



Bericht Fonds zur Förderung der Wald-  
und Holzforschung (WHFF) 2012.26

# Untersuchung zum Einfluss der Luftwechselrate auf die Innenraumlufthqualität

## Bericht

<b>Bericht Nr.</b>	9400-SB-01
<b>Auftrag Nr.</b>	9400.DWH
<b>Klassifizierung</b>	Öffentlich
<b>Datum</b>	15. September 2015
<b>Auftraggeber</b>	Lignum, Holzwirtschaft Schweiz CH-8008 Zürich  Bundesamt für Umwelt BAFU Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung CH-3003 Bern  Bundesamt für Gesundheit BAG, Direktionsbereich Verbraucherschutz, CH-3003 Bern  Amt für Hochbauten der Stadt Zürich Fachstelle Nachhaltiges Bauen, 8021 Zürich
<b>Adresse der Forschungsstelle</b>	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Werkstoffe und Holztechnologie Kompetenzbereich Materialemissionen und Extraktstoffe Solithurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91 <a href="http://www.ahb.bfh.ch">www.ahb.bfh.ch</a>
<b>Kompetenzbereichsleiter</b>	Dr. Ingo Mayer
<b>Institutsleiter</b>	Dr. Frédéric Pichelin

## Abstract

Der Einfluss der Luftwechselrate auf Schadstoff-Konzentrationen in Innenräumen bei sehr niedrigen Luftwechselraten sollte im Rahmen dieses Projektes untersucht werden. Die Kenntnis dieses Zusammenhanges ist wichtig, weil die Luftwechselrate einen grossen Einfluss darauf haben kann, ob bei einer Raumluft-Abnahmemessung die vertraglich vereinbarten Zielwerte erreicht werden können oder nicht. Weiterhin sollten die Ergebnisse den Einfluss des Luftwechsels auf die sich einstellende Schadstoffkonzentration klären und gegebenenfalls die Notwendigkeit eines geeigneten Lüftungskonzepts (auch bei der Verwendung emissionsarmer Baustoffe) verdeutlichen. In den durchgeführten Untersuchungen wurde die sich einstellende Formaldehyd-Konzentration nach Absenkung der Luftwechselrate von  $1.0 \text{ h}^{-1}$  auf Werte von 0.5, 0.2, 0.05 und  $0.01 \text{ h}^{-1}$  ermittelt. Als Emissionsquellen wurden unterschiedliche Holzwerkstoffe, verleimt mit formaldehydhaltigen sowie formaldehydfreien Klebstoffsystemen, eingesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich auch bei Absenkung des Luftwechsels auf sehr niedrigen Luftwechselraten eine Ausgleichskonzentration nach ca. 9 h einstellt und demnach keine Änderung im zeitlichen Vorgehen bei „Normmessungen“ zu erkennen ist. Die bei sehr niedrigen Luftwechselraten gemessenen Formaldehyd-Werte liegen holzwerkstoffabhängig etwa um Faktor 2 bis 5 über den Formaldehyd-Konzentrationen bei einer Luftwechselrate von  $1.0 \text{ h}^{-1}$ . Der Verlauf der Formaldehyd-Konzentration bei variierender Luftwechselrate konnte gut mit einem exponentiellen Verlauf der Trendlinie dargestellt werden. Die Ausprägung des exponentiellen Charakters des Kurvenverlaufs sowie die unterschiedlichen Absolutwerte der Formaldehydkonzentration sind mutmasslich auf die eingesetzten Klebstoffsysteme sowie werkstoffspezifische Eigenschaften (Spangeometrien, Materialdichten) der Holzwerkstoffe zurückzuführen. Die Ergebnisse verdeutlichen den starken Anstieg der Formaldehyd-Konzentration in Innenräumen mit niedrigsten Luftwechselraten – auch bei Einsatz emissionsarmer Baustoffe.

Keywords: Formaldehyd, Innenraumluft, Luftwechsel, Holzwerkstoffe

## Inhaltsverzeichnis

1	Referenz Fördermittelgeber	4
2	Ausgangslage	4
3	Zielsetzungen	6
4	Projektbeteiligte	7
5	Material und Methoden	8
	5.1 Prüfraum und Formaldehyd-Analytik	8
	5.2 Validierung des Prüfraums	9
	5.3 Konditionierung und Charakterisierung einer MDF-Platte als Emissionsquelle	9
	5.4 Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Formaldehyd-Konzentration im Prüfraum bei Absenkung des Luftwechsels	9
	5.5 Bestimmung der resultierenden Formaldehyd-Konzentration im Prüfraum bei Einstellung eines reduzierten Luftwechsels mit unterschiedlichen Holzwerkstoffen als Emissionsquelle	10
6	Ergebnisse	11
	6.1 Validierung Prüfraum (Arbeitspaket 1)	11
	6.2 Konditionierung und Charakterisierung der Emissionsquelle	11
	6.3 Ermittlung der Zeitspanne bis zum Erreichen der Ausgleichskonzentration nach Absenkung des Luftwechsels	12
	6.4 Erfassung der luftwechselabhängigen Formaldehyd-Konzentration in einem Prüfraum mit Emissionsquelle	13
	6.4.1 MDF-Platten	14
	6.4.2 Dreischichtplatten	15
	6.4.3 Spanplatten	16
	6.4.4 OSB-Platte	17
7	Diskussion und Schlussfolgerungen	18
8	Verzeichnisse	20
	8.1 Tabellenverzeichnis	20
	8.2 Abbildungsverzeichnis	20
	8.3 Literaturverzeichnis	20

## 1 Referenz Fördermittelgeber

- Die Untersuchungen wurden durch folgende Fördermittelgeber gefördert bzw. durch Eigenleistungen unterstützt:
- Bundesamt für Umwelt BAFU, Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, CH-3003 Bern, Referenz-Nr. REF-1011-85140
- Bundesamt für Gesundheit BAG, Direktionsbereich Verbraucherschutz CH-3003 Bern, Verfügung Nr. 14.008774
- Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Fachstelle Nachhaltiges Bauen, 8021 Zürich, Studienprogramm 7-Meilenschritte
- Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, CH-8008 Zürich
- Kronospan Schweiz AG, Willisauerstrasse 37, CH-6122 Menznau
- Schweizerischer Verband für geprüfte Qualitätshäuser (VGQ), CH-2501 Biel

## 2 Ausgangslage

Bauen und Wohnen in der 2000-Watt-Gesellschaft bedeutet, Bauten mit einer möglichst dichten Gebäudehülle und niedrigen natürlichen Luftwechselrate zu erstellen. Damit werden Wärmeverluste zum Beispiel über undichte Fenster minimiert. Die Kehrseite der Medaille ist, dass bei Objekten ohne geeignete Lüftungskonzepte selbst beim fachgerechten Einsatz emissionsarmer Baustoffe Schadstoffe aus Baumaterialien im Innenraum verbleiben und gesundheitliche Beeinträchtigungen verursachen können.

Bei Bauten der Stadt Zürich werden nach Abschluss der Bauarbeiten Raumluft-Abnahmemessungen durchgeführt. Mit diesen Messungen soll sichergestellt werden, dass die Nutzenden keinen erhöhten Schadstoffkonzentrationen aus Baumaterialien ausgesetzt sind und die vertraglich festgelegten Raumluftzielwerte eingehalten werden. Solche Raumluftmessungen sind auch in den KBOB-Empfehlungen für nachhaltiges Bauen [1] aufgeführt und werden beim Zertifizierungsverfahren von MINERGIE-ECO-Gebäuden verlangt [2, 3]. Das übliche Vorgehen bei dieser Raumluftmessung (Messung unter Standardbedingungen) ist eine intensive Lüftung am Vorabend der Messung, das anschliessende Schliessen aller Fenster und Türen und das Abschalten der Lüftungsanlage (falls vorhanden). Die Entnahme der Luftproben erfolgt dann nach einer Wartezeit von ca. 12 h am folgenden Morgen<sup>1</sup>. Bei moderner energiesparender Bauweise ergeben sich während der Wartezeit minimale Luftwechselraten von deutlich unter  $0.1 \text{ h}^{-1}$ . Bei verschiedenen Bauprojekten mit solch tiefen Luftwechselraten konnten mit diesem Messverfahren die Raumluftzielwerte nicht erreicht werden. Diese wieder vermehrt aufgetretenen Problemfälle verursachen ungünstige Imagefolgen für den Holzbau.

Im Projekt Planungssicherheit bei der Materialwahl [4], welches durch den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung unterstützt wurde, konnte mit Raumluftmessungen (Messungen unter Standardbedingungen mit minimalen Luftwechselraten sowie unter Nutzungsbedingungen mit laufender Lüftungsanlage) bei einem Objekt eine erhebliche Reduktion der Raumluftbelastung bei höheren Luftwechselraten nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der oben erwähnten Raumluftmessungen weisen darauf hin, dass für eine gute Innenraumluftqualität neben dem fachgerechten Einsatz emissionsarmer Baustoffe auch ein Lüftungskonzept mit ausreichenden Luftwechselraten wesentlich ist.

<sup>1</sup> Das Messverfahren ist üblich bei Gebäuden mit manueller Fensterlüftung; es stellt hier eine reale ‚worst-case‘ Situation bei der üblichen Nutzung her. MINERGIE-zertifizierte Gebäude verfügen dagegen über eine systematische Lüfterneuerung, in der Regel eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. In solchen Gebäuden misst man somit eine Situation, welche während der normalen Nutzung in der Regel nicht vorkommt.

Bei den heutigen, aus energetischen Gründen sehr dichten Gebäudehüllen sind die Luftwechselraten, die sich alleine durch die natürliche Infiltration ergeben, sehr klein. Schadstoffkonzentrationen können bei Raumluftmessungen unter Standardbedingungen bei Luftwechselraten von  $< 0.1 \text{ h}^{-1}$  dadurch sehr hoch ausfallen. Dies trifft für Gebäude ohne mechanische Lüftungsanlage zu, bei denen weiterhin unter Standardbedingungen gemessen wird. Die Zielwerte könnten darum auf einen Referenzluftwechselrate bezogen bzw. die Messresultate entsprechend auf Nutzungsbedingungen umgerechnet werden. Solche Umrechnungsformeln sind heute nicht verfügbar. Betroffen von dieser Thematik sind für den Holzbau wichtige Ziel- und Zukunftsmärkte. Vor allem ist hier die Bauerneuerung zu nennen. Hier werden noch vermehrt Sanierungskonzepte ohne Komfortlüftungen realisiert. Auch können sich hier geringe Luftwechselraten dann auch unter realen Nutzungsbedingungen einstellen und somit Qualitätszielwerte und ggf auch gesundheitliche Richtwerte überschritten werden.

Stand des Wissens ist heute, dass Formaldehyd-Konzentrationen in Innenräumen nur eine geringe Abhängigkeit von der Luftwechselrate haben und quasi linear verlaufen [5], [6] (grüne und rote ausgezogene Linien in Abbildung 1). Auf diesen linearen Zusammenhang beziehen sich die Raumluftzielwerte der Stadt Zürich bzw. MINERGIE-ECO.

Genauere Untersuchungen bei Bauprojekten, welche erhöhte Formaldehyd-Konzentrationen aufwiesen, haben allerdings gezeigt, dass die Luftwechselrate einen grösseren Einfluss auf die Messresultate haben könnte, als bisher vermutet (vgl. blaue Punkte und Linie in Abbildung 1). Damit würden die gängigen Modelle den heute üblichen sehr niedrigen Luftwechselraten von deutlich unter  $0.1 \text{ h}^{-1}$  nicht mehr gerecht werden.

Es wird angenommen, dass zwischen Formaldehyd-Konzentrationen und der Luftwechselrate in Innenräumen kein linearer sondern ein logarithmischer Zusammenhang besteht. Die Schadstoffkonzentrationen würden damit mit sinkender Luftwechselrate stark zunehmen. Da man davon ausgehen kann, dass die Entwicklung von Raumluft-Konzentrationen infolge unterschiedlicher Luftwechselraten auf verschiedene Schadstoffe übertragbar sind, fokussiert sich diese Arbeit auf die Formaldehyd-Raumluftkonzentrationen.

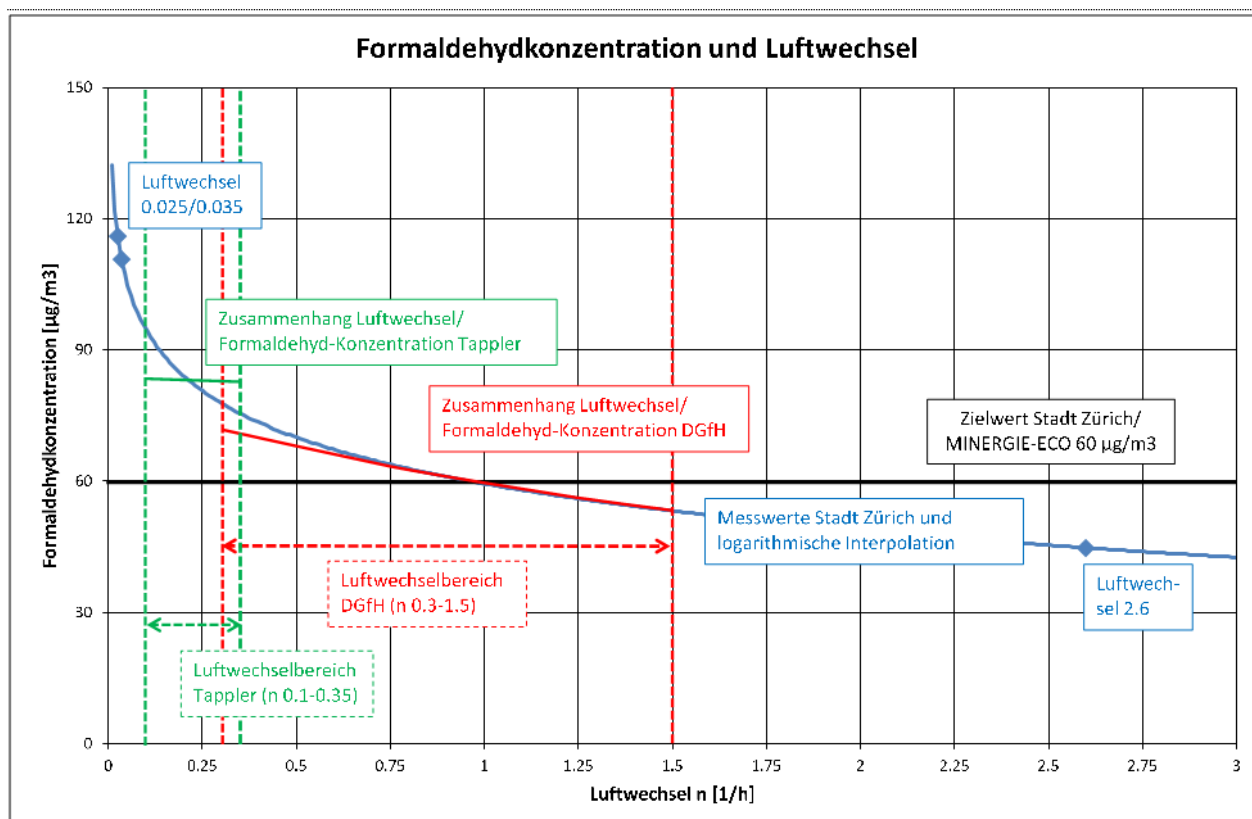


Abbildung 1 : Resultierende Formaldehyd-Konzentrationen in Abhängigkeit des Luftwechsels

Neben der Ableitung der Abhängigkeiten aus empirischen Versuchsreihen wurde zudem versucht, die sich in der Innenraumluft einstellen Konzentrationen an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) zu modellieren [7]-[13]. So hat der National Research Council Canada ein Modell entwickelt, das Raumluftemissionen mit Hilfe von Exponentialfunktionen prognostiziert [14]. Dabei müssen allerdings für neue Räume, andere Baustoffe und VOC-Komponenten, die im Modell vorhandenen Parameter jedes Mal mit einer Versuchsreihe gefittet werden, bevor das Modell VOC-Emissionen berechnen kann. Bislang verfügbare Modelle setzen zudem voraus, dass entscheidende variable Parameter (z.B. Luftwechsel, Luftfeuchtigkeit und Temperatur) konstant bleiben. Will man z.B. unterschiedliche Baustoffe in der Modellbildung bei [14] berücksichtigen, müssen wiederum zuerst die Modellparameter mit einem Regressionsmodell im Rahmen eines Experimentes aufwändig geschätzt werden.

Das bestehende Berechnungsmodell [14] ist deshalb für Berechnung in Innenräumen und bei Verwendung von Holzwerkstoffen kaum brauchbar, da prognostizierte Konzentrationen im Vergleich zu real gemessenen häufig um den Faktor 10 falsch sind und sich ändernde äussere Bedingungen in Temperatur und Feuchtigkeit nicht berücksichtigen und damit modellieren lassen. Zudem sind Emissionsdaten für die in Europa gebräuchlichen Bauprodukte nicht in der zugrundeliegenden Datenbank vorhanden. Weitere Autoren [11] schlagen Modelle vor, die weitere Parameter, z.B. Temperaturänderungen, Luftfeuchteänderungen u.a. berücksichtigen. Dabei werden auch die physikalischen Basisvorgänge des Nachschubs an VOC aus dem Baustoff (Diffusion) und die Emission von VOC an der Materialgrenzfläche an die umgebenden Luft (Partitioning) ausreichend beschreiben.

Als Grundlage dafür könnte das erwähnte Modell von Yan et al., 2009, dienen [11]. Es enthält ein einfaches Partitioning (der Partitioningkoeffizient lässt sich aus bekannten Untersuchungen entnehmen und mit den eigenen Resultaten vergleichen). Die Diffusion wird räumlich in diskretisierten Schritten modelliert. Das erlaubt direkt den Einbau von Inhomogenitäten ohne ein zusätzliches mathematisches Modell einzubeziehen. Damit ist die physikalische Basis dieser Vorgänge im Wesentlichen erfasst. Zudem ist das Modell einfach zu implementieren, enthält nur wenige Parameter (i.w. Diffusions- und Partitioningkoeffizient).

Um solche Modelle in der Praxis einsetzen zu können, müssen die Einflüsse wichtiger Parameter (Temperaturänderung, Luftwechsel usw.) berücksichtigt werden. Sie wirken sich auf Diffusions- und Partitioningkoeffizienten aus, aber auch auf den Zeitverlauf der VOC-Konzentration in der Luft. Hierfür liegt jedoch noch keine (baustoffspezifische) Datengrundlage vor, die ein solches Modell – und generell physikalische Modell zur Prognosebildung der resultierenden VOC- bzw. Formaldehyd-Konzentration – in der Praxis zeitnah einsetzbar erscheinen lässt.

### 3 Zielsetzungen

Der Einfluss der Luftwechselrate auf Schadstoff-Konzentrationen in Innenräumen bei sehr niedrigen Luftwechselraten sollte besser untersucht werden. Die Kenntnis dieses Zusammenhanges ist wichtig, weil die Luftwechselrate einen grossen Einfluss darauf haben kann, ob bei einer Raumluft-Abnahmemessung die vertraglich vereinbarten Zielwerte erreicht werden können oder nicht. Weiterhin sollten die Ergebnisse den Einfluss des Luftwechsels auf die sich einstellende Schadstoffkonzentration klären und gegebenenfalls die Notwendigkeit eines geeigneten Lüftungskonzepts (auch bei der Verwendung emissionsarmer Baustoffe) verdeutlichen.

## 4 Projektbeteiligte

- Koordination: Bernhard Furrer, dipl. Ing. HTL, Lignum Technik
- Leitung Untersuchungen: Ingo Mayer, Dr. rer. nat., Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Institut für Werkstoffe und Holztechnologie
- Fachliche Begleitung:
  - Roger Waeber, dipl. Natw. ETH/SIA, Bundesamt für Gesundheit, Fachstelle Wohngifte
  - Michael Pöll, Bauökologe, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
  - Urs Christian Luginbühl, dipl. Ing. HTL, VGQ
  - Beni Isenegger, lic. phil. nat., im puls GmbH, Bern

## 5 Material und Methoden

### 5.1 Prüfraum und Formaldehyd-Analytik

Als Prüfraum wurde eine Emissionsprüfkammer der Firma SP Schweden aus Edelstahl mit einem Volumen von 1 m<sup>3</sup> eingesetzt. Diese Emissionsprüfkammer wurde in Anlehnung an die Normen EN 717-1 und ISO 16000-9 betrieben und erfüllt hinsichtlich der Messgenauigkeit alle Kriterien dieser Normen.

#### Bedingungen Emissionsprüfkammer

Zur Emissionsprüfung wurden folgende Einstellungen an der Emissionsprüfkammer gewählt:

Temperatur: 23°C ± 1 °C

Relative Luftfeuchtigkeit: 45% ± 5%

Luftgeschwindigkeit an der Prüfkörper-Oberfläche: 0.1-0.3 m s<sup>-1</sup>

Volumen Emissionsprüfkammer: 1.0 m<sup>3</sup>

Emissionsoffene Fläche der Prüfkörper: 1.0 m<sup>2</sup>

Luftaustauschrate: variabel, siehe folgende Kapitel

Luftdurchflussrate: variabel, siehe folgende Kapitel

Raumbeladung: 1 m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>

Flächenspezifische Luftdurchflussrate q: variabel, siehe folgende Kapitel

Flächenspezifische Emissionsrate  $SER_a = C \cdot q$

**Der Betrieb der Emissionsprüfkammer wurde unter den Qualitätssicherungs-Kriterien der Akkreditierung als Prüfstelle gemäss ISO 17025 der Berner Fachhochschule AHB für die Norm SN ISO 16000-9 durchgeführt.**

#### Bestimmung der Formaldehyd-Konzentration in der Prüfkammerluft

Für die Probenahme wurde Prüfkammerluft über DNPH-Probenahmekartuschen gesaugt. Die Aldehyde reagieren mit 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH), welches sich auf den Kartuschen befindet. Die DNPH-Aldehydderivate werden mit Hilfe von Acetonitril von den Kartuschen extrahiert (Elutionsvolumen 5 ml). Zwei Einspritzungen mit einem Volumen von je 10 µl werden mittels Hochdruck-Flüssiggaschromatographie mit UV-Detektor (HPLC-UV) analysiert. Die Identifikation der Derivate erfolgt über den Vergleich der Retentionszeiten und UV-Spektren mit denen von Kalibrierstandards. Die getrennten DNPH-Derivate werden über die Licht-Absorption im UV-Bereich quantifiziert (UV-Detektor).

Volumenstrom Probenahme: 1 l/min

Volumen Probenahme: 60 l

Parameter Aldehyd-Analytik:

Säule: Zorbax Eclipse Plus: C18, 3.9 x 150 mm, 3.5 µm

Flussrate: 1 ml / min

Detektor: UV-DAD, Wellenlänge: 360 nm

Injektionsvolumen: 10 µl

Temperatur Säulenofen: 30°C

Bestimmungsgrenze: 1 µg m<sup>3</sup>

**Die Bestimmung der Formaldehyd-Konzentration in der Emissionsprüfkammer wurde unter den Qualitätssicherungs-Kriterien der Akkreditierung als Prüfstelle der gemäss ISO 17025 der Berner Fachhochschule AHB für die Norm SN ISO 16000-3 durchgeführt.**

## 5.2 Validierung des Prüfraums

Zur Erfassung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der für die weiteren Untersuchungen erforderlichen Luftwechselraten im 1 m<sup>3</sup>-Prüfraum wurden die vorherrschenden Luftwechselraten im Einstellungsbereich von 0.01 h<sup>-1</sup> bis 1 h<sup>-1</sup> mittels kalibrierter Durchflussmesser (Lufteinlass und Luftauslass der Prüfkammer) untersucht.

Dabei wurden nach Einstellung einer Luftwechselrate die Messwerte über einen Zeitraum von jeweils 8 h zur Überprüfung der Stabilität der eingestellten Bedingungen gemessen und aufgezeichnet. Ebenfalls wurde eine Bestimmung der Hintergrundkonzentration an Formaldehyd und weiteren Carbonylverbindungen im Prüfraum durchgeführt, um den Nachweis der Einhaltung der Reinheitskriterien der ISO 16000-9 zu erbringen (Hintergrundkonzentration an Einzelstoffen in der Prüfkammer (< 2 µg m<sup>-3</sup> je Einzelstoff).

## 5.3 Konditionierung und Charakterisierung einer MDF-Platte als Emissionsquelle

Als Quellenmuster dient eine Platte des Typs „MDF roh Eco“ von Kronoswiss. Für die Versuche in AP3 wurde eine Zielkonzentration für Formaldehyd in der 1 m<sup>3</sup>-Prüfkammer bei einem Luftwechsel von 0.5 h<sup>-1</sup> von 60 µg/m<sup>3</sup> angestrebt.

Ausgehend von Prüfergebnissen für denselben Plattentyp aus dem Jahr 2012 wurde ein Stück der Platten mit einer emissionsoffenen Fläche von 1 m<sup>2</sup> (Kanten abgeklebt) über 4 Wochen in der Prüfkammer fortlaufend vermessen.

Die Prüfkammer wurde dabei mit einem Luftwechsel von 0.5 h<sup>-1</sup>, einer Temperatur von 23 °C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von 45 % betrieben.

Die für die Versuche in AP3 zu verwendende emissionsoffene Fläche (Zielkonzentration 60 µg/m<sup>3</sup>) wurde durch eine lineare Extrapolation berechnet und ergab eine Gesamtfläche der Emissionsquelle von ca. 2.35 m<sup>2</sup>. Hierfür wurden zwei Plattenstücke mit den Massen 800 x 625 x 19 mm und eine mit den Massen 500 x 350 x 19 mm verwendet (alle Kanten abgeklebt).

Wegen der ausreichenden Konstanz des Emissionsverhaltens des Quellenmusters (Ausgleichskonzentration ist erreicht) wird die Quelle in der Prüfkammer belassen. Aus Gründen der Qualitätssicherung wurde die Konstanz des Emissionsverhaltens durch Luftprobenahme vor jedem Versuch überprüft (Probenahme bei Luftwechsel 1 h<sup>-1</sup>).

## 5.4 Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Formaldehyd-Konzentration im Prüfraum bei Absenkung des Luftwechsels

Zur Ermittlung der Dauer bis zum Erreichen der Ausgleichskonzentration wurde bei einem Luftwechsel von 0.05 h<sup>-1</sup> alle zwei Stunden eine Luftprobe gezogen. Vorgegangen war dieser Phase ein Lüftungsintervall von 10 h, bei einem Luftwechsel von 1 h<sup>-1</sup>. Der Versuch wurde durchgeführt, um für die Folgeversuche einen geeigneten zeitlichen Abstand bis zum Erreichen der Formaldehyd-Ausgleichskonzentration nach Absenkung des Luftwechsels definieren zu können.

### 5.5 Bestimmung der resultierenden Formaldehyd-Konzentration im Prüfraum bei Einstellung eines reduzierten Luftwechsels mit unterschiedlichen Holzwerkstoffen als Emissionsquelle

Zur Bestimmung der sich einstellenden Formaldehydkonzentration im Prüfraum wurden Versuche mit insgesamt acht Holzwerkstofftypen bzw. Kombinationen (3 x MDF, 2 x Span, 1 x OSB, 2x 3s-Schicht) durchgeführt. Alle Holzwerkstoffe wurden unbeschichtet geprüft. Einen Überblick über die in den Versuchsreihen eingesetzten Plattenwerkstoffe bietet Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsreihen und der dabei eingesetzten Holzwerkstoffe

Versuchsreihe Nr.	Holzwerkstoff Nr.	Typ Holzwerkstoff	Bemerkung
1	1	MDF, Produkt A, emissionsarm	
2	2	MDF, Produkt B, E1	
3	1+2	MDF, Produkte A und B	Kombinierte Prüfung, Produkt A und B
4	3	Spanplatte, Produkt A, Typ P2	
5	4	Spanplatte, Produkt B, emissionsarm	
6	5	Dreischichtplatte, Produkt A	
7	6	Dreischichtplatte, Produkt B	
8	7	OSB 3	

Nach einer Konditionierungsphase von 28 Tagen in der Emissionsprüfkammer (Luftwechselrate  $1 \text{ h}^{-1}$ , Temperatur  $23^\circ\text{C}$ , rel. Feuchte 45 %) wurde zunächst die Formaldehydkonzentration in einer Dreifachbestimmung bestimmt (entspr. Ausgleichskonzentration in Anlehnung an EN 717-1). Anschliessend wurden unterschiedliche Luftwechselraten von  $0.5$ ,  $0.1$ ,  $0.05$  und  $0.01 \text{ h}^{-1}$  eingestellt, um reduzierte Luftwechselraten in Innenräumen zu simulieren. Nach einer Wartezeit von 12 h nach Umstellung des Luftwechsels wurde die vorherrschende Formaldehydkonzentration in der Prüfraumlufte erneut bestimmt (siehe Abbildung 2) und dann der Luftwechsel wieder auf den Ausgangswert von  $1 \text{ h}^{-1}$  für zurückgestellt und dieser für einen Zeitraum von mindestens 10 h beibehalten.

Dieses Vorgehen wurde mehrfach mit einem der oben genannten reduzierten Luftwechselraten von  $0.5$ ,  $0.1$ ,  $0.05$  und  $0.01 \text{ h}^{-1}$  wiederholt.

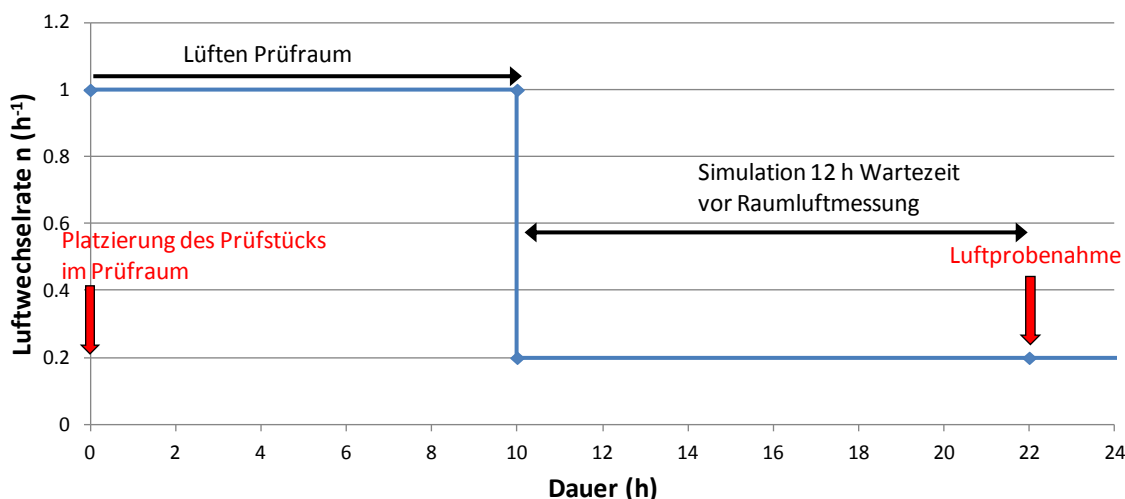


Abbildung 2: Verlauf der Luftwechselrate und Probenahme-Zeitpunkte im Prüfablauf

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Validierung Prüfraum (Arbeitspaket 1)

Der Luftwechsel in der 1 m<sup>3</sup>-Prüfkammer wurde im Einstellungsbereich von 0.01 h<sup>-1</sup> bis 1 h<sup>-1</sup> mittels kalibrierter Durchflussmesser (Lufteinlass der Prüfkammer) überprüft. Die angestrebten Luftwechselraten konnten mit den vorhandenen Prüfeinrichtungen mit hoher Genauigkeit (Abweichung 0.1 bis 0.3%) eingestellt und geregelt werden. Im Vergleich zu den Messunsicherheiten der Gesamtmethode (Prüfstückvorbereitung + Betrieb Prüfkammer + Probenahme + analytische Auswertung) von ca. 15 % bei sehr guter Qualitätssicherung, ist die ermittelte Fehler, der durch die reduzierten Luftwechse maximal hinzukommt, tolerierbar. Die Prüfkammer erfüllte damit die erforderlichen Voraussetzungen zur Durchführung der geplanten Versuche bei reduziertem Luftwechsel.

### 6.2 Konditionierung und Charakterisierung der Emissionsquelle

Als Quellenmuster dient eine Platte des Typs „MDF roh Eco“ von Kronoswiss. Für die weiteren Versuche im Projekt wurde eine Emissionsrate der Emissionsquelle angestrebt, die einer Zielkonzentration für Formaldehyd in der 1 m<sup>3</sup>-Prüfkammer bei einem Luftwechsel von 0.5 h<sup>-1</sup> von 60 µg/m<sup>3</sup> entspricht. Ausgehend von Prüfergebnissen für denselben Plattentyp aus dem Jahr 2012 wurde deshalb erwartet, mit einem Prüfkörper dieses Plattentyps mit einer emissionsoffenen Fläche von 1 m<sup>2</sup> (Kanten abgeklebt) diese Konzentration erreichen zu können. Deshalb wurde ein Vorversuch mit dem genannten Plattentyp „MDF roh Eco“ über 4 Wochen in der Prüfkammer fortlaufend mit einem Luftwechsel von 0.5 h<sup>-1</sup>, einer Temperatur von 23 °C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von 45 % durchgeführt.

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, war die Emissionsrate der MDF-Platte während der gesamten Dauer des Versuchs annähernd konstant. Der Mittelwert für die Konzentration in der Prüfkammer betrug allerdings lediglich 25.5 µg/m<sup>3</sup> und nicht wie erwartet ca. 60 µg/m<sup>3</sup>.

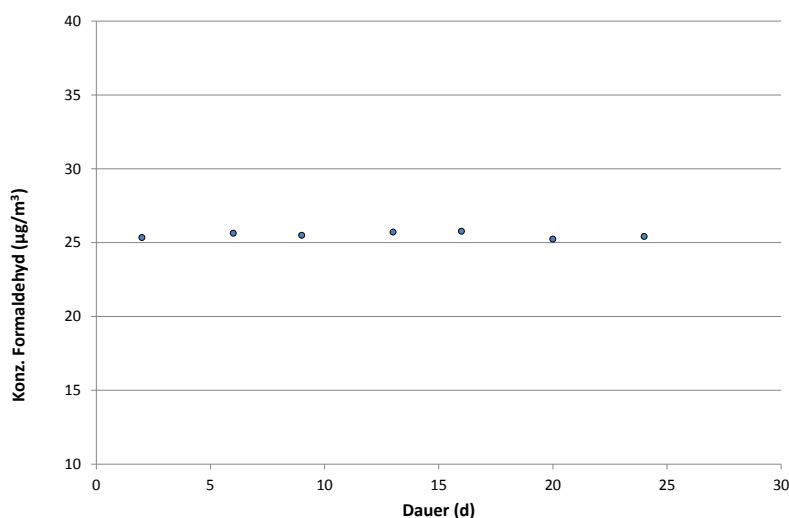


Abbildung 3: Verlauf der Formaldehydkonzentration während der Konditionierungsphase des Quellenmusters bei einem Luftwechsel von 0.5 h<sup>-1</sup>

Da für die folgenden Versuche im Projekt eine Zielkonzentration der Emissionsquelle von 60 µg/m<sup>3</sup> bei einer Luftwechselrate von 0.5 h<sup>-1</sup> angestrebt worden war, wurde die hierfür

erforderliche emissionsoffene Fläche der Musterplatte „MDF roh Eco“ berechnet. Die Extrapolation ergab eine erforderliche Gesamtfläche der Emissionsquelle von ca. 2.35 m<sup>2</sup>. Hierfür wurden 2 Platten mit Massen 800 x 625 x 19 mm und eine mit den Massen 500 x 350 x 19 mm verwendet (alle Kanten abgeklebt).

### 6.3 Ermittlung der Zeitspanne bis zum Erreichen der Ausgleichskonzentration nach Absenkung des Luftwechsels

Zunächst sollte überprüft werden, wie schnell sich nach Absenkung des Luftwechsels von 1 h<sup>-1</sup> auf den Zielluftwechsels eine Ausgleichskonzentration in der Prüfkammerluft einstellt. Zur Ermittlung der Dauer bis zum Erreichen der Ausgleichskonzentration wurde bei einem Luftwechsel von 0.05 h<sup>-1</sup> alle zwei Stunden eine Luftprobe gezogen. Vorangegangen war dieser Phase ein Lüftungsintervall von 10 h, bei einem Luftwechsel von 1 h<sup>-1</sup>.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine Ausgleichskonzentration unter den gegebenen Versuchsbedingungen nach ca. 9 Stunden erreicht wurde (Abbildung 4). Für die weiteren Versuche bei unterschiedlichen Luftwechselraten wurde der geplante Ablauf beibehalten und wie zuvor eine Dauer von 12 Stunden nach Einstellung des zu überprüfenden Luftwechsels bis zur Beprobung der sich einstellenden Ausgleichskonzentration beibehalten.

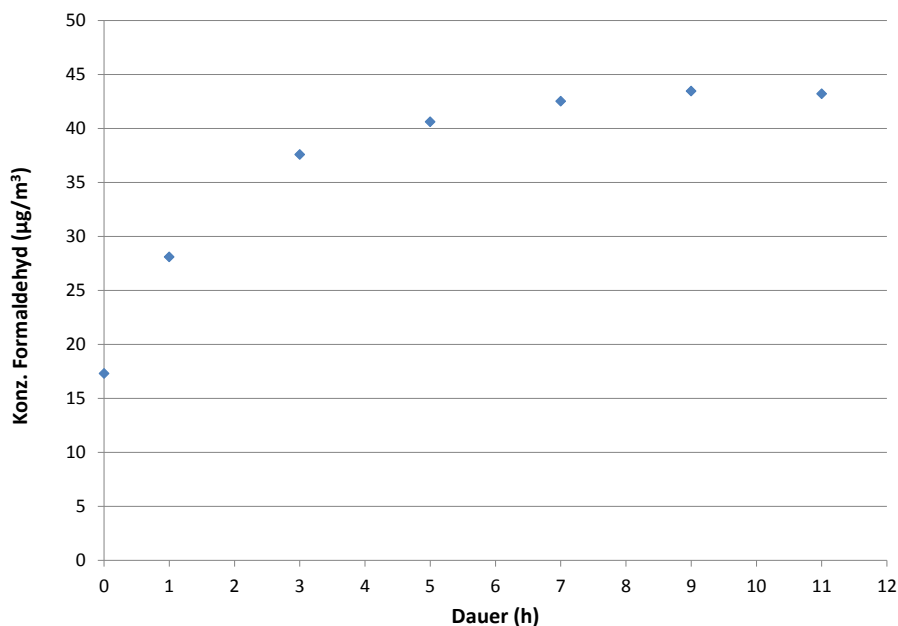


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Konzentration bei einem Luftwechsel von 0.05 h<sup>-1</sup>

#### 6.4 Erfassung der luftwechselabhängigen Formaldehyd-Konzentration in einem Prüfraum mit Emissionsquelle

Die Messungen zur luftwechselabhängigen Formaldehydabgabe umfassten zunächst lediglich MDF-Platten als Emissionsquelle. Nach Durchführung der hierzu durchgeführten Versuche in Kapitel 6.4.1 wurde entschieden, vom ursprünglichen Versuchsplan abzuweichen und entsprechende Versuche auch an weiteren Holzwerkstoffen (Spanplatten 3-Schichtplatten und OSB) durchzuführen. Hierfür wurden zusätzlich zu den untersuchten MDF-Platten noch zwei Dreischichtplatten, zwei Spanplatten und eine OSB-Platte in die Versuche integriert.

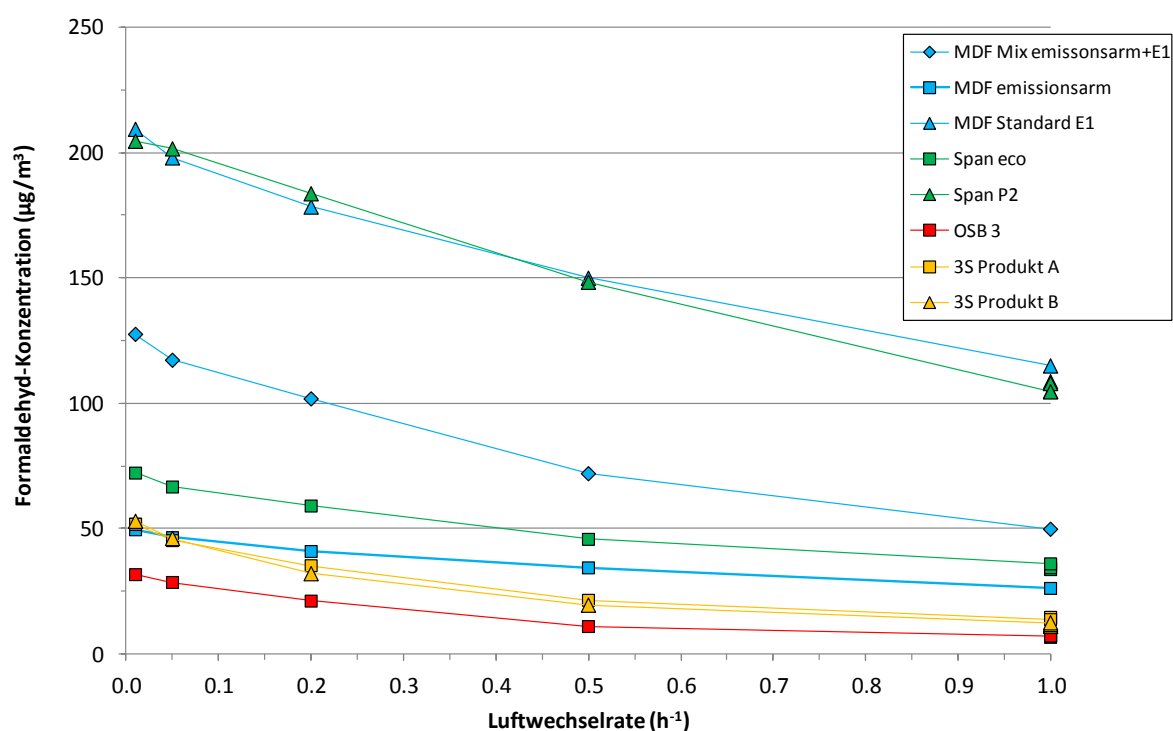


Abbildung 5: Resultierende Formaldehyd-Konzentration in der Raumluft für plattenförmige Holzwerkstoffe bei unterschiedlichen Luftwechselraten und einer Raumbeladung von 1 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

### 6.4.1 MDF-Platten

Zunächst wurden die Formaldehydkonzentrationen einer emissionsarmen MDF-Platte („MDF roh Eco“) gemessen. Für die unterschiedlichen Luftwechsel wurden mit abnehmender Luftwechselzahl ansteigende Ausgleichskonzentrationen gemessen. Während bei einem Luftwechsel von 1 h<sup>-1</sup> eine Ausgleichskonzentration von 26.2 µg/m<sup>3</sup> gemessen wird, liegt die Ausgleichskonzentration bei einem Luftwechsel von 0.01 h<sup>-1</sup> bei 49.6 µg/m<sup>3</sup> (siehe Tabelle 2 und Abbildung 6).

Ursprünglich war eine Ausgleichskonzentration von 60 µg m<sup>-3</sup> bei einem Luftwechsel von 0.5 h<sup>-1</sup> erwartet worden, die dann als geeignete Emissionsquelle für die weiteren Versuche verwendet worden wäre.

Um die gewünschte Emissionsrate der Emissionsquelle zu erreichen, wurde ein Prüfstück des emissionsarmen Produktes A mit einem weiteren Prüfstück des Produktes B kombiniert in der Emissionsprüfkammer vermessen.

Das zuvor noch separat geprüfte MDF Produkt B wies bei einem Luftwechsel von 1 h<sup>-1</sup> eine resultieren Formaldehyd-Ausgleichskonzentration von ca. 115 µg m<sup>-3</sup> auf, vergleichsweise nahe an der tolerierten Obergrenze von 120 µg m<sup>-3</sup> der EN 717-1.

Tabelle 2: Resultierende Formaldehydkonzentrationen in Abhängigkeit vom vorherrschenden Luftwechsel

Luftwechselrate (h <sup>-1</sup> )	MDF eco (Produkt A) emissionsarm	MDF (Produkt B) Standard E1	MDF Kombination (Produkte A u. B)
			Formaldehyd-Konzentration (µg/m <sup>3</sup> )
1.00	26.2	115.0	49.8
1.00	25.8	114.1	49.2
1.00	26.1	115.8	50.9
0.50	34.4	150.0	72.0
0.20	41.0	178.4	101.8
0.05	46.5	198.0	117.3
0.01	49.6	209.4	127.6

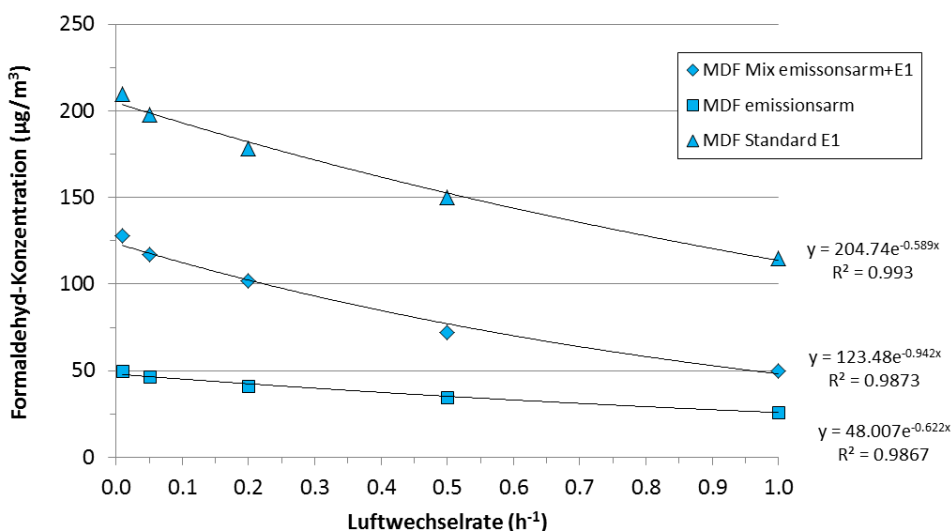


Abbildung 6: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für MDF-Platten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie.

### 6.4.2 Dreischichtplatten

Die beiden gestellten Dreischichtplatten weisen sehr geringe Formaldehyd-Emissionen bei einem Luftwechsel von  $1 \text{ h}^{-1}$  nach 28 Tagen auf (entspricht Ausgleichskonzentration gemäss EN 717-1 nach 28 Tagen). Für das Produkt wurde eine Formaldehyd-Konzentration von  $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und für das Produkt B eine Formaldehyd-Konzentration von  $14.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen (jeweils Mittelwerte der Dreifachbestimmung) (Tabelle 3).

Bei Absenkung der Luftwechselraten stiegen die sich einstellenden Formaldehyd-Konzentrationen bis zu  $53.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $51.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die Produkte A bzw. B an (Luftwechselrate  $0.01 \text{ h}^{-1}$ ). Bei Auftrag der Formaldehyd-Konzentration über die Luftwechselrate ergibt sich bei Verwendung einer exponentiellen Funktion ein Bestimmtheitsmass der Trendlinie von jeweils ca. 0.97 (Abbildung 7).

Tabelle 3: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Dreischichtplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten

Luftwechselrate ( $\text{h}^{-1}$ )	3-S Produkt A Formaldehyd-Konzentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	3-S Produkt B Formaldehyd-Konzentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1.00	14.5	11.2
1.00	14.7	11.9
1.00	13.8	12.5
0.50	21.5	19.6
0.20	35.3	32.1
0.05	45.3	46.2
0.01	51.8	53.0

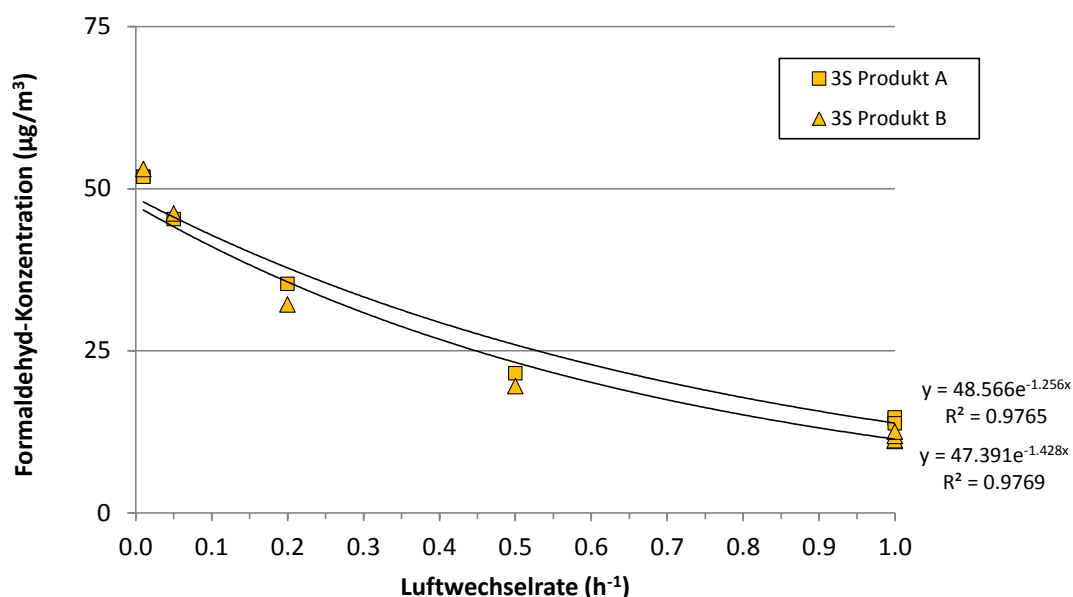


Abbildung 7: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Dreischichtplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie

### 6.4.3 Spanplatten

Für beide untersuchten Spanplattenqualitäten konnten nahezu konstante Anstiege der Formaldehyd-Konzentration bei abnehmender Luftwechselrate gemessen werden. Die Formaldehyd-Konzentration der Spanplatte P2 (Standard E1) stieg von  $104 \mu\text{g m}^{-3}$  bei einem Luftwechsel von  $1.0 \text{ h}^{-1}$  auf eine Konzentration von knapp über  $200 \mu\text{g m}^{-3}$  (Tabelle 4, Abbildung 8). Für die emissionsarme Spanplatte „Span eco“ wurde ebenfalls etwa eine Verdoppelung der Formaldehyd-Konzentration im Prüfraum bei Absenkung der Luftwechselrate gemessen. Hier stiegen die Formaldehyd-Werte von ca.  $36 \mu\text{g m}^{-3}$  (LW  $1.0 \text{ h}^{-1}$ ) auf  $72 \mu\text{g m}^{-3}$  (LW  $0.01 \text{ h}^{-1}$ ).

Tabelle 4: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Spanplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten

Luftwechselrate ( $\text{h}^{-1}$ )	Spanplatte P2 Standard E1 Formaldehyd-Konzentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Span eco emissionsarm Formaldehyd-Konzentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1.00	104.0	35.7
1.00	107.1	34.5
1.00	103.8	36.1
0.50	147.5	45.8
0.20	182.8	59.1
0.05	200.7	66.7
0.01	203.8	72.2

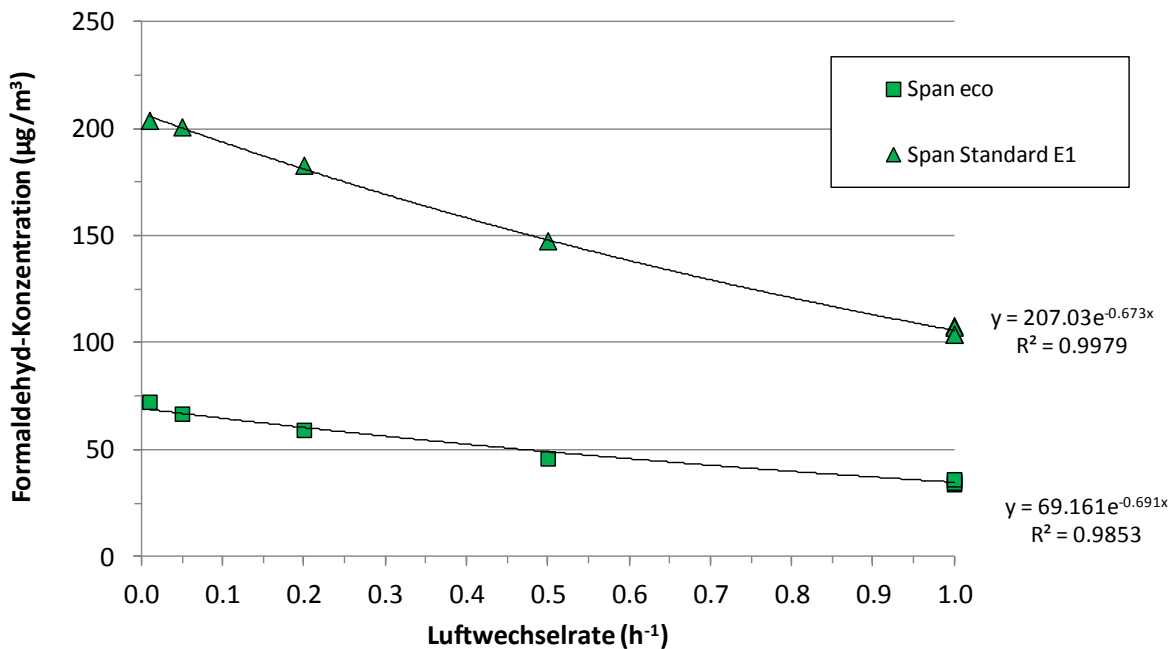


Abbildung 8: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Spanplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie

#### 6.4.4 OSB-Platte

Für die in den Untersuchungen eingesetzte OSB 3-Platte wurden bei einem Luftwechsel  $LW = 1.0 \text{ h}^{-1}$  die niedrigsten Formaldehyd-Werte im Rahmen der untersuchten Plattenwerkstoffe gemessen. Die Formaldehyd-Konzentrationen lagen bei diesem Luftwechsel bei ca.  $7 \mu\text{g m}^{-3}$  (Tabelle 5, Abbildung 9). Die Reduktion des Luftwechsels führte wie erwartet zu einer Erhöhung der Formaldehyd-Konzentration auf Werte von bis zu  $31.7 \mu\text{g m}^{-3}$  bei  $LW = 0.01 \text{ h}^{-1}$ .

Tabelle 5: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für OSB 3-Platten bei unterschiedlichen Luftwechselraten

Luftwechselrate ( $\text{h}^{-1}$ )	OSB 3 Formaldehyd-Konzentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1.00	6.7
1.00	7.2
1.00	7.0
0.50	11.0
0.20	21.1
0.05	28.6
0.01	31.7

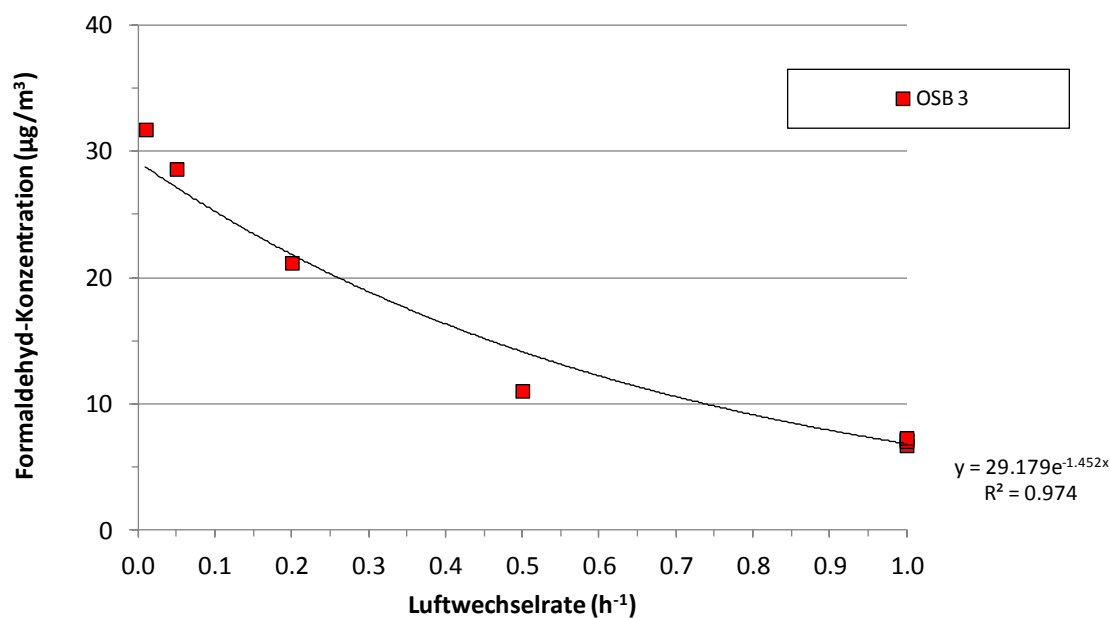


Abbildung 9: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für OSB 3-Platten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie

## 7 Diskussion und Schlussfolgerungen

### **Zeitspanne bis zum Erreichen der Ausgleichskonzentration nach Absenkung des Luftwechsels**

Die Überprüfung des zeitlichen Verlaufs der sich einstellenden Raumluft-Konzentration nach deutlicher Absenkung des Luftwechsels ergab einen Zeitraum von ca. 8-9 Stunden, nachdem sich nach Absenkung des Luftwechsels auf  $0.05 \text{ h}^{-1}$  eine gleichbleibende Formaldehyd-Konzentration eingestellt hatte. Diese Zeitspanne deckt sich relativ gut mit den zeitlichen Vorgaben für Raumluftmessungen unter „Standardbedingungen/Normbedingungen“, bei denen die Raumluftkonzentration an Formaldehyd (und weiteren Stoffen) nach intensiver Stosslüftung der Räume und anschliessender Wartezeit von min. 8 h, bei denen Türen und Fenster geschlossen zu halten sind, gemessen wird. Die im Versuch eingestellte reduzierte Luftwechselrate von  $0.5 \text{ h}^{-1}$  ist repräsentativ für die in neuer Bausubstanz bei geschlossenen Fenstern (und falls vorhanden ausgestellter Lüftungsanlage) vorliegenden Luftwechselraten. Eine Änderung der Vorgaben zur Wartezeit von 8 h erscheint auch für Gebäude mit hochdichter Gebäudehülle nicht erforderlich zu sein.

### **Anstieg der Formaldehyd-Konzentration mit abnehmenden Luftwechselraten**

Für alle gemessenen Holzwerkstoffe wurden mit abnehmender Luftwechselrate ansteigende Formaldehyd-Konzentrationen gemessen. Dabei war das Verhalten des Anstiegs weder linear noch logarithmisch. Die beste Übereinstimmung der Messpunkte einer Datenreihe mit der Trendlinie konnte bei Wahl eines exponentiellen Verlaufs der Trendlinie erreicht werden, mit zum Teil sehr hohen Bestimmtheitsmassen von bis zu 0.998 (Spanplatte Standard E1). Die unterschiedlichen Holzwerkstoffe weisen zudem leichte Unterschiede in der Ausprägung des exponentiellen Verlaufs auf. Während Spanplatten einen nur leicht exponentiellen, eher linearen Verlauf, aufweisen (Exponent ca. -0.6), ist der exponentielle Charakter des Verlaufs bei anderen Holzwerkstoffen stärker ausgeprägt (z.B. OSB, Exponent = -1.45). Ein Zusammenhang der Höhe des Exponenten z.B. zur Partikelgrösse der zur Holzwerkstoff-Herstellung eingesetzten Späne/Strands oder zu den eingesetzten Klebstoffsystemen lässt sich bei den vorliegenden Untersuchungen nicht erkennen.

Bei Betrachtung der absoluten Messwerte lässt sich feststellen, dass sich die bei einer Luftwechselrate von  $1 \text{ h}^{-1}$  gemessenen Formaldehyd-Konzentrationen (bei einer Beladung von  $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ) bei Absenkung auf einen Wert von  $0.1 \text{ h}^{-1}$  zum Teil deutlich ansteigen. Bei den in den Untersuchungen eingesetzten Plattenwerkstoffen betrug der Anstieg der Formaldehyd-Konzentration ca. 85 % (MDF-Platten), 227 % bzw. 380 % (3-Schichtplatten), ca. 100 % (Spanplatten) und 373 % (OSB 3).

Ähnliche Resultate konnten in früheren Untersuchungen an der BFH-AHB in Zusammenhang mit Untersuchungen an einer Zusammenstellung unterschiedlicher Baustoffe in Prüfräumen ermittelt werden. In einer Versuchsreihe, bei der eine Zusammenstellung eines mit PU-Lack beschichteten Eichenparketts, ein Buntlack- und ein Abrieb-Muster in einem Prüfraum untersucht worden waren, konnte eine Zunahme der TVOC-Konzentration im Prüfraum um 118 % bei einer reduzierten Luftwechselrate von  $0.1 \text{ h}^{-1}$  im Vergleich zu einer Luftwechselrate von  $1.0 \text{ h}^{-1}$  gemessen werden (Abbildung 10).

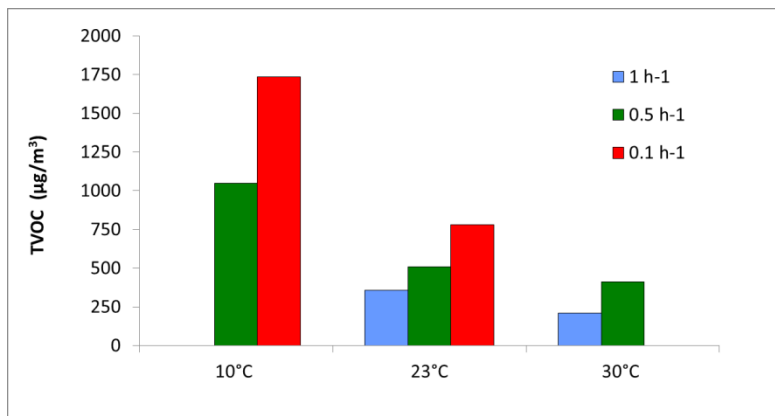


Abbildung 10 : Resultierende TVOC-Konzentration in Emissionsprüfkammern vier Wochen nach Einbringen frisch applizierter Baustoffe (lackierter Parkettboden, Buntlack und Abrieb) bei unterschiedlichen Luftwechslern und Temperaturen.

Von Meyer et al., 2014 [15] wurden Ergebnisse aus einem Projekt zur Weiterentwicklung der Andersen-Formel zur Umrechnung von Ergebnissen aus unterschiedlichen normierten Emissionsprüfungen (EN717-1, EN ISO 16000-9, ASTM E 1333, JIS A 1901 u.a.) vorgestellt. Ziel war die Entwicklung eines Umrechnungsmodells in Anlehnung an die Andersen-Formel zur Umrechnung von Messwerten zwischen den oben genannten Standards für Emissionsprüfungen, die sich hinsichtlich Temperatur und relativer Feuchte in der Prüfkammerluft unterscheiden. Der hierfür untersuchte Parameterbereich lag bei 20-28°C, 45-50% rH, einem Luftwechsel von 0.5-2 h<sup>-1</sup> und Belegungsraten zwischen 0.5 und 2 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. In diesem Bereich wurden im Projekt über 200 Einzelmessungen in einer 1 m<sup>3</sup>-Prüfkammer an Spanplatten vorgenommen. Basierend auf den Projektergebnissen wurden ein lineares und ein exponentielles Rechenmodell aufgestellt. Beide beinhalten einen „Bezugswert“ (Messwert EN717-1) und eine materialspezifische Konstante  $K_{N/L}$ , welche den „Widerstand, der der Formaldehydabgabe entgegengebracht wird“ [15] beschreibt. Die vorgestellten Ergebnisse zeigten Berechnungswerte näher am Messwert im Vergleich zum Andersen-Modell, insbesondere eine erhebliche Verbesserung bei der Berücksichtigung des Einflusses der rel. Feuchte auf die Messergebnisse und bei Verwendung der Exponentialfunktion. Allerdings wiesen die Ergebnisse des Rechenmodells bei reduzierten Luftwechselraten (0.5 h<sup>-1</sup>) deutliche Abweichungen zu den Messwerten auf [15]. Im Rahmen des Projektes wurden zudem keine Messungen bei sehr niedrigen Luftwechselraten (< 0.5 h<sup>-1</sup>) und mit anderen Holzwerkstoffen (neben den verwendeten Spanplatten) durchgeführt und die Prüfstücke gemäss EN 717-1 vorbereitet (offener Kantenanteil).

Generell kann vermutet werden, dass die Unterschiede in der Ausprägung des exponentiellen Verhaltens der Trendlinie in einem materialspezifischen Verhalten zur Formaldehyd-Abgabe liegen, welches durch folgende Faktoren bestimmt wird:

- Diffusionskoeffizient (Diffusion von freiem Formaldehyd innerhalb der Platte)
- Partitioning-Koeffizient (Übergangswiderstand von Formaldehyd aus der Platte heraus in die Raumluft)
- die Formaldehyd-Entstehungsrate (Klebstoffsystem- und Holzwerkstofftyp-abhängige Geschwindigkeit der Formaldehyd-Freisetzung aus dem Klebstoffsystem)

Es lässt sich eindrücklich belegen, dass die resultierenden Formaldehyd-Konzentrationen in Innenräumen mit geringem Luftwechslern deutlich höher liegen als in vergleichbaren Innenräumen mit höheren Luftwechslern, z.B. im Bereich der in den Baustoff-Emissionsprüfung eingesetzten Luftwechselraten von 1 h<sup>-1</sup>.

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsreihen und der dabei eingesetzten Holzwerkstoffe .....	10
Tabelle 2: Resultierende Formaldehydkonzentrationen in Abhängigkeit vom vorherrschenden Luftwechsel .....	14
Tabelle 3: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Dreischichtplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten .....	15
Tabelle 4: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Spanplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten .....	16
Tabelle 5: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für OSB 3-Platten bei unterschiedlichen Luftwechselraten .....	17

### 8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Resultierende Formaldehyd-Konzentrationen in Abhängigkeit des Luftwechsels.....	5
Abbildung 2: Verlauf der Luftwechselrate und Probenahme-Zeitpunkte im Prüfablauf.....	10
Abbildung 3: Verlauf der Formaldehydkonzentration während der Konditionierungsphase des Quellenmusters bei einem Luftwechsel von 0.5 h <sup>-1</sup> .....	11
Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Konzentration bei einem Luftwechsel von 0.05 h <sup>-1</sup> .....	12
Abbildung 5: Resultierende Formaldehyd-Konzentration in der Raumluft für plattenförmige Holzwerkstoffe bei unterschiedlichen Luftwechselraten und einer Raumbeladung von 1 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> . ....	13
Abbildung 6: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für MDF-Platten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie. ....	14
Abbildung 7: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Dreischichtplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie .....	15
Abbildung 8: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für Spanplatten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie .....	16
Abbildung 9: Resultierende Formaldehyd-Konzentration für OSB 3-Platten bei unterschiedlichen Luftwechselraten mit Angabe der Trendlinie .....	17
Abbildung 10 : Resultierende TVOC-Konzentration in Emissionsprüfkammern vier Wochen nach Einbringen eines frisch applizierter Baustoffe (lackierter Parkettboden, Buntlack und Abrieb) bei unterschiedlichen Luftwechseln und Temperaturen. ....	19

### 8.3 Literaturverzeichnis

- [1] Empfehlung nachhaltiges Bauen; KBOB c/o Bundesamt für Bauten und Logistik; Juli 2008
- [2] Reglement zur Nutzung der Qualitätsmarke Minergie-eco; Verein Minergie; Juli 2011
- [3] Qualitätssicherungssystem des Vereins Minergie für das Gebäudelabel Minergie-eco; Verein Minergie; August 2008

- [4] Planungssicherheit bei der Materialauswahl (Schlussbericht); Schweizerischer Verband für geprüfte Qualitätshäuser VQG; Aug. 2011
- [5] Tappler, Peter et al. (2006): Pilotstudie zur Untersuchung des Luftwechsels in Innenräumen; Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Endbericht Dezember 2006
- [6] Formaldehydprüfrichtlinie für Häuser aus Holz und Holzwerkstoffen; Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.; August 1993
- {7] Deng, B., Kim, C.: CFD simulation of VOCs concentrations in a resident building with new carpet under different ventilation strategies, *Building and Environment* 42 (2007), 297 – 303.
- [8] Li, F., Niu, J.: Control of volatile organic compounds indoors – Development of an integrated mass-transfer-based model and its application, *Atmospheric Environment* 41 (2007), 2344 – 2354.
- [9] Little, J.: Modeling Emissions of Volatile Organic Compounds from New Carpets, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- [10] Pepper, D., Carrington, D.: Modeling Indoor Air Pollution, Imperial College Press, 2009
- [11] Yan W., Zhang, Y., Wang, X.: Simulation of VOC emissions from building materials by using the state-space method, *Building and Environment* 44 (2009), 471 – 478.
- [12] Yang, X., Chen, Q., Zhang, J.S., Magee, R., Zeng, J., Shaw, C.: Numerical simulation of VOC emissions from dry materials, *Building and Environment* 36 (2001), 1099 – 1107.
- [13] Yang, X.: Study of building material emissions and indoor air quality. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture (1999).
- [14] IA-Quest Version 1.1.: <http://www.healthyheating.com/VOC-modelling.htm>
- [15] Meyer, B., Greubel, D., Marutzky, R.: Neues WKI-Rechenmodell für Formaldehyd. Tage der Holzforschung, 20. u. 21. März 2014. Tagungsband