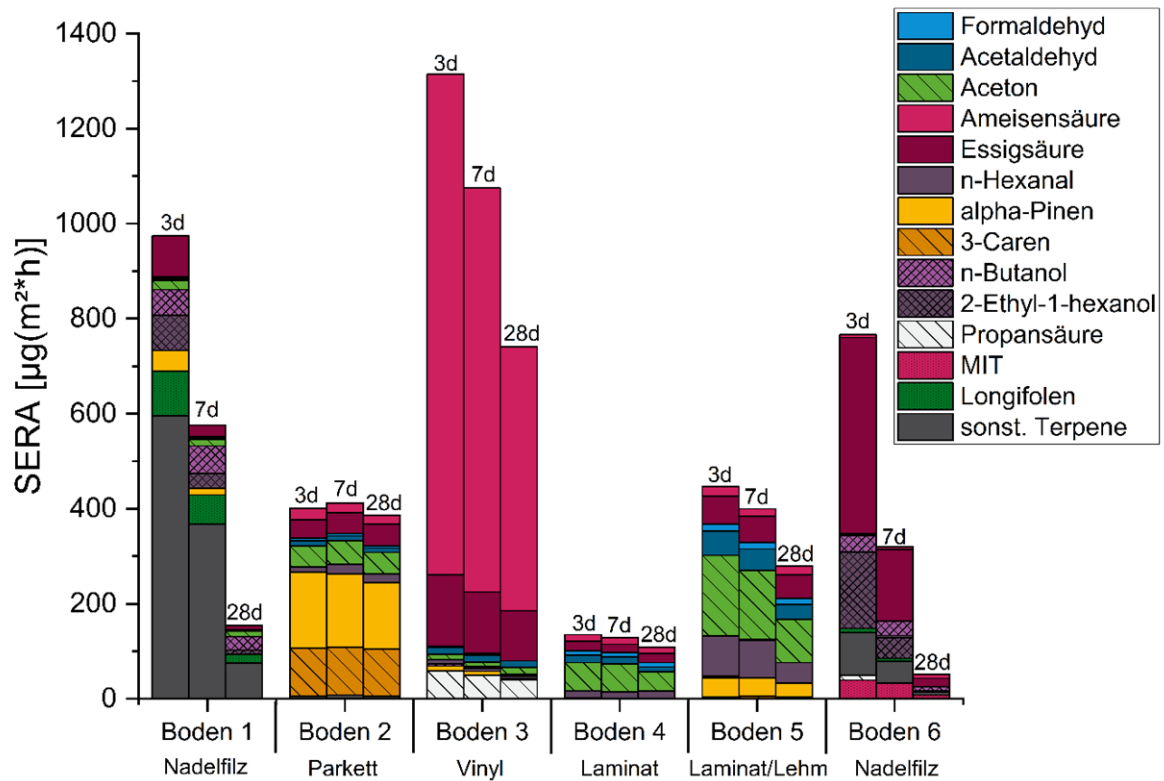
**Abbildung 41: Bodenkonstruktionen. TVOC-Werte nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Beide Nadelfilz-Böden (Boden 1, Boden 6) emittierten ein ähnliches Substanzspektrum, wenn auch die einzelnen Verbindungen in deutlich abweichenden Konzentrationen freigesetzt wurden. Hinsichtlich Boden 1 wurden sonstige Terpene als Leitsubstanzgruppe identifiziert, wogegen Boden 6 Essigsäure in erhöhten Konzentrationen freisetzte. Das vom verwendeten Klebstoff (Dispersions-K) freigesetzte 2-Ethyl-1-hexanol wurde ebenfalls durch beide Konstruktionen emittiert, das ebenfalls vom Klebstoff stammende 2-Methyl-4-isothiazolin-3-on (MIT) dagegen nur von Boden 6. Das Emissionsspektrum der beiden Laminatböden wurde primär durch die leichtflüchtigen Carbonylverbindungen (Formaldehyd, Acetaldehyd, Aceton) und die leichtflüchtigen C1-C2-Carbonsäuren dominiert, die Laminat/Lehm-Konstruktion (Boden 5) setzte zusätzlich im Gegensatz zu Boden 4/Laminat Terpene frei. Boden 2/Parkett zeigte ein ähnliches Emissionsspektrum, allerdings mit deutlich höheren Terpenkonzentrationen. Boden 3/Vinyl-2 setzte dagegen hohe Konzentrationen an Ameisensäure frei. Ein Nachweis dieses Emissionsverhaltens war allerdings nicht über die gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) vorgegebene Analytik mittels aktiver Probenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS) möglich, sondern durch eine separate Analytik mittels IC nach aktiver Probenahme auf Silicagel.

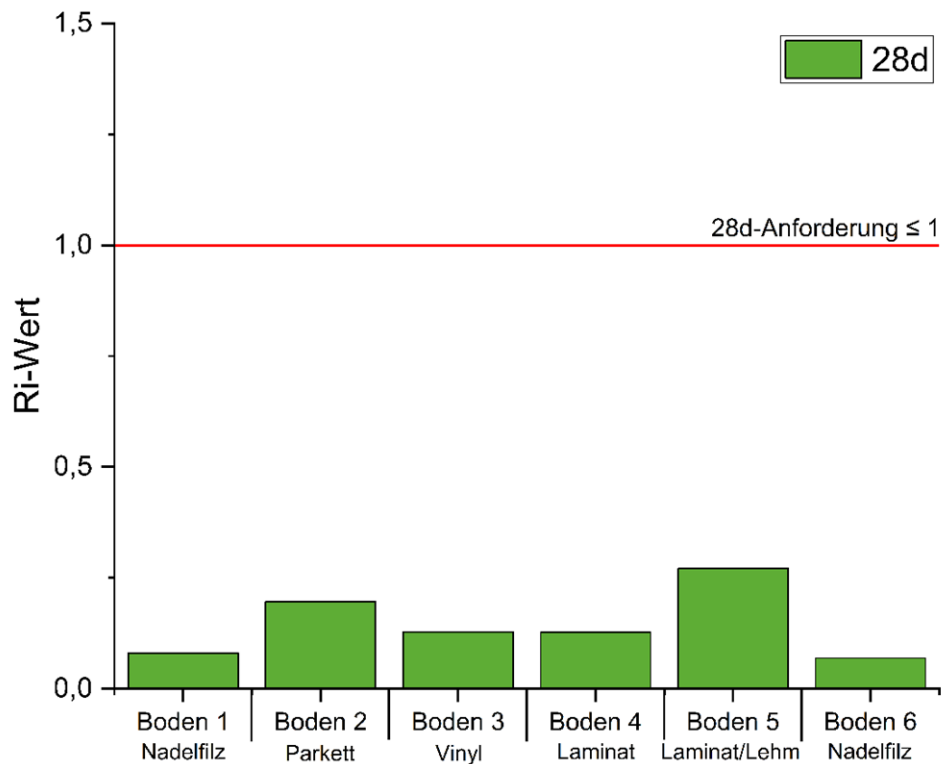
**Abbildung 42: Bodenkonstruktionen. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SER_A$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die Anforderung an den R-Wert (28 d) wurde von allen Bodenkonstruktionen erfüllt, deren R-Werte jeweils mit 0 berechnet wurden. **Abbildung 43** zeigt die aufsummierten Ri-Werte, die der Bildung des R-Wertes nach einer Prüfdauer von 28 Tagen zugrunde liegen. **Abbildung 44** zeigt die Substanzen, die den R-Wert im Wesentlichen beeinflusst haben.

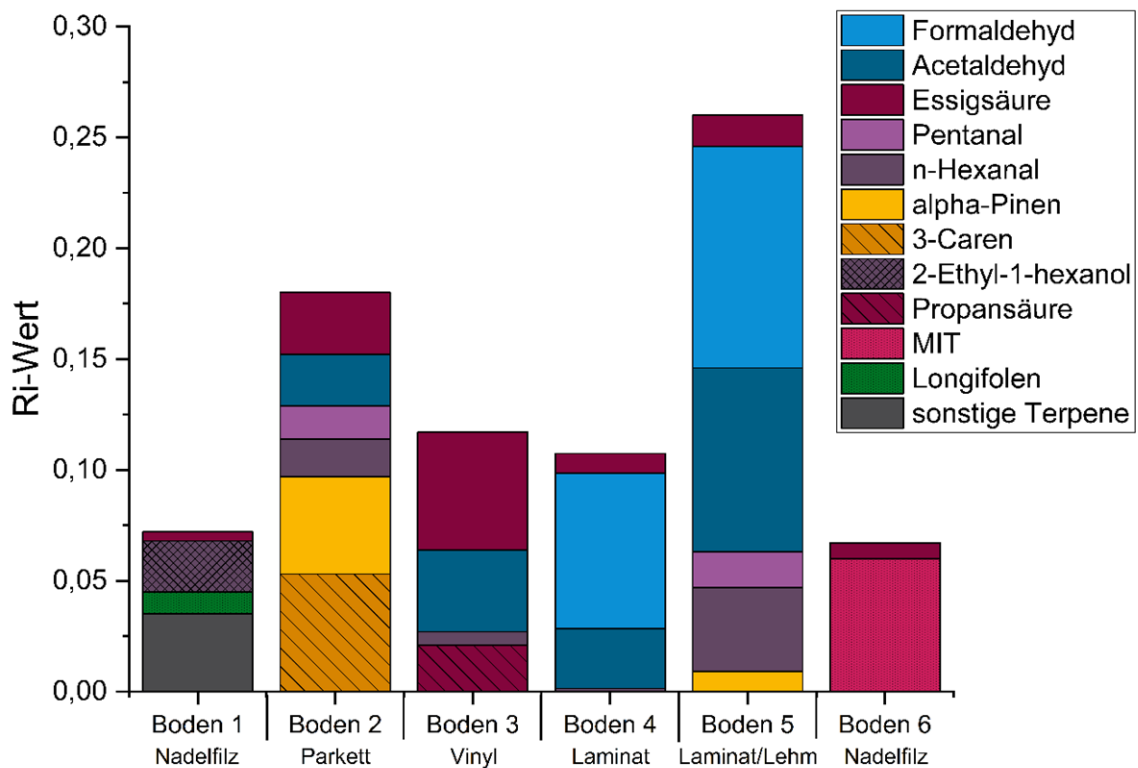
**Abbildung 43: Bodenkonstruktionen. Aufsummierter Ri-Wert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die R-Werte der Deckenkonstruktionen wurden primär durch die leichtflüchtigen Carbonylverbindungen Formaldehyd und Acetaldehyd beeinflusst mit NIK-Werten von 100 bzw. 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  gemäß NIK-Werte-Liste 2020. Als Substanzen ohne NIK-Werte waren die VVOC n-Pentan und iso-Pentan für die Bildung des R-Wertes nicht relevant. Das auch von der Dämmebene (EPS) freigesetzte Styrol wurde von Decke 3/Holzbau nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen in einer Konzentration unterhalb von 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  freigesetzt und wurde daher im Gegensatz zum Aufbau Decke 6/Holzhybridbau beim R-Wert nicht berücksichtigt.

**Abbildung 44: Bodenkonstruktionen. Ri-Werte von Substanzen, die maßgeblich zur Bildung des R-Wertes beigetragen haben, nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 4.3.3 Modellräume

#### 4.3.3.1 Modellraum 1/Holzrahmenbau

Nachfolgend werden die Auswertungen der zu Modellraum 1/Holzrahmenbau gehörenden Messdaten gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021) und der dort hinterlegten Anforderungswerte nach 3 Tagen (**Tabelle 17**) und 28 Tagen (**Tabelle 18**) Prüfzeitraum dargelegt. Zusätzlich zu den Messdaten für den Modellraum sind die Messdaten für die dazugehörigen Verbundkonstruktionen (Wand 1/Holzrahmenbau, Decke 1/Holzrahmenbau, Boden 2/Fertigparkett) und die jeweils verbauten Einzelmaterialien aufgeführt. Die Messdaten für die Einzelmaterialien wurden parallel zu der Emissionsprüfung des Modellraums erhoben, sodass diese aus derselben Charge (Ankauf) stammen wie die für Modellraum 1 verwendeten Konstruktionsmaterialien. Materialien, die in mehreren Verbundkonstruktionen verwendet wurden, sind unter dem jeweiligen Element und daher ggf. mehrfach aufgeführt.

**Tabelle 17: Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundaufbauten und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.**

| Probe                             | Abkürzung           | Anforderungswerte nach 3 Tagen<br>TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤ 10 | Anforderungswerte nach 3 Tagen<br>Kanerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤ 0,01 |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Modellraum - Holzrahmenbau</b> | <b>Modellraum 1</b> | <b>1,23</b>                                                              | <b>&lt; 0,001</b>                                                                  |
| <b>Wand - Holzrahmenbau</b>       | <b>Wand 1</b>       | <b>0,48</b>                                                              | <b>&lt; 0,001</b>                                                                  |
| Konstruktionsvollholz (160 mm)    | KVH/160             | 0,38                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Holzfaserdämmung (120 mm)         | Holzfaser/120       | 1,51                                                                     | 0,002                                                                              |
| OSB-Platte                        | OSB-1               | 1,28                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Gipsfaserplatte                   | GF                  | 0,04                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Füll-, Feinspachtelmasse          | Füllspachtel        | 0,60                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Mineralsilikatfarbe               | Mineralsilikat-F    | 0,01                                                                     | < 0,001                                                                            |
| <b>Decke - Holzrahmenbau</b>      | <b>Decke 1</b>      | <b>0,33</b>                                                              | <b>&lt; 0,001</b>                                                                  |
| Dampfbremse                       | Dampfbremse         | < 0,005                                                                  | < 0,001                                                                            |
| Steinfaserdämmung                 | Steinfaser          | 0,01                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Trockenschüttung                  | Trockenschüttung    | < 0,005                                                                  | < 0,001                                                                            |
| Baufolie                          | Baufolie            | < 0,005                                                                  | < 0,001                                                                            |
| Sperr-P1 Birke                    | Sperr-P1 Birke      | 5,66                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Konstruktionsvollholz (160 mm)    | KVH/160             | 0,15                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Mineralwolldämmung                | Mineralwolle        | < 0,005                                                                  | < 0,001                                                                            |
| Spanplatte                        | Span-P2             | 0,77                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Gipsfaserplatte                   | GF                  | 0,04                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Füll-, Feinspachtelmasse          | Feinspachtel        | 0,24                                                                     | < 0,001                                                                            |
| Mineralsilikatfarbe               | Mineralsilikat-F    | 0,01                                                                     | < 0,001                                                                            |
| <b>Boden – Fertigparkett</b>      | <b>Boden 2</b>      | <b>0,27</b>                                                              | <b>&lt; 0,001</b>                                                                  |
| Dämmunterlage                     | PU-Trittschall      | < 0,005                                                                  | < 0,001                                                                            |
| Fertigparkett Eiche               | Parkett Eiche-1     | 0,60                                                                     | < 0,001                                                                            |

Wie aus **Tabelle 17** ersichtlich, wurden die Anforderungswerte nach 3 Tagen von Modellraum 1 sowie von allen Verbundaufbauten und Einzelmaterialien erfüllt. Gemäß der in **Tabelle 18** aufgeführten Messdaten wurde nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen die Anforderung an den

TVOC-Wert von  $\leq 1 \text{ mg/m}^3$  vom gesamten Modellraum 1/Holzrahmenbau knapp eingehalten, der R-Wert wurde aber deutlich überschritten. Die Wandkonstruktion hielt die Anforderung an den R-Wert knapp ein, die verbaute Holzfaserdämmung (120 mm) lag allerdings oberhalb der Anforderungswerte sowohl für den TVOC-Wert als auch für den R-Wert. Die Überschreitungen sind auf die freigesetzten Konzentrationen von Formaldehyd, Acetaldehyd sowie von weiteren Aldehyden und Terpenen zurückzuführen, die als Leitsubstanzen detektiert wurden. Modellraum 1 emittierte außerdem die Substanz Furfural in einer Konzentration von  $11 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ . Aufgrund eines NIK-Wertes von  $10 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  ergibt sich nur durch die Furfuralkonzentration ein  $R_i$ -Wert von 1,100 und folglich eine Überschreitung der Anforderung an den R-Wert ( $\leq 1$ ). Die Emission von Furfural konnte auf die verbaute Holzfaserdämmung zurückgeführt werden. Furfural ist auf die thermische Zersetzung der im Material enthaltenen Hemicellulosen, Essigsäure auf die Abspaltung von Acetylgruppen zurückzuführen (Salthammer and Fuhrmann, 2000). Zwecks Informationserhalt sind abweichend vom Anforderungswert einige TVOC-Werte und VOC-ohne NIK mit zwei Dezimalstellen angegeben.

Die in der Deckenkonstruktion verbaute Sperrholzplatte (Sperr-P1 Birke) überschreitet den TVOC-Anforderungswert, hielt den Anforderungswert an den R-Wert aber knapp ein. Ursächlich bei beiden Materialien war die Emission stark erhöhter Konzentrationen von Essigsäure.

In **Tabelle 19** sind die für die Überschreitungen verantwortlichen Substanzen, die detektierte Konzentration in der Prüfkammer sowie der für die jeweilige Substanz geltende NIK-Wert aufgelistet (gemäß NIK-Werte-Liste, 2020).

**Tabelle 18:** Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundaufbauten und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.

| Probe, Abkürzung, Anforderungswerte nach 28 Tagen | TVOC [mg/m <sup>3</sup> ]<br>$\leq 1,0$ | TSVOC [mg/m <sup>3</sup> ]<br>$\leq 0,1$ | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ]<br>$\leq 0,001$ | VOC ohne NIK [mg/m <sup>3</sup> ]<br>$\leq 0,1$ | $\Sigma R_i$ (R-Wert)<br>$\leq 1$ | Formaldehyd [mg/m <sup>3</sup> ]<br>informativ |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Modellraum 1</b>                               | <b>0,9</b>                              | <b>&lt; 0,005</b>                        | <b>&lt; 0,001</b>                                       | < 0,005                                         | <b>2,240 (2)</b>                  | <b>0,017</b>                                   |
| <b>Wand 1</b>                                     | <b>0,8</b>                              | <b>&lt; 0,005</b>                        | <b>&lt; 0,001</b>                                       | < 0,005                                         | <b>1,190 (1)</b>                  | <b>0,011</b>                                   |
| KVH/160                                           | 0,3                                     | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | 0,165 (0)                         | 0,008                                          |
| Holzfaser/120                                     | <b>3,5</b>                              | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | <b>5,702 (5)</b>                  | 0,004                                          |
| OSB-1                                             | 0,6                                     | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | 0,851 (1)                         | 0,010                                          |
| GF                                                | 0,04                                    | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | 0,038 (0)                         | 0,004                                          |
| Feinspachtel                                      | 0,1                                     | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | 0,111 (0)                         | < 0,002                                        |
| Mineralsilikat-F                                  | < 0,005                                 | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | 0,000 (0)                         | < 0,002                                        |
| <b>Decke 1</b>                                    | <b>0,1</b>                              | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | <b>0,259 (0)</b>                  | <b>0,009</b>                                   |
| Dampfbremse                                       | < 0,005                                 | < 0,005                                  | < 0,001                                                 | < 0,005                                         | 0,000 (0)                         | < 0,002                                        |

| Probe,<br>Abkürzung,<br><br>Anforderungs-<br>werte nach 28<br>Tagen | TVOC<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤1,0 | TSVOC<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤0,1 | Kanzerogene<br>Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤0,001 | VOC ohne<br>NIK [mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤0,1 | ΣRi<br>(R-Wert)<br><br>≤1 | Formaldehyd<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>informativ |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------|
| Steinfaser                                                          | 0,02                                     | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,765 (1)                 | 0,075                                                 |
| Trockenschüt-<br>tung                                               | < 0,005                                  | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,000 (0)                 | < 0,002                                               |
| Baufolie                                                            | < 0,005                                  | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,000 (0)                 | < 0,002                                               |
| Sperr-P1 Birke                                                      | 2,9                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 2,434 (2)                 | 0,004                                                 |
| KVH/160                                                             | 0,1                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,111 (0)                 | 0,003                                                 |
| Mineralwolle                                                        | n.n.                                     | n.n.                                      | n.n.                                                     | n.n.                                             | n.n.                      | n.n.                                                  |
| Span-P2                                                             | 0,3                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,954 (1)                 | 0,063                                                 |
| GF                                                                  | 0,04                                     | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,038 (0)                 | 0,004                                                 |
| Feinspachtel                                                        | 0,1                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,111 (0)                 | < 0,002                                               |
| Mineralsilikat-F                                                    | < 0,005                                  | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,000 (0)                 | < 0,002                                               |
| <b>Boden 2</b>                                                      | <b>0,3</b>                               | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | <b>0,196 (0)</b>          | <b>0,004</b>                                          |
| PU-Trittschall                                                      | < 0,005                                  | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,000 (0)                 | < 0,002                                               |
| Parkett Eiche-1                                                     | 0,6                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                  | < 0,005                                          | 0,347 (0)                 | 0,003                                                 |

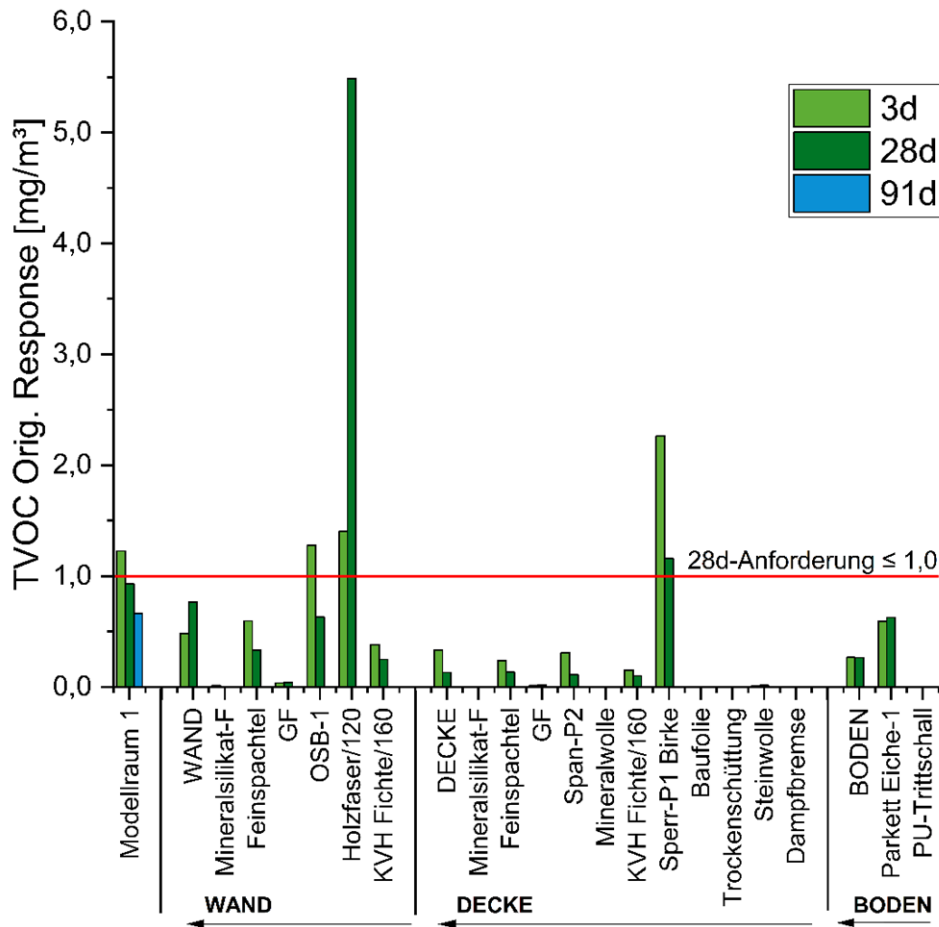
- keine Messdaten vorhanden, Messung nach 7d abgebrochen

**Tabelle 19:** Modellraum 1/Holzrahmenbau. Substanzen, die zur Überschreitung von Anforderungswerten des AgBB-Bewertungsschema (06/2021) führten, sowie Kammerkonzentration nach 28 Tagen und NIK-Wert gemäß NIK-Werte-Liste (2020). Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.

| Probe, Abkürzung, Anforderungswerte nach 28 Tagen | TVOC [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤1,0 | ΣRi (R-Wert)<br>≤1 | Substanz    | Kammerkonzentration [µg/m <sup>3</sup> ] | NIK-Wert [µg/m <sup>3</sup> ] | Ri-Wert<br>≤1 |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Modellraum 1                                      | 0,9                               | <b>2,240 (2)</b>   | Furfural    | 11                                       | 10                            | 1,100         |
|                                                   |                                   |                    | Benzaldehyd | 16                                       | 90                            | 0,178         |
|                                                   |                                   |                    | Formaldehyd | 17                                       | 100                           | 0,170         |
|                                                   |                                   |                    | Acetaldehyd | 48                                       | 300                           | 0,160         |
|                                                   |                                   |                    | 3-Caren     | 237                                      | 1500                          | 0,158         |
|                                                   |                                   |                    | n-Hexanal   | 124                                      | 900                           | 0,138         |
|                                                   |                                   |                    | alpha-Pinen | 339                                      | 2500                          | 0,136         |
| Holzfaser /120 (Wände)                            | <b>5,5</b>                        | <b>7,101 (7)</b>   | Essigsäure  | 5423                                     | 1200                          | 4,519         |
|                                                   |                                   |                    | Furfural    | 23                                       | 10                            | 2,300         |

Als einziger Modellraum wurde Modellraum 1/Holzrahmenbau über einen Zeitraum von 3 Monaten (91d) auf Emissionen geprüft. Die TVOC-Werte des Raumes nach 3d und 28d sowie nach 91d sind in **Abbildung 45** dargestellt, zusammen mit den TVOC-Werten der Verbundkonstruktionen und aller verbauten Einzelmaterialien nach 3d und 28d. **Abbildung 46** zeigt den R-Wert nach 28 Tagen.

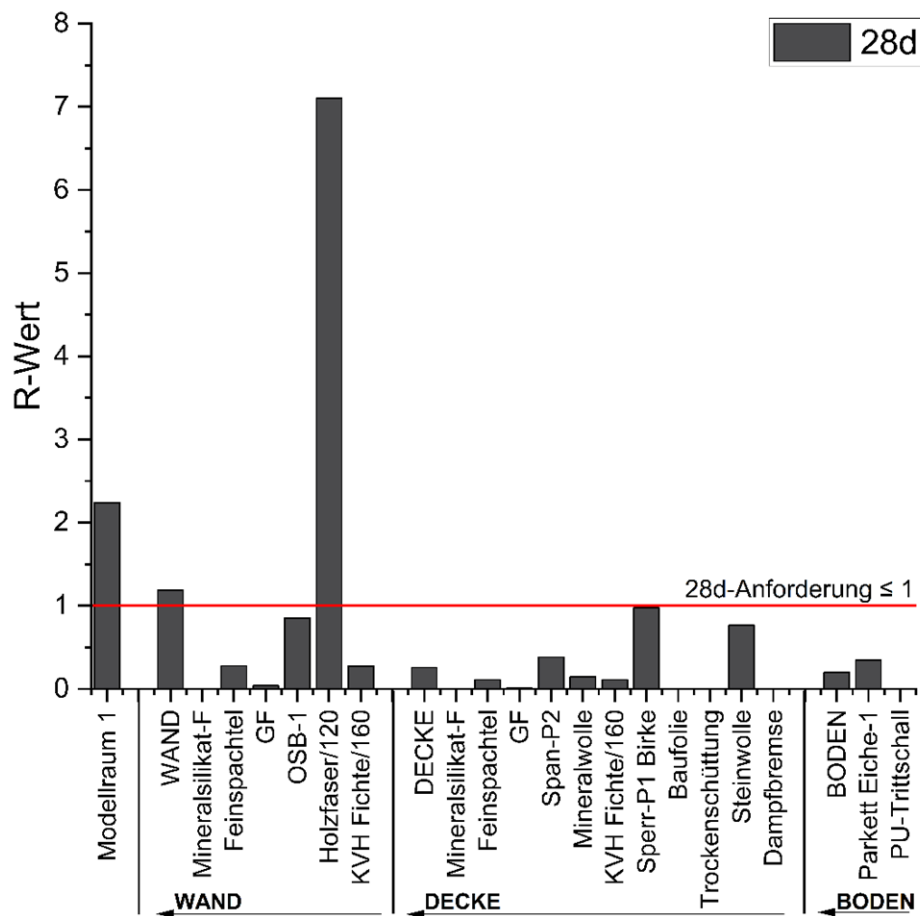
**Abbildung 45: Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), TVOC-Wert nach 3d, 28d und ggf. 91d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die Anforderungen an den TVOC-Wert nach 3 Tagen ( $\leq 10 \text{ mg/m}^3$ ) wurden vom Modellraum, den Konstruktionen und den jeweils verbauten Einzelmaterialien erfüllt. Die TVOC-Anforderung nach 28 Tagen ( $\leq 1,0 \text{ mg/m}^3$ ) wurde vom Modellraum ( $0,929 \text{ mg/m}^3$ ) knapp erfüllt. Der TVOC-Wert sank über den Messzeitraum von 91d weiter ( $0,663 \text{ mg/m}^3$ ), allerdings weniger stark als über den Zeitraum von 28d. Die in der Wandkonstruktion verbaute Holzfaserdämmplatte (Holzfaser/120) überschreitet aufgrund ihres bereits ausführlich dargelegten hohen Emissionspotentials sowohl die TVOC-Anforderung nach 28d ( $5,485 \text{ mg/m}^3$ ) als auch die Anforderung an den R-Wert (7) deutlich. Die Überschreitungen waren auf die Emissionen von Essigsäure und Furfural zurückzuführen, siehe auch **Tabelle 19**. Auch die in der Decke verbaute Sperrholzplatte (Sperr-P1 Birke) konnte die Anforderung an den TVOC-Wert nicht erfüllen, überschreitet sie aber nur leicht ( $1,158 \text{ mg/m}^3$ ) und erfüllte den R-Wert (1). Aufgrund der Freisetzung von Furfural wurde die Anforderung an den R-Wert auch von dem Modellraum überschritten, wie **Abbildung 46**, **Tabelle 19** und **Tabelle 29** zu entnehmen ist. Durch einen NIK-Werte von  $10 \mu\text{g/m}^3$  (NIK-Werte-Liste 2020) wurde der R-Wert von 1 bereits durch Freisetzung von Furfural in geringer Konzentration ( $11 \mu\text{g/m}^3$ ) überschritten ( $R_i: 1,100$ ).

**Abbildung 46: Modellraum 1/Holzrahmenbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021), R-Wert nach 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**

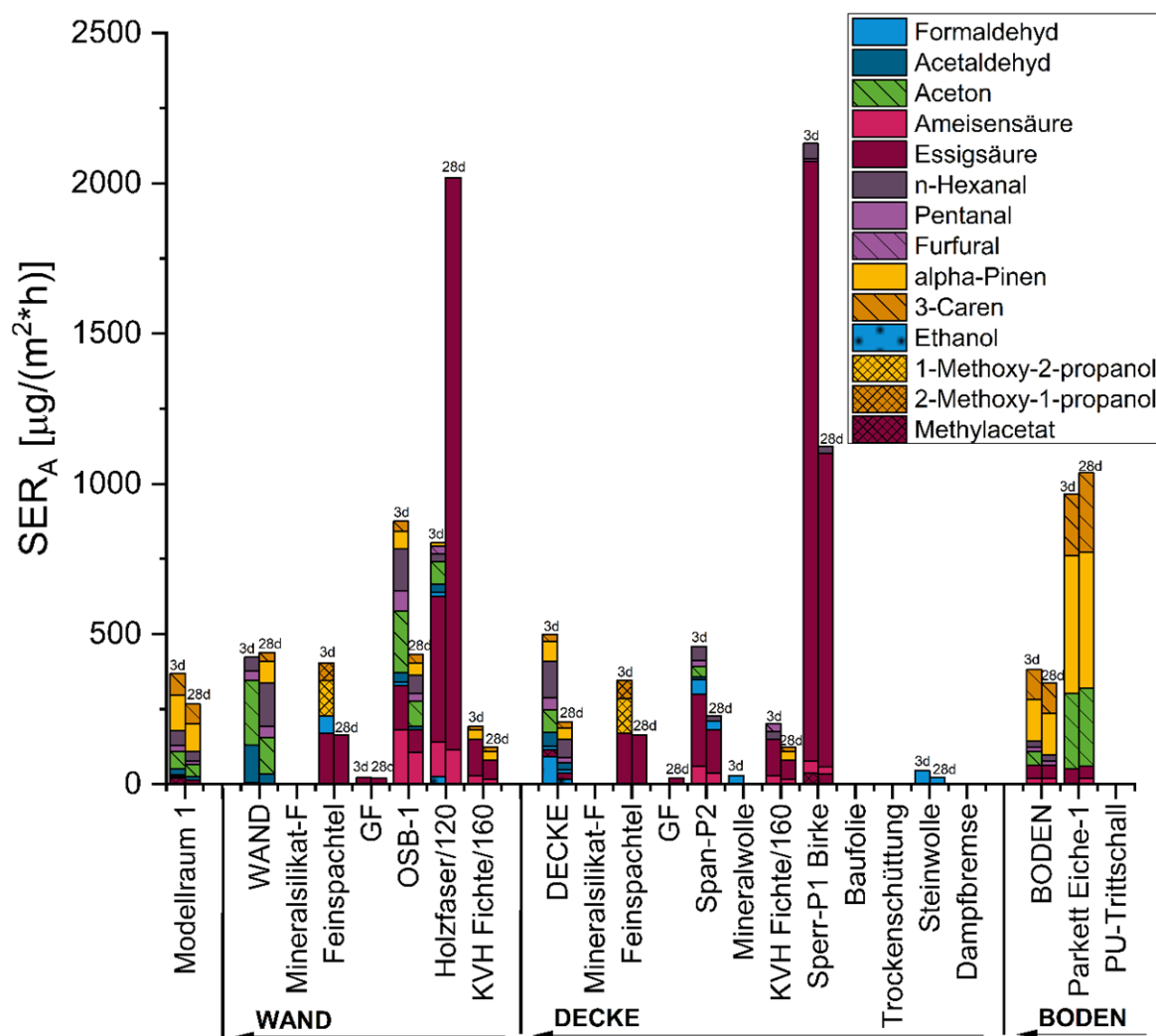


[Quelle: Fraunhofer WKI]

Analog zu den Prüfergebnissen der Verbundaufbauten (siehe **Abschnitt 4.3.2**) zeigten auch die in Modellraum 1/Holzrahmenbau erhobenen Messdaten, dass der Verbau von hoch-emittierenden Werkstoffen nicht zwingend zu ebenfalls hoch-emittierenden Aufbauten und folglich nicht zwingend zu einer hoch-emittierenden Raumkonstruktion führen muss. Der Modellraum setzte primär die leichtflüchtigen Carbonyle Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton (in ansteigender Konzentration) frei sowie die Aldehyde Pentanal und n-Hexanal und das Terpen alpha-Pinen. Damit wurde das Emissionsspektrum des Raums von den holzbasierten Werkstoffen OSB-Platte (OSB-1), Holzfaserdämmung (Holzfaser/120), Konstruktionsvollholz (KVH Fichte/160) und Parkettboden (Parkett Eiche-1) beeinflusst und somit von den für diese Materialgruppe typischen Emittenten. Die Emissionsstärke des Modellraums war allerdings niedriger als die der Wand-, Decken- oder Bodenkonstruktion und somit deutlich niedriger als die Summe dieser konstruktiven Aufbauten. Ebenfalls analog zu den Ergebnissen der Verbundkonstruktionen setzte auch der Modellraum trotz verbauter starker Emissionsquellen für Essigsäure diese nur nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen frei ( $SER_A: 6 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ). Nach 28 Tagen lag die Essigsäurekonzentration im Modellraum unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Auch hier könnte vermutet werden, dass wiederum die als Beplankung fungierende Gipsfaserplatte (GF) als Senke für Essigsäure fungiert. Allerdings stellte auch der Feinspachtel, mit dem die Gipsfaserplatte sowohl im Wand- als auch im Deckenaufbau gespachtelt wurde, eine starke und über den gesamten Prüfzeitraum konstante Essigsäurequelle dar ( $SER_A: 169 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  nach 3 Tagen;  $SER_A: 164$

$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  nach 28 Tagen). Dennoch zeigte sich dies nicht im Emissionsspektrum des Modellraums. Die Ergebnisse zeigten weiterhin, dass das Emissionsverhalten einer Verbundkonstruktion bzw. eines Modellraums nicht durch die oberste Materialschicht und damit nicht durch die Schicht, die als einzige direkt der Prüfkammerluft exponiert ist, beeinflusst wurde. Wie **Abbildung 47** zeigt, ähnelte das Emissionsspektrum weder der Wand- noch des Deckenaufbaus dem der obersten verbauten Materialschicht. Lediglich die Bodenkonstruktion spiegelte eindeutig das Emissionsverhalten des Parketts (Parkett Eiche-1) als oberen Fußbodenbelag wider, wenngleich die Konzentrationen deutlich niedriger waren.

**Abbildung 47: Modellraum 1/Holzrahmenbau. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten ( $\text{SER}_A$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 4.3.3.2 Modellraum 2/Lehmbau

Nachfolgend werden die Auswertungen der zu Modellraum 2/Lehmbau gehörenden Messdaten gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) und die dort hinterlegten Anforderungswerte nach 3 Tagen (**Tabelle 20**) und 28 Tagen (**Tabelle 21**) Prüfzeitraum erläutert. Neben den erhobenen Messdaten für Modellraum 2 sind die Messdaten für die dazugehörigen Verbundaufbauten (Wand 2, Decke 5, Boden 5, jeweils Lehmbau) und die verbauten Einzelmaterialien aufgeführt. Analog zu Modellraum 1/Holzrahmenbau wurden die verbauten Einzelmaterialien ebenfalls nochmals parallel zum Modellraum auf Emissionen geprüft, um eine direkt vergleichbare Datengrundlage zu erhalten, da angenommen werden kann, dass alle Materialien derselben Charge (Ankauf) entstammten. Das in der Deckenkonstruktion eingesetzte Weißkalkhydrat als flächige Einstreuung wurde nicht separat geprüft, da von diesem anorganischen Material keine Emissionen zu erwarten waren.

Von Wandaufbau 2/Lehmbau liegen keine 3d-Messwerte für die Substanzgruppe der VVOC und VOC vor, da die Luftfeuchte in der Kammer aufgrund des frischen Lehmputzes zu hoch war. Stattdessen werden in nachfolgender **Tabelle 20** sowie in **Abbildung 48** und **Abbildung 49** die 7d-Werte aufgeführt.

**Tabelle 20: Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.**

| Probe                                | Abkürzung           | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ] |
|--------------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| Anforderungswerte nach 3 Tagen       |                     | ≤ 10                           | ≤ 0,01                                  |
| <b>Modellraum – Lehmbau</b>          | <b>Modellraum 2</b> | <b>0,61</b>                    | <b>&lt; 0,001</b>                       |
| <b>Wand – Lehmbau</b>                | <b>Wand 2</b>       | <b>0,32 (7d-Wert)</b>          | <b>0,005 (7d-Wert)</b>                  |
| Konstruktionsvollholz (160 mm)       | KVH/160             | 0,52                           | < 0,001                                 |
| Holzfaserdämmung (120 mm)            | Holzfaser/120       | 1,40                           | 0,002                                   |
| Holzfaserdämmung (40 mm)             | Holzfaser/40        | 3,31                           | < 0,001                                 |
| Lehmbauplatte                        | Lehmbau-P           | 0,09                           | < 0,001                                 |
| Lehmfüll-, Flächenspachtel           | Lehmispachtel       | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| Lehmputzmörtel                       | Lehmputz            | 0,08                           | < 0,001                                 |
| <b>Decke – Lehmbau</b>               | <b>Decke 5</b>      | <b>0,48</b>                    | <b>&lt; 0,001</b>                       |
| Konstruktionsvollholz (160 mm)       | KVH/160             | 0,21                           | < 0,001                                 |
| Massivholzplatte Fichte              | Massiv-P Fi         | 0,23                           | < 0,001                                 |
| Rieselschutz, Hanffilzmatte          | Hanf-Trittschall/5  | 0,01                           | < 0,001                                 |
| Weißkalkhydrat (flächig eingestreut) | Weißkalk            | Keine Einzelmessung            | Keine Einzelmessung                     |
| Hanf-Trittschallstreifen             | Hanf-Trittschall/10 | 0,79                           | < 0,001                                 |

| Probe                            | Abkürzung      | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ] |
|----------------------------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| Anforderungswerte nach 3 Tagen   |                | ≤ 10                           | ≤ 0,01                                  |
| Boden – Lehmabau                 | Boden 5        | 0,20                           | < 0,001                                 |
| Konstruktionsvollholz (60*80 mm) | KVH/60/80      | 0,18                           | < 0,001                                 |
| Lehmschüttung                    | Lehmschütt     | 0,43                           | < 0,001                                 |
| Massivholzplatte Fichte          | Massiv-P Fi    | 0,23                           | < 0,001                                 |
| Dämmunterlage                    | PU-Trittschall | < 0,005                        | < 0,001                                 |
| Laminat                          | Laminat        | 0,11                           | < 0,001                                 |

Wie aus **Tabelle 20** ersichtlich, wurden die Anforderungswerte nach 3 Tagen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) von Modellraum 2/Lehmabau sowie von allen Verbundaufbauten und Einzelmaterialien erfüllt.

Nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen überschreitet der gesamte Modellraum 2/Lehmabau den Anforderungswert an den R-Wert von  $\leq 1$  (siehe **Tabelle 21**). Diese Überschreitung war auf die Freisetzung der Verbindungen Formaldehyd, Acetaldehyd und Furfural zurückzuführen. Sowohl Furfural als auch Essigsäure wurde durch die in der Wandkonstruktion (Wand 2/Lehmabau) verbauten Holzfaserdämmplatten (Holzfaser/120 und Holzfaser/40) freigesetzt, dabei Essigsäure in sehr hohen Konzentrationen. Beide Werkstoffe erfüllten folglich jeweils weder die Anforderung an den TVOC-Wert noch an den R-Wert. Durch einen niedrigen NIK-Wert ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) führt die Emission auch geringer Konzentrationen von Furfural zu einem hohen  $R_f$ -Wert. Als Hauptquelle für Formaldehyd wurde die sowohl in der Decken- als auch in der Bodenkonstruktion verbaute 3-Schichtplatte aus Fichtenholz (3-Schicht Fi) identifiziert. Zwecks Informationserhalt sind abweichend vom Anforderungswert einige TVOC-Werte und VOC-ohne NIK mit zwei Dezimalstellen angegeben.

In **Tabelle 21** sind die für die Überschreitungen verantwortlichen Substanzen, die detektierte Konzentration in der Prüfkammer sowie der für die jeweilige Substanz geltende NIK-Wert aufgelistet (gemäß NIK-Werte-Liste, 2020).

**Tabelle 21: Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.**

| Probe,<br>Abkürzung,<br>Anforderungs-<br>werte nach 28<br>Tagen | TVOC<br>[mg/m³]<br>≤1,0 | TSVOC<br>[mg/m³]<br>≤0,1 | Kanzerogene<br>Stoffe [mg/m³]<br>≤0,001 | VOC ohne<br>NIK [mg/m³]<br>≤0,1 | ΣRi<br>(R-Wert)<br>≤1 | Formaldehyd<br>[mg/m³]<br>informativ |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| <b>Modellraum 2</b>                                             | <b>0,3</b>              | <b>&lt; 0,005</b>        | <b>&lt; 0,001</b>                       | <b>&lt; 0,005</b>               | <b>1,656 (2)</b>      | <b>0,023</b>                         |
| <b>Wand 2</b>                                                   | <b>0,3</b>              | <b>&lt; 0,005</b>        | <b>&lt; 0,001</b>                       | <b>&lt; 0,005</b>               | <b>0,597 (1)</b>      | <b>0,005</b>                         |
| KVH/160                                                         | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,251 (0)             | 0,007                                |
| Holzfaser/<br>120                                               | <b>5,5</b>              | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | <b>7,101 (7)</b>      | 0,009                                |
| Holzfaser/40                                                    | <b>3,5</b>              | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | <b>7,176 (7)</b>      | 0,005                                |
| Lehmbau-P                                                       | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,110 (0)             | 0,005                                |
| Lehmspachtel                                                    | n.n.                    | n.n.                     | n.n.                                    | n.n.                            | n.n.                  | n.n.                                 |
| Lehmputz                                                        | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,032 (0)             | < 0,002                              |
| <b>Decke 5</b>                                                  | <b>0,2</b>              | <b>&lt; 0,005</b>        | <b>&lt; 0,001</b>                       | <b>&lt; 0,005</b>               | <b>0,373 (0)</b>      | <b>0,024</b>                         |
| KVH/160                                                         | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,100 (0)             | 0,003                                |
| Massiv-P Fi                                                     | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,294 (0)             | 0,021                                |
| Hanf-<br>Trittschall/5                                          | 0,01                    | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,008 (0)             | < 0,002                              |
| Weißkalk,<br>keine Einzel-<br>messung                           | -                       | -                        | -                                       | -                               | -                     | -                                    |
| Hanf-<br>Trittschall/10                                         | 0,2                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,127 (0)             | < 0,002                              |
| <b>Boden 5</b>                                                  | <b>0,1</b>              | <b>&lt; 0,005</b>        | <b>&lt; 0,001</b>                       | <b>&lt; 0,005</b>               | <b>0,271 (0)</b>      | <b>0,010</b>                         |
| KVH/60/80                                                       | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,205 (0)             | 0,006                                |
| Lehmschütt                                                      | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,058 (0)             | 0,003                                |
| Massiv-P Fi                                                     | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,294 (0)             | 0,021                                |
| PU-Trittschall,<br>keine 28d-<br>Messung, Ab-<br>bruch nach 7d  | -                       | -                        | -                                       | -                               | -                     | -                                    |
| Laminat                                                         | 0,1                     | < 0,005                  | < 0,001                                 | < 0,005                         | 0,171 (0)             | 0,006                                |

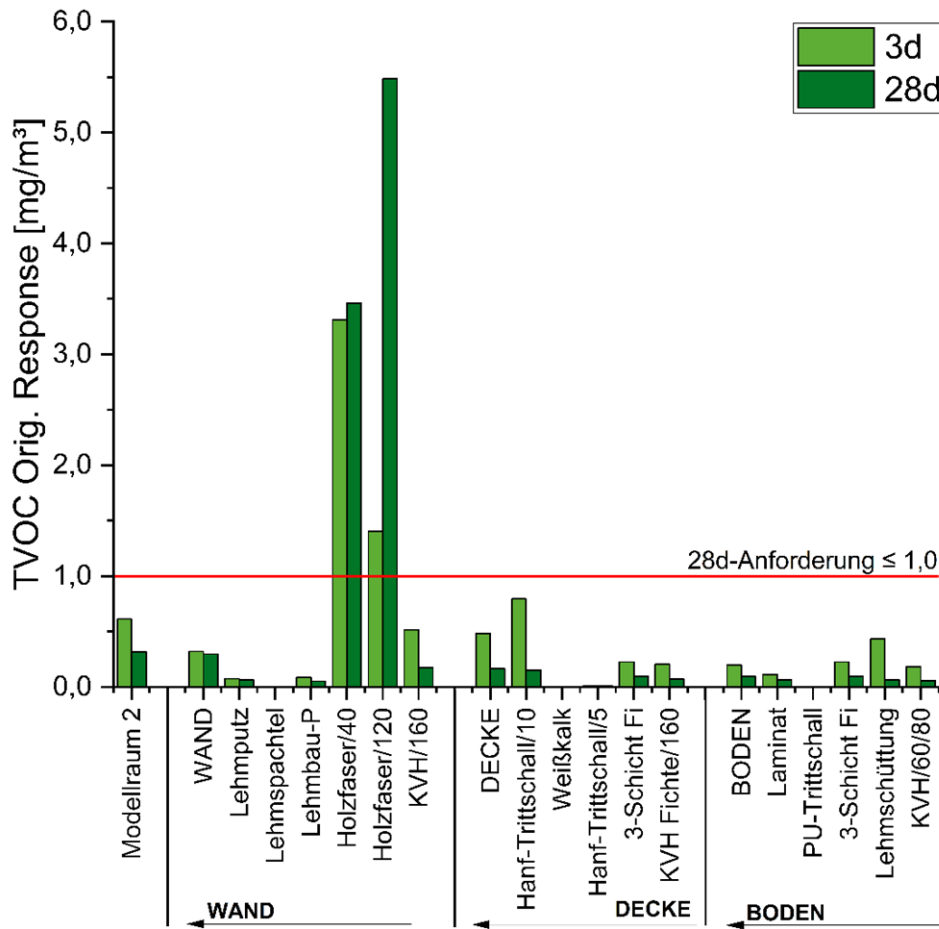
**Tabelle 22:** Modellraum 2/Lehmbau. Substanzen, die zur Überschreitung von Anforderungswerten des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) führten, sowie Kammerkonzentration nach 28 Tagen und NIK-Wert gemäß NIK-Werte-Liste (2020). Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.

| Probe, Abkürzung<br>Anforderungswerte nach 28 Tagen | TVOC [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤1,0 | ΣRi (R-Wert)<br>≤1 | Substanz    | Kammerkonzentration [µg/m <sup>3</sup> ] | NIK-Wert [µg/m <sup>3</sup> ] | Ri-Wert<br>≤1 |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Modellraum 2                                        | 0,3                               | <b>1,656 (2)</b>   | Formaldehyd | 23                                       | 100                           | 0,230         |
|                                                     |                                   |                    | Acetaldehyd | 65                                       | 300                           | 0,217         |
|                                                     |                                   |                    | Furfural    | 9                                        | 10                            | 0,900         |
| Holzfaser/120                                       | <b>5,5</b>                        | <b>7,101 (7)</b>   | Essigsäure  | 5423                                     | 1200                          | 4,519         |
|                                                     |                                   |                    | Furfural    | 23                                       | 10                            | 2,300         |
| Holzfaser/40                                        | <b>3,5</b>                        | <b>7,176 (7)</b>   | Essigsäure  | 3388                                     | 1200                          | 2,823         |
|                                                     |                                   |                    | Furfural    | 43                                       | 10                            | 4,300         |

Die für Modellraum 2/Lehmbau, die dazugehörigen Verbundkonstruktionen und verbauten Einzelmateriale gemessenen TVOC-Werte nach einer Prüfdauer von 3 Tagen und 28 Tagen sind in **Abbildung 48** graphisch dargestellt. **Abbildung 49** zeigt den R-Wert nach 28 Tagen.

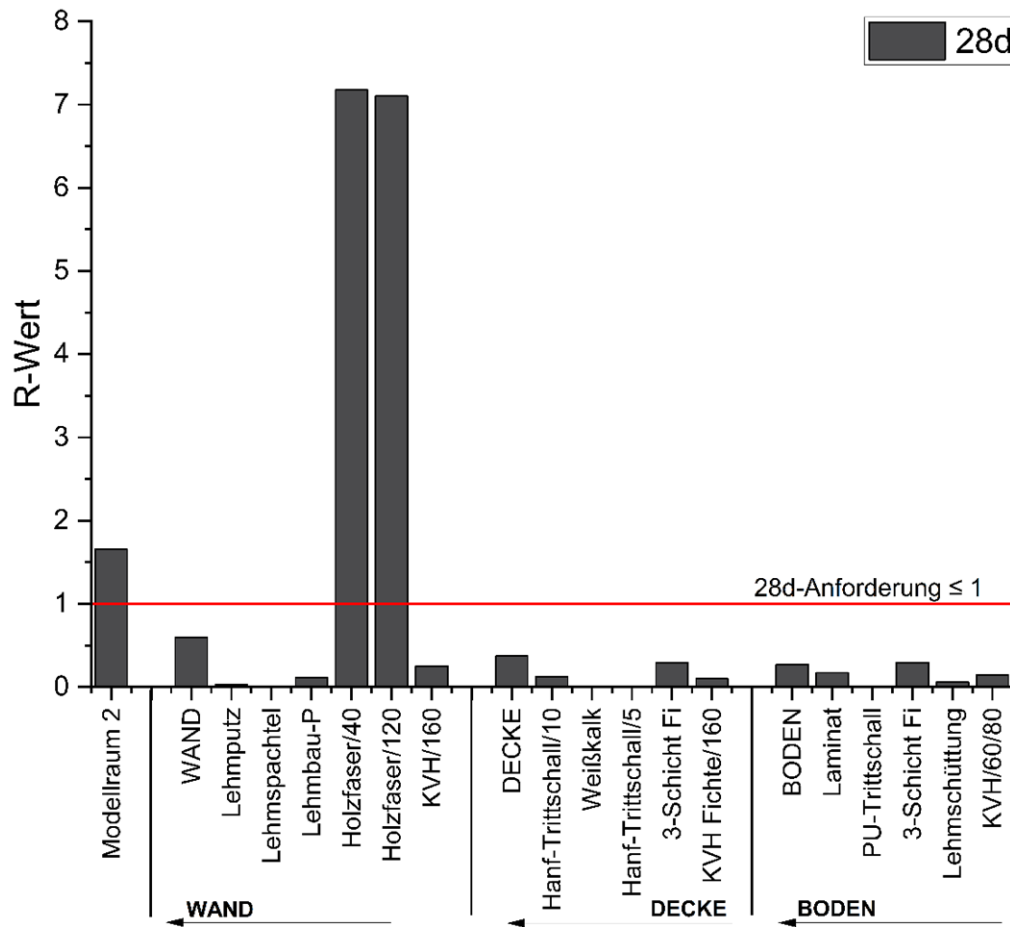
Analog zu Modellraum 1/Holzrahmenbau überschritt die auch in Modellraum 2/Lehmbau verbaute Holzfaserdämmung aufgrund ihrer hohen Emissionsstärke den TVOC-Anforderungswert nach 28 Tagen. Wie bereits im Rahmen der Prüfungen der Einzelmateriale detektiert, nahm die Quellstärke über die Zeit deutlich zu. Dies beeinflusste das Emissionsverhalten des Modellraums allerdings nicht. Der erhobene TVOC-Wert war sehr niedrig und nahm über den Untersuchungszeitraum von 28 Tagen deutlich ab (3d: 0,613 mg/m<sup>3</sup>; 28d: 0,317 mg/m<sup>3</sup>). Die Anforderung an den R-Wert nach 28 Tagen wurde somit durch die Holzfaserdämmplatten nicht erfüllt. Ebenfalls analog zu den Messergebnissen von Modellraum 1/Holzrahmenbau überschritt auch Modellraum 2/Lehmbau die R-Wertanforderungen, wobei dies ebenfalls auf den Verbau der Holzfaserdämmung und somit auf die Emission von Furfural zurückgeführt werden konnte.

**Abbildung 48: Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), TVOC-Wert nach 3d und 28d (Wand: 7d). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

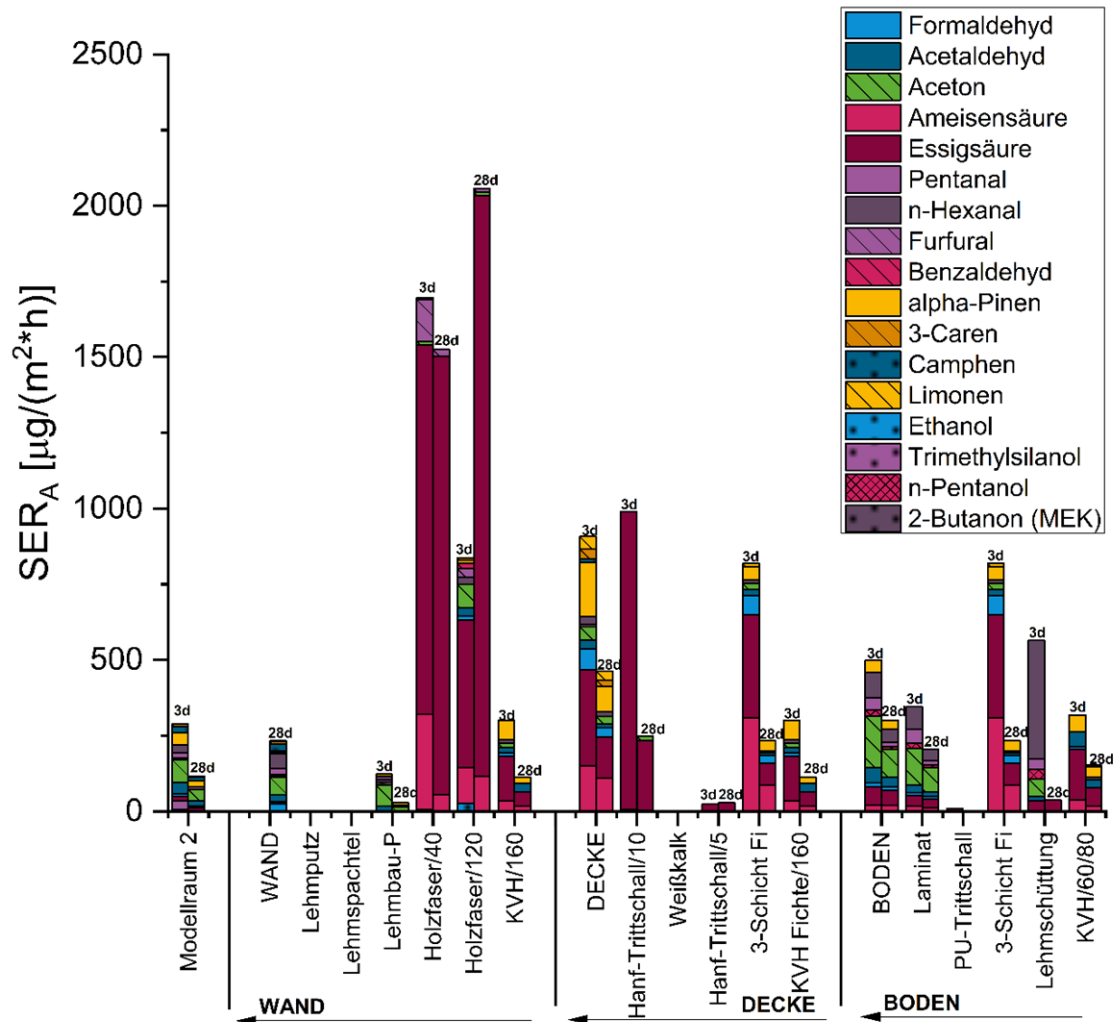
**Abbildung 49: Modellraum 2/Lehmbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), R-Wert nach 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Ähnlich zu den für Modellraum 1/Holzrahmenbau gewonnenen Ergebnissen konnte auch Modellraum 2/Lehmbau als schwache Emissionsquelle bewertet werden. Emissionsstärke und Spektrum der freigesetzten Verbindungen waren ähnlich denen der Wandkonstruktion, wie **Abbildung 50** zeigt. Der Modellraum emittierte ebenfalls primär die leichtflüchtigen Carbonyle Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton (in ansteigender Konzentration) sowie Pentanal und alpha-Pinen. Damit wurde das Emissionsspektrum auch von Raum 2/Lehmbau von den verbauten holzbasierten Werkstoffen bestimmt. Die in der Wand-, Decken- und Fußbodenkonstruktion verbauten Emissionsquellen für Essigsäure spiegelten sich weder im Emissionsspektrum des Wandaufbaus noch des kompletten Modellraums wider. Ob die als Beplankung eingesetzte Lehmbauplatte als Senke fungierte, konnte im Vorhaben nicht geklärt werden. Allerdings setzte auch die Deckenkonstruktion die C1-C2-Carbonsäuren frei, die sowohl auf die verbauten Holzwerkstoffe als auch besonders auf die verbaute Hanf-Trittschalldämmung (Hanf-Trittschall/10) zurückgeführt werden konnten, welche hohe Konzentrationen an Essigsäure emittierte ( $SER_A$ :  $231 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  nach 28d). Das durch die Deckenkonstruktion freigesetzte Substanzspektrum spiegelte die verbauten Einzelmaterialien ohne dominanten Einfluss einer bestimmten Materialschicht wider. Dasselbe galt auch für die Bodenkonstruktion, deren Emissionsspektrum allerdings primär durch das Laminat als oberste Schicht beeinflusst wurde, wobei der gesamte Bodenaufbau eine stärkere Quelle als das Laminat darstellte.

**Abbildung 50: Modellraum 2/Lehmbau.** Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SE_{RA}$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).



[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 4.3.3.3 Modellraum 3/Holzhybridbau

Nachfolgend werden die Auswertungen der zu Modellraum 3/Holzhybridbau gehörenden Messdaten gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) und die dort hinterlegten Anforderungswerte nach 3 Tagen (**Tabelle 23**) und 28 Tagen (**Tabelle 24**) Prüfzeitraum erläutert. Neben den erhobenen Messdaten für Modellraum 3 sind die Messdaten für die dazugehörigen Verbundaufbauten (Wand 3/Holzhybridbau, Decke 6/Holzhybridbau, Boden 6/Nadelfilz) und die verbauten Einzelmateriale aufgeführt. Analog zu den Modellräumen 1 und 2 wurden die verbauten Einzelmateriale ebenfalls nochmals parallel zum Modellraum auf Emissionen geprüft, um eine direkt vergleichbare Datengrundlage zu erhalten, da angenommen werden kann, dass alle Materialien derselben Charge (Ankauf) entstammten.

**Tabelle 23: Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 3 Tagen.**

| Probe                                     | Abkürzung              | Anforderungswerte<br>nach 3 Tagen      | Anforderungswerte<br>nach 3 Tagen                 |
|-------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                                           |                        | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤ 10 | Kanzerogene Stoffe [mg/m <sup>3</sup> ]<br>≤ 0,01 |
| <b>Modellraum – Holzhybridbau</b>         | <b>Modellraum 3</b>    | <b>0,96</b>                            | <b>&lt; 0,001</b>                                 |
| <b>Wand – Holzhybridbau</b>               | <b>Wand 3</b>          | <b>0,74</b>                            | <b>&lt; 0,001</b>                                 |
| Acryl-Dispersionsfarbe                    | Acryldisper-<br>sion-F | 0,06                                   | < 0,001                                           |
| Füll- und Feinspachtelmasse               | Feinspachtel           | 0,24                                   | < 0,001                                           |
| Gipskartonplatte                          | GK                     | 0,02                                   | < 0,001                                           |
| OSB-Platte                                | OSB-3                  | 0,82                                   | < 0,001                                           |
| Steinwolle-Trennwandplatte                | Stein-<br>woll-P       | 0,01                                   | < 0,001                                           |
| Konstruktionsvollholz                     | KVH/160                | 0,49                                   | < 0,001                                           |
| Rahmenprofil                              | Rahmen-<br>profil-1    | n.n.                                   | < 0,001                                           |
| Zementgebundene Leichtbeton-<br>Bauplatte | ZLB-P                  | 0,05                                   | < 0,001                                           |
| <b>Decke – Holzhybridbau</b>              | <b>Decke 6</b>         | <b>0,60</b>                            | <b>&lt; 0,001</b>                                 |
| Acryl-Dispersionsfarbe                    | Acryldisper-<br>sion-F | 0,06                                   | < 0,001                                           |
| Füll- und Feinspachtel                    | Feinspachtel           | 0,24                                   | < 0,001                                           |
| Gipsfaserplatte                           | GF                     | 0,04                                   | < 0,001                                           |
| OSB-Platte                                | OSB-3                  | 0,82                                   | < 0,001                                           |
| Trockenschüttung                          | Trocken-<br>schüttung  | 0,01                                   | < 0,001                                           |
| EPS-Dämmplatte                            | EPS                    | 0,42                                   | < 0,001                                           |
| Konstruktionsvollholz                     | KVH/160                | 0,49                                   | < 0,001                                           |
| <b>Boden – Nadelfilz</b>                  | <b>Boden 6</b>         | <b>1,32</b>                            | <b>&lt; 0,001</b>                                 |
| Nadelfilz                                 | Nadelfilz              | < 0,005                                | < 0,001                                           |
| Dispersionsklebstoff                      | Dispersions-K          | 1,29                                   | < 0,001                                           |

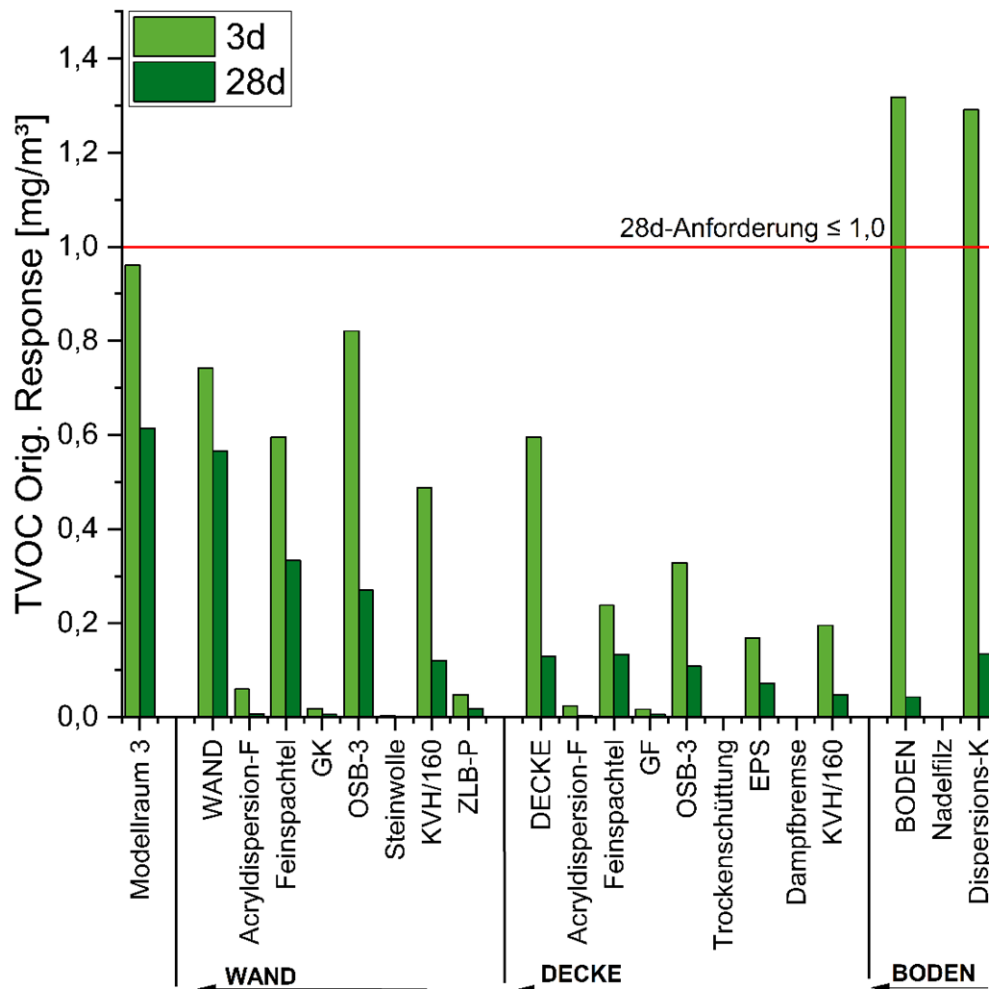
Wie aus **Tabelle 23** und **Tabelle 24** ersichtlich, wurden die Anforderungswerte nach 3 Tagen und nach 28 Tagen von Modellraum 3 und den dazugehörigen Verbundaufbauten erfüllt. Zwecks Informationserhalt sind in **Tabelle 24** abweichend vom Anforderungswert einige TVOC-Werte und VOC-ohne NIK mit zwei Dezimalstellen angegeben.

**Tabelle 24: Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung der Messdaten des Modellraums, der Verbundkonstruktionen und der Einzelmaterialien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Der in Klammern gesetzte Wert entspricht dem R-Wert nach Rundung.**

| Probe,<br>Abkürzung,<br><br>Anforderungswerte<br>nach 28 Tagen | TVOC<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤1,0 | TSVOC<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤0,1 | Kanzerogene<br>Stoffe<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤0,001 | VOC ohne<br>NIK<br>[mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>≤0,1 | ΣRi<br>(R-Wert)<br><br>≤1 | Formalde-<br>hyd [mg/m <sup>3</sup> ]<br><br>informativ |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Modellraum 3</b>                                            | <b>0,6</b>                               | <b>&lt; 0,005</b>                         | <b>&lt; 0,001</b>                                           | <b>&lt; 0,005</b>                                   | <b>0,996 (1)</b>          | <b>0,012</b>                                            |
| <b>Wand 3</b>                                                  | <b>0,6</b>                               | <b>&lt; 0,005</b>                         | <b>&lt; 0,001</b>                                           | 0,008                                               | <b>1,039 (1)</b>          | <b>0,009</b>                                            |
| Acryldispersion-F                                              | 0,01                                     | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | 0,007                                               | 0,000 (0)                 | 0,002                                                   |
| Feinspachtel                                                   | 0,1                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,111 (0)                 | < 0,002                                                 |
| GK                                                             | 0,01                                     | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,005 (0)                 | 0,003                                                   |
| OSB-3                                                          | 0,3                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,411 (0)                 | 0,007                                                   |
| Stein-<br>wolle-P                                              | < 0,005                                  | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,340 (0)                 | 0,034                                                   |
| KVH/160                                                        | 0,1                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,165 (0)                 | 0,007                                                   |
| Rahmen-<br>profil-1                                            | n.n.                                     | n.n.                                      | n.n.                                                        | n.n.                                                | n.n.                      | n.n.                                                    |
| ZLB-P                                                          | n.n.                                     | n.n.                                      | n.n.                                                        | n.n.                                                | n.n.                      | n.n.                                                    |
| <b>Decke 6</b>                                                 | <b>0,1</b>                               | <b>&lt; 0,005</b>                         | <b>&lt; 0,001</b>                                           | <b>&lt; 0,005</b>                                   | <b>0,259 (0)</b>          | <b>0,009</b>                                            |
| Acryldispersion-F                                              | 0,01                                     | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | 0,007                                               | 0,000 (0)                 | 0,002                                                   |
| Feinspachtel                                                   | 0,1                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,111 (0)                 | 0,003                                                   |
| GF                                                             | 0,04                                     | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,038 (0)                 | 0,004                                                   |
| OSB-3                                                          | 0,3                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,411 (0)                 | 0,007                                                   |
| Trockenschüttung                                               | n.n.                                     | n.n.                                      | n.n.                                                        | n.n.                                                | n.n.                      | n.n.                                                    |
| EPS                                                            | 0,2                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,804 (1)                 | < 0,002                                                 |
| KVH/160                                                        | 0,1                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,165 (0)                 | 0,007                                                   |
| <b>Boden 6</b>                                                 | <b>0,04</b>                              | <b>&lt; 0,005</b>                         | <b>&lt; 0,001</b>                                           | <b>&lt; 0,005</b>                                   | <b>0,038 (0)</b>          | <b>0,004</b>                                            |
| Nadelfilz                                                      | < 0,005                                  | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | < 0,005                                             | 0,000 (0)                 | < 0,002                                                 |
| Dispersions-K                                                  | 0,1                                      | < 0,005                                   | < 0,001                                                     | 0,015                                               | 0,283 (0)                 | < 0,002                                                 |

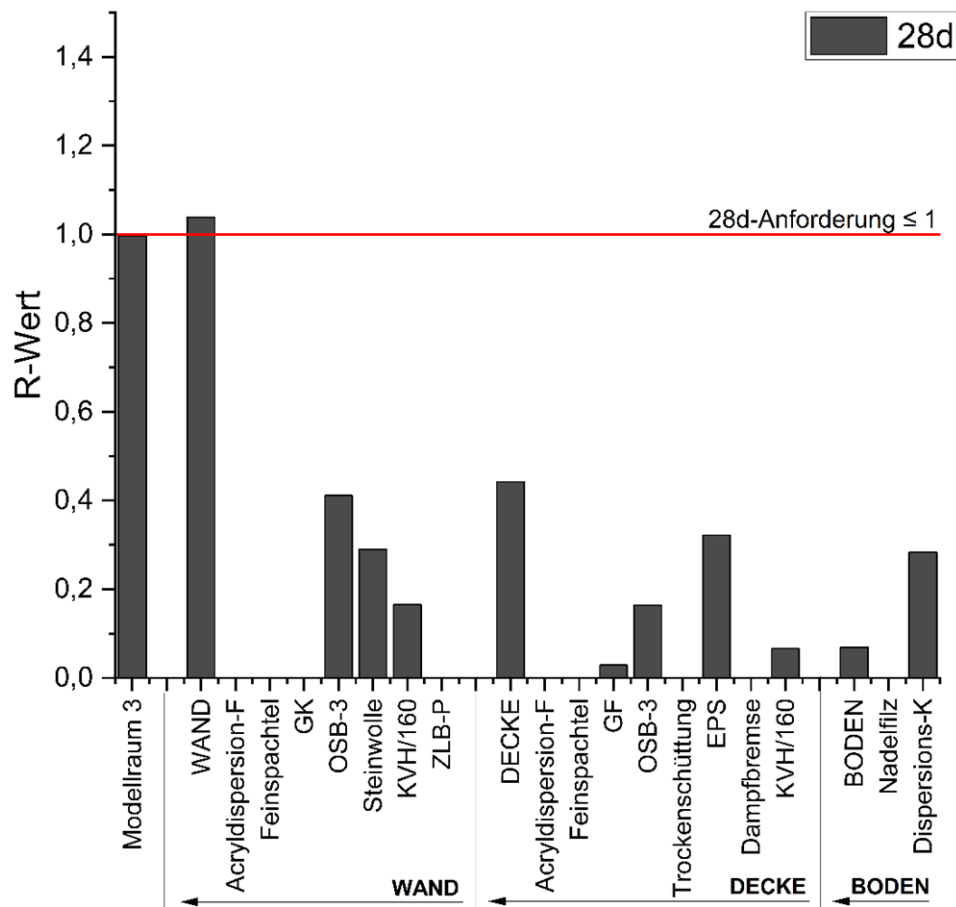
Die für Modellraum 3/Holzhybridbau, die dazugehörigen Verbundkonstruktionen und verbauten Einzelmaterialien gemessenen TVOC-Werte nach einer Prüfdauer von 3 Tagen und 28 Tagen sind in **Abbildung 51** graphisch dargestellt. **Abbildung 52** zeigt den R-Wert nach 28 Tagen.

**Abbildung 51: Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021), TVOC-Wert nach 3d und 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 52: Modellraum 3/Holzhybridbau. Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021), R-Wert nach 28d. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



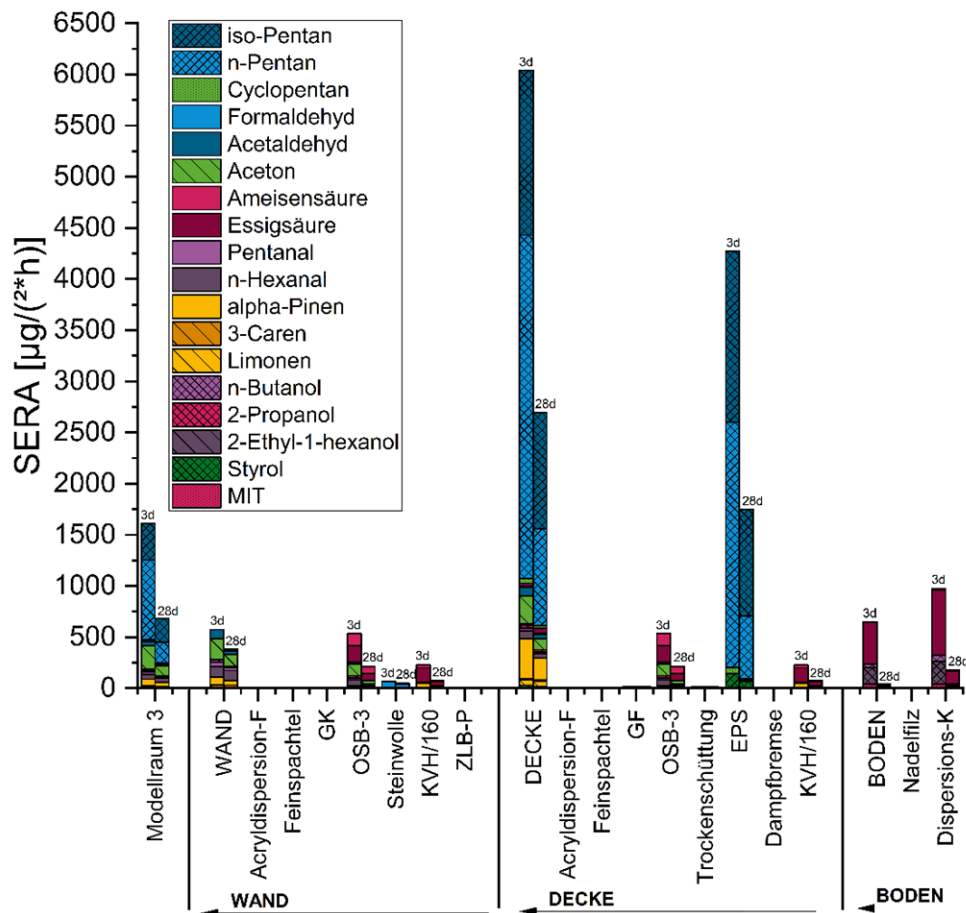
[Quelle: Fraunhofer WKI]

Weder die verbauten Einzelmaterialien, die konstruktiven Elemente (Wand, Decke, Boden) noch der Modellraum überschritten den TVOC-Anforderungswert nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Im Vergleich zum nach 3 Tagen gemessenen TVOC-Wert wird deutlich, wie stark die Emissionsstärke über den gesamten Prüfzeitraum abnahm (siehe **Abbildung 52**). Auch der Anforderungswert für den R-Wert wurde nach 28 Tagen von keinem Einzelmaterial, keiner Verbundkonstruktion und nicht von dem Modellraum überschritten. Für das Wandelement (Wand 3/Holzhybridbau) wurde ein R-Wert von 1,039 erhoben, womit der Anforderungswert ( $\leq 1$ ) ebenfalls erfüllt wurde.

Analog zu den anderen beiden Modellräumen (Modellraum 1/Holzrahmenbau, Modellraum 2/Lehmbau) konnte auch Modellraum 3/Holzhybridbau als schwache Emissionsquelle bewertet werden. Das Spektrum der freigesetzten Verbindungen zeigt **Abbildung 53**. Das Emissionsspektrum des Modellraums ähnelte dem der Wandkonstruktion, wobei zusätzlich die zu der Substanzgruppe der VVOC zählenden Verbindungen iso-Pentan und n-Pentan detektiert werden konnte. Diese Substanzen waren eindeutig auf den Deckenaufbau und die darin verbaute EPS-Dämmung zurückzuführen, die die als Treibmittel eingesetzten Pentan-Verbindungen in äußerst hohen Konzentrationen freisetzte. Sowohl das Decken- als auch das Wandelement emittierten aufgrund der verbauten holzbasierten Werkstoffe Terpene. Die von den Verbundkonstruktionen freigesetzten Konzentrationen waren allerdings höher als die der einzelnen Materialien und des

Modellraums. Der Fußbodenaufbau, dessen Emissionsspektrum und Quellstärke vom Dispersionsklebstoff dominiert wurde, beeinflusste das Emissionsverhalten des Modellraums nicht, so dass dessen Relevanz als untergeordnet betrachtet werden konnte.

**Abbildung 53: Modellraum 3/Holzhybridbau. Leitsubstanzen nach einem Prüfzeitraum von 3 und 28 Tagen. Flächenspezifische Emissionsraten ( $SER_A$ ). Detektiert mittels aktiver Luftprobenahme auf Tenax® TA (TDS-GC/MS), Carbograph 5TD (TDS-GC/MS), DNPH (HPLC/DAD) und Silicagel (IC). Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 5 Geruchliche Bewertung von Baumaterialien, Verbundkonstruktionen und Modellräumen – sensorische Prüfungen

In diesem Vorhaben wurden neben den organischen Luftfremdstoffen auch die Emissionen geruchsrelevanter Verbindungen bewertet, die durch die einzelnen Werkstoffe und Baumaterialien, die Verbundaufbauten sowie durch die Modellräume nach einem Prüfzeitraum von 7 und 28 Tagen freigesetzt wurden. Bei der Bestimmung der Geruchswahrnehmung wurden jeweils die nachfolgenden vier Bewertungsparameter ermittelt:

- ▶ Empfundene Intensität (EI) gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11
- ▶ Hedonische Wirkung gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11
- ▶ Geruchsart
- ▶ Zumutbarkeit

Gemäß Vorgaben des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) ist die Geruchsbewertung von Bauprodukten freiwillig. Der zu prüfende Parameter ist die sog. empfundene Intensität (EI), die einen Wert von  $\leq 7$  pi (pi: perceived intensity) nach einer Prüfdauer von 28 Tagen nicht überschreiten darf. Dieser vorläufige Beurteilungsmaßstab wurde gemäß AgBB-Bewertungsschema auf Basis einer Befragung von ungeschulten Personen im Hinblick auf den Parameter der Zumutbarkeit abgeleitet (UBA-Texte 35/2011). Der AgBB hält die unzumutbare Belästigung für gegeben, wenn mehr als 30 % einer nicht geschulten Gruppe von Befragten den Geruch von Bauprodukten als unzumutbar bewerten (AgBB, 2021). Da bisher erst wenige Daten im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der empfundenen Intensität und des Parameters der Zumutbarkeit vorliegen, wurde die Zumutbarkeit als zusätzliche Bewertungsgröße in diesem Vorhaben mitbewertet.

### 5.1 Empfundene Intensität (EI)

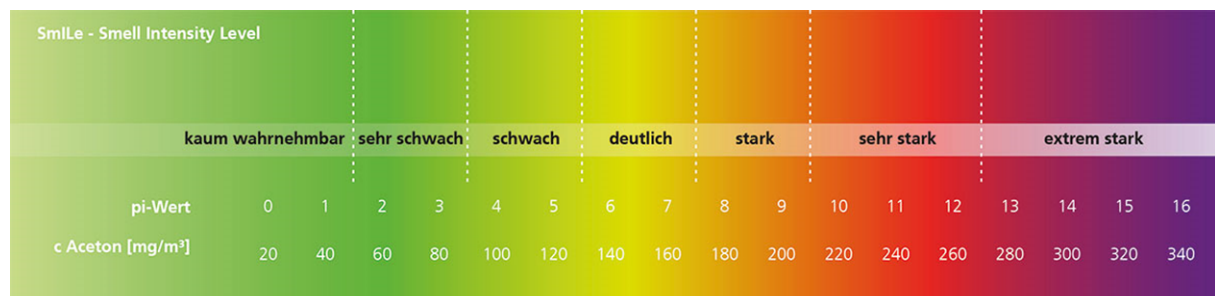
Die Methode der empfundenen Intensität (perceived intensity) dient zur Intensitätsbestimmung der Emissionen von Geruchsstoffen aus Prüfkörpern gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11.

Die empfundene Intensität der Baumaterialien wurde durch eine geschulte Probandengruppe von mindestens 10 Personen bewertet. Die Probanden bewerten die Intensität der Probe mit Hilfe eines Vergleichsmaßstabs. Die Anwendung des Vergleichsmaßstabs ermöglicht eine Standardisierung der Intensitätsbewertung und soll so zu einer Verringerung der Varianz der Messwerte durch die Vereinheitlichung des Bewertungskriteriums führen. Die Festlegung des Vergleichsmaßstabs erfolgt durch Aceton als Referenzstoff.

Prinzipiell ist ein Vergleichsmaßstab ein Verdünnungssystem für geruchsaktive Substanzen. In diesem Forschungsvorhaben wurde ausschließlich Aceton als Vergleichssubstanz herangezogen. Der zu bewertende Parameter ist die »empfundene Intensität«  $\Pi$  und hat die Einheit pi. Die Skala des Vergleichsmaßstabs liegt in einem Bereich von 0 - 15 pi. Null pi ist die angenommene Geruchsschwelle von Aceton bei einer Konzentration von  $20 \text{ mg/m}^3$  gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11. Eine Erhöhung von einem pi bedeutet definitionsgemäß eine Erhöhung der Aceton-Konzentration um  $20 \text{ mg/m}^3$ . Die Testpersonen vergleichen die Geruchsintensität einer Probe mit den unterschiedlichen Aceton-Konzentrationen bzw. pi-Stufen am Vergleichsmaßstab und können somit die Intensität der jeweiligen Probe mittels Referenzquelle bestimmen.

Um die reinen Zahlenwerte der Skala der empfundenen Intensität verbal einordnen zu können, ist in **Abbildung 54** eine Kategorisierung der Geruchsintensität dargestellt. Die Zuordnung anhand der Intensitätsskala reicht von „kaum wahrnehmbar“ (0 – 1 pi) bis hin zu „extrem stark“ bei einer empfundenen Intensität von 13 – 16 pi.

**Abbildung 54: Skalierung zur Bewertung der empfundenen Intensität (SmIle: smell intensity level).**

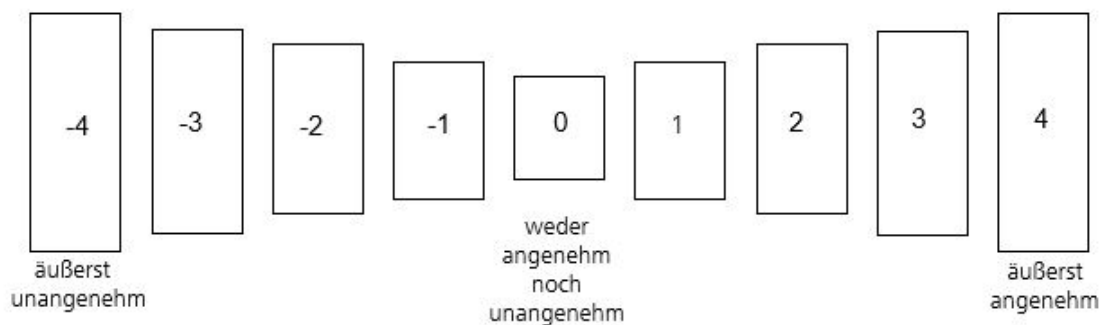


[Quelle: Fraunhofer IBP (2015)]

## 5.2 Hedonische Wirkung

Die hedonische Wirkung gibt Auskunft über die Lästigkeit eines Geruchs und ist stark von persönlichen (subjektiven) und kulturellen Faktoren geprägt. Generell hängt die Bewertung von der Situation ab, in der ein Geruch zum ersten Mal gerochen wird (Mücke and Lemmen, 2009). Bei der Bewertung der Hedonik sind mindestens 10 geschulte Prüfer einzusetzen. »Geschulte« Prüfer bedeutet, dass die Probanden gemäß der Methode der »empfundenen Intensität« trainiert wurden. Die Probanden bewerten die Probenluft mittels einer neunteiligen Skala von »extrem angenehm« (+4) bis »extrem unangenehm« (-4), siehe **Abbildung 55**.

**Abbildung 55: Skalierung zur Bewertung der hedonischen Wirkung einer Geruchsprobe.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 5.3 Geruchsart

Die Ermittlung der Geruchsart ist ein sensorisch direkt durchgeführtes Messverfahren, bei dem die Probanden den wahrgenommenen Geruch charakterisieren. Die Testpersonen beschreiben den Geruch nach deren eigenem Empfinden beispielsweise mit »muffig, faulig, süßlich, holzig, lösemittelartig, ....«. Die Geruchsqualität einer Substanz ist eine molekulare Eigenschaft, die strukturabhängig ist und eine spezifische Aktivität der Rezeptoren voraussetzt (Chu and Downes, 2002). Die Beschreibung der Geruchsqualität kann einen Hinweis auf die Geruchsquelle

liefern. Bei der Bestimmung der Geruchsart gibt es keine Anforderungen für die Anzahl der teilnehmenden Probanden. In diesem Forschungsvorhaben wurde die Bewertung der Geruchsart von mindestens 10 geschulten Probanden vorgenommen.

## 5.4 Zumutbarkeit

Ähnlich wie die hedonische Wirkung spricht die Ermittlung der Zumutbarkeit die subjektive Empfindung der Testpersonen an. Die Beurteilung der Zumutbarkeit einer Luftprobe wird auf Basis einer Befragung der Probanden ermittelt. Die Probanden müssen entscheiden, ob sie die Luftprobe als tägliches Arbeitsumfeld als zumutbar oder unzumutbar empfinden. Aus diesen Angaben wird die prozentuale Zumutbarkeit für eine Luftprobe errechnet: UBA-Texte 35/2011. Als Anforderung für die Zumutbarkeit in diesem Vorhaben wurde der vom AgBB vorgeschlagene Wert von  $\geq 70\%$  herangezogen. Üblicherweise wird die Zumutbarkeit mit ungeschulten Testpersonen ermittelt. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Zumutbarkeit mit mindestens 10 geschulten Testpersonen durchgeführt.

## 5.5 Durchführung der Geruchsbewertung

Die Bewertung der Probenluft fand indirekt über Sammeln der Kammerluft in NALOPHAN-Beuteln statt (PURE Sniff XL, Olfasense). Wesentlicher Bestandteil des PURE Sniff XL ist ein Kunststoffbehälter, in dem durch ein akkubetriebenes Gebläse ein Unterdruck bzw. ein Überdruck erzeugt werden kann. Für die Probenahme muss der Probenahmebeutel evakuiert in das Probenahmegerät eingebracht werden. Durch das Herstellen eines Unterdrucks in dem Gerät füllt sich der Beutel indirekt über den Probenahmeschlauch mit der zu untersuchenden Luft. Um Substanzverluste durch das Beutelmateriale zu minimieren, wurden die Probenahmebeutel viermal mit der Prüfkammerluft befüllt. Erst die vierte Befüllung der NALOPHAN-Beutel wurde den Testpersonen für die Geruchsbewertung angeboten. Die Probenahme der Geruchsproben erfolgte unmittelbar vor der Geruchsbewertung, sodass die Lagerzeit der Luftproben im Beutel so gering wie möglich gehalten wurde ( $< 1,5\text{h}$ ), um Veränderung der Luftprobe durch zeitliche Effekte zu minimieren (Salthammer et al., 2016). Darüber hinaus kann der Pure Sniff XL als Probendarbietungsgerät für die Geruchsprobenbewertung benutzt werden. Bei Betätigung eines Tasters (Probendarbietung) wird Überdruck in dem Gerät erzeugt, die Probenluft dadurch aus dem Beutel gedrückt und dem Probanden über einen Trichter angeboten (siehe **Abbildung 56**). Die Ermittlung der sensorischen Prüfparameter erfolgte während der gesamten Versuchsreihe voneinander entkoppelt: Zuerst wurde die Bestimmung der Geruchsintensität eines Produkts vorgenommen, anschließend wurden die Parameter der Hedonik, der Geruchsqualität und der Zumutbarkeit bewertet.

**Abbildung 56: Indirekte Geruchsbewertung einer Luftprobe aus einer Prüfkammer**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 5.6 Ergebnisse der Geruchsbewertungen

### 5.6.1 Einzelmaterialeien

In **Tabelle 25** sind die sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Werte für die Einzelmaterialeien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen aufgeführt.

**Tabelle 25:** Emissionsprüfung Einzelmaterialeien gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für die Einzelmaterialeien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.

| Probe                                       | Abkürzungen     | EI [pi]    | Hedonik | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert      | Geruchsart                              |
|---------------------------------------------|-----------------|------------|---------|------------------|-------------------|--------------|-----------------------------------------|
| Konstruktionsvollholz /Lattung, Tanne 60 mm | KVH/60/80       | 3,6        | 0,2     | 78               | 0,14              | 0,205        | holzig, sauer                           |
| Konstruktionsvollholz, Fichte, 160 mm       | KVH 160/ Fichte | 5,1        | 0,5     | 100              | 0,12              | 0,164        | holzig, holzwerkstoffartig              |
| Konstruktionsvollholz, 160 mm               | KVH/160         | 5,1        | -0,6    | 80               | 0,12              | 0,165        | holzig, holzwerkstoff-, kunststoffartig |
| OSB-Platte 1.1                              | OSB-1.1         | <b>8,9</b> | -0,4    | <b>45</b>        | <b>1,22</b>       | <b>2,305</b> | holzig, holzwerkstoffartig,             |
| OSB-Platte 1.2                              | OSB-1.2         | <b>7,8</b> | -0,2    | <b>55</b>        | 1,02              | <b>2,110</b> | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich   |
| OSB-Platte 2                                | OSB-2           | 7,2        | -0,9    | <b>60</b>        | <b>1,50</b>       | <b>3,408</b> | muffig, holzig, holzwerkstoffartig      |

| Probe                        | Abkürzungen         | EI [pi] | Hedonik | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert | Geruchsart                                 |
|------------------------------|---------------------|---------|---------|------------------|-------------------|---------|--------------------------------------------|
| OSB-Platte 3                 | OSB-3               | 5,3     | -0,6    | 60               | 0,27              | 0,411   | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich      |
| Massivholz-Platte Fichte     | Massiv-P Fi         | 5,2     | 0,6     | 91               | 0,23              | 1,015   | holzig, holzwerkstoffartig                 |
| 3-Schichtplatte Fichte       | 3-Schicht Fi        | 4,9     | 0,2     | 89               | 0,24              | 0,735   | holzig                                     |
| Sperrholzplatte Birke        | Sperr-P1 Birke      | 8,4     | -0,4    | 45               | 1,91              | 2,066   | holzig-, holzwerkstoffartig, sauer, süß    |
| Sperrholzplatte Pappel       | Sperr-P2 Pappel     | 5,1     | -0,1    | 80               | 0,17              | 0,322   | holzig, holzwerkstoffartig                 |
| Spanplatte 1                 | Span-P1             | 5,9     | 0,1     | 73               | 0,32              | 1,190   | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich      |
| Spanplatte 2                 | Span-P2             | 6,9     | -0,2    | 78               | 0,30              | 0,710   | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich      |
| Trennwandplatte              | Steinwoll-P         | k.D.    | k.D.    | k.D.             | k.D.              | k.D.    | k.D.                                       |
| Holzfaserdämmplatte 120 mm   | Holzfaser/120       | 9       | -1,1    | 56               | 4,96              | 12,885  | holzig, sauer, brandig                     |
| Holzfaserdämmplatte 40 mm    | Holzfaser/40        | 7,6     | -1,3    | 20               | 3,46              | 7,176   | sauer, brandig, nussig, holzwerkstoffartig |
| Steinfaserdämmung            | Steinwolle          | 2,3     | 0,2     | 100              | 0,01              | 0,804   | leicht holzig, sauer                       |
| Fassadendämmplatte           | Glaswolle           | 4       | -0,3    | 67               | 0,06              | 0,117   | lederartig, muffig, stallartig             |
| Spannfilz                    | Mineralwolle        | 3,8     | -0,4    | 73               | < 0,01            | 0,370   | muffig, gummi-, plastikartig               |
| Mehrzweckdämmplatte          | EPS                 | 5,8     | -0,7    | 45               | 0,25              | 1,083   | süß-honig-, kunststoffartig                |
| Dämmunterlage                | PU-Trittschall      | 2,4     | 0,4     | 100              | < 0,01            | 0,000   | -                                          |
| Hanf Nadelfilzstreifen 10 mm | Hanf-Trittschall/10 | 5,4     | -0,3    | 80               | 0,15              | 0,127   | muffig, sauer, strohig, heuig              |
| Hanf Nadelfilzstreifen 5 mm  | Hanf-Trittschall/5  | 2,9     | -0,2    | 90               | 0,01              | 0,008   | muffig, holzwerkstoffartig                 |

| Probe                   | Abkürzungen           | EI [pi] | Hedonik | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert | Geruchsart                                                            |
|-------------------------|-----------------------|---------|---------|------------------|-------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------|
| Gipskartonplatte        | GK                    | 5,2     | 0,1     | 91               | 0,03              | 0,021   | holzig, holzwerkstoff-, senf-, plastikartig, würzig, sauer, künstlich |
| Gipsfaserplatte         | GF                    | 4,7     | -0,2    | 64               | 0,06              | 0,024   | gummiartig, holzig, würzig                                            |
| Gipsputz                | Gipsputz              | 2,8     | 1,1     | 100              | 0,04              | 0,021   | fruchtig, blumig, mentholartig                                        |
| Lehmputz                | Lehmputz              | 2,3     | 0,1     | 100              | 0,08              | 0,041   | -                                                                     |
| Vinyl                   | Vinyl-1               | 5,1     | 0       | 73               | 0,11              | 0,114   | würzig, holzig, muffig                                                |
| Vinyl                   | Vinyl-2               | 4,2     | -0,3    | 70               | 0,19              | 0,258   | sauer, linoleum-, kunststoffartig                                     |
| Laminat                 | Laminat               | 5,6     | -0,3    | 82               | 0,09              | 0,182   | holzig, holzwerkstoffartig                                            |
| Parkett Eiche           | Parkett Eiche-1       | 7       | 0,6     | 82               | 0,77              | 0,511   | holzig, holzwerkstoffartig                                            |
| Parkett Eiche           | Parkett Eiche-2       | 5,7     | 0,1     | 78               | 0,17              | 0,203   | holzig, würzig                                                        |
| Nadelfilz               | Nadelfilz             | 4,2     | -1,2    | 60               | 0,07              | 0,017   | sauer, teppich-, gummi-, kunststoff-, klebstoffartig.                 |
| Teppichboden            | Velours               | 4,8     | -1      | 70               | 0,10              | 0,061   | teppichartig                                                          |
| Epoxidharz-Beschichtung | Epoxidharz            | 3,3     | 0,2     | 90               | 0,41              | 0,821   | sauer, süß                                                            |
| Bodenausgleichsmasse    | Bodenausgleich        | 2,3     | 0,7     | 100              | 0,06              | 0,106   | seifig, süß, frisch                                                   |
| Estrichbeton            | Estrichbeton          | 3,2     | 0,6     | 91               | < 0,01            | 0,000   | zimtig, süß                                                           |
| Acryldispersion         | Acryldispersion-F     | 2,6     | -0,2    | 90               | < 0,01            | 0,000   | leicht kunststoffartig, muffig süß                                    |
| Bio-Innenfarbe          | Mineralsilikat-F      | 3,3     | 0,2     | 90               | < 0,01            | 0,000   | sauer, süß                                                            |
| Mineralfarbe            | Dispersions-silikat-F | 2,4     | 0,3     | 90               | < 0,01            | 0,000   | schwach süß                                                           |
| Dispersionsfarbe        | Dispersion-F          | 4,2     | 0,5     | 100              | 0,06              | 0,280   | holzig                                                                |

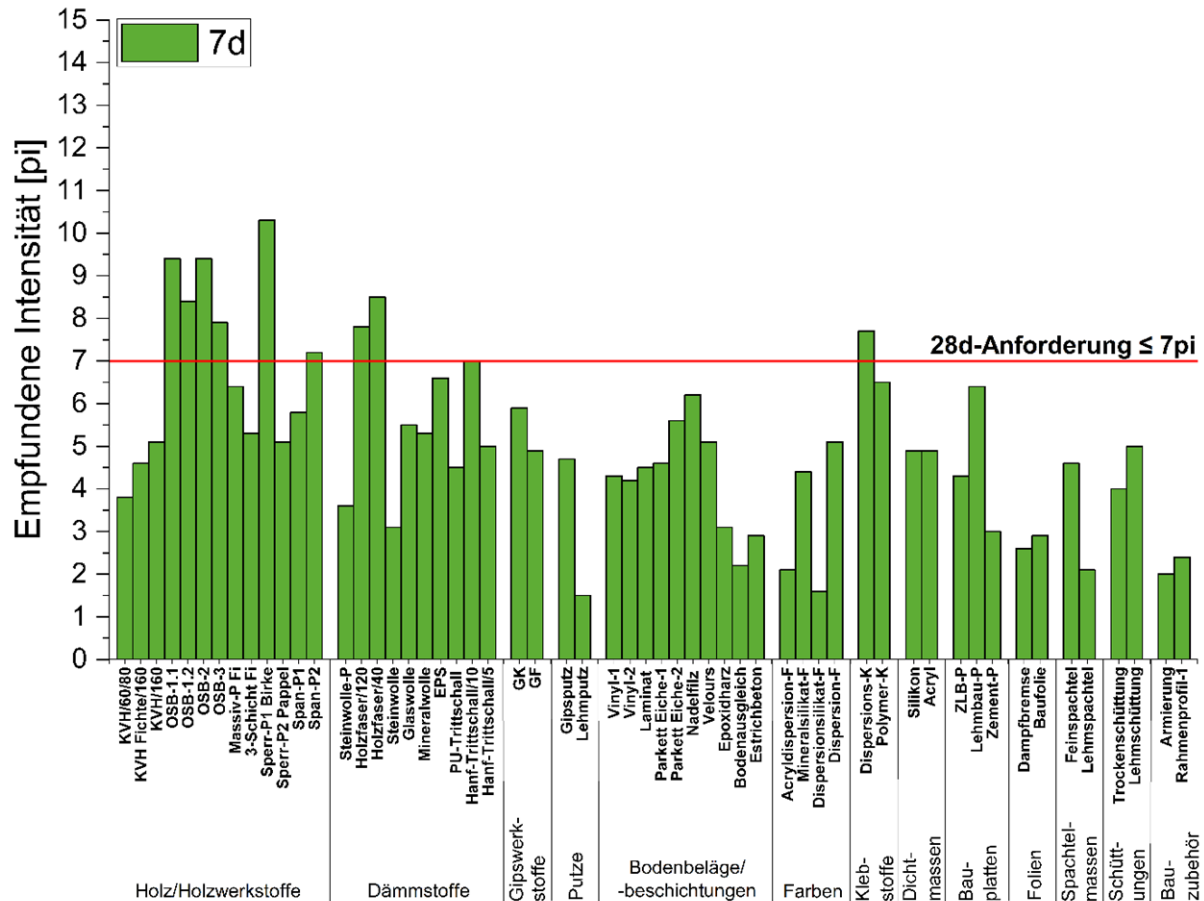
| Probe                                 | Abkürzungen      | EI [pi] | Hedonik | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert | Geruchsart                                    |
|---------------------------------------|------------------|---------|---------|------------------|-------------------|---------|-----------------------------------------------|
| Dispersionsklebstoff                  | Dispersions-K    | 6,4     | -0,9    | 70               | 0,08              | 0,180   | kunststoffartig, würzig, chemisch             |
| Parkettklebstoff                      | Polymer-K        | 3,2     | -0,3    | 70               | 0,10              | 0,124   | sauer, seifig                                 |
| Dichtmasse-Silikon                    | Silikon          | 4,1     | 0,3     | 82               | 3,74              | 3,022   | süß, kunststoffartig                          |
| Dichtmasse-Acryl                      | Acryl            | 5       | 0       | 91               | < 0,01            | 0,000   | holzlig, süß                                  |
| Zementgebundene Leichtbeton-Bauplatte | ZLB-P            | 2,9     | 0,4     | 100              | 0,02              | 0,025   | holzlig, holzwerkstoffartig, seifig, chemisch |
| Lehmbauplatte                         | Lehmbau-P        | 5,2     | -0,4    | 60               | 0,08              | 0,150   | süß, staubig, muffig                          |
| Bauplatte Außenwände                  | Zement-P         | 3,4     | 1       | 100              | 0,58              | 1,820   | minzig, anis-, gipsartig                      |
| Dampfbremsfolie                       | Dampfbremse      | 3,1     | 0,2     | 78               | < 0,01            | 0,000   | leicht holzig, würzig                         |
| Baufolie                              | Baufolie         | 1,7     | 0,3     | 100              | < 0,01            | 0,000   | leicht süß, seifig                            |
| Füll-/Feinspachtel                    | Feinspachtel     | 6       | 0       | 86               | 0,13              | 0,111   | sauer, süß, klebstoff-, baustoffartig         |
| Lehmfüll-/flächenspachtel             | Lehmspachtel     | 1,8     | 0,1     | 100              | < 0,01            | 0,000   | -                                             |
| Trockenschüttung                      | Trockenschüttung | 2,8     | 0,3     | 91               | < 0,01            | 0,000   | schwach holzig                                |
| Lehm-Holz-Trockenschüttung            | Lehmschüttung    | 5       | -0,4    | 78               | 0,06              | 0,058   | kunststoffartig, muffig                       |
| Armierungsgitter                      | Armierung        | k.D.    | k.D.    | k.D.             | k.D.              | k.D.    | k.D.                                          |
| UW-Rahmenprofil                       | Rahmenprofil-1   | 3,4     | 0,7     | 100              | < 0,01            | 0,000   | -                                             |

k.D.: Keine Daten vorhanden

### 5.6.1.1 Einzelmaterialien – Empfundene Intensität

**Abbildung 57** und **Abbildung 58** zeigen die empfundenen Intensitäten (EI) der Einzelmaterialien nach einer Versuchsdauer von 7 und 28 Tagen.

**Abbildung 57: Empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

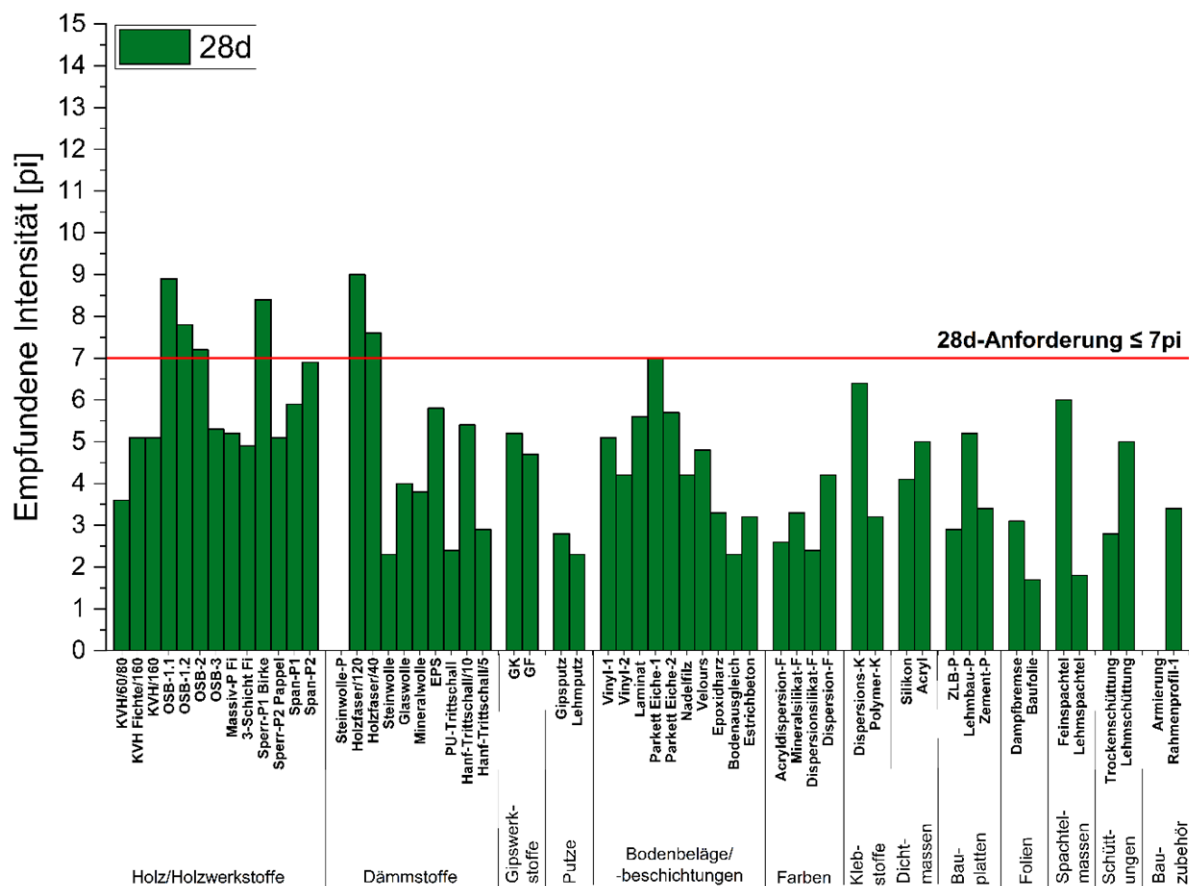
Ein Großteil der untersuchten Einzelmaterialien lag nach einer Prüfdauer von 7 Tagen in einem Intensitätsbereich von „kaum wahrnehmbar“ (0 – 1 pi) über „sehr schwach“ (2 – 3 pi) bis „schwach wahrnehmbar“ (4 – 5 pi). 15 der untersuchten Einzelmaterialien waren deutliche (6 – 7 pi) bis sehr starke (10 – 12 pi) Intensitätsquellen. Die Materialien OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2, OSB-3, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120, Holzfaser/40 und Dispersions-K lagen oberhalb der 7 pi-Anforderungen an Tag 7.

Im Gegensatz dazu lagen nach einer Versuchsdauer von 28 Tagen (**Abbildung 58**) nur noch 10 Materialien in einem deutlich bis starken Intensitätsbereich. Davon haben fünf holzbasierte Werkstoffe (Holz und Holzwerkstoffe: Sperr-P1 Birke, OSB-1.1, OSB-1.2; Dämmstoffe: Holzfaser/120, Holzfaser/40) die AgBB-Anforderungen von 7 pi nach einer Prüfdauer von 28 Tagen nicht erfüllt.

Ursächlich für die intensiven Geruchsquellen sind die geruchsrelevanten und bereits teilweise in Spurenkonzentration wahrnehmbaren Substanzgruppen der Carbonsäuren, der (un-)gesättigten Aldehyde und der Terpene. Bezüglich der holzbasierten Dämmstoffe (Holzfaser/120, Holzfaser/40) wurde ein Substanzspektrum ähnlich zu denen der Holz- und Holzwerkstoffprodukte identifiziert, mit Ausnahme der hohen Essigsäurekonzentrationen (**Abschnitt 4.3.1**) sowie der

bereits in Spuren intensiv wahrnehmbaren Substanz Methylpyrazin. Essigsäure wurde aus beiden holzbasierten Dämmstoffen in ansteigenden sehr hohen Konzentrationen freigesetzt (**Ab-schnitt 4.3.1**). Methylpyrazin wurde ausschließlich in den Materialien Holzfaser/120 und Holzfaser/40 in einem geringen Konzentrationsbereich ( $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) nachgewiesen. Darüber hinaus erfüllten die Proben Sperr-P1 Birke, OSB-1.1, OSB-1.2, Holzfaser/120 und Holzfaser/40 auch nicht die Anforderungen an den TVOC- und an den R-Wert des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.

**Abbildung 58: Empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Ta-gen.**

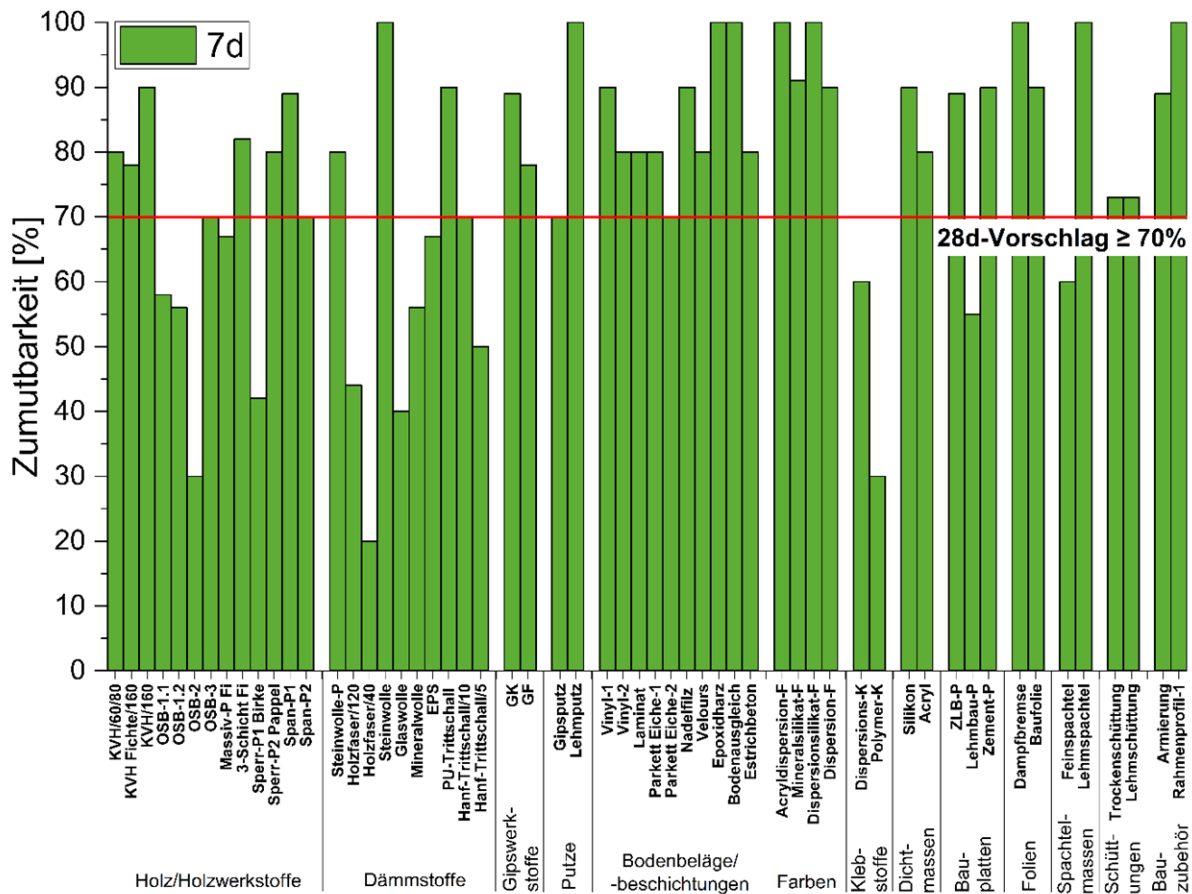


[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 5.6.1.2 Einzelmaterien – Zumutbarkeit

In **Abbildung 59** und **Abbildung 60** sind die ermittelten Zumutbarkeiten der Einzelmaterien nach 7 und 28 Tagen Versuchsdauer aufgeführt.

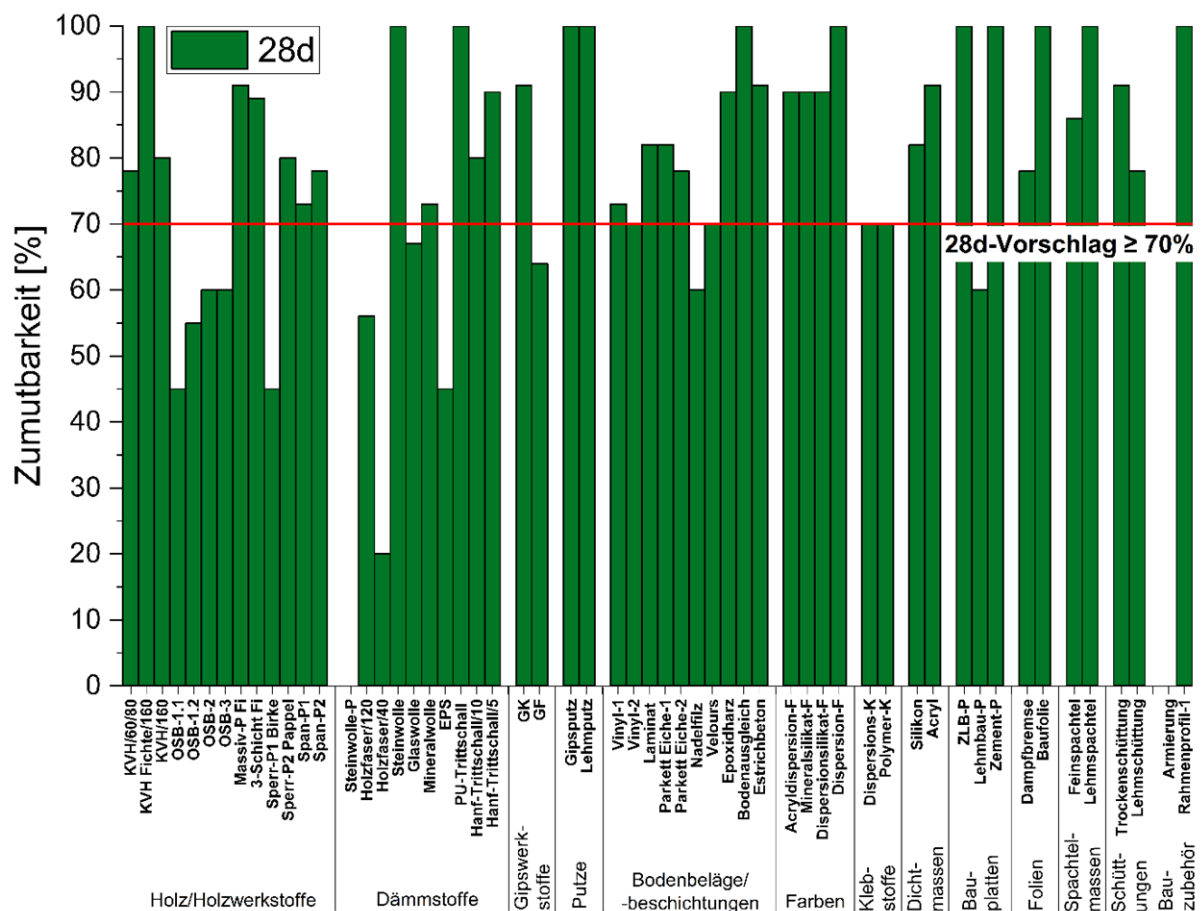
**Abbildung 59: Zumutbarkeit der Einzelmaterien nach einer Prüfdauer 7 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Insgesamt wurden nach einer Prüfdauer von 7 Tagen 15 Materialien sowie nach einer Prüfdauer von 28 Tagen 12 Materialien als unzumutbar ( $< 70\%$ ) wahrgenommen. Davon wurden neun Bauprodukte (OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120, Holzfaser/40, Glaswolle, EPS, Lehmbau-P) über die gesamte Prüfdauer als unzumutbar bewertet. Darunter nahmen die holzbasierten Werkstoffe (OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120, Holzfaser/40) mit einer Anzahl von sechs Materialien den Hauptanteil der als nicht zumutbar empfundenen Produkte ein. Die beiden Klebstoffe und der Feinspachtel wurden nur nach 7 Tagen als unzumutbar empfunden. Die Gipsfaser (GF) und der Nadelfilz lagen nach 7 Tagen im zumutbaren Wahrnehmungsbereich. Allerdings sank die Akzeptanz der beiden Proben nach einer Prüfdauer von 28 Tagen unterhalb der vorgeschlagenen Anforderung von  $70\%$ .

Abbildung 60: Zumutbarkeit der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer 28 Tagen.



[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 5.6.1.3 Einzelmaterialien - Gegenüberstellung der sensorischen Parameter empfundene Intensität, hedonische Wirkung und Zumutbarkeit

Im aktuellen AgBB-Bewertungsschema ist der Parameter der EI als optionale Anforderung nach einer Prüfdauer von 28 Tagen aufgeführt. Um abschätzen zu können, ob die EI als alleiniger Parameter für die Geruchsbewertung eines Produkts ausreichend ist, wurden nachfolgend die Ergebnisse der Einzelmaterialien dahingehend untersucht, ob Proben mit hohen EIs tendenziell als unangenehm oder unzumutbar bewertet wurden bzw. unzumutbare Materialien tendenziell als unangenehm empfunden wurden und umgekehrt.

Eine Gegenüberstellung der hedonischen Wirkung und der empfundenen Intensität (EI) nach 7 und 28 Tagen zeigen die **Abbildung 61** und **Abbildung 62**.

**Abbildung 61: Hedonische Wirkung und empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen.**



**Holz/Holzwerkstoffe**

- 1 KVH/60/80
- 2 KVH Fichte/160
- 3 KVH/160
- 4 OSB-1.1
- 5 OSB-1.2
- 6 OSB-2
- 7 OSB-3
- 8 Massiv-P Fi
- 9 3-Schicht Fi
- 10 Sperr-P1 Birke
- 11 Sperr-P2 Pappel
- 12 Span-P1
- 13 Span-P2

**Dämmstoffe**

- 15 Steinwoll-P
- 16 Holzfaser/120
- 17 Holzfaser/40
- 18 Steinwolle
- 19 Glaswolle
- 20 Mineralwolle
- 21 EPS
- 22 PU-Trittschall
- 23 Hanf-Trittschall/10
- 24 Hanf-Trittschall/5
- Gipswerkstoffe**
- 26 GK
- 27 GF

**Putze**

- 29 Gipsputz
- 30 Lehmputz
- Bodenbeläge**
- 32 Vinyl-1
- 33 Vinyl-2
- 34 Laminat
- 35 Parkett Eiche-1
- 36 Parkett Eiche-2
- 37 Nadelfilz
- 38 Velours
- 39 Epoxidharz
- 40 Bodenausgleich
- 41 Estrichbeton

**Farben**

- 43 Acryldispersion-F
- 44 Mineralsilikat-F
- 45 Dispersionsilikat-F
- 46 Dispersion-F
- Klebstoffe**
- 48 Dispersions-K
- 49 Polymer-K
- Dichtmassen**
- 51 Silikon
- 52 Acryl
- Bauplatten**
- 54 ZLB-P
- 55 Lehm bau-P

**56 Zement-P**

- Folien**
- 58 Dampfbremse
  - 59 Baufolie
  - Spachtelmassen**
  - 61 Feinspachtel
  - 62 Lehm spachtel
  - Schüttungen**
  - 64 Trockenschüttung
  - 65 Lehmschüttung
  - Bauzubehör**
  - 67 Armierung
  - 68 Rahmenprofil-1

[Quelle: Fraunhofer WKI]

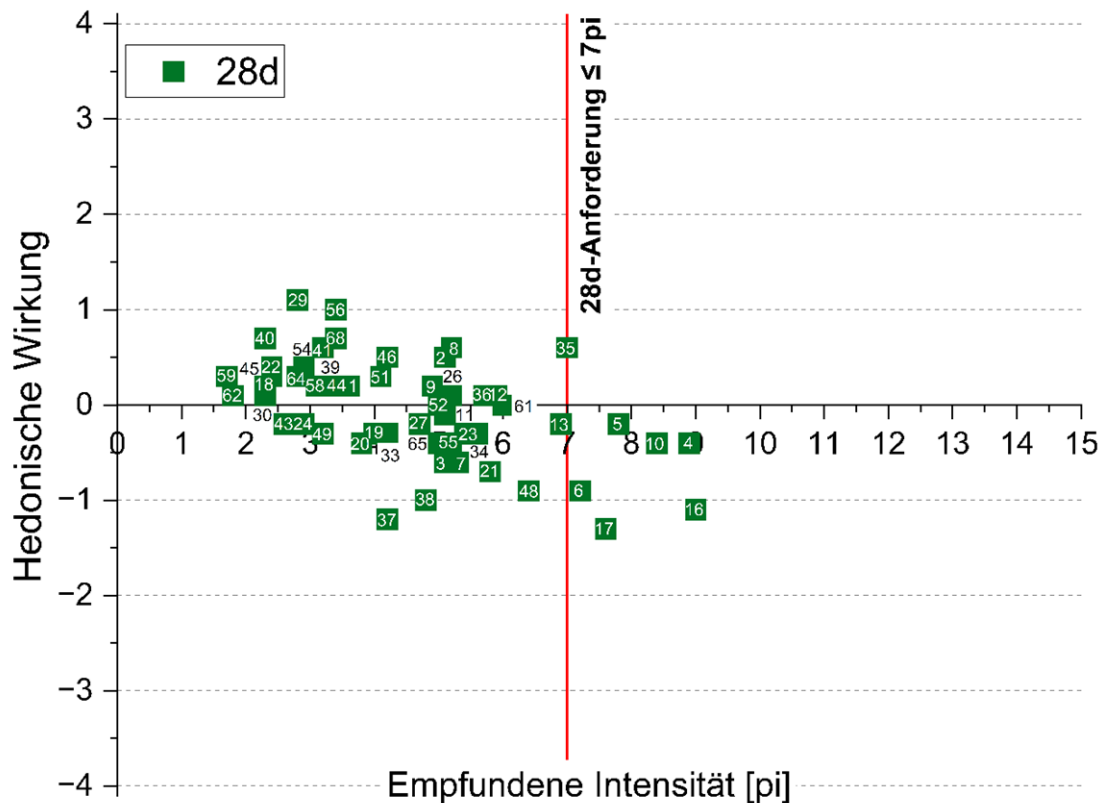
Die Ergebnisse zeigen, dass die hedonische Wirkung tendenziell mit steigender empfundener Intensität sank. Proben, wie die holzbasierten Materialien (OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2, OSB-3, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120, Holzfaser/40) sowie der Dispersions-Klebstoff (Dispersion-K), die deutlich bis stark wahrgenommen wurden, lagen im hedonisch unangenehmen Skalenbereich nach einer Testdauer von 7 Tagen. Gleiches galt für die Bauprodukte OSB-1.1, OSB-1.2, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120 und Holzfaser/40 nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Auch diese Materialien wurden als deutliche bis starke Geruchsquellen mit unangenehmer Note wahrgenommen. Mit Ausnahme des Dispersions-Klebstoffs (Dispersion-K) waren dafür die typisch für

holzbaasierte Bauprodukte freigesetzten Substanzgruppen der (un-)gesättigten Aldehyde, Carbonsäuren und Terpene sehr wahrscheinlich verantwortlich. Bezüglich des deutlich wahrnehmbaren Dispersions-Klebstoffs könnten die geruchsintensiven Komponenten Acrylsäure und Butylacrylat sowie einige Terpene ursächlich gewesen sein.

Ausnahmen waren drei Dämmstoffe (Glaswolle, Mineralwolle, EPS), ein Bodenbelag (Nadelfilz) sowie ein Klebstoff (Polymer-k) mit niedrigem EI ( $\leq 7\text{pi}$ ), aber trotzdem unangenehmer hedonischer Wirkung ( $\leq -1,0$ ) nach einer Prüfdauer von 7 Tagen. Gleiches galt nach einer Versuchsdauer von 28 Tagen für zwei Bodenbeläge (Nadelfilz, Velours). Welche Substanzen für die unangenehmen Geruchseigenschaften der Dämmstoffe Glaswolle und Mineralwolle verantwortlich waren, konnte im Vorhaben nicht geklärt werden, da beide Materialien lediglich geringe Mengen an VOCs freisetzen. Eine Erklärung für den unangenehmen Geruch der Materialien könnte die in Spuren detektierte Verbindung Salicylaldehyd sein. Salicylaldehyd hat ein hohes Geruchspotential, das mit einem muffig, zimt-, bittermandelartigen Geruchscharakter beschrieben wird (Grimm, 2024). Eine Zuordnung der Substanz zu einer Quelle war nicht möglich, zumal aufgrund des Einkaufs der Produkte bei Baustoffhändlern und Baumärkten keine detaillierten Informationen über Rezepturen vorlagen. Im Hinblick auf den Dämmstoff EPS und die Bodenbeläge Nadelfilz und Velours waren sehr wahrscheinlich die in niedrigen, bis geringen Konzentrationen nachgewiesenen Komponenten Styrol, Methylstyrol (EPS) und 4-Phenylcyclohexen (Nadelfilz, Velours) für den unangenehmen Geruchscharakter verantwortlich. Styrol, Methylstyrol und 4-Phenylcyclohexen sind Verbindungen, die bereits in Spurenkonzentrationen eine Geruchsempfindung an den menschlichen Geruchsrezeptoren bewirken (Van Gemert, 2011).

Im Allgemeinen ist festzuhalten, dass Einzelmaterialeien, die in diesem Vorhaben mit einer deutlich, bis starken Intensität bewertet wurden, überwiegend als unangenehm wahrgenommen wurden und umgekehrt. Demnach korrelieren die Parameter hedonische Wirkung und empfundene Intensität miteinander. Das Verhältnis hedonische Wirkung zur EI wurde ebenfalls in vorangegangenen Forschungsarbeiten beobachtet (UBA-Texte 35/2011; Panašková, 2013; Salthammer et al., 2016).

**Abbildung 62: Hedonische Wirkung und empfundene Intensität (EI) der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**



**Holz/Holzwerkstoffe**

- 1 KVH/60/80
- 2 KVH Fichte/160
- 3 KVH/160
- 4 OSB-1.1
- 5 OSB-1.2
- 6 OSB-2
- 7 OSB-3
- 8 Massiv-P Fi
- 9 3-Schicht Fi
- 10 Sperr-P1 Birke
- 11 Sperr-P2 Pappel
- 12 Span-P1
- 13 Span-P2

**Dämmstoffe**

- 15 Steinwooll-P
- 16 Holzfaser/120
- 17 Holzfaser/40
- 18 Steinwolle
- 19 Glaswolle
- 20 Mineralwolle
- 21 EPS
- 22 PU-Trittschall
- 23 Hanf-Trittschall/10
- 24 Hanf-Trittschall/5
- Gipswerkstoffe**
- 26 GK
- 27 GF

**Putze**

- 29 Gipsputz
- 30 Lehmputz
- Bodenbeläge**
- 32 Vinyl-1
- 33 Vinyl-2
- 34 Laminat
- 35 Parkett Eiche-1
- 36 Parkett Eiche-2
- 37 Nadelfilz
- 38 Velours
- 39 Epoxidharz
- 40 Bodenausgleich
- 41 Estrichbeton

**Farben**

- 43 Acryldispersion-F
- 44 Mineralsilikat-F
- 45 Dispersionsilikat-F
- 46 Dispersion-F
- Klebstoffe**
- 48 Dispersions-K
- 49 Polymer-K
- Dichtmassen**
- 51 Silikon
- 52 Acryl
- Bauplatten**
- 54 ZLB-P
- 55 Lehm-bau-P

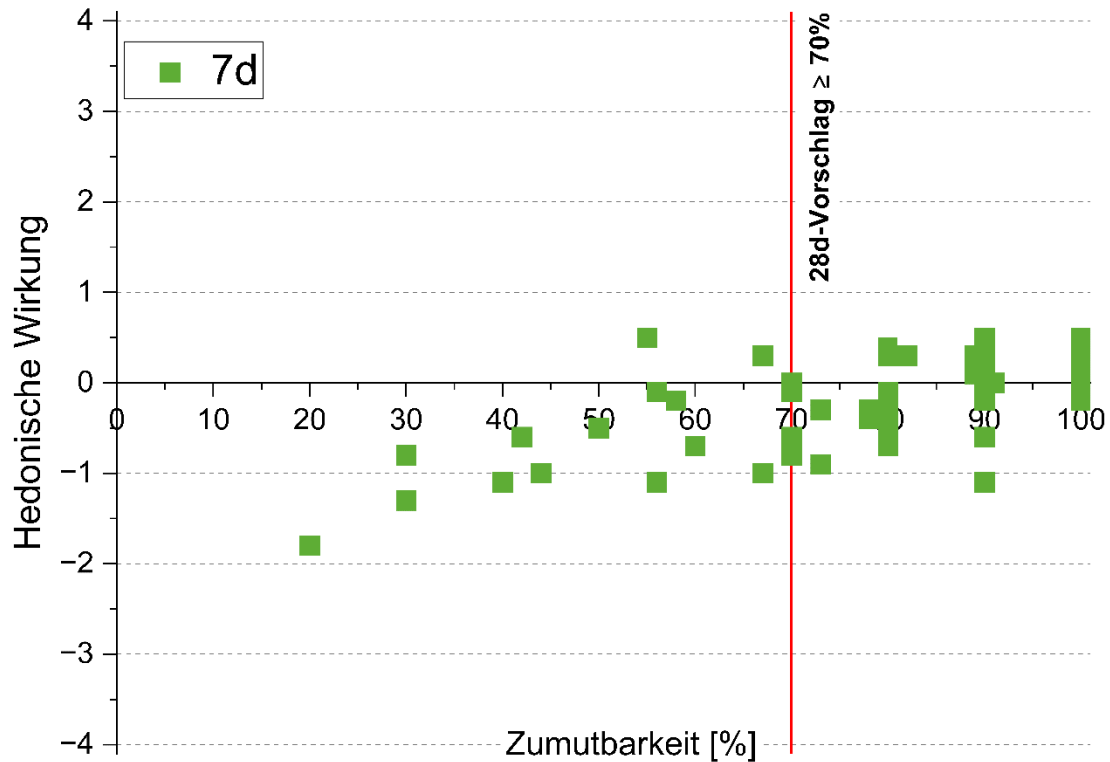
**56 Zement-P**

- Folien**
- 58 Dampfbremse
  - 59 Baufolie
  - Spachtelmassen**
  - 61 Feinspachtel
  - 62 Lehm-spachtel
  - Schüttungen**
  - 64 Trockenschüttung
  - 65 Lehmschüttung
  - Bauzubehör**
  - 67 Armierung
  - 68 Rahmenprofil-1

[Quelle: Fraunhofer WKI]

In **Abbildung 63** und **Abbildung 64** ist die hedonische Wirkung über die Zumutbarkeit an Tag 7 und 28 dargestellt.

**Abbildung 63: Hedonische Wirkung und Zumutbarkeit der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen.**

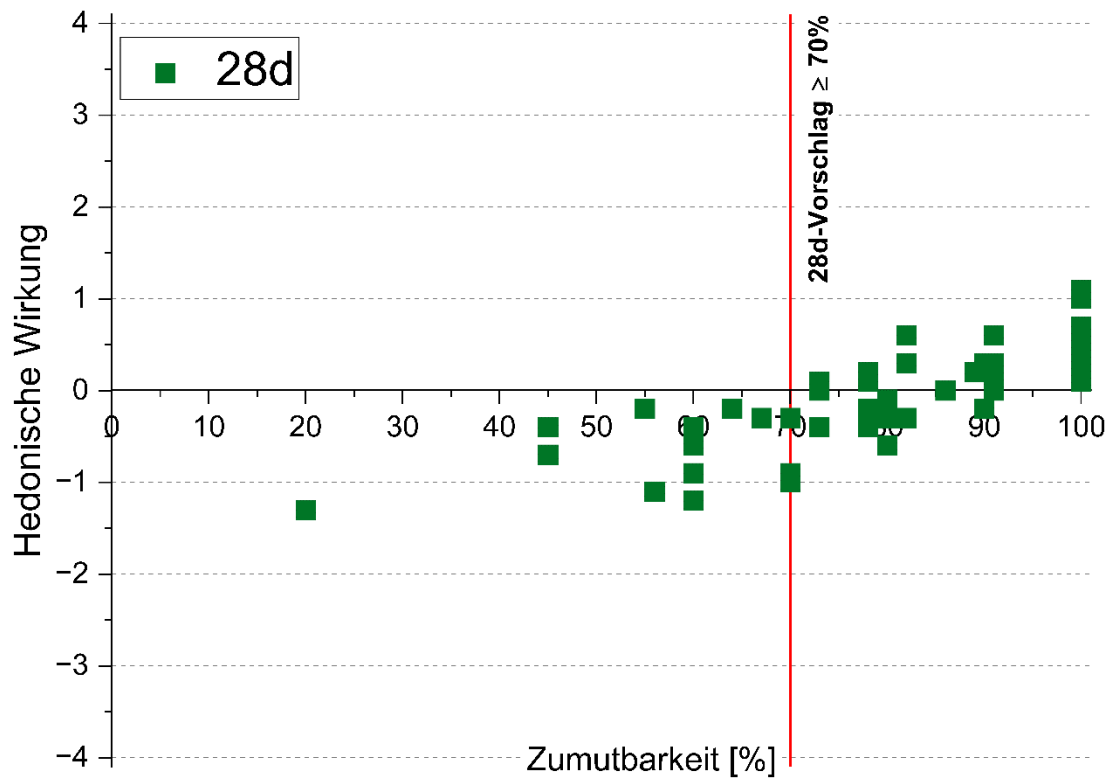


[Quelle: Fraunhofer WKI]

Mit Ausnahme des Bodenbelags Nadelfilz wurden Einzelmaterialien, die als zumutbar bewertet wurden, als hedonisch positiv bis neutral ( $< -1$ ) empfunden. Lediglich die Probe Nadelfilz wurde nach einer Prüfzeit von 7 Tagen als hedonisch unangenehm ( $-1,2$ ) wahrgenommen, obwohl die Zumutbarkeit bei 90% lag (siehe **Abbildung 63**).

Auf Basis der erhobenen Daten wurde das Verhältnis der hedonischen Wirkung zur empfundenen Intensität ähnlich zum Verhältnis der hedonischen Wirkung gegenüber der Zumutbarkeit bewertet (siehe **Abbildung 63** und **Abbildung 64**). Daraus resultiert, dass Einzelmaterialien, die mit einer Zumutbarkeit von  $\geq 70\%$  bewertet wurden, überwiegend im „angenehmen“ bis „weder angenehmen noch unangenehmen“ hedonischen Wirkungsbereich lagen und umgekehrt.

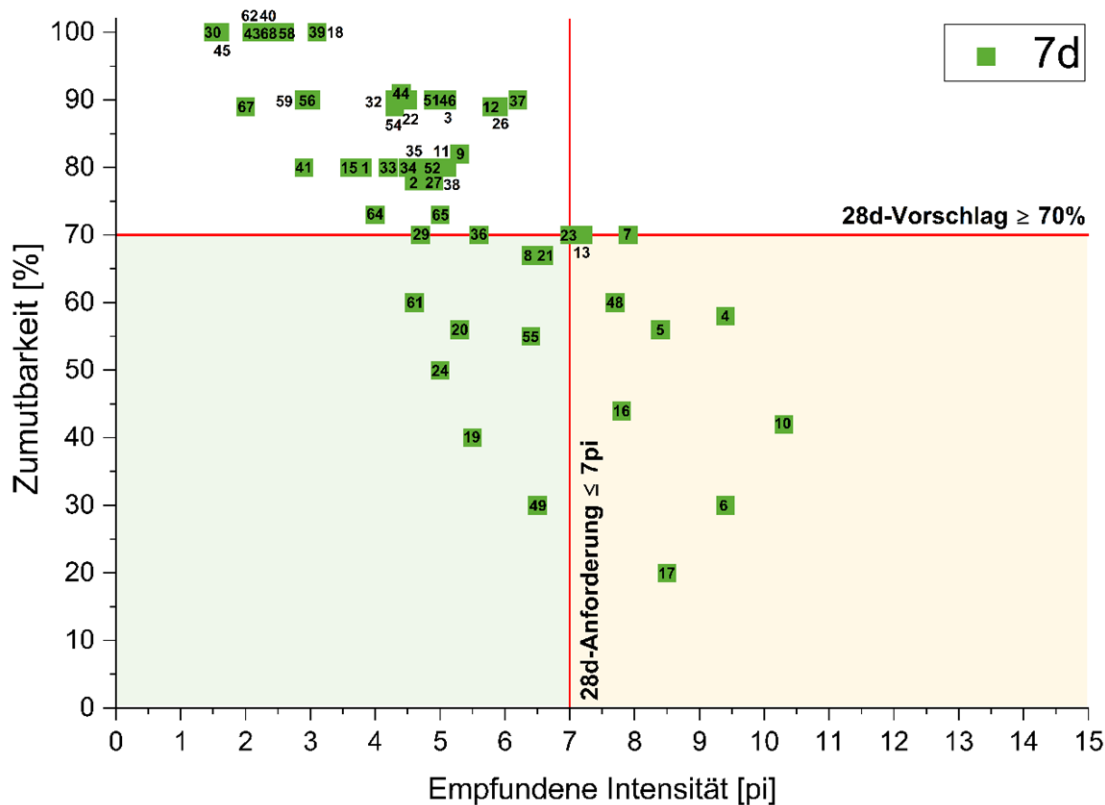
**Abbildung 64: Hedonische Wirkung und Zumutbarkeit der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 65 und Abbildung 66** zeigen die Gegenüberstellung der Zumutbarkeit und der empfundenen Intensität (EI) nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.

**Abbildung 65: Zumutbarkeit und empfundene Intensität der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 Tagen.**



#### Holz/Holzwerkstoffe

- 1 KVH/60/80
- 2 KVH Fichte/160
- 3 KVH/160
- 4 OSB-1.1
- 5 OSB-1.2
- 6 OSB-2
- 7 OSB-3
- 8 Massiv-P Fi
- 9 3-Schicht Fi
- 10 Sperr-P1 Birke
- 11 Sperr-P2 Pappel
- 12 Span-P1
- 13 Span-P2

#### Dämmstoffe

- 15 Steinwoll-P
- 16 Holzfaser/120
- 17 Holzfaser/40
- 18 Steinwolle
- 19 Glaswolle
- 20 Mineralwolle
- 21 EPS
- 22 PU-Trittschall
- 23 Hanf-Trittschall/10
- 24 Hanf-Trittschall/5
- Gipswerkstoffe**
- 26 GK
- 27 GF

#### Putze

- 29 Gipsputz
- 30 Lehmputz
- Bodenbeläge**
- 32 Vinyl-1
- 33 Vinyl-2
- 34 Laminat
- 35 Parkett Eiche-1
- 36 Parkett Eiche-2
- 37 Nadelfilz
- 38 Velours
- 39 Epoxidharz
- 40 Bodenausgleich
- 41 Estrichbeton

#### Farben

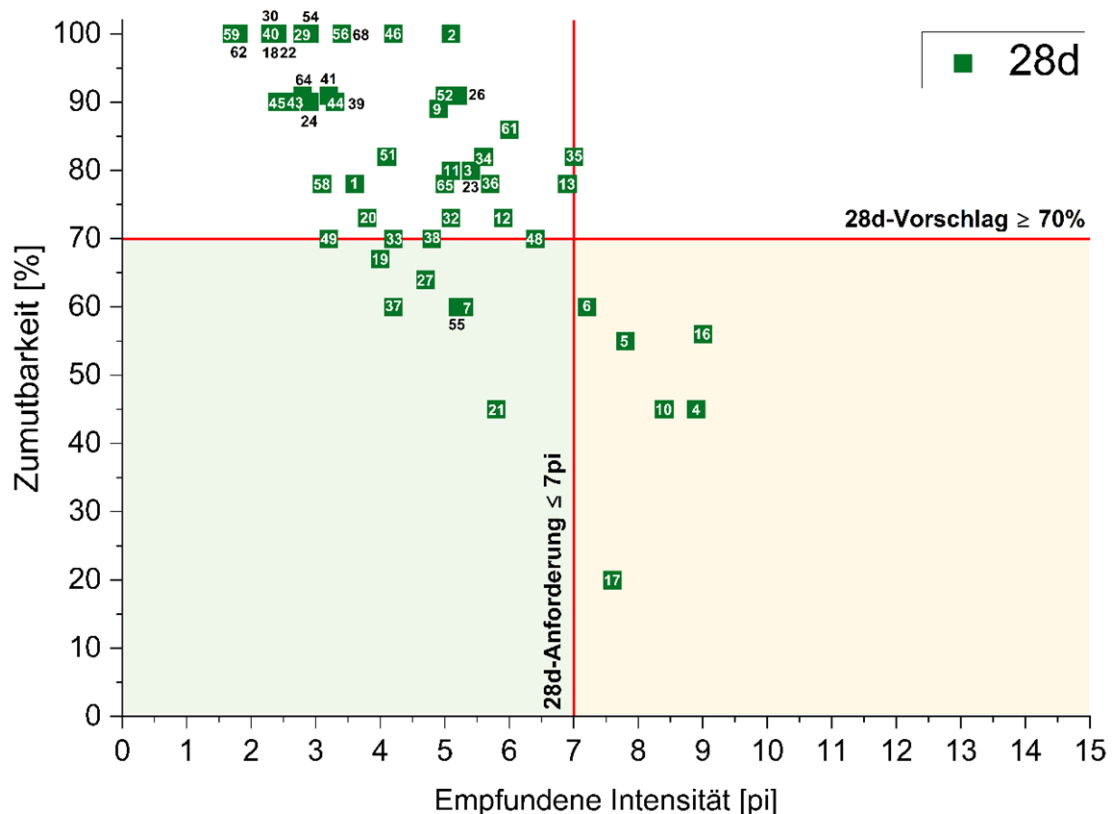
- 43 Acryldispersion-F
- 44 Mineralsilikat-F
- 45 Dispersionsilikat-F
- 46 Dispersion-F
- Klebstoffe**
- 48 Dispersions-K
- 49 Polymer-K
- Dichtmassen**
- 51 Silikon
- 52 Acryl
- Bauplatten**
- 54 ZLB-P
- 55 Lehmabau-P

#### 56 Zement-P

- Folien**
- 58 Dampfbremse
- 59 Baufolie
- Spachtelmassen**
- 61 Feinspachtel
- 62 Lehmispachtel
- Schüttungen**
- 64 Trockenschüttung
- 65 Lehmschüttung
- Baubehör**
- 67 Armierung
- 68 Rahmenprofil-1

[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 66: Zumutbarkeit und empfundene Intensität der Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**



#### Holz/Holzwerkstoffe

- 1 KVH/60/80
- 2 KVH Fichte/160
- 3 KVH/160
- 4 OSB-1.1
- 5 OSB-1.2
- 6 OSB-2
- 7 OSB-3
- 8 Massiv-P Fi
- 9 3-Schicht Fi
- 10 Sperr-P1 Birke
- 11 Sperr-P2 Pappel
- 12 Span-P1
- 13 Span-P2

#### Dämmstoffe

- 15 Steinwoll-P
- 16 Holzfaser/120
- 17 Holzfaser/40
- 18 Steinwolle
- 19 Glaswolle
- 20 Mineralwolle
- 21 EPS
- 22 PU-Trittschall
- 23 Hanf-Trittschall/10
- 24 Hanf-Trittschall/5
- Gipswerkstoffe**
- 26 GK
- 27 GF

#### Putze

- 29 Gipsputz
- 30 Lehmputz

#### Bodenbeläge

- 32 Vinyl-1
- 33 Vinyl-2
- 34 Laminat
- 35 Parkett Eiche-1
- 36 Parkett Eiche-2
- 37 Nadelfilz
- 38 Velours
- 39 Epoxidharz
- 40 Bodenausgleich
- 41 Estrichbeton

#### Farben

- 43 Acryldispersion-F
- 44 Mineralsilikat-F
- 45 Dispersionsilikat-F
- 46 Dispersion-F

#### Klebstoffe

- 48 Dispersions-K
- 49 Polymer-K

#### Dichtmassen

- 51 Silikon

#### Bauplatten

- 52 Acryl
- 54 ZLB-P
- 55 Lehm bau-P

#### 56 Zement-P

#### Folien

- 58 Dampfbremse
- 59 Baufolie

#### Spachtelmassen

- 61 Feinspachtel
- 62 Lehm spachtel

#### Schüttungen

- 64 Trockenschüttung
- 65 Lehmschüttung

#### Bauzubehör

- 67 Armierung
- 68 Rahmenprofil-1

[Quelle: Fraunhofer WKI]

Vergleicht man die Bewertungsparameter Zumutbarkeit und EI, war zu beobachten, dass sechs Einzelmaterialien (OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120 und Holzfaser/40) mit empfundenen Intensitäten oberhalb von 7 pi als unzumutbare Geruchsquellen (< 70%) nach 7 und 28 Prüfdauer bewertet wurden. Gleiches galt für den Dispersions-Klebstoff (Dispersions-K) nach einer Prüfdauer von 7 Tagen.

Dagegen lag nach Tag 7 und 28 die Zumutbarkeit von zwei Dämmstoffen (Glaswolle, EPS) und von der Lehm bau-Platte (Lehm bau-P) im unzumutbaren Bereich, obwohl die EI unterhalb von 7 pi lag. Analog dazu verhielten sich nach einer Prüfdauer von 7 Tagen die Proben Massiv-P Fi, Mineralwolle, Hanf-Trittschall/5, Polymer-K und Feinspachtel. Selbiges wurde nach einer Prüfdauer von 28 Tagen bei den Produkten OSB-3, GF (Gipsfaser) und Nadelfilz festgestellt. Ursache

für die geringe Zumutbarkeit waren vermutlich die überwiegend unangenehmen Geruchsartbeschreibungen durch das Probandenpanel, wie sauer, käsig, künstlich, muffig, lederartig, gummiartig, teppichartig, kunststoffartig.

Wie bereits bei der Gegenüberstellung der hedonischen Wirkung und der EI (siehe **Abbildung 61** und **Abbildung 62**) beschrieben, waren für den unangenehmen Geruchscharakter des Dämmstoffs EPS und der Bodenbeläge Nadelfilz und Velours sehr wahrscheinlich die in niedrigen bis geringen Konzentrationen nachgewiesenen Komponenten Styrol, Methylstyrol (EPS) und 4-Phenylcyclohexen (Nadelfilz, Velours) verantwortlich. Styrol, Methylstyrol und 4-Phenylcyclohexen sind Verbindungen, die bereits in Spurenkonzentrationen eine Geruchsempfindung an den menschlichen Geruchsrezeptoren verursachen (Van Gemert, 2011). Welche Substanzen für die unangenehmen Geruchseigenschaften der Glaswolle- und Mineralwolle-Dämmungen verantwortlich waren, wurde bereits oben im Text beschrieben.

Die als gering bewertete Zumutbarkeit der Lehmbau-Platte (Lehmbau-P) resultierte sehr wahrscheinlich aus den in geringen Konzentrationen freigesetzten Verbindungen trans-2-Butenal, 2-Methyl-4-pentenal, 2-Ethylacrolein und 2-Butylacrolein. Diese geruchsaktiven Substanzen können aufgrund ihres geruchsintensiven, stechenden und unangenehmen Geruchspotentials bereits in Spurenkonzentrationen als unzumutbare Geruchsquellen wahrgenommen werden.

Der als sauer assoziierte Geruchscharakter des Feinspachtels nach einer Prüfdauer von 7 Tagen führte sehr wahrscheinlich zu einer geringen Zumutbarkeit der Probe. Ursächlich hierfür war vermutlich die von dem Feinspachtel freigesetzte Essigsäure.

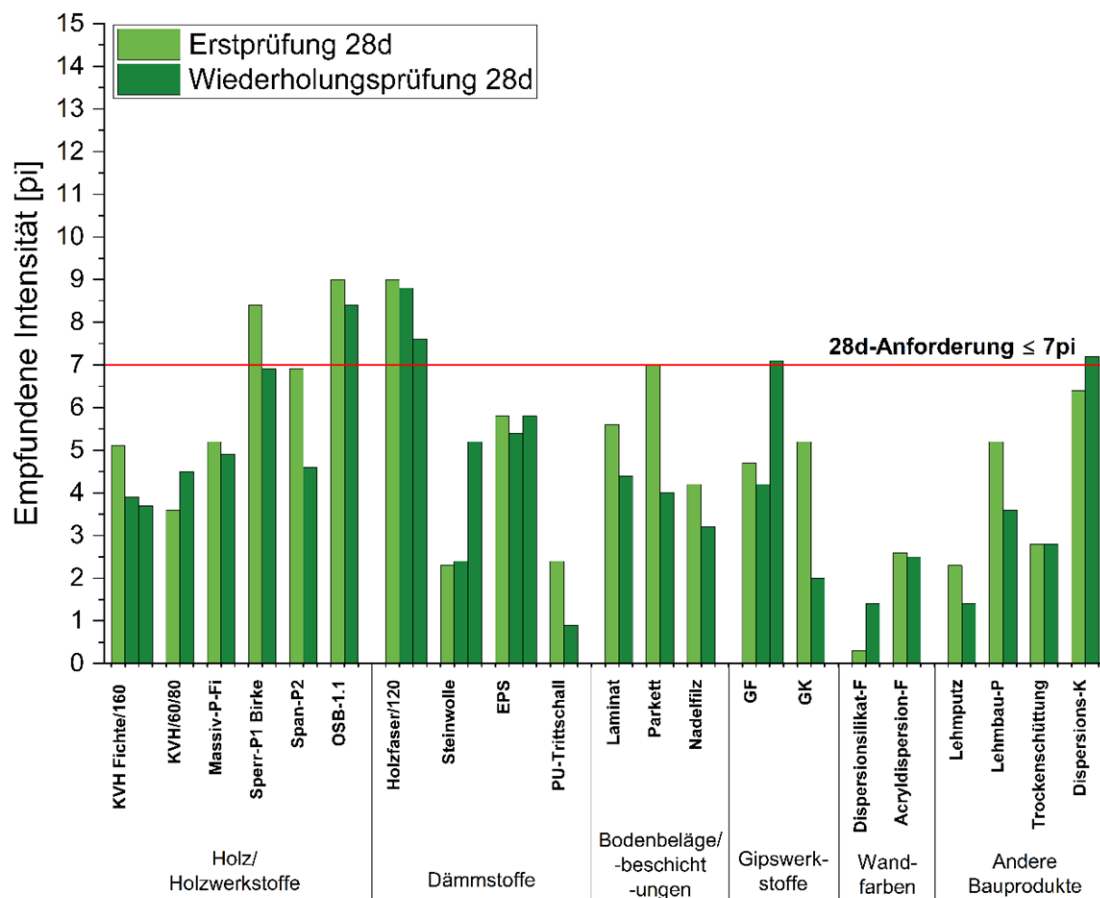
Alle anderen untersuchten Proben lagen aufgrund der geringen EI erwartungsgemäß in einem zumutbaren Bereich oberhalb von 70%.

Insgesamt wurden 56 Einzelmateriale sensorisch untersucht. Davon wurden nach einer Prüfdauer von 7 Tagen acht Materialien als unzumutbar bewertet, obwohl die EI bei  $< 7$  pi lag. Nach einer Prüfdauer von 28 Tagen lagen noch sechs Einzelmateriale oberhalb der vom AgBB vorgeschlagenen Anforderung für die Zumutbarkeit von  $\geq 70\%$  trotz einer EI von  $< 7$  pi. Demnach wurden Proben, die mit einer geringen, bis moderaten empfundenen Intensität wahrgenommen wurden, nicht zwingend als zumutbar bewertet, sondern führten auch zur Ablehnung eines Produkts.

#### 5.6.1.4 Einzelmaterialien, Wiederholungsprüfung - Empfundene Intensität

**Abbildung 67** zeigt die EI einiger Bauprodukte nach einer Testdauer von 28 Tagen, die in dem Forschungsvorhaben einer Erst- und Wiederholungsprüfung unterzogen wurden. Da im Rahmen der chemischen Emissionsprüfungen werkstoffgruppenabhängig starke Unterschiede hinsichtlich des Spektrums und der Konzentrationen der freigesetzten Substanzen bei Wiederholungsmessungen neu angekaufter Materialien detektiert wurden (siehe **Abschnitt 4.2.1.2**), wurden alle für den Bau der Modellräume neu zugekauften Werkstoffe nochmals über die gesamte Prüfzeit von 28 Tagen auf chemische und sensorische Emissionen untersucht.

**Abbildung 67: Vergleich der empfundenen Intensität (EI) der Einzelmaterialien (Erst- und Wiederholungsprüfung) nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Insgesamt wurde bei mehreren Materialien (Sperr-P1 Birke, GF, Dispersion-K, Steinwolle, GK, Span-P2, Parkett) die EI unterschiedlich bei der Erst- und Wiederholungsprüfung bewertet. Die Sperrholzplatte Birke (Sperr-P1 Birke) wurde durch die Testpersonen bei der Erstprüfung als starke Geruchsquelle mit einer EI von 8,4 pi wahrgenommen. Die Probe lag somit oberhalb der pi-Anforderung von 7. Im Vergleich dazu wurde das neu angekaufte Material (Wiederholungsprüfung) nur mit einer EI von 6,9 pi bewertet. Somit hätte das Produkt im Rahmen der Erstprüfung die Anforderungen des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021) nicht bestanden, im Rahmen der Wiederholungsprüfung wurde die 7 pi-Anforderung allerdings erfüllt ( $< 7$  pi). Mögliche Ursachen waren wahrscheinlich die bei der Erstprüfung zusätzlich nachgewiesenen ungesättigten Aldehyde und Ketone sowie die geruchsintensive Komponente Methylpyrazin.

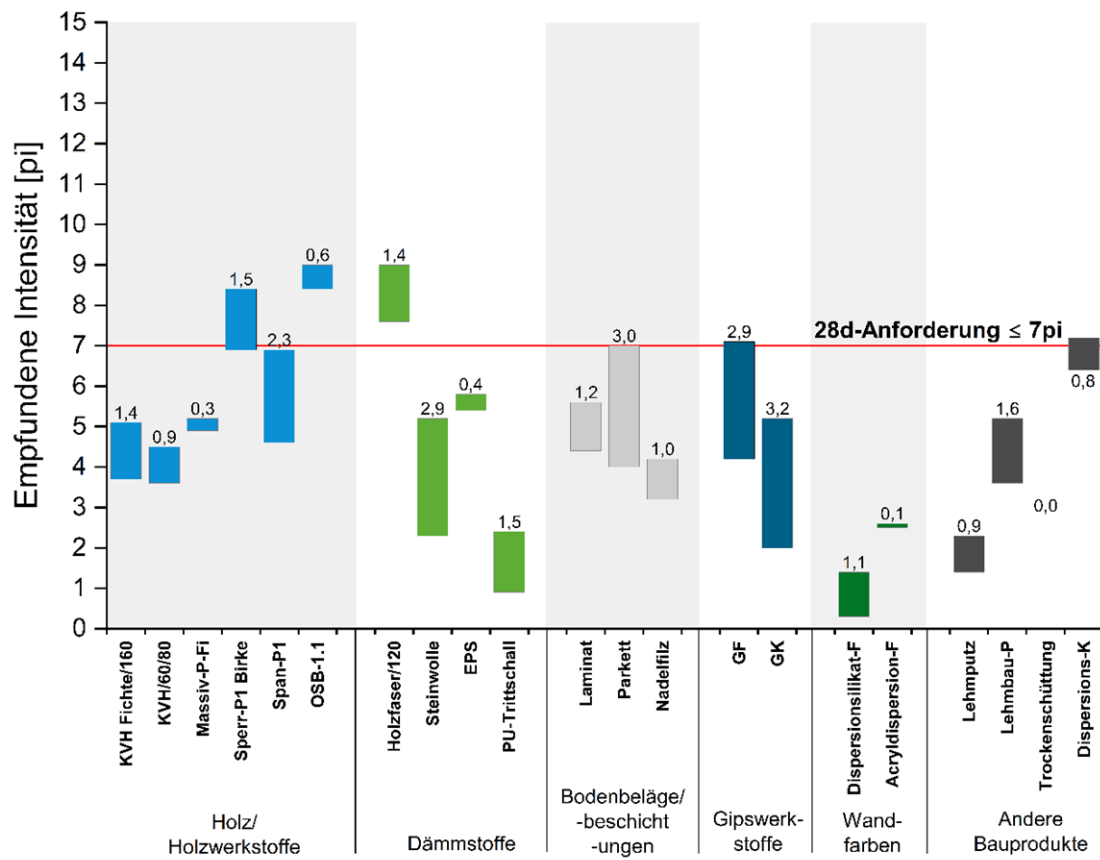
Ähnliche Unterschiede ergaben sich hinsichtlich der Gipsfaserplatte (GF) und des Dispersionsklebstoffs (Dispersions-K). Beide Werkstoffe hielten zwar die Anforderung an die EI bei der Erst- und Wiederholungsprüfung ein, allerdings lagen sie nur knapp unterhalb der Anforderung im Rahmen der Wiederholungsprüfung ( $EI > 7$  pi). Im Fall des Dispersionsklebstoffs wurde bei der Wiederholungsprüfung die Substanz Acrylsäure nachgewiesen, die bereits in Spurenkonzentrationen wahrnehmbar ist. Dies könnte ein stärkeres Geruchsempfinden bei den Testpersonen hervorgerufen haben. Demgegenüber wurden zwar bei den Prüfungen der Gipsfaserplatten (GF) kaum Unterschiede im Emissionsprofil detektiert, dafür wurde aber die Geruchswahrnehmung stark unterschiedlich bewertet. Ursächlich für den deutlich wahrnehmbaren Geruch der Gipsfaserplatte (GF) waren höchstwahrscheinlich die stark unangenehm riechenden Verbindungen 1-(2-Aminophenyl)ethan-1-onoxim und Cyclohexylisothiocyanat. Beide Substanzen konnten nicht mittels der für den Nachweis von VOCs in Prüfkammer- und Raumluft eingesetzten Analytik (TD-GC/MS) (siehe **Abschnitt 4.2.4.2**) nachgewiesen werden ( $BG < 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sondern durch Zusatzuntersuchungen mit der nachweisempfindlicheren Methode TD-GC/Q-TOF (Thermodesorption-Gaschromatograph/Quadrupol-time-of-flight-Massenspektrometer). Cyclohexylisothiocyanat und 1-(2-Aminophenyl)ethan-1-onoxim sind Verbindungen, die bereits in Spurenkonzentrationen eine unangenehme Wahrnehmung hervorrufen können, die mit fischig und faulig assoziiert wird. Folglich können beide Verbindungen deutliche bis starke Intensitäten an der menschlichen Nase hervorrufen.

Weiterhin wurden nennenswerte Intensitätsunterschiede bei der Steinwolle-Dämmung (Differenz-Steinwolle: 2,9 pi) und der Gipskartonplatte (Differenz-GK: 3,2 pi) zwischen der Erst- und Wiederholungsprüfung festgestellt. Alle untersuchten Proben beider Werkstoffgruppen (Steinwolle (3 Proben), GK (2 Proben)) waren sehr emissionsarme VOC-Quellen über eine Testdauer von 28 Tagen. Verantwortlich für die unterschiedlichen Geruchseindrücke der Materialien sind sehr wahrscheinlich geruchsintensive Verbindungen, die unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze ( $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) der TD-GC-MS Methode freigesetzt wurden.

In **Abbildung 68** ist die Differenz der EI zwischen der Erst- und Wiederholungsprüfung, unterteilt nach Produktgruppen, dargestellt. Bei 16 von 21 Materialiengruppen, die einer Erst- und Wiederholungsprüfung unterzogen wurden, lagen die Unterschiede in einem moderaten, für Geruchsbewertungen eher üblichen Bereich zwischen 0,0 – 2,0 pi. Demgegenüber gab es fünf Produkte, bei denen nennenswerte pi-Unterschiede zwischen 2,1 – 3,2 pi ermittelt wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass hinsichtlich des Emissionsverhaltens (siehe **Abschnitt 4.2.1.2**) und der sensorischen Parameter eine Reproduzierbarkeit der Messdaten in Abhängigkeit von der Werkstoffgruppe nur eingeschränkt möglich war.

**Abbildung 68: Differenzen ( $\Delta p_i$ ) der empfundenen Intensität (EI) der Einzelmaterialien (Erst- und Wiederholungsprüfung) nach Bauproduktgruppen unterteilt.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 5.6.2 Verbundaufbauten

Die Geruchsbewertung der Verbundaufbauten erfolgte nach 7 und 28 Tagen Prüfdauer. An jedem Bewertungstag wurden die sensorischen Parameter der empfundenen Intensität (EI), der hedonischen Wirkung, der Geruchsart und der Zumutbarkeit bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus der Verbundkonstruktionen sowie die Versuchsparameter der Emissionsprüfungen erfolgt in **Abschnitt 4.1.2 Tabelle 5-6** und **Abschnitt 4.2**.

Eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Einzelmaterialien erfolgte über eine Prüfdauer von 3 Tagen (**Abschnitt 4.2.1.2**) und folglich ohne die nach einem Zeitraum von 7 und 28 Tagen vorgesehenen Geruchsbewertung. Daher werden nachfolgend lediglich die Ergebnisse der sensorischen Prüfung der einzelnen Verbundkonstruktionen dargestellt.

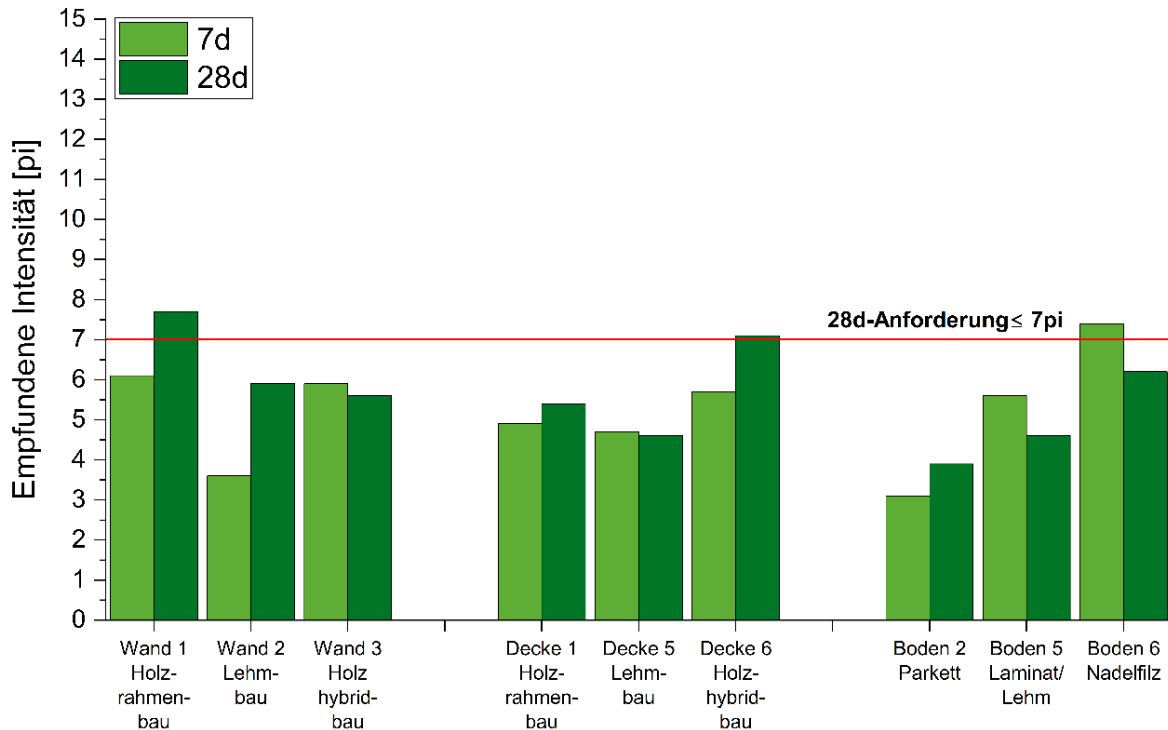
In **Tabelle 26** sind die sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Werte für die Verbundkonstruktionen nach einer Prüfdauer von 28 Tagen aufgeführt.

**Tabelle 26: Emissionsprüfung Verbundkonstruktionen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Übersicht über die sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert.**

| Probe                   | Empfundene Intensität [pi] | Hedonik | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert | Geruchsart                                          |
|-------------------------|----------------------------|---------|------------------|-------------------|---------|-----------------------------------------------------|
| <b>Wandaufbauten</b>    |                            |         |                  |                   |         |                                                     |
| Wand 1- Holzrahmenbau   | <b>7,7</b>                 | -0,8    | <b>30</b>        | 0,77              | 1,190   | holzig, holzwerkstoffartig, muffig, kunststoffartig |
| Wand 2 - Lehm-bau       | 5,9                        | -0,3    | 70               | 0,30              | 0,597   | holzig, holzwerkstoffartig, süß, sauer, künstlich   |
| Wand 3 - Holzhybridbau  | 5,6                        | -1      | <b>50</b>        | 0,57              | 1,039   | muffig                                              |
| <b>Deckenaufbauten</b>  |                            |         |                  |                   |         |                                                     |
| Decke1 - Holzrahmenbau  | 5,4                        | 0,1     | 70               | 0,08              | 0,655   | holzig, kunststoffartig                             |
| Decke 5 - Lehm-bau      | 4,6                        | 0,1     | 90               | 0,17              | 0,373   | holzig/holzwerkstoffartig, muffig                   |
| Decke 6 - Holzhybridbau | 7,1                        | -0,7    | <b>56</b>        | 0,35              | 0,442   | holzig, holzwerkstoffartig, muffig, fischig, käsig  |
| <b>Bodenaufbauten</b>   |                            |         |                  |                   |         |                                                     |
| Boden 2 - Parkett       | 3,9                        | 0,5     | 91               | 0,27              | 0,196   | holzig, holzwerkstoffartig, frisch, teppichartig    |
| Boden 5 - Laminat/Lehm  | 4,6                        | -0,9    | <b>60</b>        | 0,10              | 0,271   | holzig/holzwerkstoffartig, muffig                   |
| Boden 6 - Nadelfilz     | 6,2                        | -1,2    | <b>44</b>        | 0,02              | 0,069   | muffig, holzig, kunststoffartig, würzig             |

**Abbildung 69** zeigt die gemessene empfundene Intensität der Verbundaufbauten nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.

**Abbildung 69: Empfundene Intensität (EI) der verbauten Verbundmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.**

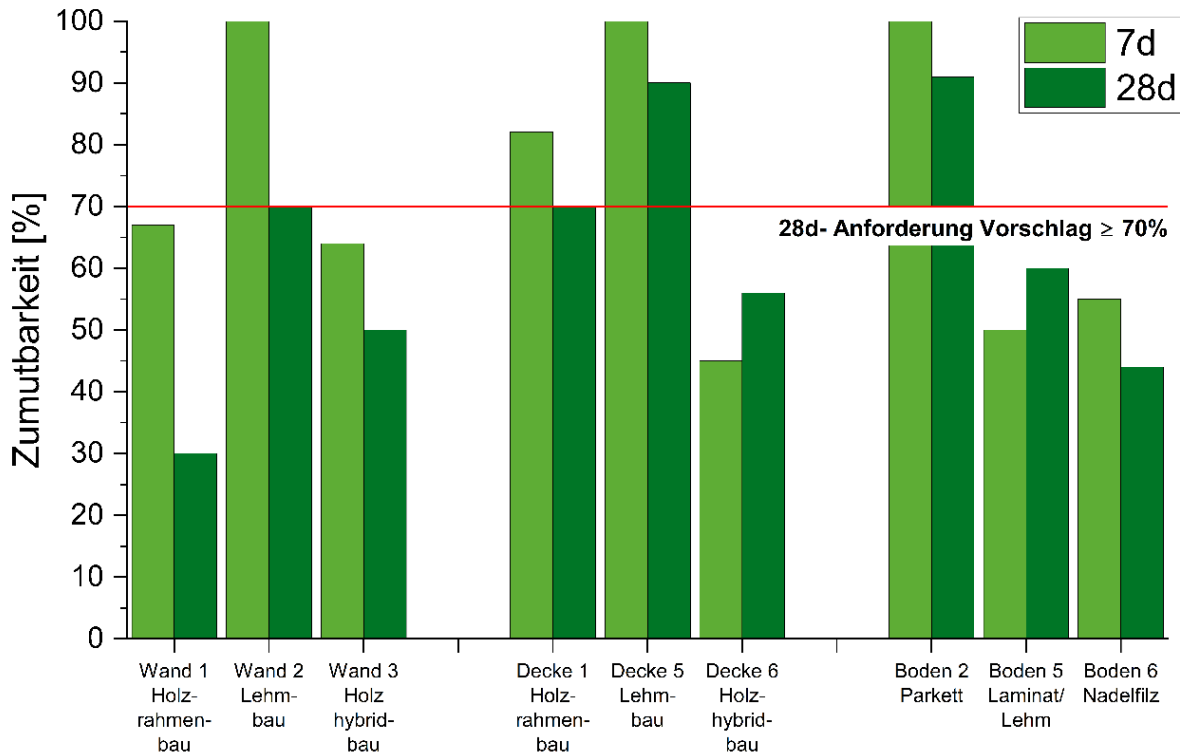


[Quelle: Fraunhofer WKI]

Abgesehen von Wand 1/Holzrahmenbau erfüllten alle Verbundaufbauten die AgBB-Anforderungen von 7 pi nach 7 und 28 Tagen Prüfdauer. Die Probe Wand 1/Holzrahmenbau wurde nach einer Prüfdauer von 28 Tagen als deutlich bis starke Geruchsquelle mit einer EI von 7,7 pi wahrgenommen, obwohl die Intensität nach 7 Tagen (6,0 pi) unterhalb der Anforderung von 7 pi lag. Die Probe war eine moderate VOC-Quelle mit leicht ansteigendem Emissionsverhalten über die gesamte Versuchsdauer. Mögliche Ursachen für den deutlich wahrnehmbaren Geruch könnten u. a. die geruchsaktiven Substanzgruppen der gesättigten Aldehyde, Carbonsäuren, Terpene sowie unbekannte geruchsrelevante Verbindungen ( $< \text{BG: } 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sein.

**Abbildung 70** zeigt die gemessene Zumutbarkeit der Verbundaufbauten nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.

**Abbildung 70: Zumutbarkeit der verbauten Verbundmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die vom AgBB vorgeschlagene Anforderung für die Zumutbarkeit von  $\geq 70\%$  wurde von fünf der insgesamt 12 Verbundaufbauten (Wand 1/Holzrahmenbau, Wand 3/Holzhybridbau, Decke 6/Holzhybridbau, Boden 5/Laminat/Lehm, Boden 6/ Nadelfilz) nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen nicht eingehalten. Im Gegensatz dazu erfüllten alle fünf Proben die VOC-Anforderungen gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021). Die Wandaufbauten Wand 1/Holzrahmenbau und Wand 3/Holzhybridbau sowie der Deckenaufbau Decke 6/Holzhybridbau waren moderate Quellen für VOC. Die beiden als unzumutbar wahrgenommenen Bodenaufbauten (Boden 5/Laminat/Lehm, Boden 6/Nadelfilz) setzten sogar nur geringe Mengen an flüchtigen organischen Verbindungen frei. Während der Emissionsprüfung der fünf Verbundaufbauten wurden einige gesättigte Aldehyde, Carbonsäuren und Terpene nachgewiesen, die aufgrund ihrer Substanzmenge wahrscheinlich eine untergeordnete Rolle hinsichtlich der geringen Zumutbarkeit spielten.

Wahrscheinlicher ist, dass bei den als unzumutbar bewerteten Verbundkonstruktionen unangenehme geruchsintensive Komponenten ursächlich waren, die unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze ( $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) der für den Nachweis von VOCs in Prüfkammer- und Raumluft eingesetzten Analytik (TDS-GC/MS) liegen, jedoch bereits in Spurenkonzentrationen für die menschliche Nase wahrnehmbar sind. Hinweise darauf gaben auch die vergleichsweise negativen Geruchsartbeschreibungen. Die Probanden charakterisierten die Proben u. a. als stechend, muffig, fischig, käsig, ranzig, teppichartig und plastikartig (siehe **Tabelle 26**).

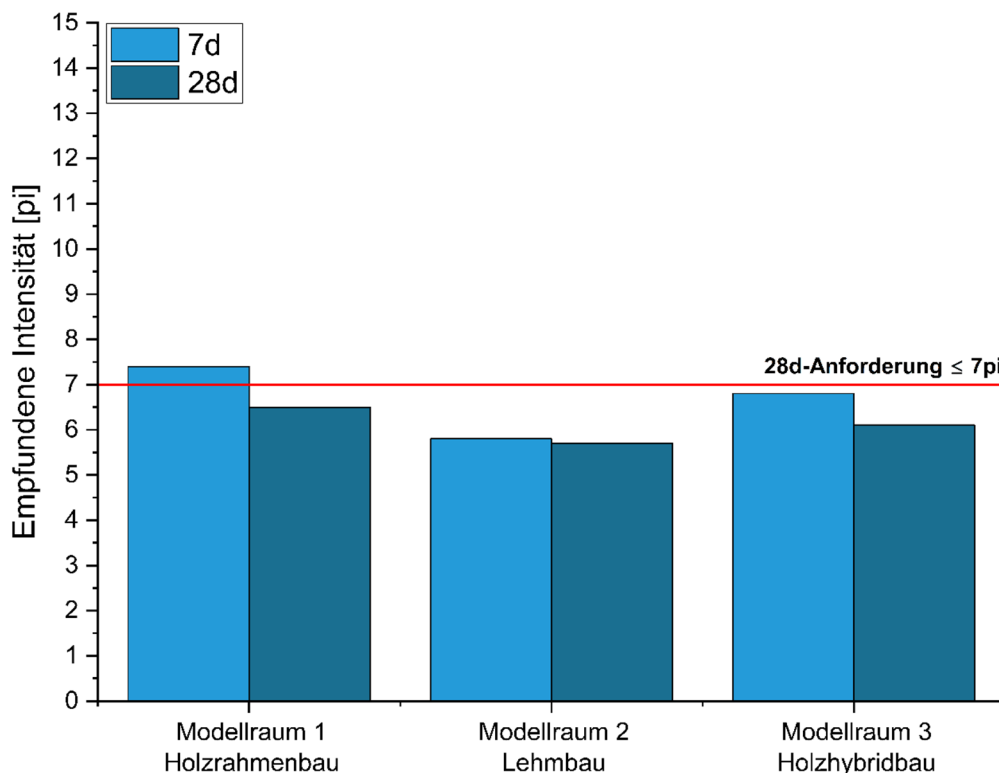
### 5.6.3 Modellräume

Die Geruchsbewertung der Modellräume erfolgte nach 7 und 28 Tagen Prüfdauer. Eine Ausnahme bildete Modellraum 1/Holzrahmenbau, der als einziger Modellraum über eine Gesamtzeit von 3 Monaten (91 Tagen) geprüft wurde. Zusätzliche Geruchsbewertungen erfolgten somit nach 56 und 91 Tagen (siehe **Tabelle 27**). An jedem Bewertungstag wurden die sensorischen Parameter der empfundenen Intensität (EI), der hedonischen Wirkung, der Geruchsart und der Zumutbarkeit bestimmt. Eine technische Beschreibung des Aufbaus der Modellräume sowie die Versuchsparameter der Emissionsprüfungen befindet sich unter **Abschnitt 4.1.3** und **Abschnitt 4.2.3**.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der sensorischen Prüfung je Modellraum beschrieben. Wie bereits in **Abschnitt 4.2.1.2** erläutert, wurden für die Konstruktion der Modellräume neue Baumaterialien angekauft. Um eine direkte Vergleichbarkeit mit den Messdaten der Modellräume zu gewährleisten, wurden die für die Modellräume angekauften Einzelmaterialien wiederum einer Emissionsprüfung unterzogen. Diese erfolgte gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) über den kompletten Zeitraum von 28 Tagen, um auch die Erhebung und Bewertung der sensorischen Parameter zu ermöglichen.

**Abbildung 71** zeigt die EI der drei Modellräume (Modellraum 1/Holzrahmenbau, Modellraum 2/Lehmbau, Modellraum 3/Holzhybridbau) nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.

**Abbildung 71: Modellraum 1-3/Holzrahmenbau/Lehmbau/Holzhybridbau. Empfundene Intensität (EI) nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.**

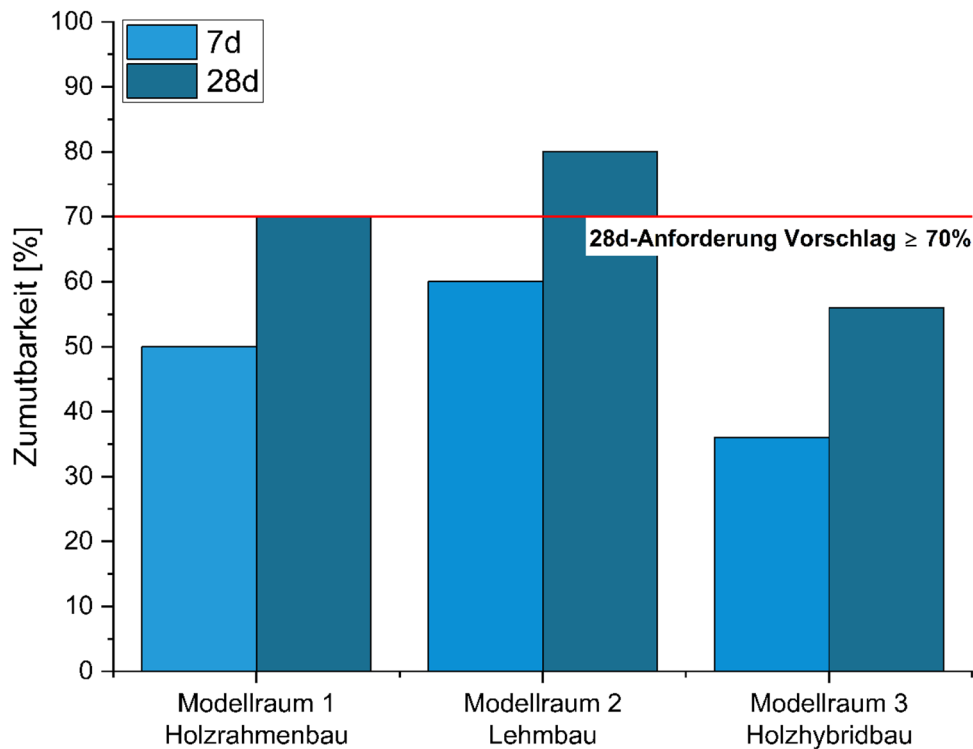


[Quelle: Fraunhofer WKI]

Alle ermittelten EIs lagen unterhalb des Anforderungswerts von  $\leq 7$  pi nach 7 und 28 Tagen Prüfzeit. Nach einem Zeitraum von 7 Tagen hätte Modellraum 1/Holzrahmenbau diese Anforderung mit einer EI von 7,4 pi knapp unterschritten.

Im Gegenteil dazu lagen die ermittelten Zumutbarkeiten der drei untersuchten Modellräume (Modellraum 1/Holzrahmenbau, Modellraum 2/Lehmbau, Modellraum 3/Holzhybridbau) unterhalb der seitens des AgBB vorgeschlagenen Anforderung von  $\geq 70\%$  nach einer Prüfzeit von 7 Tagen (**Abbildung 72**). Am 28. Prüftag wurde nur noch Modellraum 3/Holzhybridbau als unzumutbare Geruchsquellen mit einer Zumutbarkeit von 56% wahrgenommen.

**Abbildung 72: Modellraum 1-3/Holzrahmenbau/Lehmbau/Holzhybridbau. Zumutbarkeit nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Wie im **Abschnitt 4.3.3** erläutert, erfüllten Modellraum 1/Holzrahmenbau und Modellraum 2/Lehmbau nicht die Anforderung des R-Werts nach einem Prüfzeitraum von 28 Tagen. Ursächlich war in beiden Fällen die von den Modellräumen freigesetzte Substanz Furfural, dessen Konzentration über die gesamte Prüfzeit anstieg. Aufgrund des niedrigen NIK-Werts von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  führten bereits geringe Konzentrationen zum Überschreiten des R-Werts. Zudem setzten beide Modellräume die Verbindungen Acetaldehyd, Furfural, n-Hexanal und Benzaldehyd sowie die Terpene alpha-Pinen und 3-Caren frei.

**Tabelle 27** gibt eine Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter der untersuchten drei Modellräume nach einer Prüfdauer von 28 Tagen einschließlich TVOC- und R-Wert. Obwohl Modellraum 1/Holzrahmenbau und Modellraum 2/Lehmbau deutlich wahrnehmbare Geruchsquellen darstellten, lagen die Proben hinsichtlich der EI ( $\leq 7\text{pi}$ ) und der Zumutbarkeit ( $\geq 70\%$ ) unterhalb der jeweiligen AgBB-Anforderung. Auch Modellraum 3/Holzhybridbau erfüllte alle AgBB-Anforderungen nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Lediglich die Zumutbarkeit des Raums lag mit 56 % unterhalb des seitens des AgBB vorgeschlagenen Anforderungswerts von 70 % (siehe **Abbildung 72**). Wahrscheinlich war die als holzig, muffig und fischig beschriebene Geruchsqualität ursächlich für die unzumutbare Bewertung durch die Probanden. Verantwortlich für diesen Geruchscharakter könnten möglicherweise die Substanz Styrol sowie einige Aldehyde (Acetaldehyd, Propanal, Butanal, Pentanal, Hexanal, Octanal, Nonanal), Ketone (2-Butanon,

2-Pentanon, 2-Hexanon, 2-Heptanon) und Alkohole (n-Pentanol) gewesen sein, die bereits in geringen Konzentrationen einen Geruchsreiz an der menschlichen Nase verursachen.

**Tabelle 27:** Modellraum 1-3/Holzrahmenbau/Lehmbau/Holzhybridbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.

| Probe                      | Abkürzungen  | Empfundene Intensität [pi] | Hedonik | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m <sup>3</sup> ] | Ri-Wert      | Geruchsart                            |
|----------------------------|--------------|----------------------------|---------|------------------|--------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Modellraum – Holzrahmenbau | Modellraum 1 | 6,5                        | 0       | 70               | 0,93                           | <b>2,240</b> | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich |
| Modellraum – Lehmbau       | Modellraum 2 | 5,7                        | 0       | 80               | 0,32                           | <b>1,656</b> | holzig/holzwerkstoffartig, muffig     |
| Modellraum – Holzhybridbau | Modellraum 3 | 6,1                        | -0,8    | <b>56</b>        | 0,61                           | 0,996        | holzig, muffig, fischig               |

#### 5.6.3.1 Modellraum 1/Holzrahmenbau. Ergebnisse der sensorischen Prüfung.

**Tabelle 28** gibt eine Übersicht über die sensorischen Parameter von Modellraum 1/Holzrahmenbau, der dazugehörigen Verbundkonstruktionen (Wand 1/Holzrahmenbau, Decke 1/Holzrahmenbau, Boden 2/Parkett) und der insgesamt 19 verbauten Einzelmateriale nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.

**Abbildung 73** zeigt die gemessene empfundene Intensität von Modellraum 1/Holzrahmenbau im Vergleich zu den Verbundkonstruktionen und den verbauten Einzelmateriale.

Abgesehen von der Wandkonstruktion (Wand 1/Holzrahmenbau), der Holzfaserdämmplatte (Holzfaser/120) und der OSB-Platte (OSB-1.2) lagen die EI unterhalb der AgBB-Anforderung von  $\leq 7$  pi nach 28 Tagen Prüfzeit. Die EI von Wand 1/Holzrahmenbau lag dagegen mit 7,7 pi oberhalb der AgBB-Anforderung. Möglicherweise wurde der Geruchscharakter der Wandkonstruktion durch die deutlich wahrnehmbaren holzbasierten Materialien OSB-Platte (OSB-1.2) und Holzfaserdämmung (Holzfaser/120) beeinflusst. Beide Einzelmateriale wiesen Intensitäten oberhalb der AgBB-Anforderung von 7 pi auf. Zudem lagen die EI nach einer Prüfzeit von 7 Tagen niedriger als nach 28 Tagen. Gleiches Intensitätsverhalten war auch bei Wand 1/Holzrahmenbau zu beobachten. Aufgrund der ähnlichen Geruchsartbeschreibung als holzig, holzwerkstoffartig und kunststoffartig lassen sich Rückschlüsse auf die holzbasierten Werkstoffe ziehen.

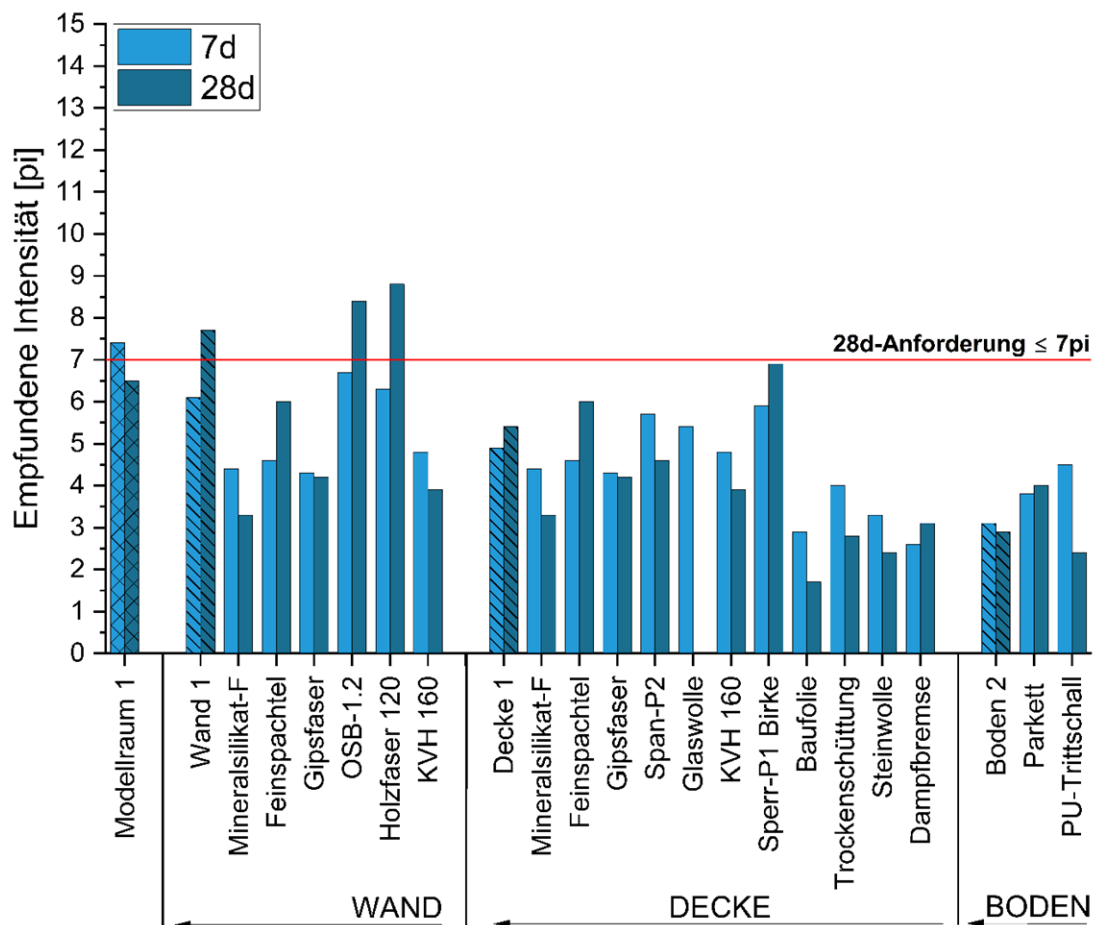
Die Emissionsprüfung der Glaswolldämmung (Glaswolle) wurde zwar aufgrund des geringen Emissionspotentials nach einer Prüfdauer von 7 Tagen abgebrochen, dennoch wurde das Material als „unzumutbar“ mit einer Zumutbarkeit von 36% sowie als „unangenehm“ mit einer hedonischen Wirkung von -1,5 bewertet. Eine Erklärung für den unangenehmen Geruch des Materials (siehe **Tabelle 28**) könnte die in Spurenkonzentrationen ( $< BG$ ) detektierte Verbindung Salicylaldehyd sein. Salicylaldehyd hat ein hohes Geruchspotential, das mit einem muffig, zimt-, bittermandelartigen Geruchscharakter beschrieben wird ([www.thegoodscentscompany.com](http://www.thegoodscentscompany.com)). Eine Zuordnung der Substanz zu einer Quelle war nicht möglich, zumal aufgrund des Einkaufs der Produkte in Baumärkten und im Baustoffhandel keine detaillierten Informationen über Rezepturen vorlagen.

**Tabelle 28: Modellraum 1/Holzrahmenbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für den Modellraum, die Verbundaufbauten und die Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert.**

| Probe                             | Abkürzungen         | EI [pi]    | Hedonik    | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert      | Geruchsart                                      |
|-----------------------------------|---------------------|------------|------------|------------------|-------------------|--------------|-------------------------------------------------|
| <b>Modellraum – Holzrahmenbau</b> | <b>Modellraum 1</b> | 6,5        | 0          | 70               | 0,93              | <b>2,240</b> | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich           |
| <b>Wand 1 – Holzrahmenbau</b>     | <b>Wand 1</b>       | <b>7,7</b> | -0,8       | <b>30</b>        | 0,77              | 1,190        | holzig, holzwerkstoff-, kunststoffartig, muffig |
| Mineralsilikatfarbe               | Mineralsilikat-F    | 3,3        | 0,2        | 90               | < 0,01            | 0,000        | sauer, süß                                      |
| Füll-, Feinspachtelmasse          | Feinspachtel        | 6,0        | 0          | 86               | 0,13              | 0,111        | sauer, süß, klebstoff-, baustoffartig           |
| Gipsfaserplatte                   | GF                  | 4,2        | -0,8       | 70               | 0,04              | 0,038        | plastikartig, muffig                            |
| OSB-Platte                        | OSB-1.2             | <b>8,4</b> | -1         | <b>60</b>        | 0,63              | 0,851        | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich           |
| Holzfaser-Dämmplatte              | Holzfaser/120       | <b>8,8</b> | -1,9       | <b>22</b>        | <b>5,49</b>       | <b>7,101</b> | stechend, sauer, holzwerkstoffartig             |
| Konstruktionsvollholz             | KVH/160             | 3,9        | -0,4       | 80               | 0,25              | 0,277        | holzig, holzwerkstoffartig                      |
| <b>Decke 1 – Holzrahmenbau</b>    | <b>Decke 1</b>      | <b>5,4</b> | <b>0,1</b> | <b>70</b>        | <b>0,13</b>       | <b>0,259</b> | <b>holzig, kunststoffartig</b>                  |
| Mineralsilikatfarbe               | Mineralsilikat-F    | 3,3        | 0,2        | 90               | < 0,01            | 0,000        | sauer, süß                                      |
| Füll-, Feinspachtelmasse          | Feinspachtel        | 6,0        | 0          | 86               | 0,13              | 0,111        | sauer, süß, klebstoff-, baustoffartig           |
| Gipsfaserplatte                   | GF                  | 4,2        | -0,8       | 70               | 0,04              | 0,038        | plastikartig, muffig                            |
| Spanplatte                        | Span-P2             | 4,6        | -0,3       | 90               | 0,28              | 0,954        | holzig, holzwerkstoffartig, sauer               |

| Probe                     | Abkürzungen      | EI [pi]    | Hedonik    | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert      | Geruchsart                                            |
|---------------------------|------------------|------------|------------|------------------|-------------------|--------------|-------------------------------------------------------|
| Glaswolldämmung (7d-Wert) | Glaswolle        | 5,4        | -1,5       | 36               | < 0,01            | 0,000        | holzigholzwerkstoffartig, sauer, süßlich, muffig      |
| Konstruktionsvollholz     | KVH/160          | 3,9        | -0,4       | 80               | 0,25              | 0,277        | holzigholzwerkstoffartig                              |
| Sperrholzplatte Birke     | Sperr-P1 Birke   | 6,9        | -0,9       | 50               | 2,90              | 2,434        | sauer, holzig                                         |
| Baufolie                  | Baufolie         | 1,7        | 0,3        | 100              | < 0,01            | 0,000        | leicht süßlich seifig                                 |
| Trockenschüttung          | Trockenschüttung | 2,8        | 0,3        | 91               | < 0,01            | 0,000        | schwach holzig                                        |
| Steinfaser-Dämmung        | Steinwolle       | 2,4        | 0,3        | 100              | 0,01              | 0,478        | holzigholzwerkstoffartig, süß, minzig, seifig         |
| Dampfbrems-Folie          | Dampfbremse      | 3,1        | 0,2        | 78               | < 0,01            | 0,000        | leicht holzig, würzig                                 |
| <b>Boden 2 – Parkett</b>  | <b>Boden 2</b>   | <b>2,9</b> | <b>0,5</b> | <b>91</b>        | <b>0,27</b>       | <b>0,196</b> | <b>holzigholzwerkstoffartig, frisch, teppichartig</b> |
| Fertigparkett             | Parkett          | 4,0        | 0,8        | 100              | 0,63              | 0,347        | holzigholzwerkstoffartig                              |
| Dämmunterlage             | PU-Trittschall   | 2,4        | 0,4        | 100              | < 0,01            | 0,000        | leicht süßlich, frisch                                |

**Abbildung 73: Modellraum 1/Holzrahmenbau. Empfundene Intensität (EI) im Vergleich zu den Messwerten der Verbundaufbauten und Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

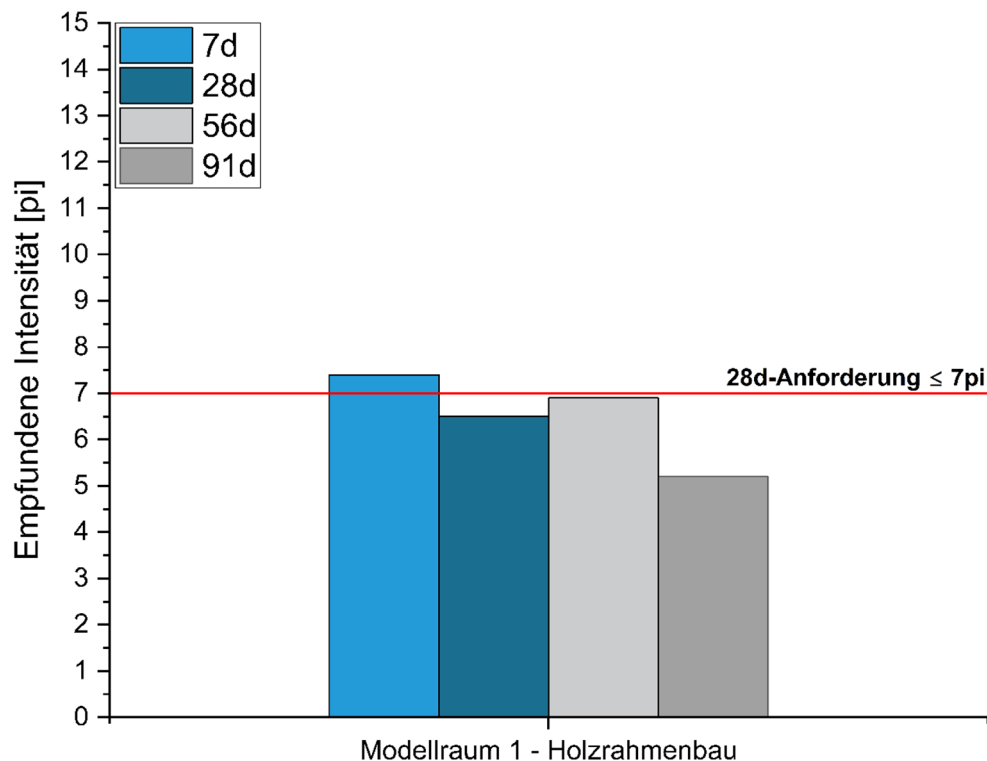
Gleiches galt für das Bauprodukt Sperrholz (Sperr-P1 Birke). Das Material lag ebenfalls unterhalb der AgBB-Anforderungen von  $\leq 7$  pi, wurde jedoch als gering zumutbar mit 50% von den Testpersonen wahrgenommen (siehe **Tabelle 28**). In Bezug auf das Sperrholzprodukt war sehr wahrscheinlich die hohe Essigsäurekonzentration mit einem daraus resultierenden sauren Geruchscharakter Hauptverursacher des unzumutbaren Geruchs der Probe. Weiterhin wurden einige (un-)gesättigte Aldehyde (3-Methyl-2-butenal, trans-2-Octenal, Pentanal, Hexanal, Nonanal, Decanal, Furfural, Benzaldehyd) und Carbonsäuren (Propansäure, Pentansäure, Hexansäure) mit geruchsrelevantem Charakter bestimmt. Des Weiteren lag die EI der Probe nach 28 Tagen Prüfdauer höher als nach 7 Tagen (siehe **Abbildung 67**), obwohl die von der Probe freigesetzte VOC-Konzentration, insbesondere die Essigsäure, über die Prüfdauer sank. Eine denkbare Ursache hierfür könnten sogenannte Maskierungseffekte durch die hohe Essigsäurekonzentration nach 7 Tagen Messdauer sein. Möglicherweise wurden dadurch andere geruchsaktive Komponenten unterdrückt und daraus resultierend empfanden die Testpersonen die Luftprobe als weniger intensiv. Durch das Abklingen der Essigsäure-Konzentration über die Prüfzeit von 28 Tagen könnte der Maskierungseffekt der Essigsäure weniger starken Einfluss auf die Geruchswahrnehmung der Probanden haben und folglich die (un-)gesättigten Aldehyde (Pentanal, n-Hexanal, 3-Methyl-2-butenal, Furfural, Benzaldehyd, trans-2-Octenal, Nonanal, Decanal) sowie die anderen Carbonsäuren (Propansäure, Pentansäure, Hexansäure) ursächlich für die höhere EI sein.

Abweichend von der Standardprüfzeit (28d) wurde Modellraum 1/Holzrahmenbau über einen Zeitraum von 91 Tagen geprüft. Während der erweiterten Prüfdauer wurden nach 56 und 91 Tagen zusätzliche Geruchsbewertungen durchgeführt. In **Tabelle 29** sind die sensorischen Parameter sowie der TVOC- und R-Wert des gesamten Untersuchungszeitraum aufgeführt. **Abbildung 74** zeigt die Ergebnisse der EI über eine Prüfdauer von 91 Tagen. Abgesehen von der Anforderung an den R-Wert wurden von dem Modellraum alle AgBB-Anforderungen eingehalten. Wie bereits oben beschrieben, war Hauptverursacher für das Überschreiten des R-Werts das Aldehyd Furfural. Die Verbindung wurde in niedrigen Konzentrationen ( $9\text{--}13\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) über den gesamten Untersuchungszeitraum von 91 Tagen freigesetzt und führte zum Überschreiten der Anforderung. Bei den sensorischen Parametern lag lediglich die Zumutbarkeit mit 50% nach einer Prüfdauer von 7 Tagen unterhalb des vom AgBB vorgeschlagenen Anforderungswerts. Ursächlich für die unzumutbare Bewertung könnte die deutlich wahrnehmbare würzig, künstliche Geruchsqualität der Luftprobe sein. Der würzige Geruchscharakter wurde sehr wahrscheinlich von der in Spurenkonzentrationen nachgewiesenen Substanz Methylpyrazin hervorgerufen. Die Komponente wird von der menschlichen Nase bereits in Spuren wahrgenommen und weist einen als würzig, nussig, röstig und muffig beschriebenen Geruchscharakter auf. Eine mögliche Quelle für die geruchsintensive Verbindung könnte die in der Wandkonstruktion (Wand 1/Holzrahmenbau) verbaute Holzfaserdämmung (Holzfaser/120), sein. Die Holzfaserdämmung setzt, neben anderen geruchsrelevanten Substanzen, Methylpyrazin über die gesamte Prüfdauer frei. Weitere Einflussfaktoren für die eher unangenehme Wahrnehmung der Luftprobe könnten die geruchsrelevanten Verbindungen Pyrazin, trans-2-Butenal, trans-2-Heptenal, 2-Pentanon und 2-Heptanon sowie andere Aldehyde und Terpene gewesen sein, die ebenfalls in Spuren ( $\text{BG} < 1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) aus Modellraum 1/Holzrahmenbau freigesetzt wurden.

**Tabelle 29:** Modellraum 1/Holzrahmenbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert über eine Prüfdauer von 91 Tagen. **Überschreitungen** in rot und fett markiert.

| Prüfdauer | Empfundene Intensität [pi] | Hedonik | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] | Ri-Wert      | Geruchsart                                 |
|-----------|----------------------------|---------|------------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|
| 7d        | 7,4                        | -0,7    | <b>50</b>        | 1,09                                 | <b>2,174</b> | würzig, künstlich                          |
| 28d       | 6,5                        | 0       | 70               | 0,93                                 | <b>2,240</b> | holzig, holzwerkstoffartig, künstlich      |
| 56d       | 6,9                        | 0,1     | 70               | 0,90                                 | <b>2,233</b> | holzig, holzwerkstoffartig, muffig, frisch |
| 91d       | 5,2                        | 0,2     | 90               | 0,66                                 | <b>2,128</b> | holzig, holzwerkstoffartig                 |

**Abbildung 74: Modellraum 1/Holzrahmenbau. Empfundene Intensität (EI) nach einer Prüfdauer von 7, 28, 56 und 91 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 5.6.3.2 Modellraum 2/Lehmbau. Ergebnisse der sensorischen Prüfung

**Tabelle 30** gibt eine Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter des untersuchten Modellraums 2/Lehmbau, der dazugehörigen Verbundaufbauten (Wand 2/Lehmbau, Decke 5/Lehmbau, Boden 5/Laminat/Lehm) sowie der 13 verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Die Prüfung der Probe Dämmunterlage (PU-Trittschall) wurde aufgrund sehr geringer Emissionen nach einem Zeitraum von 7 Tagen abgebrochen, sodass in nachfolgender Tabelle statt der 28-Tage-Werte die 7-Tage-Werte aufgeführt werden.

Mit Ausnahme der beiden verwendeten Holzfaserdämmplatten (Holzfaser/120 und Holzfaser/40) lagen bei Modellraum 2/Lehmbau alle eingesetzten Einzelmaterialien und Verbundkonstruktionen (Wand 2/Lehmbau, Decke 5/Lehmbau, Boden 5/Lehmbau) unterhalb der sensorischen und chemischen Anforderungswerte des AgBB-Bewertungsschemas (06/2021). Lediglich der R-Wert von Modellraum 2/Lehmbau überschritt den Anforderungswert von  $\leq 1$ . Verantwortlich hierfür war, wie bereits in **Abschnitt 4.3.3.3** beschrieben, die Substanz Furfural, deren niedriger NIK-Wert zum Überschreiten der Anforderung führte. Im Gegensatz dazu lagen bei beiden Holzfaserdämmungen (Holzfaser/120, Holzfaser/40) sowohl die sensorischen als auch die chemischen Parameter oberhalb der AgBB-Anforderungen. Das Überschreiten der sensorischen Anforderungen ist sehr wahrscheinlich auf die in hohen Konzentrationen freigesetzte Hauptkomponente Essigsäure zurückzuführen sowie auf die in geringen Konzentrationen detektierten geruchsrelevanten Verbindungen 2-Methylpyrazin, Furfural, 2-Methylfurfural und Benzaldehyd. Insbesondere die sehr geruchsintensive Substanz 2-Methylpyrazin wird bereits in Spurenkonzentrationen von der menschlichen Nase detektiert. Für das Überschreiten des TVOC-Werts war die Carbonsäure Essigsäure hauptverantwortlich. Maßgebend für die hohen Ri-Werte der Holzfaserdämmplatten waren wiederum die Komponenten Essigsäure und Furfural.

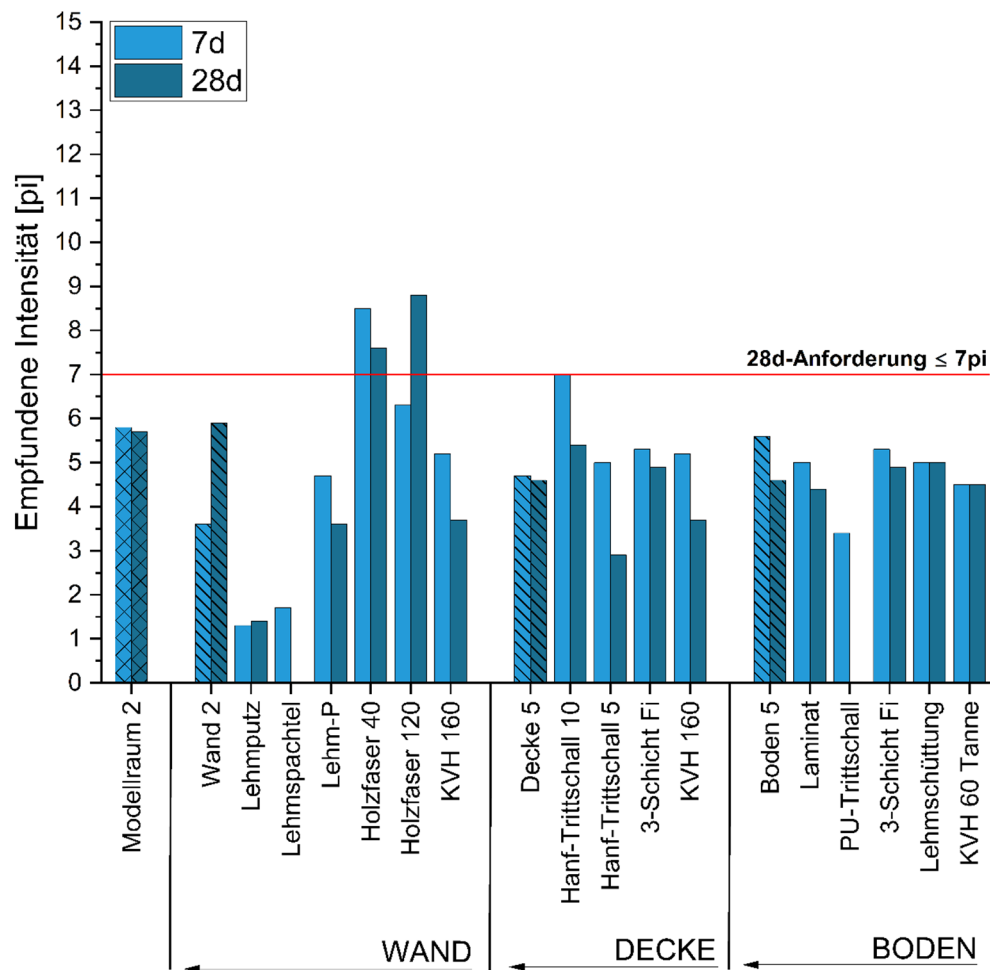
**Tabelle 30: Modellraum 2/Lehmbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für den Modellraum 2, die Verbundaufbauten und die Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert.**

| Probe                                | Abkürzungen         | Empfundene Intensität [pi] | Hedonik     | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert      | Geruchsart                                 |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------|------------------|-------------------|--------------|--------------------------------------------|
| <b>Modellraum – Lehmbau</b>          | <b>Modellraum 2</b> | <b>5,7</b>                 | <b>0</b>    | <b>80</b>        | <b>0,32</b>       | <b>1,656</b> | holzig, holzwerkstoffartig, muffig         |
| <b>Wand 1 – Lehmbau</b>              | <b>Wand 2</b>       | <b>5,9</b>                 | <b>-0,3</b> | <b>70</b>        | <b>0,77</b>       | <b>1,190</b> | holzig, holzwerkstoffartig, süß            |
| Konstruktionsvollholz                | KVH/160             | 3,7                        | 0,8         | 89               | 0,17              | 0,251        | holzig, holzwerkstoffartig, sauer          |
| Holzfaserdämmplatte                  | Holzfaser/120       | <b>8,8</b>                 | -1,9        | <b>22</b>        | <b>5,49</b>       | <b>7,101</b> | stechend, sauer, holzwerkstoffartig        |
| Holzfaserdämmplatte                  | Holzfaser/40        | <b>7,6</b>                 | -1,3        | <b>20</b>        | <b>3,46</b>       | <b>7,176</b> | sauer, brandig, nussig, holzwerkstoffartig |
| Lehmplatte                           | Lehm-P              | 3,6                        | 0,2         | 89               | 0,05              | 0,110        | muffig                                     |
| Lehmfüll-, Flächenspachtel (7d-Wert) | Lehmspachtel        | 1,7                        | 0,4         | 100              | < 0,01            | 0,000        | leicht seifig, holzig, zitronig            |
| Lehmputzmörtel                       | Lehmputz            | 1,4                        | 1,2         | 100              | 0,06              | 0,032        | kaum wahrnehmbar                           |
| <b>Decke 5 – Lehmbau</b>             | <b>Decke 5</b>      | <b>4,6</b>                 | <b>0,1</b>  | <b>90</b>        | <b>0,17</b>       | <b>0,373</b> | <b>holzig, holzwerkstoffartig, muffig</b>  |
| Hanf-Trittschallstreifen             | Hanf-Trittschall/10 | 5,4                        | -0,3        | 80               | 0,15              | 0,127        | muffig, sauer, strohig, heuig              |
| Weißkalk, keine Einzelmessung        |                     |                            |             |                  |                   |              |                                            |
| Rieselschutz, Hanffilzmatte          | Hanf-Trittschall/5  | 2,9                        | -0,2        | 90               | 0,01              | 0,008        | muffig, holzwerkstoffartig                 |
| 3-Schichtplatte Fichte               | 3-Schicht Fi        | 4,9                        | 0,2         | 89               | 0,24              | 0,735        | holzig                                     |
| Konstruktionsvollholz                | KVH/160             | 3,7                        | 0,8         | 89               | 0,17              | 0,251        | holzig, holzwerkstoffartig, sauer          |

| Probe                         | Abkürzungen    | Empfundene Intensität [pi] | Hedonik     | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert      | Geruchsart                                |
|-------------------------------|----------------|----------------------------|-------------|------------------|-------------------|--------------|-------------------------------------------|
| <b>Boden 5 – Laminat/Lehm</b> | <b>Boden 5</b> | <b>4,6</b>                 | <b>-0,9</b> | <b>60</b>        | <b>0,09</b>       | <b>0,271</b> | <b>holzig, holzwerkstoffartig, muffig</b> |
| Laminat                       | Laminat        | 4,4                        | -0,6        | 89               | 0,06              | 0,171        | muffig, sauer, holzwerkstoffartig         |
| Dämmunterlage (7d-Wert)       | PU-Trittschall | 3,4                        | 0,7         | 91               | < 0,01            | 0,000        | blumig, holzig, holzwerkstoffartig, sauer |
| 3-Schichtplatte Fichte        | 3-Schicht Fi   | 4,9                        | 0,2         | 89               | 0,24              | 0,735        | holzig                                    |
| Lehmschüttung                 | Lehmschüttung  | 5                          | -0,4        | 78               | 0,06              | 0,058        | kunststoffartig, muffig                   |
| Konstruktionsvollholz         | KVH/60/80      | 4,5                        | -0,5        | 70               | 0,15              | 0,359        | holzig                                    |

**Abbildung 75** zeigt eine Gegenüberstellung der empfundenen Intensität (EI) von Modellraum 2/Lehmbau, Wand 2/Lehmbau, Decke 5/Lehmbau und Boden 5/Lehmbau zu den empfundenen Intensitäten der verwendeten Einzelmateriale nach jeweils 7 und 28 Tagen Prüfdauer. Wie bereits erwähnt, wurden einzig die verbauten Holzfaserdämmplatten (Holzfaser/40, Holzfaser/120) als intensive Geruchsquellen durch die Probanden bewertet. Trotz des hohen Geruchspotentials der beiden Dämmungen wurde die empfundene Intensität des Modellraums 2/Lehmbau und der Verbundaufbauten (Wand 1, Decke 5, Boden 5) nicht maßgeblich durch das Dämmmaterial (Holzfaser/120, Holzfaser/40) beeinflusst.

**Abbildung 75: Modellraum 2/Lehmbau. Empfundene Intensität (EI) des Modellraums, der Verbundaufbauten und der verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 5.6.3.3 Modellraum 3/Holzhybridbau. Ergebnisse der sensorischen Prüfung

**Tabelle 31** gibt eine Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter des untersuchten Modellraums 3/Holzhybridbau, der dazugehörigen Verbundaufbauten (Wand 3/Holzhybridbau, Decke 6/Holzhybridbau, Boden 6/Nadelfilz) sowie der 17 verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.

**Abbildung 76** zeigt eine Gegenüberstellung der empfundenen Intensität (EI) von Modellraum 3/Holzhybridbau, Wand 3/Holzhybridbau, Decke 6/Holzhybridbau und Boden 6/Nadelfilz zu den empfundenen Intensitäten der verwendeten Einzelmaterialien nach jeweils 7 und 28 Tagen Prüfdauer. Alle untersuchten Proben wiesen eine empfundene Intensität von  $\leq 7$  pi nach einer Testdauer von 28 Tagen auf. Lediglich der Holzwerkstoff OSB-3 lag mit einer EI von 7,9 pi oberhalb von 7 pi nach einer Versuchsdauer von 7 Tagen. Dagegen wurde der Holzhybridbau, die dazugehörigen Verbundaufbauten sowie die Einzelmaterialien GF, OSB-3, EPS und Dispersions-K als unzumutbar ( $< 70\%$ ) bewertet (siehe **Tabelle 31**). Analog dazu lag die hedonische Wirkung dieser Proben ebenfalls im unangenehmen Wahrnehmungsbereich. Möglicherweise ist dies auf den eher negativen Geruchscharakter dieser Konstruktionen und Materialien zurückzuführen,

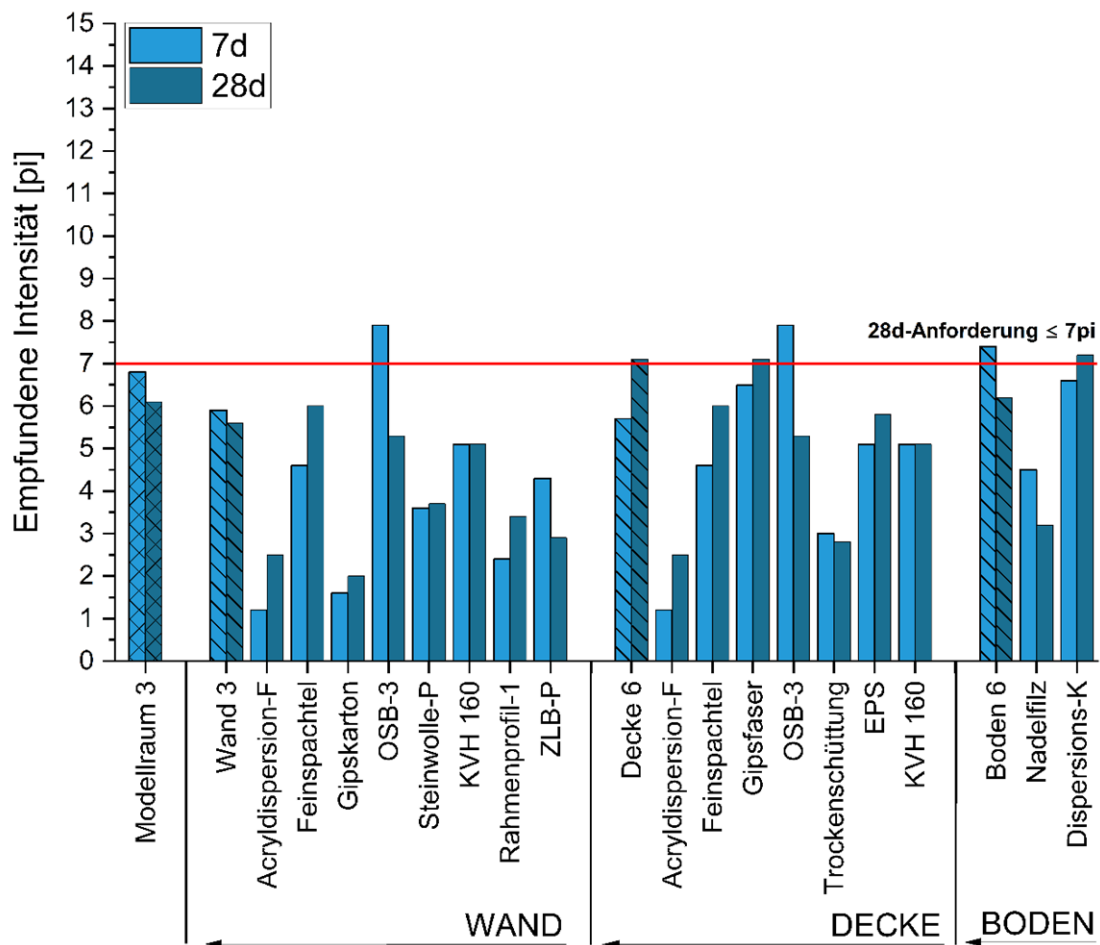
die als muffig, würzig, fischig, faulig, käsig, styropor-, kunststoff- und gummiartig beschrieben wurde. Obwohl die OSB-Platte (OSB-3) an Tag 7 als starke Geruchsquelle wahrgenommen wurde, konnte kein maßgeblicher Effekt auf die Verbundaufbauten Wand 3 und Decke 6 sowie den Modellraum beobachtet werden. Im Gegensatz dazu könnte der Dispersions-Klebstoff (Dispersions-K) einen Einfluss auf die EI der Verbundkonstruktion - Boden 6 haben, da beide Proben als deutliche Intensitätsquellen (6 – 7 pi) wahrgenommen wurden.

**Tabelle 31: Modellraum 3/Holzhybridbau. Übersicht über die Bewertung der sensorischen Parameter inkl. TVOC- und Ri-Wert für den Modellraum 3, die Verbundaufbauten und die Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Überschreitungen in rot und fett markiert.**

|                                       | Probe               | Empfundene Intensität [pi] | Hedonik     | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert      | Geruchsart                                                |
|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------|------------------|-------------------|--------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Modellraum – Holzhybridbau</b>     | <b>Modellraum 3</b> | 6,1                        | -0,8        | <b>56</b>        | 0,61              | 0,996        | holzig, muffig, fischig                                   |
| <b>Wand 3 – Holzhybridbau</b>         | <b>Wand 3</b>       | 5,6                        | -1,0        | <b>50</b>        | 0,57              | 1,039        | muffig                                                    |
| Acryl-Dispersionsfarbe                | Acryldispersion-F   | 2,5                        | 0,6         | 100              | 0,01              | 0,000        | kaum wahrnehmbar, kunststoffartig                         |
| Füll- und Feinspachtelmasse           | Feinspachtel        | 6,0                        | 0,0         | 86               | 0,13              | 0,111        | sauer, süß, klebstoff-, baustoffartig                     |
| Gipskartonplatte                      | GK                  | 2,0                        | 0,7         | 100              | 0,01              | 0,005        | kaum wahrgenommen                                         |
| OSB-Platte                            | OSB-3               | 5,3                        | -0,6        | <b>60</b>        | 0,27              | 0,411        | holzig, holzwerkstoff-, kunststoffartig                   |
| Steinwolle-Trennwandplatte            | Steinwoll-P         | 3,7                        | 0,7         | 80               | < 0,01            | 0,340        | leicht holzwerkstoff-, teppichartig, süß                  |
| Konstruktionsvollholz                 | KVH/160             | 5,1                        | -0,6        | 80               | 0,12              | 0,165        | holzig, holzwerkstoff-, kunststoffartig                   |
| Rahmenprofil                          | Rahmenprofil-1      | 3,4                        | 0,7         | 100              | < 0,01            | 0,000        | -                                                         |
| Zementgebundene Leichtbeton-Bauplatte | ZLB-P               | 2,9                        | 0,4         | 100              | 0,02              | 0,025        | seifig, chemisch                                          |
| <b>Decke 6 – Holzhybridbau</b>        | <b>Decke 6</b>      | <b>7,1</b>                 | <b>-0,7</b> | <b>56</b>        | <b>0,35</b>       | <b>0,442</b> | <b>holzig, holzwerkstoffartig, muffig, fischig, käsig</b> |
| Acryl-Dispersionsfarbe                | Acryldispersion-F   | 2,5                        | 0,6         | 100              | 0,01              | 0,000        | kaum wahrnehmbar, kunststoffartig                         |

|                             | Probe            | Empfundene Intensität [pi] | Hedonik     | Zumutbarkeit [%] | TVOC-Wert [mg/m³] | Ri-Wert      | Geruchsart                                     |
|-----------------------------|------------------|----------------------------|-------------|------------------|-------------------|--------------|------------------------------------------------|
| Füll- und Feinspachtelmasse | Feinspachtel     | 6,0                        | 0,0         | 86               | 0,13              | 0,111        | sauer, süß, klebstoff-, baustoffartig          |
| Gipsfaserplatte             | GF               | 7,1                        | -2          | 10               | 0,02              | 0,073        | fischig, faulig, muffig                        |
| OSB-Platte                  | OSB-3            | 5,3                        | -0,6        | 60               | 0,27              | 0,411        | holzig, holzwerkstoff-, kunststoffartig        |
| Trockenschüttung            | Trockenschüttung | 2,8                        | 0,3         | 100              | < 0,01            | 0,000        | leicht holzwerkstoffartig                      |
| EPS-Dämmplatte              | EPS              | 5,8                        | -1,3        | 60               | 0,18              | 0,804        | künstlich, styroporartig, süßlich              |
| Konstruktionsvollholz       | KVH/160          | 5,1                        | -0,6        | 80               | 0,12              | 0,165        | holzig, holzwerkstoff-, kunststoffartig        |
| <b>Boden 6 – Nadelfilz</b>  | <b>Boden 6</b>   | <b>6,2</b>                 | <b>-1,2</b> | <b>44</b>        | <b>0,02</b>       | <b>0,069</b> | <b>muffig, holzig, kunststoffartig, würzig</b> |
| Nadelfilz                   | Nadelfilz        | 3,2                        | -0,4        | 70               | < 0,01            | 0,000        | kunststoffartig, sauer, süß                    |
| Dispersionsklebstoff        | Dispersions-K    | 7,2                        | -1,1        | 60               | 0,13              | 0,283        | gummi-, kunststoffartig, holzig, muffig        |

**Abbildung 76: Modellraum 3/Holzhybridbau. Empfundene Intensität (EI) des Modellraums, der Verbundaufbauten und der verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen. Die Pfeile zeigen die Richtung des Konstruktionsaufbaus von unten/innen (links) nach oben/außen (rechts).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Weiterhin wurden im Verbundaufbau - Boden 6 einige geruchsrelevante Verbindungen (2-Ethyl-1-hexanol, Buttersäurebutylester, Ethylhexylacetat, 2-Ethylhexylpropionat, 2-Ethylhexylbutyrat) detektiert, die ausschließlich aus dem Einzelmaterial Dispersions-K freigesetzt wurden (siehe **Tabelle 32**). Ob auch die EI des Modellraums durch den Boden 6/Nadelfilz bzw. des Dispersions-Klebstoffs beeinflusst wurden, kann nicht eindeutig belegt werden, da neben den in **Tabelle 31** gelisteten Verbindungen eine Vielzahl weiterer VOCs aus dem Modellraum 3/Holzhybridbau freigesetzt wurden (**Abschnitt 4.3.3.4**). Weiterhin gibt es Hinweise aufgrund der gleichen Geruchsartbeschreibung (**Tabelle 31**) der Gipsfaserplatte (GF), Decke 6 und Modellraum 3 (fischig, faulig, muffig), dass die GF einen sensorischen Einfluss auf Decke 6 und den Modellraum 3 haben könnten. Mögliche Ursachen für den unangenehmen Geruchscharakter der GF sind in **Abschnitt 5.6.1.4** beschrieben.

**Tabelle 32:** Geruchsrelevante Verbindungen die ausschließlich in Modellraum 3/Holzhybridbau, Verbundaufbau Boden 6/Nadelfilz und im Dispersionsklebstoff (Dispersions-K) nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen nachgewiesen wurden.

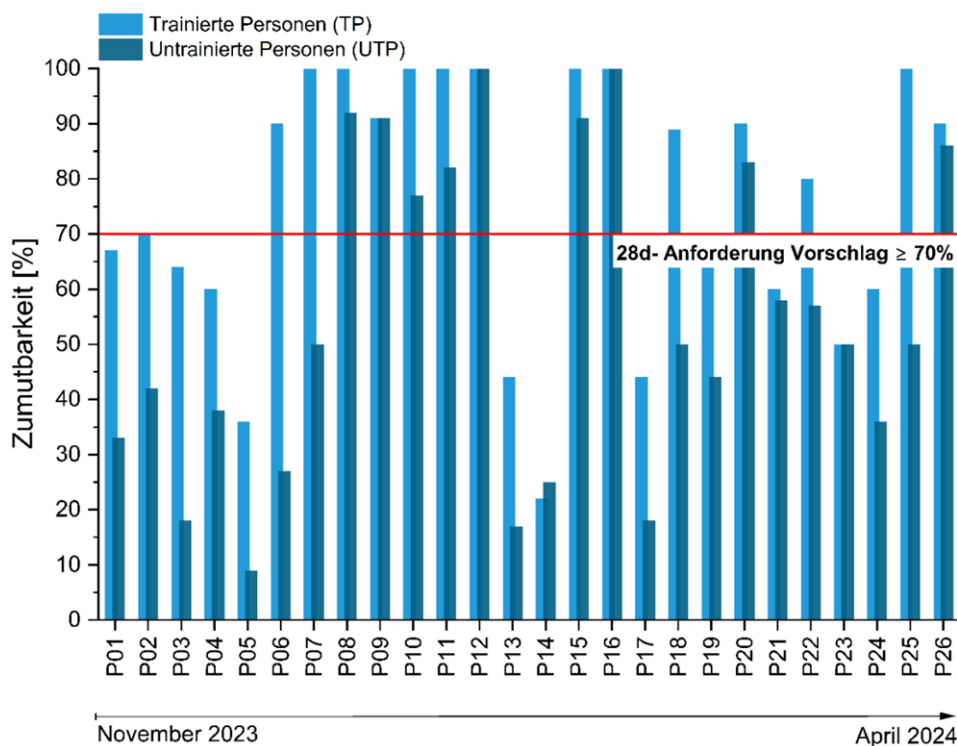
| Substanz                                 | 2-Ethyl-1-he-<br>xanol | Buttersäure-<br>butylester | Ethylhexylacetat | 2-Ethylhexyl-<br>propionat | 2-Ethylhexyl-<br>butyrat |
|------------------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|
| CAS-Nr.                                  | 104-76-7               | 109-21-7                   | 103-09-3         | 6293-37-4                  | 25415-84-3               |
| Probe,<br>Konzentration<br>in µg/m³ nach | 7d / 28d               | 7d / 28d                   | 7d / 28d         | 7d / 28d                   | 7d / 28d                 |
| Dispersions-K                            | 81 / 9                 | 2 / < 1                    | 13 / 1           | 8 / < 1                    | 2 / < 1                  |
| Boden 6 –<br>Nadelfilz                   | 35 / 2                 | 1 / < 1                    | 3 / < 1          | 5 / < 1                    | 2 / < 1                  |
| Modellraum –<br>Holzhybridbau            | 9 / 4                  | 1 / < 1                    | 3 / 1            | 3 / < 1                    | < 1 / < 1                |

## 5.7 Gegenüberstellung der Zumutbarkeit, ermittelt mit trainierten und untrainierten Personengruppen

Zusätzlich wurde die Zumutbarkeit von einer trainierten (TP) und untrainierten Personen-Gruppe (UTP) bewertet, um mögliche Unterschiede im Bewertungsverhalten der Testpersonen zwischen einer routinierten Gruppe (TP) und einer naiven, unerfahrenen Gruppe (UTP) zu ermitteln. Insgesamt erfolgten 26 Bewertungen an 11 Einzelmaterialien, 2 Verbundaufbauten sowie 2 Modellräumen. Die trainierte Personengruppe umfasste 9-11 Testpersonen, die gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11 mit einem Aceton-Vergleichsmaßstab geschult waren. Die untrainierte Personengruppe bestand aus Mitarbeiter\*innen des Fraunhofer WKI, die bislang kaum oder keine Erfahrungen im Hinblick auf Geruchsbewertungen vorweisen konnten. Die Anzahl der Personen in der untrainierten Gruppe variierte zwischen 6 und 14.

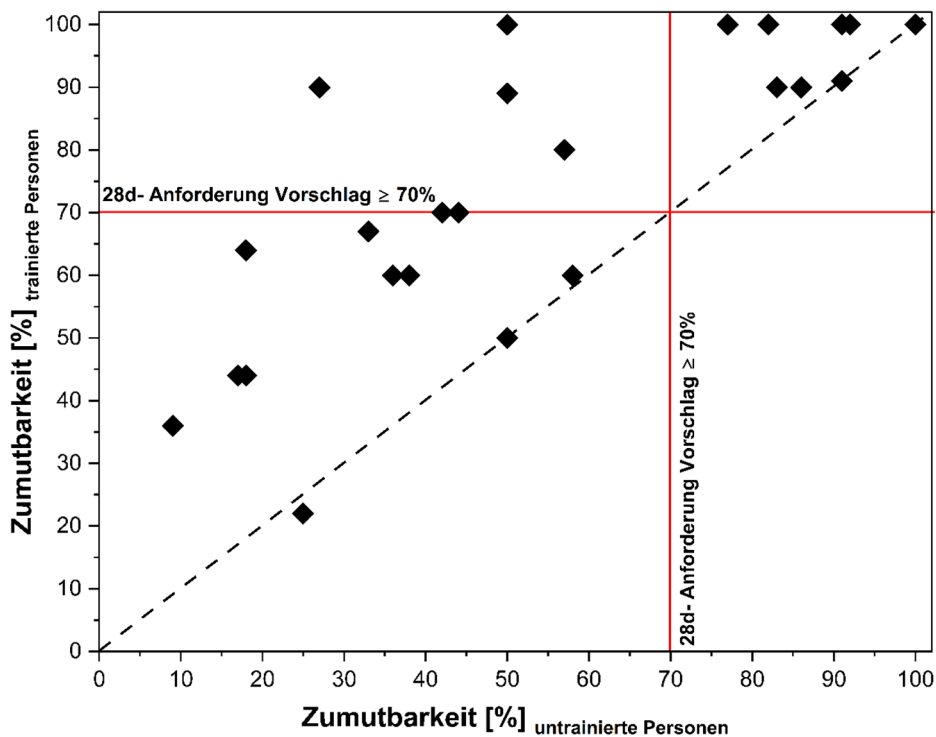
In **Abbildung 77** ist die Zumutbarkeit über die untersuchten Proben dargestellt, unterteilt in trainierte Personen (TP) und untrainierte Personen (UTP). Während der ersten sieben Geruchsbewertungen empfanden die UTP die Luftproben als weniger zumutbar als die Gruppe der TP. Die ermittelte Zumutbarkeit der UTP lag während dieser ersten Untersuchungen zwischen 9–50 %. Demgegenüber lag die Zumutbarkeit der TP derselben Proben zwischen 36–100 %. Die Diskrepanz zwischen den UTP und den TP verringerte sich im weiteren Verlauf der Untersuchungen. Tendenziell kann jedoch festgehalten werden, dass die UTP die untersuchten Luftproben als unzumutbarer bewerteten als die Gruppe der TP. Eine denkbare Ursache der anfänglich großen Unterschiede in der Bewertung der Zumutbarkeit könnte der ungewöhnliche Ablauf der Geruchsbewertungen für die Gruppe der untrainierten Testpersonen sein. Mögliche Einflüsse aus der Umgebung könnten dazu führen, dass die UTP, im Vergleich zu der routinierten Personengruppe, beeinflusst wurden und daraus resultierend der Geruchssinn der Personen.

**Abbildung 77: Bewertung der Zumutbarkeit trainierter (TP) und untrainierter Personen (UTP) von verschiedenen Einzelmaterialien/Konstruktionen nach einer Prüfdauer von 7 und 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 78: Vergleich der Zumutbarkeit von trainierten Personen (TP) zu untrainierten Personen (UTP) von 26 Bewertungen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

In **Abbildung 78** sind die 26 Bewertungen der TP und der UTP im direkten Vergleich dargestellt. Davon lag bei 8 Bewertungen die Zumutbarkeit bei beiden Personengruppen oberhalb von 70%. Demgegenüber wurden 12 Luftproben sowohl von den UTP als auch von den TP als unzumutbar empfunden ( $< 70\%$ ). Bei vier Proben empfand die TP die angebotene Luft als zumutbar ( $< 70\%$ ) wohingegen die UTP dieselben Luftproben als unzumutbar bewerteten ( $< 70\%$ ). Lediglich bei 10 Geruchsproben waren sich beide Gruppen bei der Bestimmung der Zumutbarkeit nahezu einig. Hier lag die Differenz zwischen den Bewertungen bei maximal 9%. Abgesehen von einer Probe, empfand die Gruppe der TP die untersuchten 26 Luftproben als zumutbarer im Vergleich zur Gruppe der UTP.

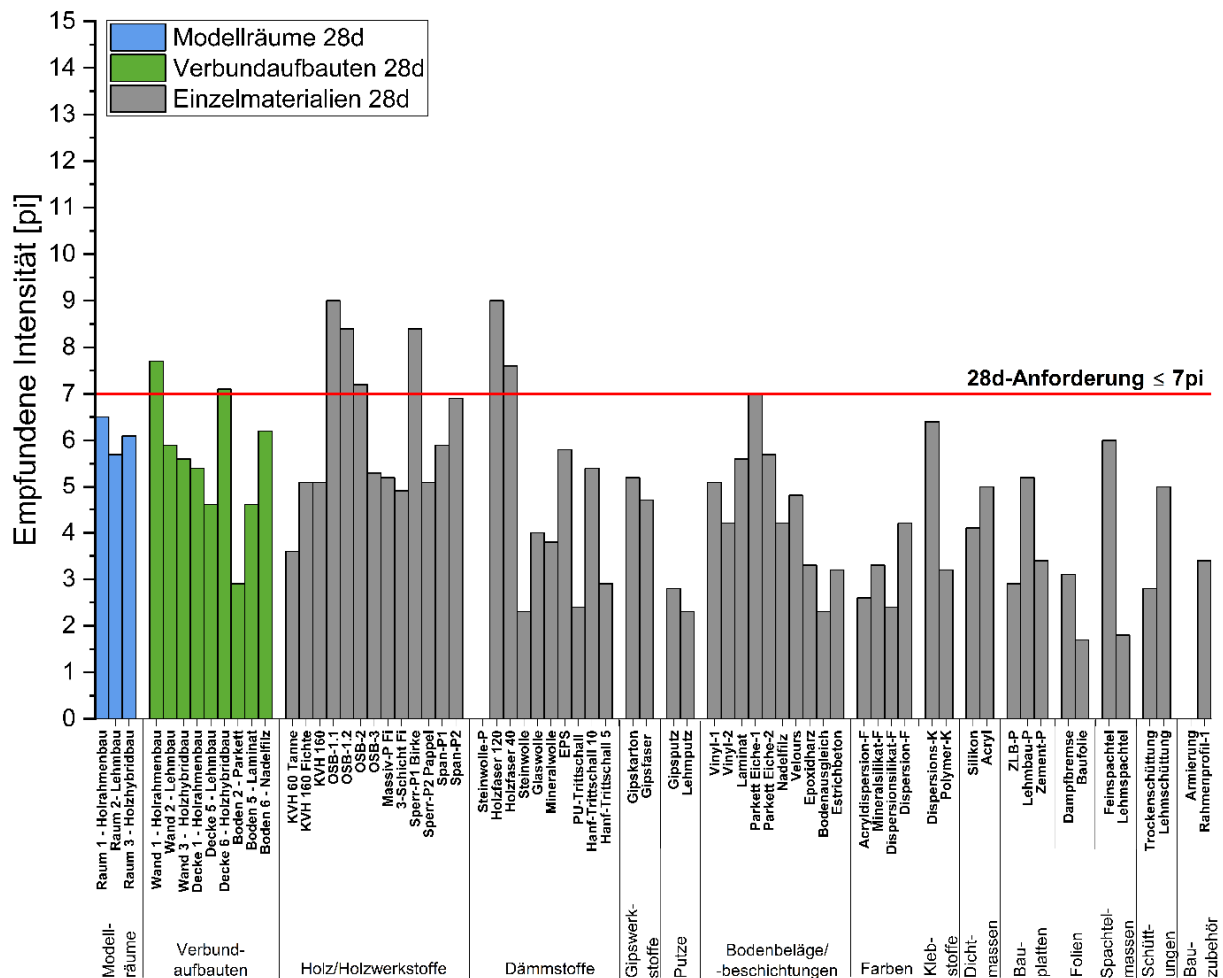
## 5.8 Zusammenfassung der sensorischen Parameter

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Bewertungsparameter empfundene Intensität und Zumutbarkeit der Modellräume 1 – 3, der verwendeten Verbundaufbauten sowie der verbauten Einzelmaterialeien zusammengefasst (siehe **Abbildung 79** und **Abbildung 80**).

Um zu ermitteln, wie die unterschiedlichen Bewertungsparameter korrelieren, wurden die Ergebnisse dahingehend untersucht, ob Proben mit hohen EIs tendenziell als unangenehm oder unzumutbar (**Abbildung 81** und **Abbildung 83**) bewertet wurden bzw. unzumutbare Materialien tendenziell als unangenehm (**Abbildung 82**) empfunden wurden und umgekehrt.

**Abbildung 79** zeigt die empfundenen Intensitäten (EI) der Modellräume 1–3, der 12 verbauten Verbundaufbauten sowie die verbauten Einzelmaterialeien nach einer Versuchsdauer von 7 und 28 Tagen.

**Abbildung 79: Empfundene Intensität (EI) der drei Modellräume, der dazugehörigen Verbundaufbauten und der verbauten Einzelmaterien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**

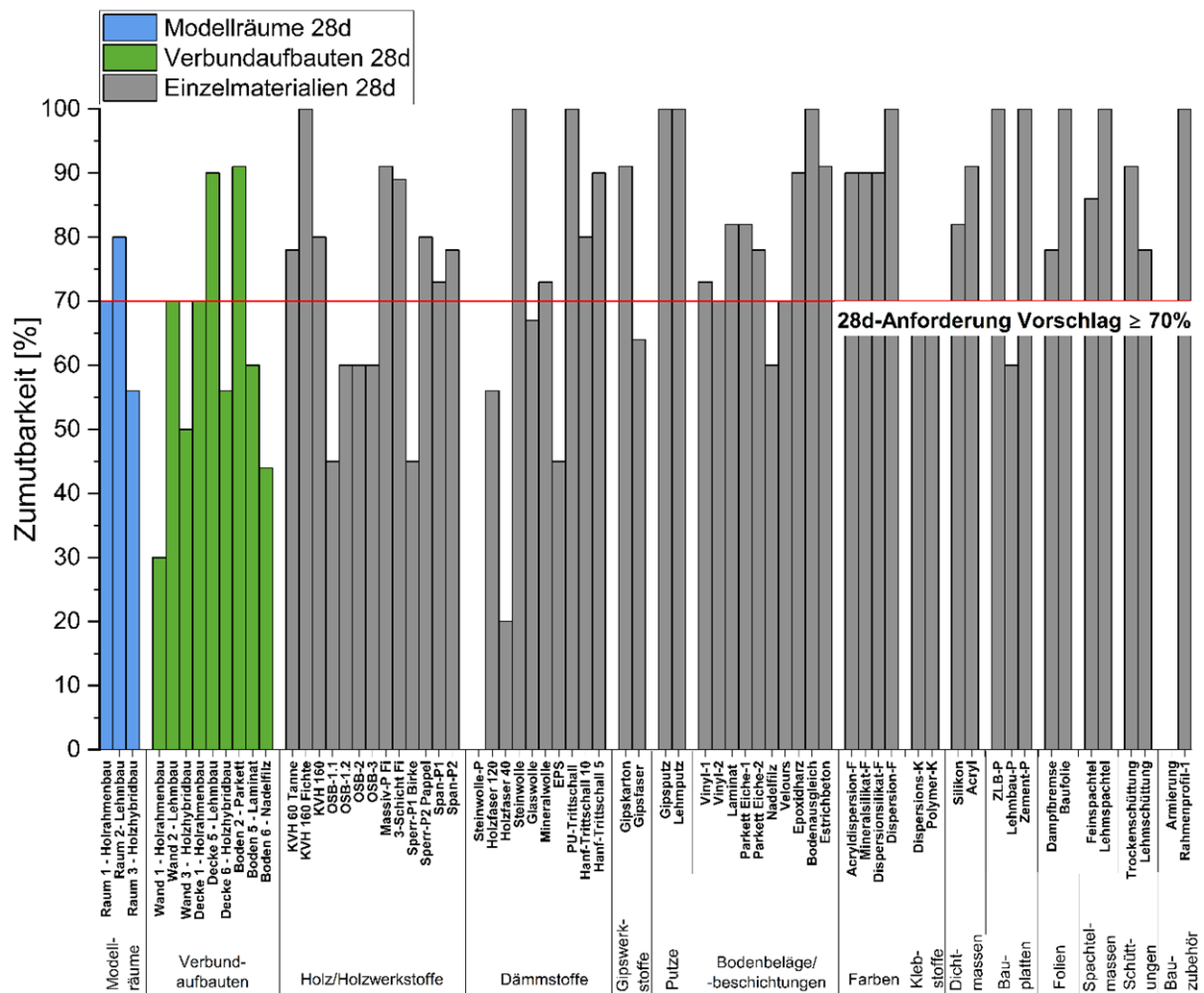


[Quelle: Fraunhofer WKI]

Von insgesamt 68 Proben lagen 6 Proben oberhalb der AgBB-Anforderung von 7 pi nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Darunter waren fünf holzbasierte Einzelmaterien (Sperr-P1 Birke, OSB-1.1, OSB-1.2, Holzfasen/120, Holzfasen/40). Weiterhin wurde der Verbundaufbau Wand 1/Holzrahmenbau als starke Geruchsquelle mit einer EI von 7,7 pi wahrgenommen. Eine detaillierte Beschreibung der möglichen Ursachen für die deutlich bis starken EIs der holzbasierten Einzelmaterien (Sperr-P1 Birke, OSB-1.1, OSB-1.2, Holzfasen/120, Holzfasen/40) sind in **Abschnitt 5.6.1.1** und für den Verbundaufbau Wand 1/Holzrahmenbau in **Abschnitt 5.6.2** aufgeführt und diskutiert.

**Abbildung 80** zeigt die Zumutbarkeit der Modellräume 1 – 3, der 12 verbauten Verbundaufbauten sowie die verbauten Einzelmaterien nach einer Versuchsdauer von 7 und 28 Tagen.

**Abbildung 80: Zumutbarkeit der drei Modellräume, der dazugehörigen Verbundaufbauten und der verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**



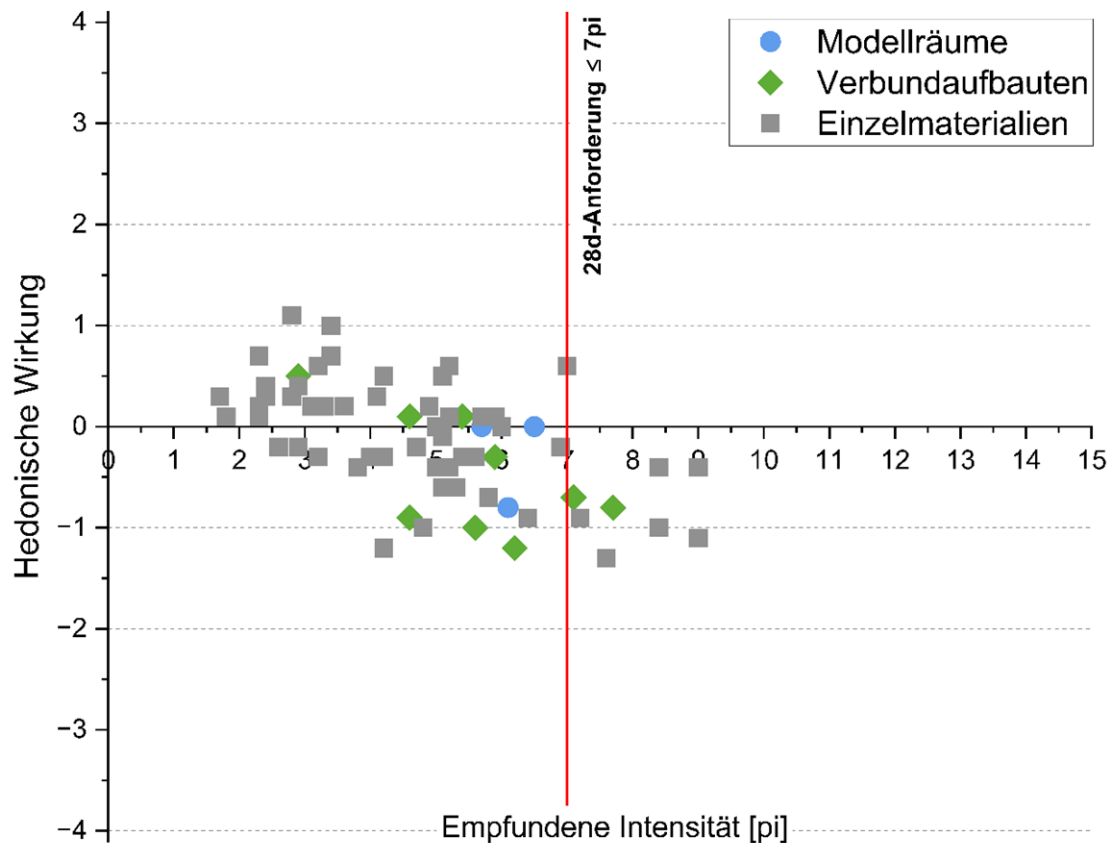
[Quelle: Fraunhofer WKI]

Im Vergleich zur EI lagen 18 von 68 Proben oberhalb seitens des AgBBs vorgeschlagenen Anforderung von  $\geq 70\%$  nach einer Prüfdauer von 28 Tagen (**Abbildung 80**). Darunter waren die Proben Modellraum 3/Holzhybridbau, fünf Verbundaufbauten (Wand 1/Holzrahmenbau, Wand 3/Holzhybridbau, Decke 6/Holzhybridbau, Boden 5/Laminat/Lehm, Boden 6/Nadelfilz), fünf Holz/Holzwerkstoffe (OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2, OSB-3, Sperr-P1 Birke), vier Dämmstoffe (Holzfaser/120, Holzfaser/40, Glaswolle, EPS) sowie die Gipsfaserplatte (GF), der Nadelfilz und die Lehnmbau-Platte (Lehnmbau-P). Bei acht der als unzumutbar bewerteten Proben sind die detektierten geruchsaktiven Komponenten sowie die freigesetzten Substanzmengen ursächlich für die Ablehnung der Proben (OSB-1.1, OSB-1.2, OSB-2, OSB-3, Sperr-P1 Birke, Holzfaser/120, Holzfaser/40, EPS). Eine ausführlichere Ursachenbeschreibung ist in **Abschnitt 5.6.1.2** aufgeführt. Im Gegensatz dazu waren die Proben Modellraum 3/Holzhybridbau, Wand 1/Holzrahmenbau, Wand 3/Holzhybridbau, Decke 6/Holzhybridbau, Boden 5/Laminat/Lehm, Boden 6/Nadelfilz, Glaswolle, die GF, der Nadelfilz und die Lehnmbau-Platte niedrige bis moderate VOC-Quellen. Ursächlich für die unzumutbare Wahrnehmung der Materialien sind sehr wahrscheinlich unangenehme geruchsintensive Komponenten, die teils in geringen und teils unterhalb der Bestimmungsgrenze ( $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) der Standard GC-MS-Analytik liegen, jedoch bereits in diesen geringen Konzentrationen für die menschliche Nase wahrnehmbar sind. Hinweise darauf gaben auch die

vergleichsweise negativen Geruchsartbeschreibungen. Die Probanden charakterisierten die Proben u. a. als stechend, muffig, fischig, käsig, ranzig, teppichartig und plastikartig.

Im nachfolgenden Diagramm (**Abbildung 81**) ist die gemessene hedonische Wirkung gegen die jeweilige empfundene Intensität (EI) nach einer Prüfzeit von 28 Tagen für die Modellräume 1- 3, der insgesamt 9 verbauten Verbundaufbauten sowie der verwendeten Einzelmaterialien abgebildet.

**Abbildung 81: Hedonische Wirkung gegen empfundene Intensität (EI) der drei Modellräume, der dazugehörigen Verbundaufbauten und der verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**



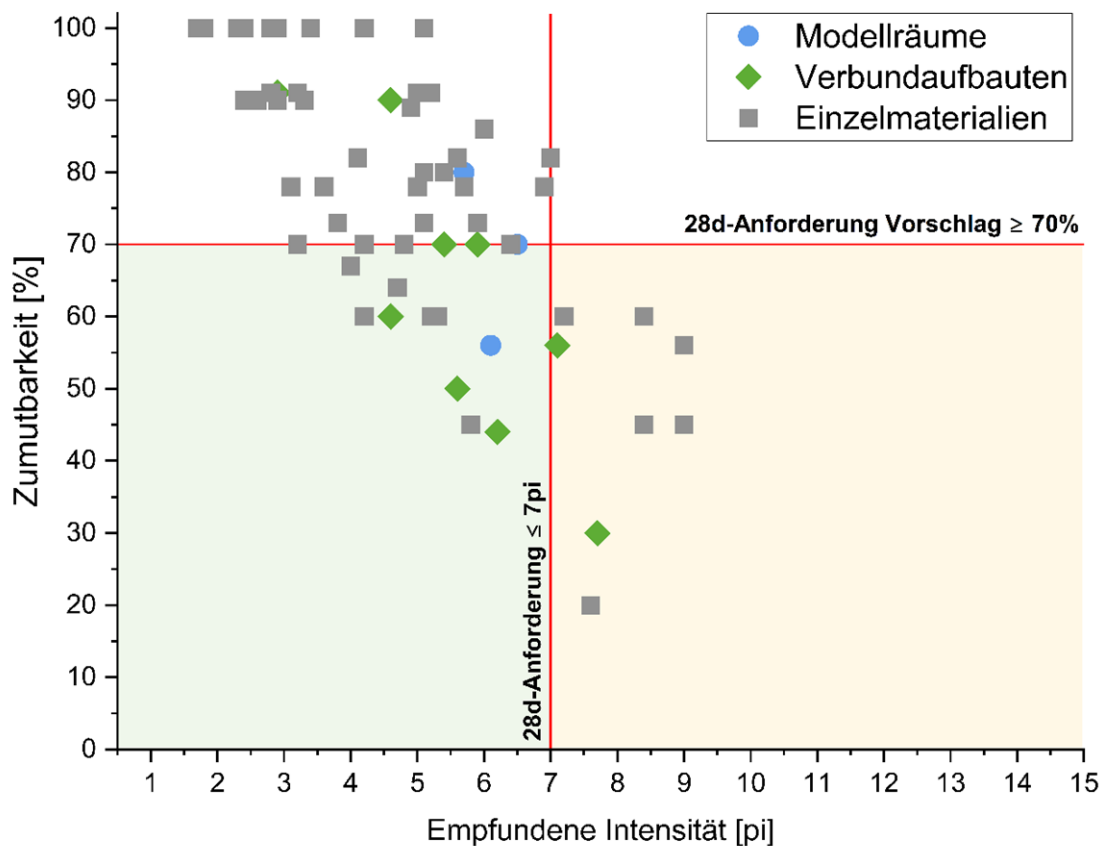
[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die hedonische Wirkung der untersuchten Proben lag überwiegend im „weder angenehmen noch unangenehmen“ hedonischen Bereich. Von insgesamt 68 Bewertungen wurden sieben als leicht unangenehme ( $< -1$ ) Geruchsquellen wahrgenommen. Tendenziell wurden mit steigender empfundener Intensität die untersuchten Luftproben als unangenehmere Geruchsquelle empfunden. Das Verhältnis von sinkender hedonischer Wirkung zu steigender empfundener Intensität bei Bauprodukten wurde bereits in vorangegangenen Forschungsvorhaben beobachtet (Salthammer et al., 2016).

In **Abbildung 82** ist die hedonische Wirkung im Vergleich zu der Zumutbarkeit der jeweiligen Modellräume 1-3, der insgesamt 9 untersuchten Verbundaufbauten sowie der verwendeten Einzelmaterialien dargestellt.



**Abbildung 83: Zumutbarkeit gegen empfundene Intensität (EI) der drei Modellräume, der dazugehörigen Verbundaufbauten und der verbauten Einzelmaterialien nach einer Prüfdauer von 28 Tagen.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Wie in der obigen Abbildung dargestellt, war dagegen keine eindeutige Tendenz bei der Gegenüberstellung der Parameter Zumutbarkeit und empfundener Intensität (EI) festzustellen (Modellräume, Verbundaufbauten und Einzelmaterialien). Zwar wurden Proben mit einer hohen Intensität von den Probanden ausschließlich als unzumutbar empfunden, jedoch wurde eine Vielzahl an Materialien mit einer geringeren Intensität mit einer Zumutbarkeit < 70 % bewertet und somit als unzumutbare Geruchsquellen wahrgenommen. Dieser Sachverhalt ist möglicherweise auf Substanzen mit niedrigen Geruchsschwellen und/oder unangenehmem Geruchscharakter zurückzuführen und wird in den **Abschnitten 5.6.1.3, 5.6.2 und 5.7** ausführlicher beschrieben.

Derzeit ist im AgBB-Bewertungsschema (06/2021) nur die Methode der empfundenen Intensität als sensorischer Bewertungsparameter aufgeführt. Demnach würden sechs (8,8 %) von 68 Proben die AgBB-Anforderungen von  $\leq 7$  pi nicht erfüllen (**Abbildung 79**). Wird allerdings der seitens des AgBB vorgeschlagene Bewertungsparameter von  $\geq 70\%$  für die Zumutbarkeit mit in die Ergebnisbetrachtung einbezogen (**Abbildung 83**), würden zusätzlich 12 Proben die Anforderungen nicht erfüllen, obwohl die Proben nur gering bis deutlich wahrnehmbar waren ( $\leq 7$  pi), dafür aber als nicht akzeptabel (< 70%) wahrgenommen wurden. Demnach würden bei einer Probenzahl von 68 26,5 % der Proben die Anforderungen nicht erfüllen.

## 6 Simulation der Emissionen von Einzelmaterialien, Verbundkonstruktionen sowie der Raumluftqualität in Modellräumen

Auf Basis der erhobenen Messdaten im Rahmen der Emissionsprüfungen wurde das jeweilige Emissionsprofil (i) der Einzelmaterialien, (ii) der Verbundkonstruktionen und (iii) der Modellräume simuliert und die Ergebnisse mit den Messdaten verglichen. Darüber hinaus wurde versucht, Zusammenhänge zwischen Emissionen von (i) Einzelmaterialien, (ii) Verbundkonstruktionen und (iii) der resultierenden Luftqualität in den Modellräumen anhand von Modellsimulationen zu beschreiben und abzubilden.

Die Simulationen basierten auf bestehenden Modellsystemen, die folgende Mechanismen und Beziehungen beschreiben:

- Emissionen aus Materialien/Bauprodukten
- Chemisch-physikalische Reaktionen und Prozesse in der Gasphase

### 6.1 Simulation von Materialemissionen

Für die Emissionen organischer Verbindungen aus Baustoffen und Einrichtungsgegenständen stehen zahlreiche Emissionsmodelle für verschiedene Materialtypen zur Verfügung, wobei jeweils die Anwendbarkeit auf spezifische Materialtypen und die erforderlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften zu berücksichtigen sind. Im Wesentlichen können zwei Arten von Modellen unterschieden werden: (i) empirische Modelle und (ii) Massentransfermodelle (Massentransportmodelle).

Diese beiden Modellierungsansätze haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Das empirische Modell ermöglicht die Validierung einer großen Menge an experimentellen Daten; die Modellparameter sind leicht zu schätzen. Daher ist der empirische Ansatz für Routineprüfungen in der Kammer geeignet. Allerdings fehlt dem empirischen Modell eine physikalische Grundlage. Die empirischen Parameter dieses Ansatzes gelten für Prüfkammerbedingungen und sind daher möglicherweise nicht repräsentativ für Emissionen unter realen Bedingungen.

Das Massentransfermodell hingegen erlaubt genaue Emissionsvorhersagen unter verschiedenen Bedingungen, was für die Prognose von Emissionen in realen Räumen anhand von Messdaten aus der Kammer ideal ist. Die derzeit verfügbaren Massentransfermodelle und ihre Lösungsansätze entsprechen jedoch der Lösung von Gleichungsreihen und der Bestimmung unendlicher Lösungsreihen, was für routinemäßige Laborarbeiten und technische Anwendungen nicht geeignet ist (Wang et al., 2021). Darüber hinaus erfordert die Quantifizierung von Modellparametern des Massentransfermodells (Anfangskonzentration im Material, Diffusionskoeffizient, Material/Luft-Verteilungskoeffizient) eine größere Anzahl an Messdaten in engeren Zeitabständen, insbesondere in den ersten 24 Stunden (Liu et al., 2021; Xiong et al., 2019). Dies ist in etablierten Prüfprotokollen und -vorgaben in der Regel nicht vorgesehen. Zu den allgemeinen Annahmen des Massentransfermodells gehört außerdem, dass der Diffusionskoeffizient im Material homogen ist und die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen VOC vernachlässigbar sind. Wie in **Abschnitt 4.2.1.2** erörtert, ist die Reproduzierbarkeit der Messdaten von Einzelmaterialien im Hinblick auf das Emissionsverhalten jedoch nur eingeschränkt oder gar nicht möglich.

## 6.2 Anwendung des empirischen Modells

Zunächst wurden empirische Ansätze ausgewählt und für die Simulation der Emissionen von Einzel- und Verbundkonstruktionen verwendet.

Für eine Substanz, die von einem einzelnen Material emittiert wird, kann ihre Konzentration in der Kammerluft mit folgender **Gleichung (6-1)** beschrieben werden:

$$\frac{dC_{air}}{dt} = \frac{A}{V} \cdot SER_A(t) - \lambda \cdot C_{air}(t) \quad (6-1)$$

wobei  $C_{air}(t)$  die Kammerkonzentration zum Zeitpunkt  $t$ ,  $A$  die Oberfläche des geprüften Materials,  $V$  das Kammervolumen,  $\lambda$  die Luftaustauschrate (in  $\text{h}^{-1}$ ) und  $SER_A$  die flächenspezifische Emissionsrate ist. **Gleichung (6-1)** kann zur Berechnung der flächenspezifischen Emissionsrate ( $SER_A$ ) anhand der gemessenen Kammerkonzentration verwendet werden.

### 6.2.1 Simulation der Emissionen von Einzelmaterialien

Im ersten Schritt wurde die  $SER_A$  ( $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) für alle emittierten Substanzen aus allen Einzelmaterialien berechnet. Um das Muster der Emissionsrate zu erfassen, wurde ein empirisches Modell (exponentielles Abklingmodell erster Ordnung) mit nachfolgender mathematischer Formel verwendet:

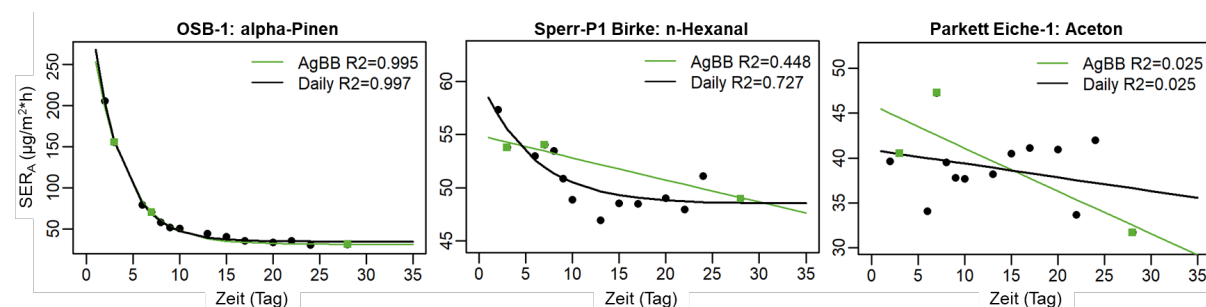
$$SER_A = a + b \cdot e^{(-t/k)} \quad (6-2)$$

wobei  $b$  der Anfangswert von  $SER_A$  bei  $t=0$  ist und  $k$  die Abklingrate bestimmt.

Nähert sich  $t$  unendlich, strebt  $SER_A$  gegen  $a$ , was als die Emissionsrate des Materials im stationären Zustand angesehen werden kann. Die im Vorhaben täglich erhobenen Messdaten wurden auf das Modell angewendet, um bestmögliche Anpassungsparameter (d. h.  $a$ ,  $b$  und  $k$ ) für die Simulation der Emissionsrate zu ermitteln.

Die meisten Emissionsmuster der Substanzen konnten mit dem exponentiellen Abklingmodell erster Ordnung gut simuliert werden (siehe **Abbildung 84** - Daily). Im Durchschnitt zeigten die simulierten Ergebnisse für 75 % der aus den geprüften Materialien freigesetzten Substanzen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Ergebnissen mit einem linearen Regressionskoeffizienten  $R^2 \geq 0,7$ . Das exponentielle Abklingmodell erster Ordnung wurde auch auf die drei Datenpunkte (3d, 7d und 28d) angewendet, die gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) vorgesehen sind. Die auf diesen drei Datenpunkten (3d, 7d, 28d) basierenden Simulationsergebnisse wiesen erwartungsgemäß eine größere Diskrepanz auf als die, die auf den Tagesdaten basierend berechnet wurden. Wie **Abbildung 84** zeigt, können die Simulationsergebnisse der Datenpunkte an Tag 3, 7 und 28 durch Datenrauschen oder mögliche systematische Fehler stark beeinflusst werden. Von den emittierten Substanzen, die mit den täglichen Messdaten gut simuliert werden konnten, ließen sich jedoch 85 % auch anhand der AgBB-Messdaten gut simulieren. Bei der Entscheidung, welche Datensätze für Simulationen herangezogen werden sollen (AgBB-Messdaten oder tägliche Messdaten), müssen jedoch die Datengenauigkeit und der Messaufwand abgewogen werden.

**Abbildung 84: Simulation der Emissionsraten einzelner Materialien auf Grundlage von (a) täglich erhobenen Messdaten (Daily) und gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) vorgesehenen Messpunkten (3,7,28d), exemplarisch dargestellt anhand von drei Materialien. Punkte: Messdaten, Linien: Simulationsergebnisse.**



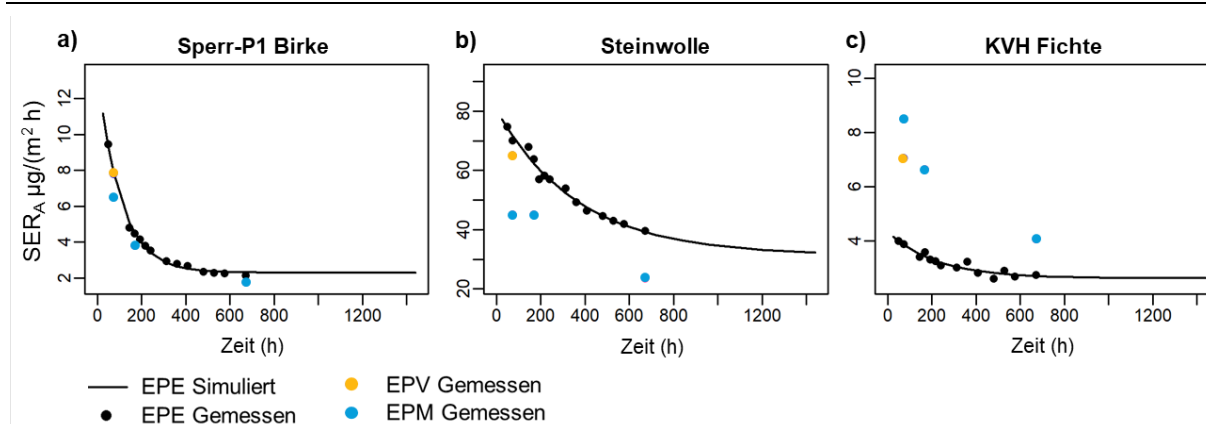
[Quelle: Fraunhofer WKI]

Eine Herausforderung bestand darin, dass die Emissionsstärke eines einzelnen Materials von vielen Faktoren beeinflusst werden kann, wie beispielsweise von dem Probenzuschnitt bei einem heterogenen Material, verschiedenen Produktionschargen und Lagerzeiten. Die Ergebnisse der Kammerprüfungen zeigten, dass die Emissionsraten von gleichen Einzelmaterialien, die für die Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien sowie für den Bau der Verbundkonstruktionen und der Modellräume wiederholt angekauft wurden, ähnlich sein können (siehe **Abbildung 85a**), für viele Materialien aber deutliche Unterschiede aufwiesen (siehe **Abbildung 85b-c**).

Angesichts dieser Abweichungen mussten die simulierten Modellparameter für einzelne Werkstoffgruppen korrigiert werden. Hierfür wurden die Messdaten der Wiederholungsmessungen, die bei erneutem Ankauf der Einzelmaterialien für den Bau von Verbundaufbauten und Modellräumen durchgeführt wurden (siehe **Abschnitt 4.2.1.2**), verwendet („Retest“).

Unter der Annahme, dass die somit aus verschiedenen Chargen eingekauften Einzelmaterialien dasselbe Abklingverhalten aufweisen (d. h.  $k$  in **Gleichung (6-2)** ist gleich), konnte die Abklingkurve der Emissionsraten der neu angekauften Materialproben durch Verschieben der Abklingkurve der jeweils älteren Materialprobe korrigiert werden, d. h. die Differenz der Emissionsrate der verschiedenen Materialchargen wurde zu  $a$  in **Gleichung (6-2)** addiert.

**Abbildung 85: Emissionsraten von Formaldehyd für die gleichen Einzelmaterialien, die für die Emissionsprüfung der Einzelmaterialien (EPE), der Verbundkonstruktionen (EPV) und für die Modellräume (EPM) gekauft wurden, dargestellt am Beispiel von Modellraum 1/Holzrahmenbau.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 6.2.2 Simulation der Emission von Verbundkonstruktionen

Mehrschichtige Materialien haben im Allgemeinen drei Arten von Zusammensetzungen: (1) trocken/trocken (z. B. Laminat + Trittschall), (2) trocken/nass (z. B. Teppich + Klebstoff) und (3) nass/trocken (z. B. Farbe + Gipskarton) (Haghighat and Huang, 2003). Zu den wichtigsten VOC-Emissionsprozessen gehören die externe Desorption und die interne Diffusion. Die externe Desorption ist ein Gasphasen-Massentransferprozess, der die Diffusion von Gasmolekülen durch die Grenzschicht in die umgebende Raumluft nahe der Materialoberfläche beschreibt. Für die internen Diffusionsprozesse müssen verschiedene Arten von Verbundstrukturen betrachtet werden.

Unter der Annahme, dass die mehrschichtige Bodenkonstruktion aus den Schichten  $m, m+1, \dots, m+n$  (von oben nach unten) zusammengesetzt ist, sind das Schema des Verbundaufbaus und die VOC-Emissionsprozesse in der Emissionsprüfkammer in **Abbildung 86** dargestellt. Hier wurde die oberste Schicht (Fußbodenbelag)  $m$  als 1. Schicht behandelt, weil die oberste Schicht aus Sicht der Prüfkammer bzw. übertragen auf den realen Innenraum direkt der Umgebungsluft ausgesetzt ist (Kontakt Materialoberfläche – Kammer-/bzw. Innenraumluft). Es konnte daher theoretisch davon ausgegangen werden, dass die oberste, direkt exponierte Schicht den größten Einfluss auf die Kammer- bzw. Raumluftkonzentration emittierter Substanzen haben würde.

Die zeitabhängige Emission der Bodenkonstruktion kann wie folgt beschrieben werden:

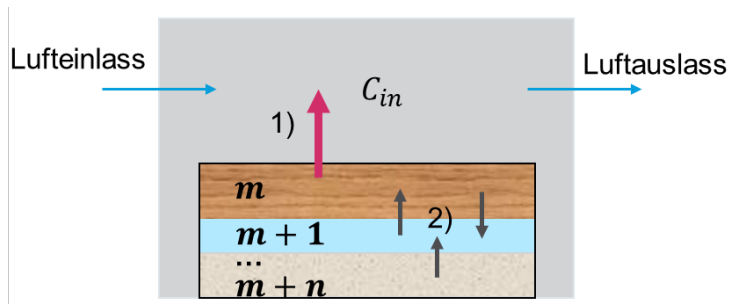
$$\frac{dC_{air}}{dt} = -\lambda \cdot C_{air(t)} + \frac{A}{V} \cdot SER_{A(t), floor} = -\lambda \cdot C_{air(t)} + \frac{A}{V} \cdot SER_{A(t), m} - \frac{A}{V} \cdot R_{s(t), m+1} + f \cdot \frac{A}{V} \cdot SER_{A(t), m+1} + n \quad (6-3)$$

wobei  $SER_{A(t), floor}$  die flächenspezifische Emissionsrate für die gesamte Bodenkonstruktion ist.

Die flächenspezifische Emissionsrate kann aus der Emission jeder Materialschicht  $SER_{A(t), m}$ ,  $SER_{A(t), m+1}$ ,  $SER_{A(t), m+n}$ , und dem Verlust an die jeweils benachbarte Schicht  $R_{s(t), m+1}$  (d. h. Absorption oder Adsorption) berechnet werden.  $f$  ist der Anteil der Emissionsrate aus der unteren Schicht. Da der Materialverbund aus einer unendlichen Anzahl an Schichten bestehen kann, wird der Beitrag der unteren Schichten als  $n$  vereinfacht. In der Simulation der Emission von Einzelschichten wurde der  $SER_A$  bereits berechnet.  $R_{s(t), m+1}$ , und  $f$  müssen noch für jeden Materialverbund berechnet werden.

Die simulierte Abklingkurve der Emissionen jeder Verbundkonstruktion wurde mit der Summe der korrigierten Emissionskurven jeder einzelnen Materialschicht verglichen. Die Differenz zwischen ihnen kann zur Berechnung der Parameter ( $f, R_{s(t), m+1}$ ) in **Gleichung (6-3)** verwendet werden.

**Abbildung 86: Schematische Darstellung einer Verbundkonstruktion (Beispiel Fußboden) und möglicher VOC-Emissionsprozesse in der Prüfkammer: 1) externe Desorption, 2) Diffusionsprozesse im Materialverbund.**



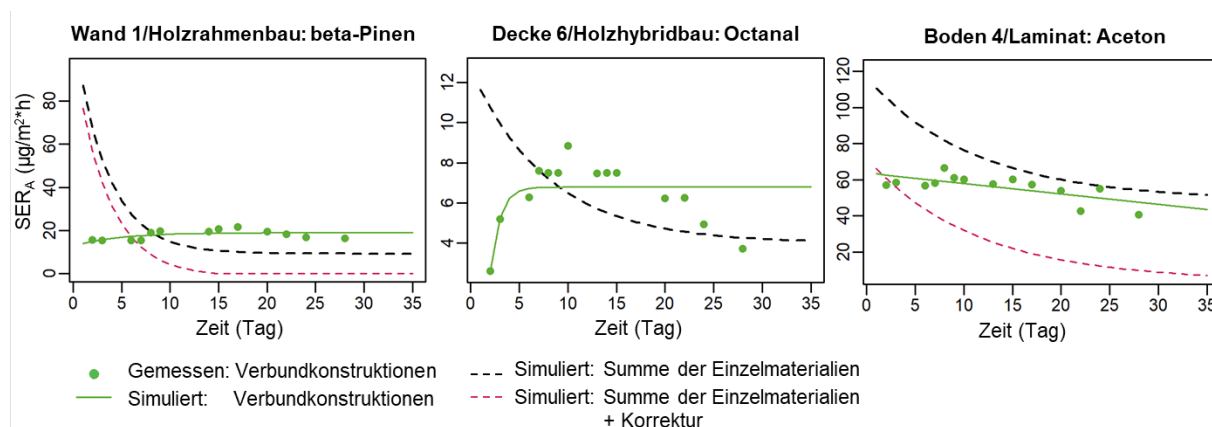
[Quelle: Fraunhofer WKI]

Das Simulationsmodell und der Korrekturanatz wurden nachfolgend auf alle Substanzen angewendet, die aus den Verbundkonstruktionen und den Einzelmaterialein („Retest“) emittiert wurden, unter Verwendung der täglich erhobenen Messdaten. Die Modellparameter ( $f$ ,  $R_s$ ) in **Gleichung (6-3)** wurden für jede aus einer Verbundkonstruktion emittierte Substanz berechnet und zur Simulation der Innenraumluft des Modellraums verwendet.

Wie in **Abschnitt 4.2.1.2** diskutiert, sind Emissionsmessdaten von Einzelmaterialein jedoch nur eingeschränkt reproduzierbar. Ebenso wie die Messergebnisse ist auch der Vergleich von Simulationen der Einzelmaterialein und der Verbundkonstruktionen mit großen Einschränkungen zu betrachten.

Wie in **Abbildung 87** dargestellt, zeigte darüber hinaus die Summe der Emissionskurven der Einzelmaterialein bei vielen Substanzen einen normalen exponentiellen Abklingverlauf, während die Emissionskurve der Verbundstrukturen ein anderes Muster zeigte. In solchen Fällen können die Verlustprozesse nicht mit **Gleichung (6-3)** quantifiziert werden. Daher konnten bei Verwendung des empirischen Ansatzes die Emissionen von Verbundkonstruktionen nicht unter Verwendung der Emissionsdaten der Einzelmaterialein simuliert werden.

**Abbildung 87: Gemessene und simulierte Emissionsraten ausgewählter Substanzen, die aus Verbundkonstruktionen und aus der Summe der in der Konstruktion verbauten Einzelmaterialein emittiert wurden.**

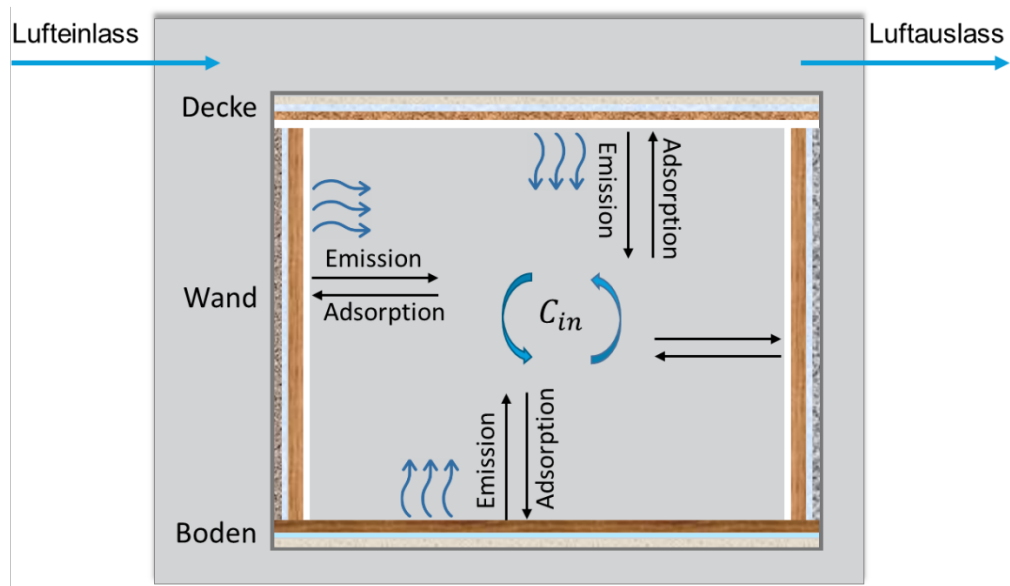


[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 6.2.3 Simulation der Luftfremdstoffkonzentration in einem Modellraum

Wie in **Abschnitt 4.2.3** beschrieben, wurden die Modellräume analog des Europäischen Referenzraums gemäß DIN EN 16516:2020-10 mit den darin definierten Oberflächen von Außen-/Innenwänden sowie Decken und Fußböden konstruiert (**Abbildung 88**). Um die Konzentration ( $C_{\text{air}}$ ) luftgetragener Verbindungen in der Atmosphäre der Emissionsprüfkammer zu simulieren, müssen neben den in **Abschnitt 6.2.1** und **Abschnitt 6.2.2** berechneten gasförmigen Emissionen aus den für die Konstruktion verwendeten Materialien auch andere wichtige Prozesse berücksichtigt werden: die Luftwechselrate  $\lambda$  ( $\text{h}^{-1}$ ) in der Prüfkammer, die aus den einzelnen oder verbundenen Materialien freigesetzten Emissionen und mögliche Senkeneffekte an den Materialoberflächen.

**Abbildung 88: Schematische Darstellung eines Modellraums und der möglichen Emissions-/Adsorptionsprozesse in der Emissionsprüfkammer.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

Die Änderungsrate der Konzentration einer bestimmten chemischen Substanz in der Prüfkammerluft kann durch **Gleichung (6-4)** beschrieben werden:

$$\frac{dC_{\text{in}}}{dt} = -\lambda \cdot C_{\text{in}(t)} + \left( \frac{A_{\text{ceiling}}}{V} \cdot \text{SER}_{A(t),\text{ceiling}} + \frac{A_{\text{walls}}}{V} \cdot \text{SER}_{A(t),\text{wall}} + \frac{A_{\text{floor}}}{V} \cdot \text{SER}_{A(t),\text{floor}} \right) - \left( \frac{A_{\text{ceiling}}}{V} \cdot R_{s(t),\text{ceiling}} + \frac{A_{\text{walls}}}{V} \cdot R_{s(t),\text{wall}} + \frac{A_{\text{floor}}}{V} \cdot R_{s(t),\text{floor}} \right) \quad (6-4)$$

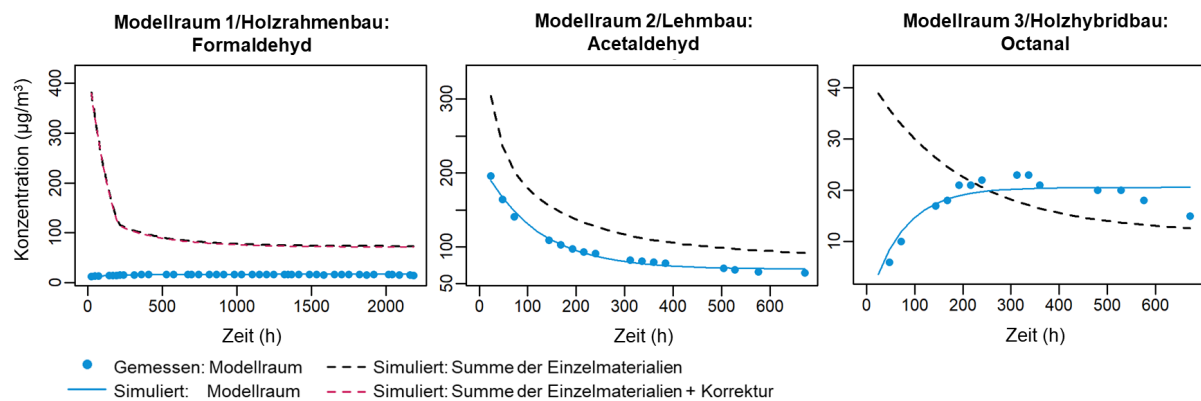
wobei  $\text{SER}_{A(t),\text{ceiling}}$ ,  $\text{SER}_{A(t),\text{wall}}$ , und  $\text{SER}_{A(t),\text{floor}}$  die flächenspezifischen Emissionsraten für die gesamte Decken-, Wand- bzw. Bodenkonstruktion sind, die mit Gleichung (6-3) berechnet werden können.  $R_{s(t),\text{ceiling}}$ ,  $R_{s(t),\text{wall}}$ , und  $R_{s(t),\text{floor}}$  beschreiben als Adsorptionsraten mögliche Senkeneffekte für die oberste Schicht der Decken-, Wand- bzw. Fußbodenkonstruktion.

Dieser empirische Modellansatz wurde auf die drei Modellräume angewendet. Die berechneten Emissionsraten der Einzelmateriale (**Abschnitt 6.2.1**) wurden zur Simulation der Raumluftkonzentration verwendet. **Abbildung 89** zeigt die in drei Modellräumen gemessenen Konzentrationen verschiedener Substanzen. Es ist zu erkennen, dass die Simulationsergebnisse der

Summe der Einzelmaterialien oft viel höher waren als die real gemessenen Innenraumluftkonzentrationen. Darüber hinaus haben alle Modellräume einige Substanzen freigesetzt, die ein von den Einzelmaterialien abweichendes Emissionsverhalten aufwiesen (siehe **Abbildung 89**).

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass, basierend auf den Emissionsdaten einzelner Materialien oder von Verbundkonstruktionen, durch die Anwendung empirischer Methoden die Konzentrationen in den Modellräumen nicht erfolgreich simuliert werden konnte.

**Abbildung 89: Konzentrationen verschiedener, in den Modellräumen freigesetzter Substanzen und deren simulierte Konzentrationen auf Grundlage von Emissionsdaten für die verbauten Einzelmaterialien.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 6.3 Entwicklung des Massentransfermodells

Die Ergebnisse in **Abschnitt 6.2** zeigen, dass mittels eines empirischen Ansatzes die Luftfremdstoffkonzentrationen in einem Modellraum auf Basis von Messdaten, die im Rahmen der Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien bzw. Verbundkonstruktionen erhoben wurden, nicht erfolgreich simuliert werden konnten. Daher wurde nachfolgend ein alternativer Ansatz mit dem Massentransfermodell verfolgt.

Wie in **Abschnitt 6.1** erwähnt, ist eine der Hauptschwierigkeiten bei der Anwendung des Massentransfermodells das Fehlen von Modellparameterdaten. Es war daher notwendig, das Modell zu vereinfachen und einen Ansatz zur Schätzung der Parameter zu entwickeln.

### 6.3.1 Modellbeschreibung und Parameterschätzung

Das Emissionsverhalten von Materialien kann durch zwei grundlegende physikalische Prozesse charakterisiert werden (Sparks et al., 1996):

- Massentransport in der Materialphase, d. h. interne Diffusion aufgrund eines Konzentrationsgradienten im Material;
- Massentransfer in der Gasphase, d. h. Oberflächenemissionen durch Konvektion oder Verdunstung aufgrund der Wechselwirkung der Materialoberfläche mit der angrenzenden Luft.

Die Dynamik der Emissionsprozesse von Bauprodukten wurde eingehend untersucht, und eine Reihe von Modellen unterschiedlicher Komplexität wurde in der Literatur bereits beschrieben und verglichen (Bodalal et al., 2000; Deng and Kim, 2004; Little et al., 1994; Liu et al., 2013; Yang et al., 2001). In dem Massentransfermodell müssen vier Kontrollfaktoren bestimmt werden: die

Anfangskonzentration eines VOC in jedem einzelnen Material ( $C_{m0}$ ), der Diffusionskoeffizient jedes Einzelmaterials ( $D_m$ ), der Material/Luft-Verteilungskoeffizient ( $K_m$ ) und der konvektive Stoffübergangskoeffizient ( $h_m$ ).

In diesem Vorhaben wurde ein Massentransfermodell auf Grundlage von Haghighat and Huang (2003) modifiziert und angewendet. Diese haben ein allgemeines, mehrschichtiges Emissionsmodell vorgeschlagen, das zur Simulation der VOC-Konzentration in der Raumluft bei komplexen Quellen- und Senkenmaterialien verwendet werden kann.

Unter folgenden Annahmen kann die VOC-Diffusion in einem einzelnen Material als eindimensionale Diffusionsgleichung ausgedrückt werden, siehe **Gleichung (6-5)**:

- ▶ die Raumluft ist gut gemischt
- ▶ das Material ist homogen mit konstantem  $D_m$
- ▶ die Anfangskonzentration der Substanz im Material ist homogen mit  $C_{m(y,0)} = C_{m0}$
- ▶ die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen VOCs, die von dem Material emittiert werden, sind vernachlässigbar.

$$\frac{\partial C_{m(y,t)}}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C_{m(y,t)}}{\partial y^2} \quad (6-5)$$

wobei  $C_m$  die VOC-Konzentration im Material ist,  $t$  die Zeit,  $y$  die vertikale Koordinate von der Unter- zur Oberseite des Materials,  $0 < y < l_m$  die Dicke des einzelnen Materials ( $l_m$ ). Das Symbol  $\partial$  bezeichnet eine partielle Ableitung, d. h. die Änderungsrate einer Funktion in Bezug auf eine Variable, während alle anderen Variablen konstant gehalten werden.

Die Gleichgewichtsbeziehung zwischen der VOC-Konzentration in der oberflächennahen Luftphase ( $C_{aes}$ ) und der VOC-Konzentration in der Materialphase kann wie folgt beschrieben werden, siehe **Gleichung (6-6)**:

$$C_{m(l_m,t)} = K_m \cdot C_{aes} \quad (6-6)$$

Die Geschwindigkeit des VOC-Massentransfers in der Grenzschicht kann gemäß **Gleichung (6-7)** ausgedrückt werden:

$$SER = -D_m \frac{\partial C_{m(l_m,t)}}{\partial y} = h_m \cdot (C_{aes} - C_{in}) \quad (6-7)$$

Die Prozesse der VOC-Senkung durch ein Material sind den Prozessen der VOC-Emission aus einem Material entgegengesetzt. **Gleichung (6-7)** kann auch verwendet werden, um die VOC-Senkungsrate von der Luft auf das Material zu berechnen.

Die gesamte VOC-Massenbilanz in der Raumluft kann wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{\partial C_{air(t)}}{\partial t} = -\lambda C_{air} + \frac{A_m}{V} h_m \left( \frac{C_{m(l,t)}}{K_m} - C_{air} \right) - \frac{A_{sink}}{V} h_{sink} \left( C_{air} - \frac{C_{sink(l,t)}}{K_{sink}} \right) \quad (6-8)$$

wobei  $A_m$  die Oberfläche des Emissionsmaterials und  $A_{sink}$  die Oberfläche des Senkenmaterials ist.  $C_{sink}$  ist die VOC-Konzentration im Senkenmaterial.  $h_{sink}$  und  $K_{sink}$  sind der konvektive Massentransferkoeffizient und der Material-/Luft-Verteilungskoeffizient des Senkenmaterials.

Es wurde eine Finite-Differenzen-Methode verwendet, um die maßgeblichen Gleichungen mit den zugehörigen Anfangs- und Randbedingungen zu lösen. Die eindimensionale partielle Differentialgleichung wurde zunächst als „Ordinary Differential Equation“ (ODE) mit dem R-Paket *ReacTran* Version 1.4.3.1 geschrieben (Soetaert and Meysman, 2010). Anschließend wurde die ODE mit dem R-Paket *deSolve* Version 1.40 gelöst (Soetaert et al., 2010).

Um die Modellparameter für alle in diesem Projekt verwendeten Einzelmaterialien abzuschätzen, wurden zunächst Literaturdaten gesammelt und zusammengefasst. Daten zu Materialien wie Kalziumsilikat, Decken, Gipskartonplatten, OSB-Platten, Sperrholz, Spanplatten, Teppichen, Vinylböden und gestrichenen Gipskartonplatten sind in der Literatur verfügbar. Angesichts der großen Bandbreite der in diesem Projekt verwendeten Materialien ist es daher notwendig, die Kategorie der Materialtypen zu vereinfachen. Trockenbaustoffe sind im Allgemeinen poröse Materialien, sodass das Plattenmaterial als dieselbe Kategorie behandelt werden kann. Eine grobe Schätzung der Modellparameter wurde zunächst auf Grundlage von Literaturdaten (d. h. in derselben Größenordnung) vorgenommen.

Ein von Liu et al. (2021) publizierter Ansatz wurde entwickelt, um Modellparameter anhand von VOC-Emissionsdaten aus standardmäßigen Tests in kleinen Prüfkammern abzuschätzen. Dieser Ansatz wurde im Vorhaben vereinfacht angewendet. Die Emissionsrate  $SE_{RA}$  der Einzelmaterialien in der Prüfkammer kann anhand des in **Abschnitt 6.2.1** beschriebenen empirischen Emissionsmodells berechnet werden. Da die anfängliche Konzentration  $C_{m0}$  die Form der Emissionskurve nicht beeinflusst (Yang et al., 2001), wurde  $C_{m0}$  angepasst, um der Emissionsrate verschiedener Materialchargen zu entsprechen.

### 6.3.2 Modellvalidierung

Die Validierung des Massentransfermodells erfolgte anhand eines Einzelmaterials und einer Verbundkonstruktion. Hierfür wurde auf vorhandene Literatur zurückgegriffen und von Haghighat and Huang (2003) publizierte Daten für die Modellparameter und Emissionsdaten verwendet. Haghighat and Huang (2003) beschrieben die Freisetzung von Benzol aus Sperrholz. Aufgrund des kompletten Datensatzes wurde dieses Beispiel zur Modellvalidierung herangezogen, obwohl Benzol üblicherweise nicht von Holzwerkstoffplatten freigesetzt wird.

Die Benzolkonzentration im Sperrholz wurde mit einer Anfangskonzentration  $C_{m0}$  von  $1,0 \times 10^7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  simuliert. Die Abmessungen des Kammerraums betrugen  $3,0 \times 3,0 \times 2,5 \text{ m}^3$  bei einer Luftwechselrate von  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Die Simulationsparameter für Benzol lauteten wie folgt:

$$h_m = 2,45 \times 10^{-4} \text{ (m s}^{-1}\text{)};$$

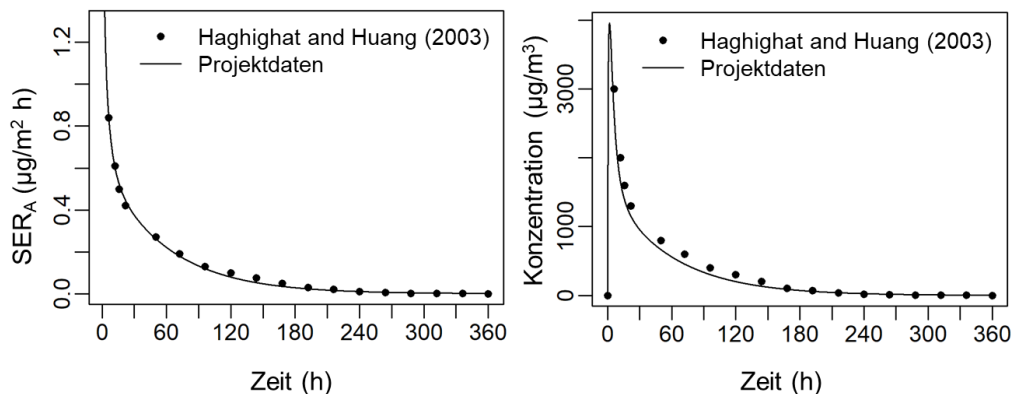
$$D_m = 4,92 \times 10^{-10} \text{ (m}^2 \text{s}^{-1}\text{)};$$

$$K_m = 184 \text{ (-)};$$

$$l_m = 1,6 \times 10^{-2} \text{ (m)}.$$

Wie in **Abbildung 90** dargestellt, stimmten die simulierten Ergebnisse gut mit den Daten aus der Arbeit von Haghighat und Huang (2003) überein.

**Abbildung 90:** Simulierte Emissionsraten und -konzentrationen von Benzol, das von einem Sperrholz emittiert wurde. Vergleich der Simulationsergebnisse anhand des in diesem Vorhaben entwickelten Massentransfermodells mit dem Modell gemäß Haghighat und Huang (2003).



[Quelle: Fraunhofer WKI]

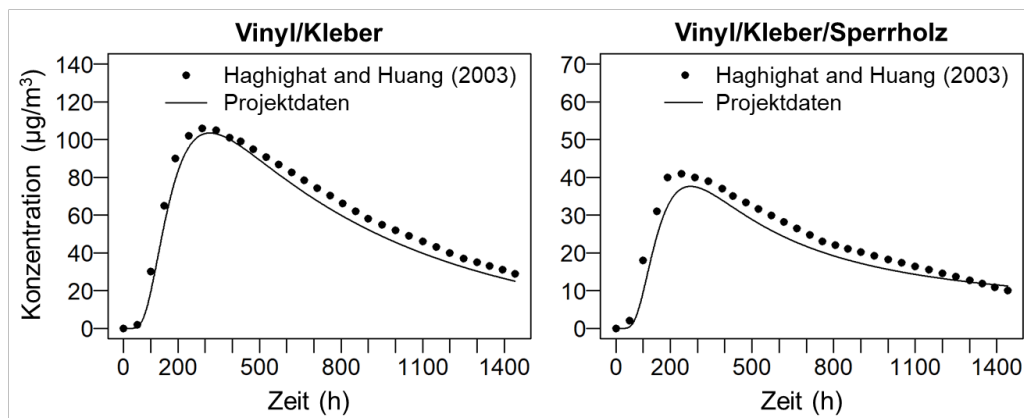
Als Beispiel für die Simulation des Emissionsverhaltens von Verbundkonstruktionen wurden die Emissionsdaten von Dekan genutzt, das aus einem dreischichtigen Verbundbodenaufbau, Vinyl/Kleber/Sperrholz, freigesetzt wurde (Haghighat und Huang, 2003). In diesem Beispiel wurde Dekan nur aus der mittleren Schicht (Kleber) mit einer Anfangskonzentration  $C_{m0}$  von  $1,0 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  emittiert. Die Abmessungen des Kammerraums betrugen  $3,0 \times 3,0 \times 2,5 \text{ m}^3$  mit einer Luftwechselrate von  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Die Bodenkonstruktion hatte eine Gesamtdicke von  $0,0197 \text{ m}$ . Die Modellparameter der einzelnen Schichten sind in **Tabelle 33** aufgeführt.

**Abbildung 91** zeigt die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Literaturdaten. In diesem Simulationsbeispiel wurde zunächst die Dekan-Emission aus den beiden obersten Schichten (Vinyl/Kleber) simuliert. Die Höchstkonzentration lag dabei bei ca.  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Bei der Simulation der dreischichtigen Struktur lag die maximale Konzentration mit ca.  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  deutlich niedriger. Haghighat und Huang (2003) führten dies auf einen Subtraktionseffekt des Sperrholzes als untere Schicht zurück. In dieser dreischichtigen Struktur diffundiert Dekan aufgrund von Konzentrationsunterschieden aus der mittleren Schicht in die oberen und unteren Schichten. Infolgedessen nimmt die Konzentration von Dekan im Sperrholz und im Vinyl zu und im Klebstoff ab, bis ein Gleichgewicht erreicht wird. Der Subtraktionseffekt konnte mit dem im vorliegenden Forschungsvorhaben entwickelten Massentransfermodell erfasst werden. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit Literaturdaten in Haghighat und Huang (2003).

**Tabelle 33:** Modellparameter für die Simulation der Emission von Dekan aus einer dreischichtigen Bodenkonstruktion: Vinyl/Kleber/Plattenholz. Die Daten wurden von Haghighat und Huang (2003) übernommen.

| Material                                  | Vinyl                  | Kleber                 | Sperrholz              |
|-------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $h_m \text{ (m s}^{-1}\text{)}$           | $1.28 \times 10^{-4}$  | $2.45 \times 10^{-4}$  | $2.45 \times 10^{-4}$  |
| $D_m \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ | $1.28 \times 10^{-11}$ | $2.92 \times 10^{-10}$ | $2.09 \times 10^{-12}$ |
| $K_m \text{ (-)}$                         | $6.95 \times 10^3$     | -                      | $1.31 \times 10^4$     |
| $l_m \text{ (m)}$                         | $1.60 \times 10^{-2}$  | $0.70 \times 10^{-3}$  | $0.30 \times 10^{-2}$  |

**Abbildung 91: Simulierte Konzentration von Dekan, freigesetzt aus einer zwei- und dreischichtigen Bodenkonstruktion. Vergleich der Simulationen anhand des in diesem Vorhaben entwickelten Massentransfermodells mit dem Modell gemäß Haghighat und Huang (2003).**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 6.3.3 Simulation der Emissionen von Einzelmaterialeien

Das validierte Modell wurde auf die in diesem Projekt erhobenen Kammermesswerte angewendet, zunächst auf die Emissionsdaten für die untersuchten Einzelmaterialeien.

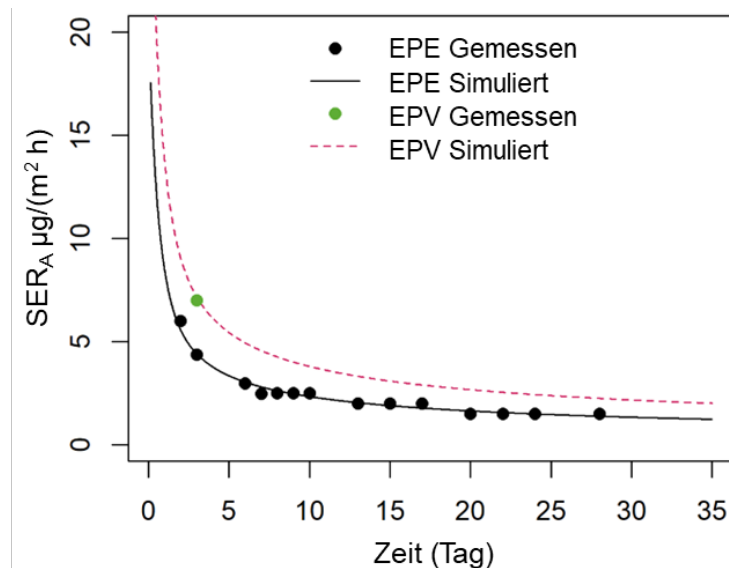
Als Beispiel für die Simulation diente die Freisetzung von beta-Pinen aus der Holzfaserdämmung (Holzfaser/120). Details zur Emissionsprüfung gemäß AgBB-Bewertungsschema (06/2021) siehe **Abschnitt 4.1.1**. Die Prüfung erfolgte in einer 1m<sup>3</sup>- Emissionsprüfkammer bei einem Luftwechsel von  $\lambda=0,7\text{ h}^{-1}$ . Die Materialstärke lag bei  $l_m = 0,12\text{ m}$ .

Da in der Literatur keine Modellparameterdaten für eine Holzfaserdämmung verfügbar waren, wurden exemplarisch Datensätze für Holzwerkstoffe, wie beispielsweise OSB, Spanplatten und Sperrholz, herangezogen. Die verfügbaren Daten zeigen, dass die  $D_m$  im Bereich von  $10^{-11}$  bis  $10^{-10}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$  und  $C_{m0}$  in der Größenordnung von  $10^7\text{ µg/m}^3$  für OSB, Spanplatten und Sperrholz lagen (Liu et al., 2021).

Basierend auf diesen Bereich wurden die anfänglichen Konzentrationen von beta-Pinen  $C_{m0}$  und der Diffusionskoeffizient  $D_m$  verwendet und angepasst, um den Wert zu finden, der am besten zu den Daten der Emissionsprüfung von Einzelmaterialeien (EPE) für Holzfaser/120 passte. Die beste Anpassung der simulierten Emissionsrate mit den gemessenen Daten wurde bei  $C_{m0} = 3,0 \times 10^5\text{ µg/m}^3$  und  $D_m = 1,5 \times 10^{-11}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$  erreicht (siehe **Abbildung 92**).

Bei der Emissionsprüfung von Verbundkonstruktionen (EPV) wurde die Probe Holzfaser/120 erneut angekauft und wiederum auf Emissionen geprüft, allerdings nur über einen Zeitraum von 3 Tagen. Die an Tag 3 gemessene Konzentration von beta-Pinen war etwas höher im Vergleich zur ersten Messung dieses Materials (siehe **Abbildung 92**). Daher wurde  $C_{m0}$  höher angesetzt ( $4,5 \times 10^5\text{ µg/m}^3$ ), um die von der Probe Holzfaser/120 im EPV freigesetzte Konzentration zu berücksichtigen. Die korrigierte Emissionskurve ist in **Abbildung 92** dargestellt.

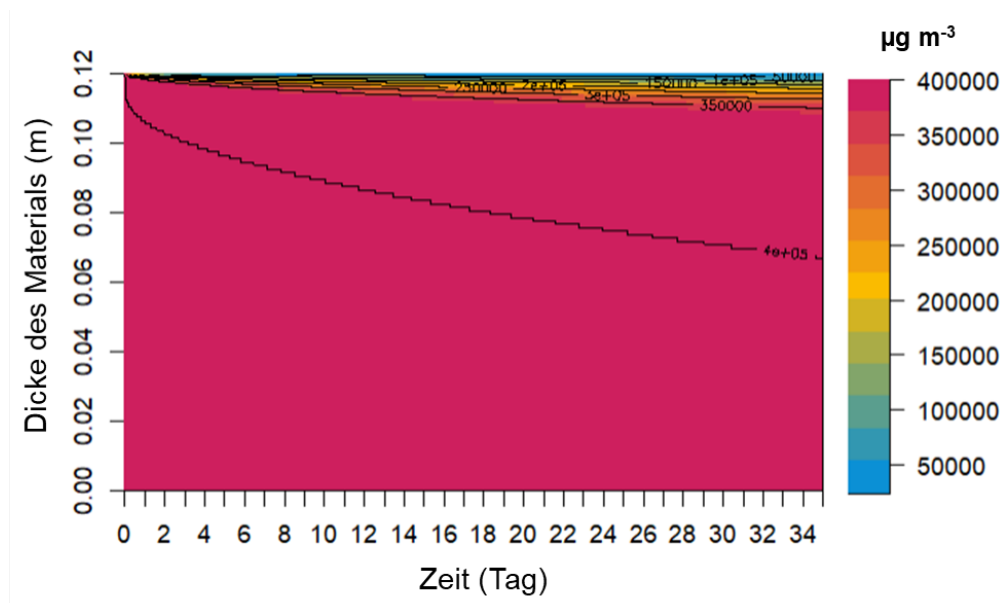
**Abbildung 92: Flächenspezifische Emissionsrate von beta-Pinen, freigesetzt von der Probe Holzfaser/120. Simulation auf Grundlage der Messdaten für die Einzelmaterialeinrichtungen (EPE) und für den Bau der Verbundkonstruktion (EPV) angekauft wurden.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 93** zeigt die Verteilung der beta-Pinen-Konzentration an verschiedenen Stellen in der Probe Holzfaser/120 über 28 Tage gemäß des Massentransfermodells (beschrieben in **Ab-schnitt 6.3.1**) und der geschätzten Modellparameter ( $C_0$  und  $D_m$ ). Sie zeigt, dass auch nach 28 Tagen nur ein kleiner Teil von beta-Pinen aus dem oberen Bereich des Materials an die Kammerluft abgegeben wurde. Die Konzentration von beta-Pinen im unteren Bereich des Materials veränderte sich nicht ( $3,0 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Material einen niedrigen Diffusionskoeffizienten hat und relativ dick ist.

**Abbildung 93: Konzentrationsverteilung von beta-Pinen in der Probe Holzfaser/120.**



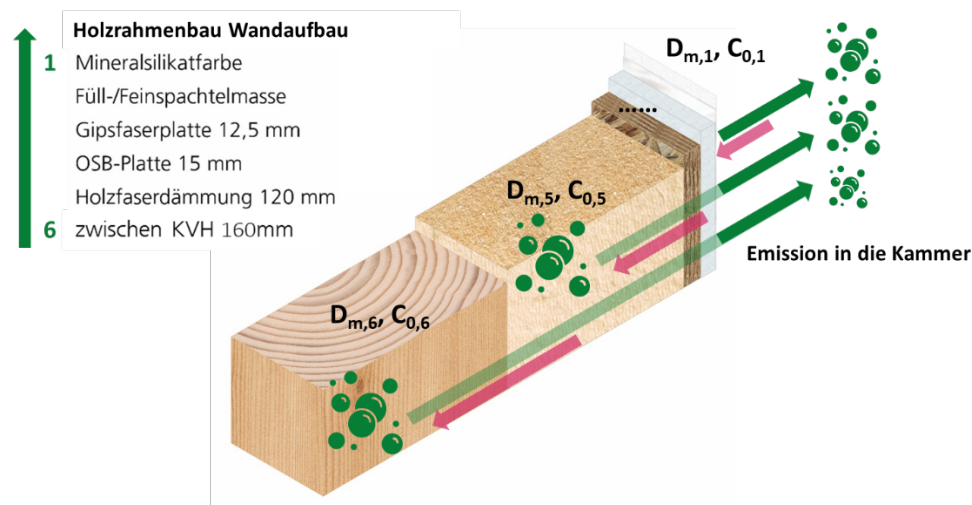
[Quelle: Fraunhofer WKI]

#### 6.3.4 Simulation der Emissionen aus Verbundkonstruktionen

Bei der Simulation des Emissionsverhaltens von Verbundkonstruktionen müssen die Diffusionsprozesse in und zwischen den einzelnen Materialschichten berücksichtigt werden. Als Beispiel wurde die Freisetzung von beta-Pinen aus der Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau simuliert, die aus sechs Materialschichten bestand (siehe **Abbildung 94**). Wie in **Abbildung 87** in **Abschnitt 6.2.2** gezeigt, konnte die Emission von beta-Pinen mit Hilfe des empirischen Ansatzes nicht gut simuliert werden, da die Kurven der Emissionsraten der Einzelmaterialeien einen anderen Trend als die der Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau aufwies. Daher wurde als Alternative das Massentransfermodell herangezogen. In den Emissionsprüfungen der Einzelmaterialeien wurde beta-Pinen als Emission der untersten drei konstruktiven Schichten detektiert: OSB-1, Holzfaser/120 und KVH/Fichte. In einem ersten Schritt wurden die Parameter  $D_m$  und  $C_{m0}$  für jedes einzelne Material geschätzt, um die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Daten zu erhalten (siehe **Abbildung 95**). Anhand dieser Parameter konnten die Diffusionsprozesse in und zwischen den einzelnen Schichten berechnet werden. **Abbildung 96** zeigt die Konzentrationsänderung von beta-Pinen innerhalb des Wandaufbaus (Wand 1/Holzrahmenbau) aufgrund von Diffusionsprozessen in und zwischen den einzelnen Materialschichten. Die Emissionsrate der Wandkonstruktion kann daher als Konzentrationsänderungsrate im Material berechnet werden. Mit dem Massentransfermodell zeigten die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Messergebnissen eine gute Übereinstimmung (siehe **Abbildung 97**).

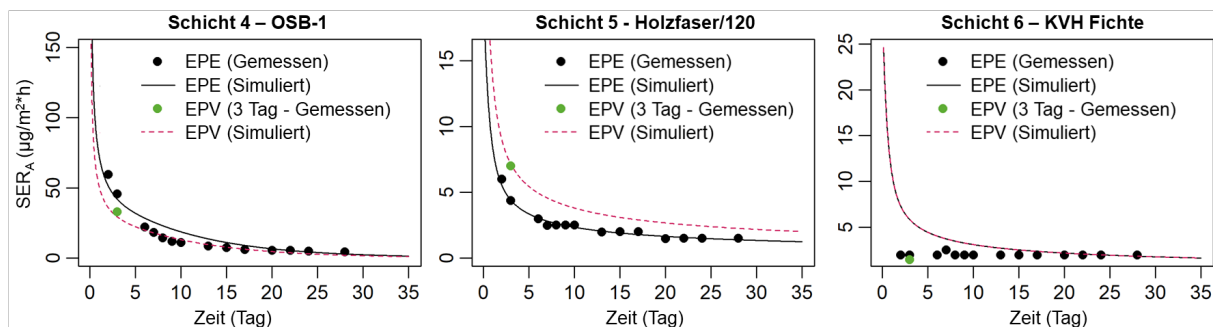
Als weiteres Simulationsbeispiel wurde die Freisetzung von Octanal aus der Konstruktion Decke 6/Holzhybridbau gewählt, die aus sieben Materialschichten bestand (siehe **Tabelle 6**). Ähnlich zu dem vorherigen Beispiel (Wand 1/Holzrahmenbau) zeigten die Emissionsratenverläufe der Einzelmaterialeien einen anderen Trend als die Emissionsratenverläufe der Deckenkonstruktion (siehe **Abbildung 87**). Gemäß den Ergebnissen aus den Emissionsprüfungen der Einzelmaterialeien wurde die Substanz Octanal nur aus der vierten Konstruktionsschicht, einer OSB-Platte (OSB-3), emittiert. Die mittels des Massentransfermodells erzielten Simulationsergebnisse sind in **Abbildung 98** dargestellt, wobei die simulierte Octanal-Emissionsrate gut mit den Messwerten übereinstimmte.

**Abbildung 94: Emissions- und Verlustprozesse in der Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau sowie Diffusionsprozesse in und zwischen den einzelnen Materialschichten.**



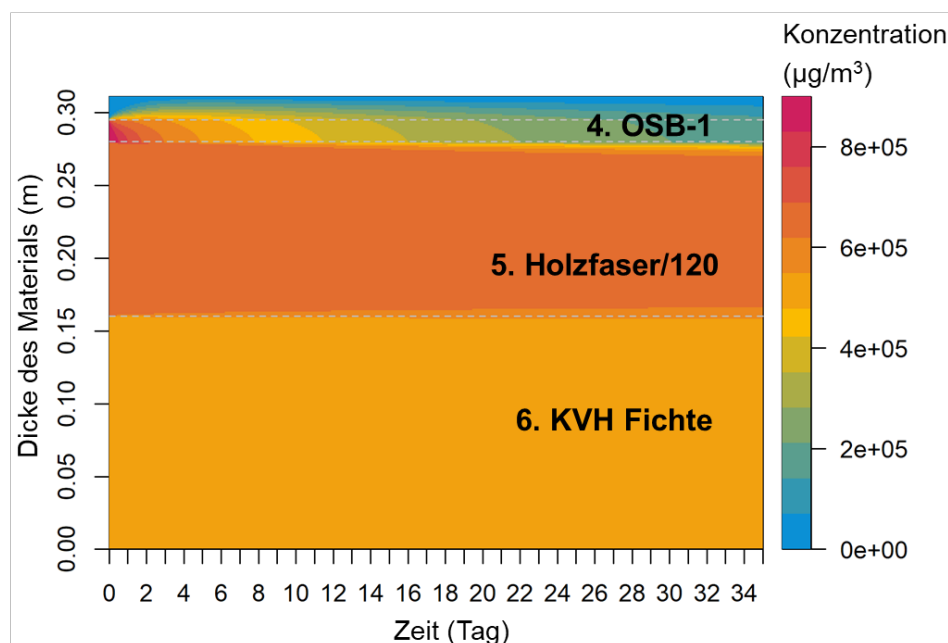
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 95: Emissionsraten von beta-Pinen, Simulation auf Grundlage der Messdaten für die Einzelmaterialien, die für die Emissionsprüfungen der Einzelmaterialien (EPE) und für den Bau der Verbundkonstruktion (EPV) - Wand 1/Holzrahmenbau - angekauft wurden.**



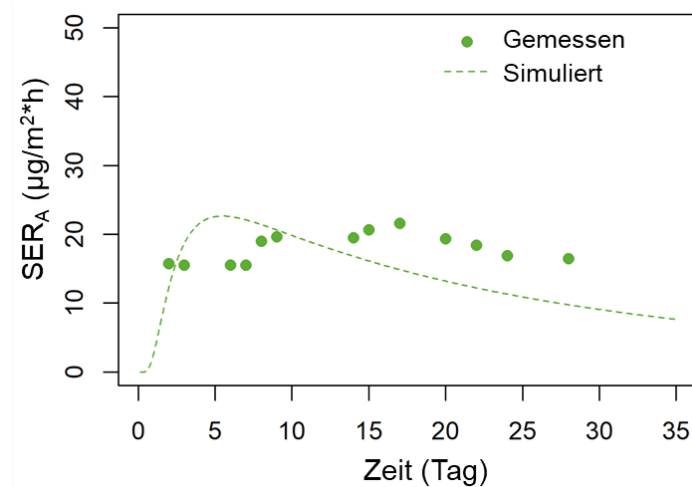
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 96: Diffusion von beta-Pinen innerhalb der Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau.**



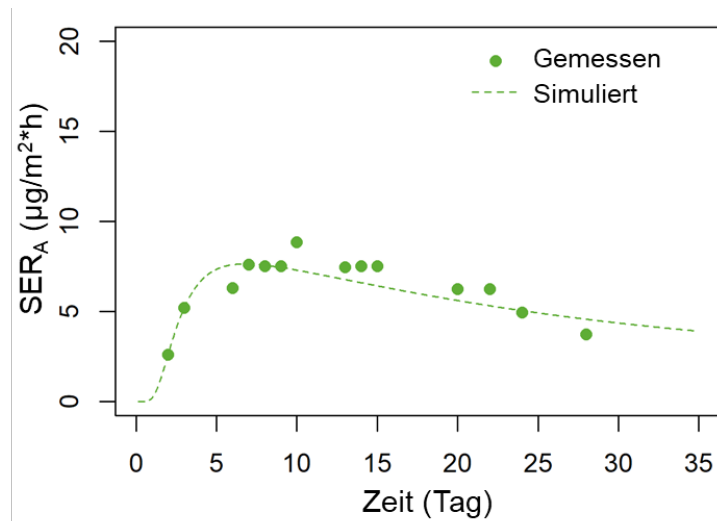
[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 97: Gemessene und simulierte flächenspezifische Emissionsraten von beta-Pinen, freigesetzt von der Konstruktion Wand 1/Holzrahmenbau. Die Simulation erfolgte auf Basis des Massentransfermodells.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 98: Gemessene und simulierte flächenspezifische Emissionsraten von Octanal, freigesetzt von der Konstruktion Decke 6/Holzhybridbau. Die Simulation erfolgte auf Basis des Massentransfermodells.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

### 6.3.5 Simulation der Emissionen im Modellraum

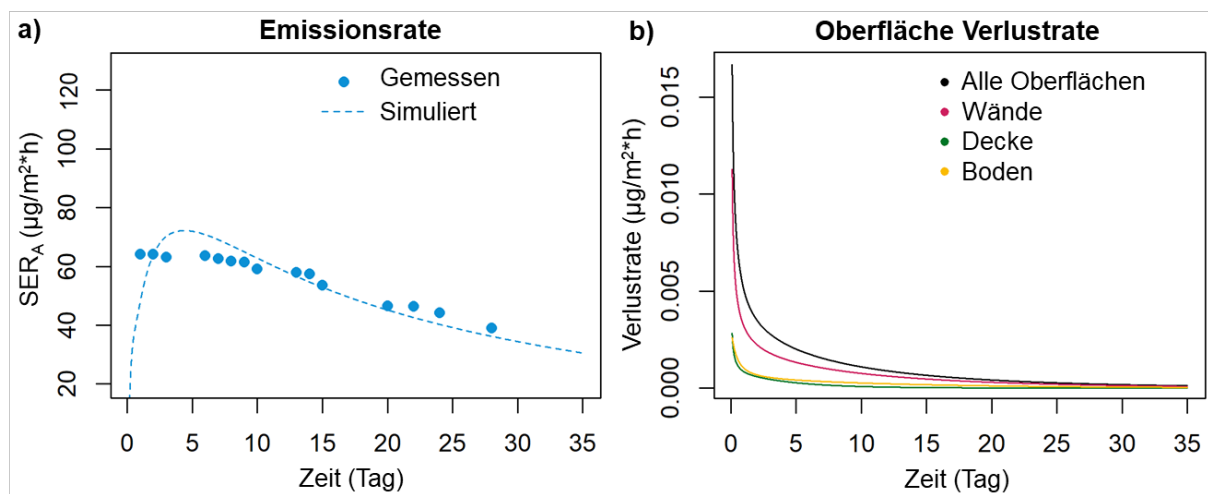
Die Ergebnisse zeigen, dass das Massentransfermodell bei der Simulation von Emissionen aus Einzelmaterialien und Verbundkonstruktionen gut funktionierte. Das Modell wurde daher auch herangezogen, um die Emissionsraten in den Modellräumen zu simulieren.

Zu den charakteristischen Substanzen, die von Holzwerkstoffen emittiert werden, zählt alpha-Pinen. Wie erwartet, setzte Modellraum 3/Holzhybridbau hohe Konzentrationen an alpha-Pinen frei. Dieser Modellraum wurde aus insgesamt 13 verschiedenen Einzelmaterialien konstruiert, wobei alpha-Pinen nur von den Materialien OSB-3 und dem KVH/160 freigesetzt wurde (siehe **Abbildung 53**). Der Werkstoff OSB-3 wurde als 4. Schicht sowohl in den Konstruktionen Wand 3/Holzhybridbau als auch in der Decke 6/Holzhybridbau verwendet. Das Material KVH/160

wurde als 6. und 7. Schicht in den Konstruktionen Wand 3/Holzhybridbau und Decke 6/Holzhybridbau verbaut.

Die Simulation der Emissionen von Wand-, Decken- und Bodenkonstruktionen wurde wie in **Abschnitt 6.3.4** beschrieben durchgeführt. Nachfolgend wurden die für alpha-Pinen erzielten Emissionsraten aufsummiert. Darüber hinaus wurde die Verlustrate von alpha-Pinen an den Oberflächen von Wänden, Decken und Böden gemäß **Gleichung (6-7)** berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die simulierten Emissionsraten von alpha-Pinen in Modellraum 3/Holzhybridbau gut mit den erhobenen Messdaten übereinstimmten (siehe **Abbildung 99a**). Die simulierten Verlustraten von alpha-Pinen an Wand-, Decken- und Bodenflächen zeigt **Abbildung 99b**, wobei die Werte deutlich niedriger waren als im Vergleich zu den simulierten Emissionsraten.

**Abbildung 99: Modellraum 3/Holzhybridbau. a) Gemessene und simulierte flächenspezifische Emissionsrate von alpha-Pinen aus den Materialien. b) Simulierte Verlustrate von alpha-Pinen an Wand-, Decken- und Bodenflächen.**

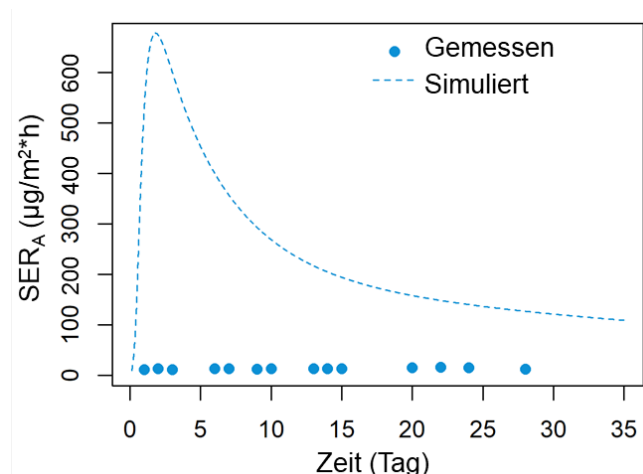


[Quelle: Fraunhofer WKI]

Allerdings konnte das Massentransfermodell nicht immer erfolgreich auf die Simulation der Emissionsraten aller Substanzen innerhalb eines Modellraums angewendet werden. Beispielfähig ist Essigsäure zu nennen, deren Emissionsrate in Modellraum 3/Holzhybridbau simuliert wurde. Essigsäure wurde aus den drei Einzelmaterialelementen OSB-3, KVH/160 und Dispersions-K emittiert. OSB-3 wurde als 4. Schicht in den Konstruktionen Wand 3/Holzhybridbau und Decke 6/Holzhybridbau verwendet. KVH/160 wurde als 6. und 7. Schicht in den Konstruktionen Wand 3/Holzhybridbau und Decke 6/Holzhybridbau verbaut und Dispersions-K wurde als 2. Schicht in der Konstruktion 6/Nadelfalz eingesetzt. In diesem Fall waren die simulierten Ergebnisse für die flächenspezifische Emissionsrate von Essigsäure deutlich höher als die Messwerte, wie in **Abbildung 100** dargestellt.

Eine Ursache für die Abweichung könnte darin liegen, dass die Emissionsprüfung der Wandkonstruktion unmittelbar nach dem Aufbringen der Wandfarbe begann, während die Wandfarbe für die Emissionsprüfung als Einzelmaterialelement über 3 Tage vorkonditioniert (getrocknet) wurde. Der Diffusionskoeffizient kann sich zwischen feuchtem und trockenem Zustand stark unterscheiden (Farajollahi et al., 2009; Radulescu-Bouilly et al., 2006). Außerdem ist Essigsäure wasserlöslich, sodass bei feuchtem Material eine geringere Menge an Essigsäure freigesetzt wird.

**Abbildung 100: Modellraum 3/Holzhybridbau. Gemessene und simulierte flächenspezifische Emissionsrate von Essigsäure aus den Materialien.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

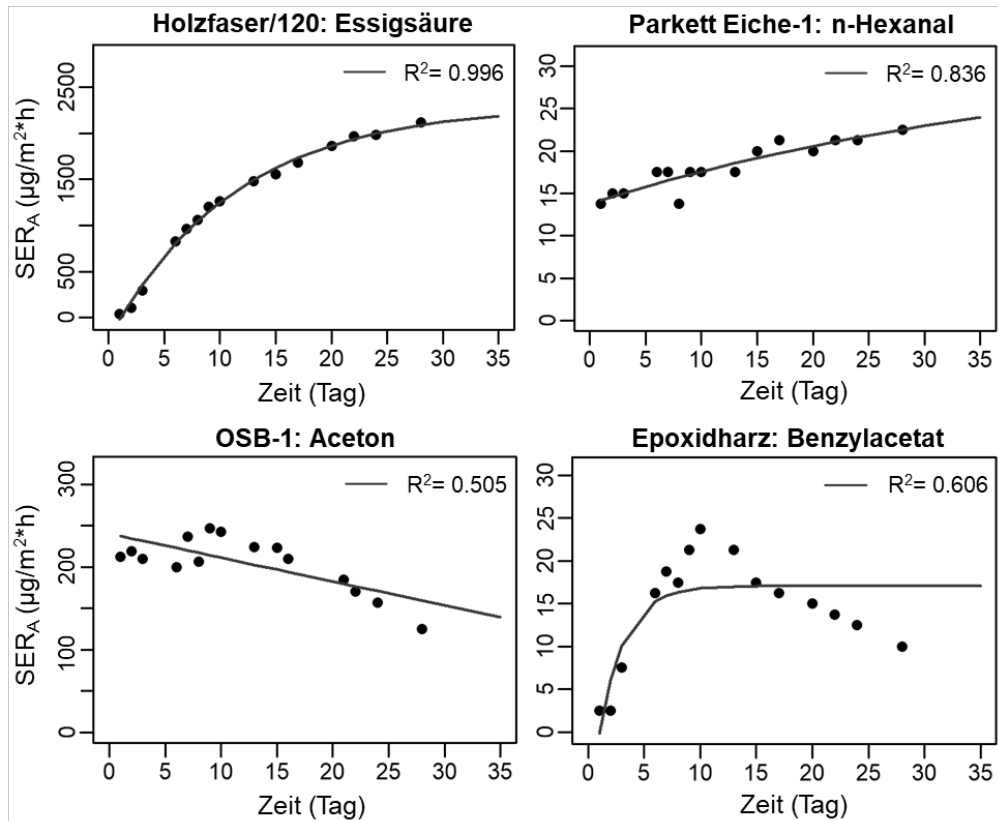
### 6.3.6 Grenzen des Simulationsmodells

Obwohl das Massentransfermodell genaue Simulationsergebnisse für bestimmte Emittenten liefern konnte, unterlag die Verwendung dieses Modells angesichts der im Vorhaben erzielten Ergebnisse gewissen Einschränkungen.

Das Massentransfermodell geht davon aus, dass das einzelne Material homogen ist. Dies gilt allerdings nicht für alle Werkstoffe. Dies könnte erklären, warum die flächenspezifischen Emissionsraten einiger Substanzen, die aus einzelnen Materialien freigesetzt wurden, keine typischen Abklingkurven aufwiesen, wie beispielhaft in **Abbildung 101** gezeigt. Wenn ein Material nicht homogen ist, kann dies grundsätzlich auch zu unterschiedlichen Anfangskonzentrationen ( $C_{m0}$ ) in verschiedenen Bereichen desselben Materials führen. Dies könnte erklären, warum die Konzentration einer Substanz, die aus einer Verbundkonstruktion emittiert wurde, manchmal höher war als die Summe der durch die Einzelmateriale freigesetzten Konzentrationen (siehe z. B. **Abbildung 102**).

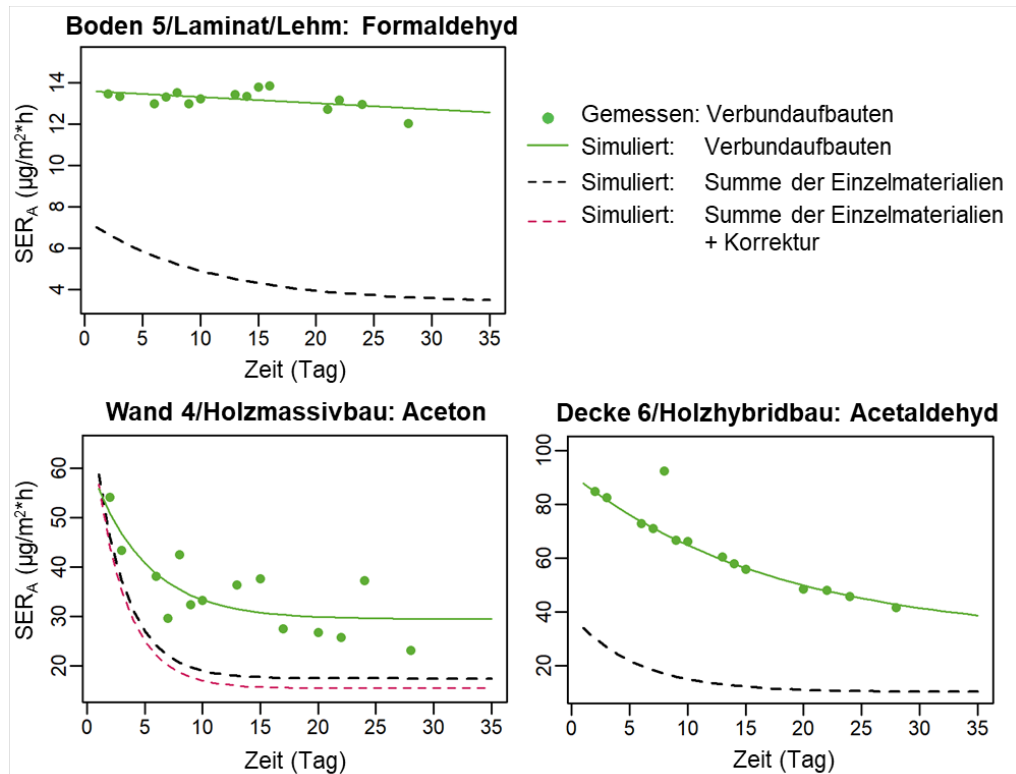
Darüber hinaus berücksichtigt das Massentransfermodell bei der Simulation der Materialemissionen nur physikalische Diffusionsprozesse, es können aber auch andere Prozesse auftreten. Wie in den Simulationsergebnissen zu **Abbildung 100** beschrieben, begann die Emissionsprüfung bei einigen Wand- und Deckenkonstruktionen unmittelbar nach dem Auftragen der Wandfarbe, wo der Feuchtegehalt bestimmte Substanzen (z. B. bestimmte Säuren, Alkohole und Ketone) hätte lösen und verdampfen können. Diese Prozesse müssen bei der zukünftigen Modellentwicklung berücksichtigt werden.

**Abbildung 101: Beispiele für Substanzen, die von Einzelmaterialien freigesetzt wurden und keinen typischen exponentielle Abklingkurve aufwiesen. Punkte: Messdaten, Linien: Simulationsergebnisse.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

**Abbildung 102: Beispiele für Substanzen, deren flächenspezifische Emissionsraten bei Freisetzung aus Verbundkonstruktionen höher waren als die aufsummierten Emissionsraten der verbauten Einzelmateriale.**



[Quelle: Fraunhofer WKI]

## 7 Diskussion und Zusammenfassung

Basierend auf den in diesem Vorhaben untersuchten Einzelmaterialien, den ausgewählten Verbundkonstruktionen und Modellräumen hat sich in der Zusammenschau des jeweiligen Emissionsverhaltens gezeigt, dass

- ▶ der Verbau hochemittierender Materialien nicht zwangsläufig zu hochemittierenden Konstruktionen (Verbundaufbauten) führte,
- ▶ Modellräume eine niedrigere Emissionsquelle als die Verbundkonstruktionen, aus denen der Raum besteht, sein können,
- ▶ die Verbundkonstruktionen wiederum eine niedrigere Emissionsquelle als die (Summe der) Einzelmaterialien sein können, aus denen sie gebaut wurden.

Diese Schlussfolgerungen sind auf die im Vorhaben untersuchten Konstruktionen begrenzt. Ob sie auch auf andere Konstruktionstypen übertragen werden können, sollte Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein.

Unabhängig von den erzielten Ergebnissen sind regelmäßige Emissionsprüfungen von Bauprodukten und Werkstoffen seitens der herstellenden Unternehmen unverändert ein wichtiges und unverzichtbares Werkzeug, um Informationen über das Emissionsverhalten dieser Materialien sowie beeinflussender (Umgebungs-)Faktoren und damit wichtige Erkenntnisse für die werkseigene Qualitätskontrolle und fortwährende Produktverbesserungen zu erhalten. Darüber hinaus liefern möglichst aktuell vorliegende Emissionsprüfergebnisse wichtige Hinweise auf die potentielle(n) Emissionsquelle(n) im Beschwerdefall.

Angesichts der oben getroffenen Kernaussagen ist ein „einfacher“ Rückschluss aus dem Emissionsverhalten von einzelnen Materialien auf die Quellstärke daraus konstruierter Aufbauten bzw. Modellräume nicht möglich. Vielmehr hat sich angesichts der Ergebnisse gezeigt, dass

- ▶ die „Vorhersage“ der Emissionseigenschaften der untersuchten Verbundkonstruktionen und Modellräume schwierig war, insbesondere hinsichtlich vielschichtiger Verbundkonstruktionen mit mehr als drei Materialschichten,
- ▶ die oberste, zuletzt verbaute Materialschicht nicht zwangsläufig das Emissionsverhalten der gesamten Konstruktion bestimmte, mit Ausnahme der untersuchten Fußbodenkonstruktionen,
- ▶ die Tatsache, dass Verbundkonstruktionen und Modellräume deutlich niedrigere Emissionen zeigten als von den verbauten Einzelmaterialien in Summe zu erwarten gewesen wäre, deutete auf mögliche Senkeneffekte hin. Hinsichtlich Modellraum 1/Holzrahmenbau wären daher weiterführende Untersuchungen zum Zusammenspiel Gipsfaserplatte und Holzfaserdämmung sinnvoll, hinsichtlich Modellraum 2/Lehmbau zum Zusammenspiel Lehmprodukte und Holzfaserdämmung. Im Rahmen von Folgeuntersuchungen sollte geklärt werden, ob (a) tatsächlich Senkeneffekte bestehen und (b) wie lange diese anhalten bzw. wann die aus der Dämmebene freigesetzten Verbindungen durchbrechen werden.

Analog zu den Emissionsergebnissen ist auch bei der Gegenüberstellung der empfundenen Intensität (EI) von Einzelmaterialien - Verbundkonstruktionen – Modellräumen zu erkennen, dass Einzelmaterialien mit einem weiten geruchsaktiven Substanzspektrum nicht zwingend zu sensorisch deutlich bis stark wahrzunehmenden Verbundaufbauten oder Modellräumen führten. Auch bei den sensorischen Parametern könnten mögliche Senkeneffekte von Bauprodukten eine Rolle

spielen. Ausnahmen gab es lediglich hinsichtlich der Verbundkonstruktionen Boden 6/Nadelfilz und Decke 6/Holzhybridbau. Auf Basis der erhobenen Datensätze ist anzunehmen, dass die Materialien Dispersionsklebstoff (Dispersions-K) und Gipsfaserplatte (GF) einen sensorischen Effekt auf die dazugehörigen Verbundkonstruktionen (Decke 6, Boden 6) haben könnten.

Boden 6/Nadelfilz emittierte einige geruchsrelevante Verbindungen (2-Ethyl-1-hexanol, Buttersäurebutylester, Ethylhexylacetat, 2-Ethylhexylpropionat, 2-Ethylhexylbutyrat), die ausschließlich aus dem Dispersionsklebstoff (Dispersions-K) freigesetzt wurden (siehe **Abschnitt 5.6.3.3, Tabelle 32**). Ob auch die EI von Modellraum 3/Holzhybridbau durch die verbaute Konstruktion Boden 6/Nadelfilz bzw. den Dispersions-Klebstoff beeinflusst wurden, kann nicht eindeutig belegt werden, da neben den in **Tabelle 32** gelisteten Verbindungen eine Vielzahl weiterer VOCs aus dem Modellraum freigesetzt wurden (**Abschnitt 4.3.3.4**). Aufgrund der gleichen Geruchsartbeschreibung (fischig, faulig, muffig) der Gipsfaserplatte (GF), der Konstruktion Decke 6/Holzhybridbau und des Modellraums 3/Holzhybridbau gibt es Hinweise darauf, dass die GF einen sensorischen Einfluss auf die geruchliche Wahrnehmung der Deckenkonstruktion und des Modellraums haben könnte (siehe **Abschnitt 5.6.3.3, Tabelle 30**). Eine ausführliche Beschreibung der Ursachen für den unangenehmen Geruchscharakter der GF sind in **Abschnitt 5.6.1.4** beschrieben.

Zusätzlich wurde die Zumutbarkeit von einer trainierten (TP) und untrainierten Personen-Gruppe (UTP) bewertet. Tendenziell empfand dabei die Gruppe der TP die untersuchten Materialien als deutlich zumutbarer als die Gruppe der UTP (**Abschnitt 5.7**). Allerdings verringerte sich die Diskrepanz zwischen der UTP und der TP im weiteren Verlauf der Untersuchungen. Eine denkbare Ursache der anfänglich großen Unterschiede in der Bewertung der Zumutbarkeit könnte der ungewöhnliche Ablauf der Geruchsbewertungen für die Gruppe der untrainierten Testpersonen gewesen sein. Mögliche Einflüsse aus der Umgebung könnten dazu geführt haben, dass die UTP, im Vergleich zu der routinierten Personengruppe (TP), beeinflusst wurde und daraus resultierend der Geruchssinn der Personen.

Bei Vergleich der erhobenen Ergebnisse hinsichtlich der sensorischen Parameter empfundene Intensität, Zumutbarkeit und Hedonik ergaben sich folgende Aussagen:

- ▶ Proben mit steigender empfundener Intensität wurden durch die Probanden tendenziell als unangenehmere Geruchsquelle empfunden (**Abschnitt 5.6.1.3** und **Abschnitt 5.8**).
- ▶ Analog dazu wurden Proben mit einer Zumutbarkeit  $\geq 70\%$  überwiegend als „angenehme“ bis „weder angenehme noch unangenehme“ Geruchsquellen bewertet (**Abschnitt 5.6.1.3** und **Abschnitt 5.8**).
- ▶ Im Gegensatz dazu wurden Luftproben mit einer hohen Intensität von den Probanden als ausschließlich unzumutbar empfunden. Aber auch eine Vielzahl an Materialien, die mit einer geringeren Intensität und mit einer Zumutbarkeit  $< 70\%$  bewertet wurden, wurden als unzumutbare Geruchsquellen wahrgenommen. Dieser Sachverhalt lässt sich möglicherweise auf Substanzen mit niedrigen Geruchsschwellen und/oder unangenehmem Geruchscharakter zurückführen (**Abschnitt 5.6.1.3** und **Abschnitt 5.8**).

Eine genauere Klärung der Frage, welche geruchsaktiven Verbindungen im Spurenkonzentrationsbereich ursächlich für eine unzumutbare Geruchsempfindung trotz niedriger EI waren, hätte das Hinzuziehen analytischer Methoden mit deutlich niedrigeren Nachweisgrenzen und folglich einer höheren Empfindlichkeit erfordert im Vergleich zu den im Vorhaben eingesetzten Verfahren. Exemplarisch wurde daher eine Gipsfaserplatte (GF) mit auffälligem Geruchscharakter einer Zusatzuntersuchung mittels Thermodesorption-Gaschromatograph/Quadrupol-time-of-

flight-Massenspektrometer (TD-GC/Q-TOF) unterzogen (siehe **Abschnitt 5.6.1.4**). Um geruchsaktive Komponenten im Spurenkonzentrationsbereich zu detektieren, bietet der Q-TOF als Detektor eine deutlich höhere Auflösung und eine bessere Nachweisstärke als herkömmliche GC/MS-Analysentechniken.

Auf Basis der erhobenen Messdaten im Rahmen der Emissionsprüfungen wurde das jeweilige Emissionsprofil (i) der Einzelmaterialien, (ii) der Verbundkonstruktionen und (iii) der Modellräume simuliert und die Ergebnisse mit den Messdaten verglichen. Zur Simulation der Emissionen aus einzelnen Materialien und Verbundstrukturen sowie der resultierenden Konzentrationen in Modellräumen wurden ein empirisches Modell und ein Massentransfermodell verwendet. Die erzielten Ergebnisse zeigten, dass mit empirischen Methoden die meisten Emissionsmuster der von Einzelmaterialien emittierten Substanzen gut simuliert werden konnten. Allerdings konnten mit Hilfe empirischer Methoden unter Verwendung von Emissionsdaten von Einzelmaterialien die Emissionen von komplexen Verbundstrukturen und Modellräumen nicht simuliert werden. Empirische Modelle eignen sich möglicherweise nur für die Simulation von Innenraumluftkonzentrationen in sehr einfachen Fällen, wie z. B. bei einschichtigen Wänden, Decken und Bodenbelägen.

Mit dem Massentransfermodell ließen sich dagegen Diffusionsprozesse bestimmter Substanzen in Einzelmaterialien und Verbundkonstruktionen sowie die Emissionen der Modellräume erfolgreich simulieren. Voraussetzung dafür waren allerdings die Erfüllung nachfolgender Bedingungen:

- ▶ Die einzelnen Materialien sind homogen (konstante  $D_m$  und  $C_{m0}$ ),
- ▶ die Materialfeuchte befindet sich im Gleichgewichtszustand,
- ▶ es gibt keine signifikanten Unterschiede innerhalb verschiedener Chargen des gleichen Materials,
- ▶ es finden keine chemischen Reaktionen statt.

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen, dass das Massentransfermodell auch für die Simulation von Emissionen aus komplexen, realistischen Baukonstruktionen für eine Reihe von Substanzen geeignet ist. Je mehr grundlegende Daten über Bauprodukte verfügbar und je mehr chemisch-physikalische Prozesse einbezogen werden, desto genauere Simulationsergebnisse können perspektivisch erzielt werden. Daher ist das Modell so lange nicht endgültig validierbar bzw. sind verlässliche Simulationen so lange nicht möglich, bis belastbare, reproduzierbare Emissionsmessdaten vorliegen.

Angeichts der erhobenen Emissionsmessdaten der Einzelmaterialien wurde im Vorhaben deutlich, dass diese Datensätze in Abhängigkeit von der Werkstoffkategorie, den Produktionschargen und dem Lagerungsprozess großen Schwankungen unterworfen sind. Für die Qualitätskontrolle und Gewährleistung einer gleichbleibenden Qualität bezüglich des Emissionsverhaltens für die Endverbraucher\*innen kommt regelmäßig durchgeführten Emissionsprüfungen eine unverändert hohe Relevanz zu. Für Produkte, die mit einem Qualitätszeichen ausgezeichnet sind, werden abhängig von der Werkstoffkategorie perspektivisch in regelmäßigen, aber kürzeren Zeitabständen durchzuführende Emissionsprüfungen wichtig sein. Dabei könnten Proben berücksichtigt werden, die sowohl direkt vom herstellenden Unternehmen als auch aus dem Baustoffhandel bezogen wurden.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens können in Gesundheitsschutzstandards innerhalb nationaler und europäischer Bauvorschriften einfließen und auch zur Überarbeitung bestehender Prüfverfahren, wie des AgBB-Bewertungsschemas, beitragen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse in einem praxisorientierten Leitfaden zusammengefasst, der Planer\*innen und Architekt\*innen Informationen zum Umgang mit Materialemissionen und Raumluftqualität bietet.

## 8 Quellenverzeichnis

AgBB (2021): Anforderungen an die Innenraumluftqualität in Gebäuden: Gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VVOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten. Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB). Stand Juni 2021

Bodalal, A.; Zhang, J.S.; Plett, E.G. (2000): A method for measuring internal diffusion and equilibrium partition coefficients of volatile organic compounds for building materials. Build Environ. 35, 101-110.  
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00005-0)

Carslaw, N. (2007): A new detailed chemical model for indoor air pollution. Atmos Environ. 41, 1164-1179.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.038>

Carslaw, N.; Fletcher, L.; Heard, D.; Ingham, T.; Walker, H. (2017): Significant OH production under surface cleaning and air cleaning conditions: Impact on indoor air quality. Indoor Air. 27, 1091-1100.  
<https://doi.org/10.1111/ina.12394>

Carslaw, N.; Mota, T.; Jenkin, M.; Barley, M.H.; McFiggans, G. (2012): A significant role for nitrate and peroxide groups on indoor secondary organic aerosol. Environmental science & technology. 46, 9290-9298.  
<https://doi.org/10.1021/es301350x>

Chu, S.; Downes, J.J. (2002): Proust nose best: Odors are better cues of autobiographical memory. Mem Cognit. 30, 511-518. <https://doi.org/10.3758/BF03194952>

Cox, S.S.; Little, J.C.; Hodgson, A.T. (2002): Predicting the Emission Rate of Volatile Organic Compounds from Vinyl Flooring. Environ Sci Technol. 36, 709-714. <https://doi.org/10.1021/es010802+>

Deng, B.; Kim, C.N. (2004): An analytical model for VOCs emission from dry building materials. Atmos Environ. 38, 1173-1180. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.11.009>

DIBt (2010): Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bau-produkten in Innenräumen. Stand: Oktober 2010. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin

DIBt (2023): Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB). Ausgabe 2023/1. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin

DIN EN 13986:2015-06. Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung. Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 16000-5:2007-05. Innenraumluftverunreinigungen - Teil 5: Probenahmestrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC). Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 16516:2020-10. Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft. Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 16000-9:2008-04. Innenraumluftverunreinigungen - Teil 9: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen - Emissionsprüfkammer-Verfahren. Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 16000-11:2006-06. Innenraumluftverunreinigungen - Teil 11: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen - Probenahme, Lagerung der Proben und Vorbereitung der Prüfstücke. Beuth Verlag, Berlin

DIN ISO 16000-3:2013-01. Innenraumluftverunreinigungen - Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern - Probenahme mit einer Pumpe. Beuth Verlag, Berlin

DIN ISO 16000-6:2022-03. Innenraumluftverunreinigungen - Teil 6: Bestimmung organischer Verbindungen (VVOC, VOC, SVOC) in Innenraum- und Prüfkammerluft durch aktive Probenahme auf Adsorptionsröhrchen, thermischer Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID. Beuth Verlag, Berlin

DIN ISO 16000-28:2021-11. Innenraumluftverunreinigungen - Teil 28: Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten mit einer Emissionsprüfkammer. Beuth Verlag, Berlin

EU-BauPVO (2024): Verordnung (EU) 2024/3110 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011. Amtsblatt der Europäischen Union vom 18.12.2024, L 2024/3110

EU (2024): Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). European Union, Luxembourg. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202401275&pk\\_keyword=Energy&pk\\_content=Directive](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive)

Farajollahi, Y.; Chen, Z.; Haghighat, F. (2009): An Experimental Study for Examining the Effects of Environmental Conditions on Diffusion Coefficient of VOCs in Building Materials. CLEAN – Soil, Air, Water. 37, 436-443. <https://doi.org/10.1002/clen.200900053>

Grimm, R. (2024): Was ist die Holzhybridbauweise? BauNetz. <https://www.baustoffwissen.de/was-ist-die-holzhybridbauweise-31102023> (14.10.2025)

Haghighat, F.; Huang, H. (2003): Integrated IAQ model for prediction of VOC emissions from building material. Build Environ. 38, 1007-1017. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00064-7)

Haghighat, F.; Lee, C.; Ghaly, W. (2002): Measurement of diffusion coefficients of VOCs for building materials: review and development of a calculation procedure. Indoor Air. 12, 81-91. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.1e008.x>

Höllbacher, E.; Rieder-Gradinger, C.; Strateva, D.; Srebotnik, E. (2015): A large-scale test set-up for measuring VOC emissions from wood products under laboratory conditions in simulated real rooms. Holzforschung. 69, 457-462. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0129>

Holøs, S.B.; Aileen, Y.; Merethe, L.; Kari, T.; Peter, S.; and Mysen, M. (2019): VOC emission rates in newly built and renovated buildings, and the influence of ventilation – a review and meta-analysis. International Journal of Ventilation. 18, 153-166. <https://doi.org/10.1080/14733315.2018.1435026>

Huangfu, Y.; Lima, N.M.; O'Keeffe, P.T.; Kirk, W.M.; Lamb, B.K.; Pressley, S.N.; Lin, B.; Cook, D.J.; Walden, V.P.; Jobson, B.T. (2019): Diel variation of formaldehyde levels and other VOCs in homes driven by temperature dependent infiltration and emission rates. Build Environ. 159, 106153. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.031>

Järnström, H.; Saarela, K.; Kalliokoski, P.; Pasanen, A.L. (2006): Reference values for indoor air pollutant concentrations in new, residential buildings in Finland. Atmos Environ. 40, 7178-7191. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.021>

Jensen Zhang, J.; Liu, Z.; Beverly Guo, B. (2019): Model-based testing and evaluation of VOC emission sources and sinks: theory and application. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 609, 042015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/4/042015>

Kraus, M.; Senitkova, I.J. (2019): Material VOC emissions and indoor air quality simulation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing

Little, J.C.; Hodgson, A.T.; Gadgil, A.J. (1994): Modeling emissions of volatile organic compounds from new carpets. Atmos Environ. 28, 227-234. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90097-3](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90097-3)

- Liu, Z.; Nicolai, A.; Abadie, M.; Qin, M.; Grunewald, J.; Zhang, J. (2021): Development of a procedure for estimating the parameters of mechanistic VOC emission source models from chamber testing data. *Building Simulation*. 14, 269-282. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0616-3>
- Liu, Z.; Ye, W.; Little, J.C. (2013): Predicting emissions of volatile and semivolatile organic compounds from building materials: A review. *Build Environ*. 64, 7-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.012>
- Mendez, M.; Blond, N.; Blondeau, P.; Schoemaecker, C.; Hauglustaine, D.A. (2015): Assessment of the impact of oxidation processes on indoor air pollution using the new time-resolved INCA-Indoor model. *Atmos Environ*. 122, 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.025>
- Mücke, W.; Lemmen, C. (2009): Duft und Geruch: Wirkungen und gesundheitliche Bedeutung von Geruchsstoffen. ecomed MEDIZIN. ecomed, Landsberg am Lech
- UBA Texte 35/2011. Müller, B.; Panašková, J.; Danielak, M.; Horn M.; Jann O.; D., M. (2011): Sensorische Bewertung der Emissionen von Bauprodukten-Integration in die Vergabegrundlagen für den Blauen Engel und das Bewertungsschema des Ausschusses zur Gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten. Umweltbundesamt, Dessau
- Panašková, J. (2013): Olfaktorische Bewertung von Emissionen aus Bauprodukten. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen University, Aachen
- Plaisance, H.; Vignau-Laulhere, J.; Mocho, P.; Sauvat, N.; Raulin, K.; Desauziers, V. (2017): Volatile organic compounds concentrations during the construction process in newly-built timber-frame houses: source identification and emission kinetics. *Environ Sci: Processes Impacts*. 19, 696-710. <https://doi.org/10.1039/C7EM00047B>
- Rackes, A.; Waring, M.S. (2016): Do time-averaged, whole-building, effective volatile organic compound (VOC) emissions depend on the air exchange rate? A statistical analysis of trends for 46 VOCs in U.S. offices. *Indoor Air*. 26, 642-659. <https://doi.org/10.1111/ina.12224>
- Radulescu-Bouilly, C.; Allard, F.; Blondeau, P.; Collignan, B.; Popescu, R.; Sjöberg, A. (2006): A physically-based analysis of the interactions between humidity and VOCs in building materials. *Healthy Buildings 2006*.
- Rat der Europäischen Gemeinschaften (1989): Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG). Amtsblatt der EG Nr. L 40/12-26, Brüssel
- Salthammer, T.; Fuhrmann, F. (2000): Release of Acetic Acid and Furfural from Cork Products. *Indoor Air*. 10, 133-134. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010002133.x>
- Salthammer, T.; Schulz, N.; Stolte, R.; Uhde, E.; Bartsch, J. (2016): Evaluierung einer Methode zur sensorischen Bewertung von Bauprodukten für Innenraumanwendungen unter Praxisbedingungen. Fraunhofer WKI, Braunschweig. [https://www.stuck-komzet.de/wp-content/uploads/Geruch\\_WKI\\_SENSORIK\\_2016\\_Final.pdf](https://www.stuck-komzet.de/wp-content/uploads/Geruch_WKI_SENSORIK_2016_Final.pdf)
- Schieweck, A.; and Salthammer, T. (2009): Emissions from Construction and Decoration Materials for Museum Showcases. *Studies in Conservation*. 54, 218-235. <https://doi.org/10.1179/sic.2009.54.4.218>
- Schieweck, A.; Gunschera, J.; Varol, D.; Salthammer, T. (2018): Analytical procedure for the determination of very volatile organic compounds (C3–C6) in indoor air. *Anal Bioanal Chem*. 410, 3171-3183. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1004-z>
- Shiraiwa, M.; Carslaw, N.; Tobias, D.J.; Waring, M.S.; Rim, D.; Morrison, G.; Lakey, P.S.J.; Kruza, M.; von Domaros, M.; Cummings, B.E.; Won, Y. (2019): Modelling consortium for chemistry of indoor environments (MOCCIE): integrating chemical processes from molecular to room scales. *Environ Sci: Processes Impacts*. 21, 1240-1254. <https://doi.org/10.1039/C9EM00123A>
- Soetaert, K.; Meysman, F. (2010): *ReacTran: Reactive transport modelling in 1D, 2D and 3D*. R package.

Soetaert, K.; Petzoldt, T.; Setzer, R.W. (2010): Package deSolve: solving initial value differential equations in R. *Journal of Statistical Software*. 33, 1-25

Sparks, L.; Tichenor, B.; Chang, J.; Guo, Z. (1996): Gas - phase mass transfer model for predicting volatile organic compound (voc) emission rates from indoor pollutant sources. *Indoor Air*. 6, 31-40.

<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1996.t01-3-00004.x>

Terseglav, A.; Burdack-Freitag, A. (2015): Der Geruchsintensität einen Namen geben. Fraunhofer IBP.

[https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/pi\\_2015-09\\_geruch.html](https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/pi_2015-09_geruch.html) (14.04.2025)

Van Gemert, L. (2011): Odour thresholds. Oliemans Punter & Partners

VDI 4301 Blatt 7:2018-10. Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messen von Carbonsäuren. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf

VGH Baden-Württemberg (2020): Aktenzeichen 8 S 2959/18. openJur, 2020/10/07.

<https://openjur.de/u/2305263.html> (2025/04/25)

VGH Bayern (2021): Aktenzeichen 2 N 21.2173. openJur, 2021/11/24. <https://openjur.de/u/2395145.html>

(2025/04/25)

Wang, Y.; Wang, H.; Tan, Y.; Liu, J.; Wang, K.; Ji, W.; Sun, L.; Yu, X.; Zhao, J.; Xu, B.; Xiong, J. (2021): Measurement of the key parameters of VOC emissions from wooden furniture, and the impact of temperature. *Atmos Environ*. 259, 118510. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118510>

Xiong, J.; Chen, F.; Sun, L.; Yu, X.; Zhao, J.; Hu, Y.; Wang, Y. (2019): Characterization of VOC emissions from composite wood furniture: Parameter determination and simplified model. *Build Environ*. 161, 106237.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106237>

Xu, Y.; Zhang, Y. (2003): An improved mass transfer based model for analyzing VOC emissions from building materials. *Atmos Environ*. 37, 2497-2505. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00160-2)

Xu, Y.; Zhang, Y. (2004): A general model for analyzing single surface VOC emission characteristics from building materials and its application. *Atmos Environ*. 38, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.020>

Yang, X.; Chen, Q.; Zhang, J.; Magee, R.; Zeng, J.; Shaw, C. (2001): Numerical simulation of VOC emissions from dry materials. *Build Environ*. 36, 1099-1107. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00078-0)