Hochschule Ruhr West, Institut Bauingenieurwesen

HOCHSCHULE RUHR WEST
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Untersuchung der Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen durch die Emission von verschiedenen Materialien in Räumen

Masterarbeit

Studiengang Bauingenieurswesen

Franz König

Matrikelnummer: 10009502

Erstprüfer: Tobias Stickan (M. Eng.)

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Nebehat Özdarcin

Mülheim an der Ruhr, April 2025

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Themengebieten der flüchtigen organischen Verbindungen im Kontext des Bauingenieurwesens und der Entwicklung und Umsetzung eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen durch Emission aus Baumaterialien in Innenräumen.

Zunächst werden Grundlagen über flüchtige organische Verbindungen, Emissionsquellen, Messverfahren, Beurteilungskriterien, Normen und Regelwerke erarbeitet. Darauf aufbauend wird ein Versuchsaufbau konzipiert, realisiert und in Betrieb genommen. Für geplante Messreihen wird eine Materialübersicht von in Innenräumen häufig verwendeten Baustoffen erstellt. Nach ersten Messversuchen kann eine grundlegende Funktionsfähigkeit des Versuchsaufbaus/ -konzepts nachgewiesen werden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I
Inhaltsverzeichnis II
Abbildungsverzeichnis IV
Tabellenverzeichnis VI
Abkürzungsverzeichnis VII
1. Einleitung 1
1.1 Anlass der Arbeit, Zielsetzung 1
1.2 Aufbau der Arbeit 1
2. Flüchtige organische Verbindungen in der Innenraumluft 2
2.1 Häufige VOC in Innenräumen 3
2.2 Gesundheitliche Auswirkungen von VOC 5
2.3 Bauprodukte als Emissionsquellen von VOC 6
3. Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen TVOC 8
3.1 Analytische Verfahren 8
3.2 Direktanzeigende Verfahren 9
3.3 Aussagekraft TVOC-Wert 10
4. Beurteilung der Innenraumluft 12
4.1 Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) Deutschland 13
4.1.1 Richtwerte für die Innenraumluft 13
4.1.2 Leitwerte für die Innenraumluft 14
4.2 Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB) 15
4.3 Arbeitskreis Innenraumluft Österreich 17
4.5 Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) 18
5. Regelungen, Normen 19
5.1 Gesetzliche Vorgaben, Regelungen 19
5.1.2 EU-Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO) 20
5.1.3 Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) 20
5.1.4 Arbeitsstättenverordnung 21

5.2 Richtlinien, Normen 22
5.2.1 DIN EN ISO 16000 Innenraumluftverunreinigungen 22
5.2.2 Din EN 16516 Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen 23
5.2.3 EN ISO 16017 Probenahme und Analyse flüchtiger organischer Verbindungen durch Sorptionsröhrchen/..... 23
5.2.4 VDI 4300 Blatt 6 Messstrategien für flüchtige Organische Verbindungen (VOC) 23
5.2.5 VDI/VDE 3518 Multigassensoren..... 23
6. Versuchsaufbau/ Messstand 24
6.1 Entwurf und Aufbau 24
6.2 Komponenten 27
6.2.1 Prüfkammer 27
6.2.2 Messkammer 30
6.2.3 Pumpe..... 32
6.2.4 Ventile, Ventil-/ Pumpensteuerung..... 33
6.2.5 Verbindungselemente 35
6.2.6 Trockenschrank 35
6.3 Messkonzept 36
6.3.1 Sensor Bosch BME688 36
6.3.2 Sensorsteuerung, Messdatenerfassung..... 38
6.3.3 Messdatenauswertung 40
6.4 Zusammenbau, Inbetriebnahme 42
7. Durchführung 44
7.1 Voruntersuchungen 45
7.1.1 Temperaturstabilität Trockenschrank, Prüfkammern..... 45
7.1.2 Volumenermittlung Prüfkammer..... 48
7.1.3 Volumenstrom Pumpe..... 49
7.1.4 Materialauswahl zur Untersuchung 50
7.1.5 Kunststoffe für Parameterermittlung..... 52

7.2 Parameterermittlung Messzyklus 53
7.2.1 Versuchsreihe 1 56
7.2.2 Versuchsreihe 2 57
7.2.3 Versuchsreihe 3 58
7.2.4 Versuchsreihe 4-6 59
7.2.5 Versuchsreihe 7 60
7.2.6 Versuchsreihe 8-9 62
7.2.7 Versuchsreihe 10 63
7.2.8 Versuchsreihe 11-12 65
7.2.9 Versuchsreihe 13-15 66
7.3 Finaler Status Messstand, Fehlersuche, Änderungen 68
8. Zusammenfassung und Ausblick 70
9. Literaturverzeichnis 71
Erklärung 76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: AgBB-Bewertungsschema zur Bewertung von Emissionen aus Bauprodukten 16
Abbildung 2: Konzept Versuchsaufbau 24
Abbildung 3: Phasen eines Messzyklus 26
Abbildung 4: Drahtbügelglas, Deckel 27
Abbildung 5: 3D Model Deckel (links), Deckel Prototyp gedruckt (rechts) 28
Abbildung 6: Fertiger Deckel aus Aluminium (links), Dichtheitsprüfung (rechts) 28
Abbildung 7: Fertiger Prüfkammer mit Anschlüssen 29
Abbildung 8: Messkammer CAD-Entwurf. „Sensor“-Hälfte (links), „Außenwand“ (rechts) 30
Abbildung 9: Messkammer fertig 31
Abbildung 10: Messkammer Sensorik eingebaut (links), Messkammer montiert (rechts) 31

Abbildung 11: Modifizierte Kolben-Vakuumpumpe (links), Bauteile Pumpenkopf (rechts) 32
Abbildung 12: Magnetventil 33
Abbildung 13:ATMEGA 2560 Board 33
Abbildung 14: Auszug Quellcode Steuerung 34
Abbildung 15: Loop Messzyklus 34
Abbildung 16: Zu-/ Abluft-Verteiler mit montierten Stecknippeln 35
Abbildung 17: Signalverarbeitung BME688 und BSCE 37
Abbildung 18: Sensor BME688 (rot umrandet) auf Leiterplatte 38
Abbildung 19: Microcontroller Sensorsteuerung 39
Abbildung 20: Ausschnitt Coolterm 39
Abbildung 21: Bsp. einer Pivot-Tabelle zur Auswertung 41
Abbildung 22: Versuchsaufbau testweise montiert 42
Abbildung 23: Montierter Versuchsaufbau im Trockenschrank mit bestückten Prüfkammern 43
Abbildung 24: Montierte Messkammer 43
Abbildung 25: Arbeitsplatz Messstand 43
Abbildung 26: Glas im Trockenschrank, Positionierung Temperatursensoren 46
Abbildung 27: Gläser im Trockenschrank, Positionierung Temperatursensoren 47
Abbildung 28: Messung Volumen Prüfkammer 48
Abbildung 29: Messung Volumenstrom Vakuumpumpe 12V 49
Abbildung 30: Probekörper A-F 51
Abbildung 31: Probekörper auf Halter (links), Glas mit Sensor und Probekörper (rechts) 52
Abbildung 32: Ablauf Messintervall/ Messzyklus, Phasen/Parameter Bezeichnung 53
Abbildung 33: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.04-07, M-Phasen markiert 56
Abbildung 34: Ausschnitt Temperaturverlauf VD_2025.02.04-07 57

Abbildung 35: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.10-11, M-Phasen markiert 57
Abbildung 36: Ausschnitt Temperaturverlauf VD_2025.02.10-11..... 58
Abbildung 37: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.13-14 58
Abbildung 38: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.13-14, Phasen markiert 59
Abbildung 39: Exemplarische M-Phase 5 [min] aus VD_2025.02.18-20 59
Abbildung 40: Exemplarische M-Phase 10 [min] aus VD_2025.02.20-21 60
Abbildung 41: Exemplarische M-Phase 20 [min] aus VD_2025.02.14-17 60
Abbildung 42: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.21-24 61
Abbildung 43: Defekte Pumpenmembran, verdreckte Pumpenteile 61
Abbildung 44: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.26-28 62
Abbildung 45: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.28-04 63
Abbildung 46: Pumpenkopf mit Membran auf Glasfaserverstärktem PTFE 63
Abbildung 47: Ausschnitt IAQ-Messwerte Tagesverlauf VD_2025.03.05-13 ... 64
Abbildung 48: Ausschnitt IAQ-Messwerte Wochenende VD_2025.03.05-13 ... 64
Abbildung 49: Ausschnitt CO_2-Messwerte VD_2025.03.14-20..... 65
Abbildung 50: Luftfilter 66
Abbildung 51: Niederschlag Leitungen..... 66
Abbildung 52: Ausschnitt IAQ-Messwerte Tagesverlauf VD_2025.04.02-04 ... 67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemische Stoffgruppen und Einzelstoffe häufiger VOC in Innenräumen 3
Tabelle 2: Mögliche gesundheitliche Wirkungen von VOC bei inhalativer Aufnahme..... 6
Tabelle 3: Bauprodukte und mögliche VOC-Emissionen 7
Tabelle 4:Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft 14
Tabelle 5: Beurteilung von Summenkonzentrationen..... 17
Tabelle 6: Festgelegte Messwerte, Signale 40

Tabelle 7: Übersicht Bauprodukte als VOC Quelle 50
Tabelle 8: Ausgewählte Materialien 51
Tabelle 9: Auswirkungen Dauer t der Phasen 53
Tabelle 10: Auflistung Versuchsreihen 54
Tabelle 11: Mögliche Änderungen Versuchsaufbau 69

Abkürzungsverzeichnis

AgBB	Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten
AIR	Ausschuss für Innenraumrichtwerte
DIBt	Deutsche Institut für Bautechnik
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
LBO	Landesbauordnung
MBO	Musterbauordnung
TPU	Thermoplastische Polyurethane
VOC	Flüchtige organische Verbindungen, engl. Volatile Organic Compounds
TVOC	Summe flüchtiger organischer Verbindungen, engl. Total Volatile Organic Compound
SVOC	Schwerflüchtige organische Verbindungen
VVOC	Sehr flüchtige organische Verbindungen
BSCE	Bosch Software Enviromental Cluster
IAQ	Index for Air Quality, Luftqualitätsindex
AN	Ansaugen, Ansaug-Phase
M	Messen, Mess-Phase
SP	Spülen, Spül-Phase
W	Wartezeit

1. Einleitung

1.1 Anlass der Arbeit, Zielsetzung

Im Rahmen eines geplanten Forschungsvorhabens der Hochschule Ruhr West soll das Driftverhalten von kapazitiven Luftfeuchtesensoren untersucht werden. Wesentlichen Einfluss auf das Driftverhalten haben dabei flüchtige organische Verbindungen (VOC), wobei nicht die Art, sondern die Gesamtkonzentration der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) entscheidend ist. Aus diesem Grund soll in einem zukünftigen Projekt das Driftverhalten der Sensoren bei verschiedener VOC Belastung untersucht werden. Hierfür sollen zunächst Grundlagen auf dem Themenfeld VOC und TVOC erarbeitet werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, dem Leser Grundlagenwissen zu den Themenfeldern VOC, TVOC, Bauprodukte, Messverfahren, Beurteilungsmöglichkeiten, gesetzliche Vorgaben, Richtlinien und Regelungen im Umfeld des Bauingenieurwesens zu vermitteln.

Weiterhin wird ein Versuchsaufbau zur Messung möglicher VOC-Konzentrationen aus Baustoffproben konzeptioniert und realisiert, mit welchem im Anschluss die TVOC-Emission vorher festgelegter Baustoffe gemessen werden sollen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Die Kapitel 2-5 bilden dabei den theoretischen Grundlagenteil. Kapitel 2 gibt einen Überblick über das Themengebiet VOC, häufige VOC in Innenräumen, ihre gesundheitlichen Auswirkungen und ihr Vorkommen in Bauprodukten. Kapitel 3 behandelt die Themen TVOC, mögliche Messverfahren und die Aussagekraft eines TVOC-Wertes. Kapitel 4 zeigt mögliche Bewertungskriterien der Innenraumluftqualität in Bezug auf VOC und TVOC. Kapitel 5 erläutert die wichtigsten Regelungen und Normen, die in Bezug auf VOC und TVOC in Erscheinung treten.

Kapitel 6-8 umfassen den praktischen Aufgabenteil dieser Arbeit. Kapitel 6 beschreibt Konzept und Aufbau des entwickelten Versuchsaufbaus. Kapitel 7 führt durch die Versuchsdurchführung. Kapitel 8 fasst die Ergebnisse der Versuche zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Arbeiten und Fragestellungen. Die graphisch aufgearbeiteten Messdaten sind vollständig separat im elektronischen Anhang hinterlegt.

2. Flüchtige organische Verbindungen in der Innenraumluft

Zahlreiche wissenschaftliche Studien belegen, dass die Entwicklung von Atemwegserkrankungen, Entzündungsreaktionen und Reizschäden an Atemwegen und Augen, systemischen Schädigungen, Sensibilisierungen/ Allergien sowie unspezifischen Symptomen wie Unwohlsein und Kopfschmerzen in direktem Zusammenhang mit der Innenraumluftqualität und Luftverunreinigungen stehen [1].

Die Luft in Innenräumen kann auf verschiedene Weise mit Fremdstoffen verunreinigt werden. Neben Eintragungen von Substanzen durch die Außenluft und Verursachung durch die Bewohner selbst, sind Baumaterialien und Einrichtungsgegenstände Hauptemissionsquelle für Verunreinigungen der Innenraumluft. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Verunreinigungen sind die sogenannten flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, engl. Volatile Organic Compounds), welche die Qualität der Innenraumluft in hohem Maße beeinflussen können. Je nach Nutzung, Alter und Beschaffenheit der verwendeten Baumaterialien und Einrichtungsgegenstände, geben diese unterschiedliche Mengen an VOC in die Umgebungsluft ab [2] [3].

Mit VOC sind alle organischen Verbindungen gemeint, die bei Raumtemperatur, oder höher in die Gasphase überwechseln. Dazu gehören beispielsweise Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde und organische Säuren. Ebenso Lösemittel, synthetisch hergestellte Stoffe sowie aus biologischen Prozessen entstandene Verbindungen. Viele verschiedene Einzelverbindungen können sich gemeinsam in einer Luftprobe befinden [4] [5].

Aufgrund der Vielfalt an flüchtigen organischen Verbindungen werden sie weiter bspw. anhand ihrer physikalischen Eigenschaften (Siedebereich), oder analytischer Gesichtspunkte (Retentionszeit in der Gaschromatographie) in Gruppen unterteilt [2] [4] [3]:

- VVOC: Sehr flüchtige organische Verbindungen
- VOC: Flüchtige organische Verbindungen
- SVOC: Schwerflüchtige organische Verbindungen

Eine Unterteilung nach analytischen Gesichtspunkten erfolgt in der DIN ISO 16000-6 und DIN EN 16516, unter Ausnutzung der individuellen Stoffeigenschaften, mittels Messung der Retentionszeiten der Stoffe in einer Gaschromatographischen Analyse unter Zuhilfenahme der Referenzsubstanzen Hexan und Hexadecan [2]. VOC sind hier nach alle organischen Verbindungen,

welche auf einer gaschromatographischen Trennsäule zwischen n-Hexan und einschließlich n-Hexadecan eluieren. VVOC alle organischen Verbindungen, die vor n-Hexan eluieren und SVOC nach n-Hexadecan [6].

2.1 Häufige VOC in Innenräumen

Einzelne VOC können anhand ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer Molekülstruktur in chemische Stoffgruppen unterteilt werden. Stoffe mit derselben charakteristischen Struktur im chemischen Aufbau, oder denselben funktionellen Gruppen in der Molekülstruktur werden in einer gemeinsamen Stoffgruppe zusammengefasst. Die Bestimmung und Untersuchung von einzelnen VOC geschieht durch analytische Verfahren. Die Menge der in einer Luftprobe vorhandenen VOC wird als Stoffgemisch bezeichnet. Dieses setzt sich aus Einzelstoffen, verschiedener Stoffgruppen und Konzentrationen zusammen. Für die Angabe der Gesamtkonzentration der einzelnen VOC eines Stoffgemisches wird der Summenparameter TVOC verwendet [3].

VOC haben eine wichtige Bedeutung für die Luftqualität in Innenräumen, da sie diese im erheblichen Maße mitbestimmen und beeinflussen. Ihre Quellen sind sehr verschieden, weshalb Innenraumluft eine vielfältige qualitative sowie quantitative Zusammensetzung verschiedener VOC aufweist [3].

Eine Übersicht von häufigen in Innenräumen anzutreffenden chemischen Stoffgruppen und ihnen zugeordneten Einzelstoffen von VOC sind in Tabelle 1 aufgelistet. Sie werden z.B. aus Lacken, Klebstoffen, Möbeln, Teppichen, Reinigungsmitteln, Holzwerkstoffen, Dichtstoffen, Pflanzen und Lösemitteln etc. emittiert. Ebenso durch menschliche Aktivitäten wie Kochen, Rauchen und Putzen. Die jeweilige Konzentration ist von weiteren Parametern wie der Menge der vorhandenen Materialien, Lüftung, Raumnutzung, Temperatur etc. abhängig [3].

Tabelle 1: Chemische Stoffgruppen und Einzelstoffe häufiger VOC in Innenräumen

Stoffgruppe	Zugeordnete Einzelstoffe (VOCs)
allphatische Kohlenwasserstoffe	n-Hexan, n-Heptan (n-Alkane) 2-Methylpentan (iso-Alkan) Hepten, Octen (ungesätigte n-Alkane) Cyclohexan, Methylcyclopentan (ringförmige Alkane) 4-Vinylcyclohexen (ungesättigt ringförmiges Alkan)
aromatische Kohlenwasserstoffe	Toluol, Xylol, Ethylbenzol, Propylbenzol, p-Cymol (Alkylbenzole) Styrol (auch Vinylbenzol genannt) Naphtalin (bicyclisches aromatisches Ringsystem)
Aldehyde	Formaldehyd, Acetaldehyd und Hexanal, Heptanal, Octanal, Nonanal

(funktionelle Gruppe: -CHO)	(gesättigte Aldehyde) 2-Ethylhexanal (verzweigter Aldehyd) 2-Heptenal, 2-Octenal (ungesättigte Aldehyde) Benzaldehyd (aromatischer Aldehyd) Furfural (heteroaromatischer cyclischer Aldehyd)
Carbonsäuren (funktionelle Gruppe: -COOH)	Hexansäure, Heptansäure, Octansäure (höherkettig) Essigsäure, Propionsäure, Butansäure (Buttersäure) (niederkettig) Adipinsäure (Dicarbonsäure) Acrylsäure (auch 2-Propensäure genannt, ungesättigte Säure)
Alkohole (Funktionelle Gruppe: -COOR)	2-Propanol, n-Butanol 2-Ethylhexanol 1,4-Butandiol (zwei OH-Gruppen) Cyclohexanol (ringförmig) Phenol, Benzylalkohol (Alkohole mit einem aromatischen Ring)
Ester (funktionelle Gruppe: -COOR)	Ethylacetat (auch Essigsäureethylester genannt), 1-Butylacetat, iso-Butylacetat (auch Essigsäureisobutylester genannt) Adipinsäuredimethylester (Dicarbonsäureester) n-Butylacrylat (auch Acrylsäure-n-butylester genannt) und 2-Ethylhexylacrylat (Acrylsäureester) Methacrylsäuremethylester (Alkylacrylsäureester) Tributylphosphat, Tris (2-chlorethyl)phosphat (auch TCEP genannt, Phosphorsäureester)
Gkykolverbindungen	Ethylenglycol, Diethylenglycol, Propylenglycol, Ethylenglycolbutyl-ether, Diethylenglykolethylether, Diethylenglykolbutylether, Diethyl-englykolbutyletheratat, 2-Propylenglykol-1-methylether
Ketone (funktionelle Gruppe: >C=O)	2-Butanon (auch Methylethylketon [MEK] genannt) 4-Methylpentan-2-on (auch Methylisobutylketon [MIBK] genannt) Cyclohexanon (ringförmige Struktur) Acetophenon (auch Methylphenylketon genannt, Keton mit aromatischen Ring)
Terpene	A-Pinen, ß-Pinen, Δ-3-Caren (bicyclische Monoterpene) Limonen (monocyclisches Terpen)
Oxime	2-Butanonoxim (MEKO)

Quelle: [3]

2.2 Gesundheitliche Auswirkungen von VOC

Aufgrund der Vielzahl an vorhandenen VOC sind die verschiedensten Auswirkungen auf Organismen möglich. Von unbekannten Wirkungen bis zur hohen gesundheitlichen Schädigung. Der Hauptexpositionsweg der Stoffaufnahme sind dabei die Atemwege. Ein inhalativ aufgenommener gesundheitsschädlicher Stoff, wirkt oftmals direkt im Atemtrakt. Andere Stoffe werden im Organismus verteilt und schädigen bspw. Organe und das zentrale Nervensystem [3].

Neben der stofflichen Zusammensetzung sind die Stoffkonzentration, die Dauer der Exposition und die aufgenommene Stoffmenge für die Abschätzung der gesundheitlichen Gefährdung wichtig. Nachweisbare Wechselwirkungen eines Stoffes mit dem Organismus werden eingeteilt in reversibler Art (der Organismus ist in der Lage Beschädigungen zu beheben) und irreversibler Art (bleibende Schädigung des Organismus). Das Risiko eines Stoffes beruht auf der Wahrscheinlichkeit der gesundheitlichen Schädigung eines Raumnutzers bei dessen Exposition. Oft tritt eine Gesundheitsschädigung durch einen Stoff erst bei der Überschreitung eines Schwellenwertes der Stoffkonzentration am Wirkort auf. Jedoch wird bei krebserzeugenden Stoffen von einer Schwellenwert unabhängigen Schädigung ausgegangen [3].

Als gesundheitlich problematisch zu bewertende Stoffe gelten alle, die über ein kanzerogenes (krebsauslösendes), mutagenes (erbgutveränderndes) oder reproduktionstoxisches (fortpflanzungsschädigendes) Wirkpotential verfügen. Die Exposition solcher Stoffe gegenüber Menschen sowie Stoffen die sensibilisierende bzw. allergieauslösende Eigenschaften und ein Anreicherungspotential im menschlichen Organismus haben, ist abzulehnen [3].

Die gesundheitlichen Auswirkungen reichen von Geruchsbelästigungen bei schon sehr niedrigen Stoffkonzentrationen, die das Wohlbefinden stören, über Beschwerden bis hin zu möglichen, meist bei deutlich höheren Stoffkonzentrationen, dauerhaften gesundheitlichen Schäden [3].

Auftretende gesundheitliche Wirkungen bei Menschen können wie folgt unterteilt werden [3]:

- Reizwirkung an Augen und Atemwegen, Ausbildung von Atemwegserkrankungen
- Befindlichkeitsstörungen (Müdigkeit, Kopfschmerzen, etc.)
- Funktionsstörungen von Organen
- Geruchsbelästigungen
- Beeinflussung des blutbildenden Systems

- Beeinflussung des Immunsystems
- allergische Erkrankungen

Eine Liste von möglichen gesundheitlichen Wirkungen durch inhalative Aufnahme von VOC und ihre möglichen verursachenden Stoffgruppen/ Einzelstoffe ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Mögliche gesundheitliche Wirkungen von VOC bei inhalativer Aufnahme

Wirkungen	Stoffgruppen/ Einzelstoffe
Sensorische Reizwirkungen (Jucken/ Brennen/ Tränen von Nase, Augen etc.) **Reizungen mit Entzündungsreaktionen und Gewebeschädigung (Atemwege, Lungenfunktionsstörung)**	Alkohole, Aledhyde, Ketone, Ester, organische Säuren 2-Ethylhexanol, Formaldehyd, Pentanal, Ethylacetat, Buttersäure
Neurotoxische Wirkungen (Kopfschmerzen, Schwindel, Sehstörungen, Übelkeit, Koordinationsstörungen, etc.)	Aromatische Kohlenwasserstoffe (Toluol, Xylol, Styrol und weitere Alkylbenzole) Aliphaische Kohlenwasserstoffe (wirken am Zentralnervensystem)
Geruchsbelästigung	Aldehyde (Octanal, Nonanal, Decanal) aromatische Kohlenwasserstoffe (Styrol) Terpene, Carbonsäuren (Propion- oder Buttersäure), Alkohol (1-Butanol)
sensibilisierende, allergieauslösende Eigenschaften (Haut, Atemwege)	Limonen (Terpen), Iso-thiazolin-Derivate: 5-Chlor-2-methyl-4-isothiazolin-3-on (CIT) und 2-Methyl-4-isothiazolin-3-on (MIT) Butanonoxim

Quelle: [3]

2.3 Bauprodukte als Emissionsquellen von VOC

Eine der Emissionsquellen für VOC in Innenräumen sind Bauprodukte. Die spezifische Materialzusammensetzung eines Produktes ist dabei sehr individuell. Es kann aus wenigen natürlichen, bis vielen synthetischen Materialien aus organischen Stoffen sowie Kombinationen aus beidem bestehen. Für das Erreichen bestimmter Produkteigenschaften werden Zusatzmittel wie bspw. Weichmacher, Lösemittel, Bindemittel und Füllstoffe eingesetzt. Ebenso unterscheiden sich die jeweiligen spezifischen Materialien eines Bauproduktes teils deutlich in ihrer chemischen Zusammensetzung, der Anzahl der enthaltenden Einzelstoffe und dem Stoffgehalt. So kommt es zu jeweils eigenen spezifischen Emissionscharakteristiken von Bauprodukten und einer großen Bandbreite an möglichen VOC-Emissionen. Bauprodukte derselben

Bauproduktgruppe (Bodenbeläge, Holzwerkstoffe, etc.) können dabei stark in ihrer Emissionscharakteristik variieren. In derselben Produktgruppe kann es emissionsarme, sowie stark emittierende Bauprodukte geben [3].

Oft stammen die freigesetzten VOC in Innenräumen aus Bodenbeläge, Farben, Oberflächenbeschichtungen und Holzwerkstoffen. Aufgrund ihres hohen mengen- und flächenmäßigen Einsatzes sind sie als potentielle Emissionsquelle für VOC von wesentlicher Bedeutung [3].

In Tabelle 3 sind mehrere Bauproduktgruppen und ihre möglichen VOC-Emissionen exemplarisch aufgelistet. Diese sollten jedoch aufgrund der möglichen Vielfalt der Produkte nicht als repräsentativ betrachtet werden [3].

Häufige nachweisbare Stoffgruppen von VOC in Bauprodukten sind aliphatische Kohlenwasserstoffe, aromatische Kohlenwasserstoffe, Aldehyde, Carbonsäuren, Alkohole, Ester, Glykolverbindungen, Ketone, Terpene, Ether und Siloxane [3].

Tabelle 3: Bauprodukte und mögliche VOC-Emissionen

Bauproduktgruppe	Mögliche Quellen/ Stoffe
Bodenbeläge	Weichmacher: Phthalate, 2-Ethylhexanol Kork: höherkettige Aldehyde, Furfural Linoleum: höherkettige Aldehyde, Säuren
Holz, Holzwerkstoffe	Terpene: α-Pinen, ß-Pinen, ∆-3-Caren, Limonen Aldehyde: C3- bis C9-Aldehyde Säuren: Essigsäure, Hexansäure Formaldehyde aus Leimen etc.
Farben, Lacke	aliphatische, aromatische Kohlenwasserstoffe Alkohole, Aldehyde, Ketone, Ester u.a.Terpene, Siloxane wasserbasierte Dispersionslacke/ -farben: Glykolverbindungen, Isothiazolinderivate Lösemittel verschiedener Art
Dichtstoffe, Klebstoffe	Polyorganische Siloxanverbindungen, fungizide, Essigsäuren Phthalsäureester (Weichmacher). Isothiazolnverbindungen
Dämmstoffe	Flammschutzmittel: Trisphosphat, Triethylphosphat

Quelle: [3]

3. Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen TVOC

Der Begriff TVOC (en.: Total Volatile Organic Compound, dt. : Summe flüchtiger organischer Verbindungen) wird oft in Zusammenhang mit Luftkennwerten, Analysen und Luftqualität verwendet. Dabei unterliegt er keiner genauen Definition, steht aber meist für eine Gesamtsumme gemessener VOC Konzentrationen in der Luft. Je nach Messmethode einschließlich VVOC und SVOC-Werten. Deshalb kann ein TVOC-Wert nur mit Werten derselben Messmethodik verglichen werden [7].

Es kommen verschiedene Messmethoden zur Bestimmung eines TVOC-Werts zum Einsatz. Hauptsächlich basieren diese auf zwei Prinzipien. Messungen mit direkt anzeigenden Messgeräten, welche nicht nach der Zusammensetzung des VOC-Gemisches unterscheiden und in Echtzeit einen TVOC-Wert ausgeben. Sowie analytische Verfahren, welche durch Anreicherung einer Luftprobe in einem Sorben mit nachgelagerter gaschromathographischer Untersuchung den TVOC-Wert bestimmen und eine Aufschlüsselung der enthaltenen VOCs ermöglichen [8].

3.1 Analytische Verfahren

Die Bestimmung einer TVOC Konzentration mittels eines analytischen Standardverfahrens wurde 2004 in der DIN ISO 16000-6 festgelegt. Sie definiert den TVOC-Wert als Summe der Konzentrationen aller bestimmten und nicht bestimmten VOCs, welche bei einer gaschromathographischen Untersuchung zwischen n-Hexan und n-Hexadecan eluieren. Hierfür wird als Analysegeräte, ein Gaschromatographisches System mit einem Massenspektrometer (MS) oder Flammenionisationsdetektor (FID) und ein Thermodesorptionsgerät (TD) benötigt. Die DIN 16000-6 beschreibt vier Methoden für die Berechnung eines TVOC-Wertes. Die jeweils mit einer Methode berechneten Werte sind untereinander nicht vergleichbar [7] [6].

$TVOC_{TIC/Tol}$ und $TVOC_{FID/Tol}$: Berechnung der Gesamtkonzentration aus der Summe der Massen aller Verbindungen, die in einem festgelegten Bereich des Chromatogramms eluieren, und mithilfe des TIC-Responsefaktors oder des FID-Responsefaktors, für Toluol quantifiziert wurden.

$TVOC_{ID}$: Berechnung der Gesamtkonzentration aus der Summe aller, anhand stoffspezifischer Standards quantifizierten, identifizierten zu untersuchenden Verbindungen, identifizierten nicht zu untersuchenden Verbindungen und nicht

identifizierten Verbindungen quantifiziert mit Hilfe des TIC-Responsefaktors für Toluol, die in einem festgelegten Bereich des Chromatogramms eluieren.

$TVOC_{MEQ}$: Berechnung der Gesamtkonzentration anhand der VOC-Masse der Fläche eines bestimmten Bereiches des Chromatogramms, bestimmt mithilfe des TIC- oder FID-Responsefaktors für Toluol.

3.2 Direktanzeigende Verfahren

Direkt anzeigenden Messgeräte bedienen sich verschiedener Detektionssysteme. Jedes basiert auf einem anderen Funktionsprinzip und variiert in Genauigkeit, Detektionsbereich und Anschaffungspreis. Sie differenzieren meist nicht zwischen VOCs, VVOCs und SVOCs. Im folgenden Abschnitt sind mit dem Begriff VOC alle flüchtigen organischen Verbindungen einschließlich VVOCs und SVOCs gemeint. Es können Gesamtkonzentrationen als TVOC-Wert, oder teilweise auch spezifische Stoffe detektiert werden. Verwendung finden photoakustische Sensoren (PAS), Flammenionisationsdetektoren (FID), Photoionisationsdetektoren (PID), nichtdispersive Infrarotsensoren (NDIR), Metalloxidsensoren (MOX) und elektrochemische Sensoren (EC) [7]. Ihre jeweiligen Funktionsweisen werden folgend kurz aufgeführt:

$TVOC_{PAS}$ (Photoakustisch): In einer Messzelle wird eine Luftprobe mittels einer gepulsten Lichtquelle bestrahlt. Die Moleküle absorbieren das Licht unterschiedlich und erwärmen die Probe. Hierdurch entstehen, bei konstanter Volumengröße der Messzelle akustische Wellen, deren Frequenz mit der Modulationsfrequenz der Lichtquelle übereinstimmt. Diese Wellen, das photoakustische Signal, können mittels Mikrofonen detektiert werden. Ihre Signalamplitude korreliert mit der Stärke der Absorption und gibt dadurch Aufschluss über die VOC-Konzentration in der Messzelle [9].

$TVOC_{FID}$ (Flammenionisation): Das Prinzip des FID-Detektors beruht auf der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit einer Wasserstoffflamme in einem elektrischen Feld. Eine Luftprobe wird in die Flamme geleitet und dort enthaltene VOCs thermisch Ionisiert. Der Ionenstrom wird gemessen und ist proportional zur Konzentration der organischen Verbindungen in der Probe. Er gibt so Aufschluss über die Gesamtkonzentration, jedoch nicht über spezifische VOCs [10].

$TVOC_{PID}$ (Photoionisation): Der PID-Detektor arbeitet mit dem Prinzip der Ionisierung gasförmiger Stoffe durch UV-Licht. In einer Messkammer wird die zu untersuchende Luft mittels einer UV-Lampe ionisiert. Befinden sich vom UV-Licht

ionisierbare Substanzen in der Probe, entsteht im elektrischen Feld der Messkammer ein Stromfluss, welcher sich proportional zur Konzentration verhält. Dieser gibt eine Gesamtkonzentration der in der Probe vorhandenen ionisierbaren Luftbestandteile aus. Dazu gehören eine Vielzahl an gängigen VOCs [11] [12].

NDIR (nichtdispersive Infrarotsensoren): NDIR Sensoren nutzen die charakteristischen Absorptionsspektren verschiedener Gase für die Bestimmung spezifischer Verbindungen und deren Konzentrationen. In einer Messkammer befindet sich ein Infrarotstrahler gegenüber einem Infrarotsensor. Dieser misst die Stärke der ankommenden Strahlung und wird mittels eines Filters auf das Absorptionsspektrum eines spezifischen VOC-Stoffes eingestellt. Die Luftprobe wird eingeleitet und absorbiert einen Teil der ausgesendeten Infrarotstrahlung. Der Sensor registriert die ankommende stärke der Strahlung und gibt diese als Messsignal aus. Mit zunehmender Konzentration des VOCs erhöht sich die Absorption und das Signal wird schwächer [13].

MOX (Metalloxidsensor/ Halbleitersensor): Bestimmung der Konzentration eines VOCs über die elektrische Leitwertänderung einer sensorisch aktiven Schicht durch Reaktion auf oxidierende und reduzierende Gase. Durch Verwendung einer geeigneten Beschichtung kann eine hohe Selektivität auf spezifische VOCs erreicht werden. Die gassensitive Schicht wird beheizt und kann durch Änderung der Betriebstemperatur die Sensitivität des Sensors zusätzlich beeinflussen. Betriebstemperaturen liegen zwischen 300-900°C [14].

EC (Elektrochemischer Sensor): Das Prinzip des EC-Sensors beruht auf der Reaktion eines Gases mit zwei katalytisch wirkenden Elektroden innerhalb des Sensors und den so entstehenden messbaren elektrischen Signalen. Diese sind linear proportional zur Konzentration und geben Auskunft über die Konzentration des spezifischen, zu untersuchenden Stoffes [15].

3.3 Aussagekraft TVOC-Wert

Bei einem TVOC-Wert handelt es sich um einen Summenparameter für gemessene VOC in der Luft. Wie in Kapitel 3. Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen TVOCbeschrieben kann er mittels unterschiedlicher Messmethoden bestimmt werden, welche jeweils verschiedene Bandbreiten an VOC detektieren. Die Messwerte verschiedener Messmethoden sind deshalb nicht miteinander vergleichbar. Der TVOC-Wert umschreibt jeweils eine Mischung von Stoffen unterschiedlicher Konzentration und Zusammensetzung. Er besitzt keine Aussagekraft über die vorhandenen Einzelstoffe, deren

Konzentration und eventuelle toxikologische Eigenschaften. Darum gilt ein TVOC-Wert nicht als zuverlässiger Indikator für den Einfluss von Innenraumluft und Produktemissionen hinsichtlich menschlicher Gesundheit [6]. Er kann als Anzeigeindex für VOC in der Luft verwendet werden.

Wirkungsstudien mit VOC-Gemischen definierter Zusammensetzung zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Reizwirkungen und Geruchseffekten mit einer steigenden TVOC-Konzentration zunimmt. Jedoch lassen sich aufgrund der Vielfalt der möglichen VOC in der Raumluft keine gesicherten Aussagen über Dosis-Wirkungs-Beziehungen treffen [8, p. 276f]. Deswegen sollte ein TVOC-Summenparameter nicht als alleiniges Kriterium für eine gesundheitliche Bewertung der Innenraumluft herangezogen werden [16].

Ein TVOC-Wert kann als Indikator für die lufttechnische Gesamtsituation, zeitliche Trends und die Raumluftüberwachung verwendet werden. Er eignet sich als Hinweisgeber für evtl. weitere notwendige gezielte Einzelbetrachtungen und Quellen [7] [8].

Seine Vorteile liegen in seiner je nach Messverfahren einfachen, schnellen und kostengünstigen Bestimmung. Er kann in Kurz- und Langzeitmessungen mittels direkt anzeigender, oder analytischer Messverfahren gut als Parameter für die oben genannten Anwendungen eingesetzt werden [7].

4. Beurteilung der Innenraumluft

Für das Bewerten von Innenraumluft existieren verschiedene Beurteilungswerte. Sie variieren in ihrer fachlichen Herleitung und rechtlichen Bedeutung. Sie können größtenteils in drei Kategorien unterteilt werden [3] [17]:

- Grenzwerte: Vom Gesetzgeber festgelegte Höchstkonzentrationen (rechtliche Bindung)
- toxikologische Richt- und hygienisch/ risikobasierte Leitwerte: Basieren auf geeigneten Erkenntnissen zu Wirkungen von Stoffen (keine rechtliche Bindung)
- statistisch abgeleitete Referenzwerte: Bilden die Hintergrundbelastung ab, in der Regel keine Aussage zur Gesundheitsgefährdung

Sie bilden die Grundlage für die Beurteilung von Analyseergebnissen und sind in ihrer Reihenfolge als Beurteilungshierarchie anzusehen d.h., Grenzwerte stehen vor Richt- und Leitwerten [3].

Die Messung von TVOC-Werten in der Raumluft und die Festlegung einer maximalen Gesamtkonzentration gegenüber einer langfristigen Exposition der Raumnutzer gilt hierbei auch als eine Möglichkeit für die gesundheitliche Bewertung der Innenraumluft [18]. Dabei darf der Summenparameter jedoch nicht als alleiniges Kriterium, sondern als Indikator für die Gesamtsituation gesehen werden [16].

Beurteilungswerte werden auf verschiedene Art festgelegt. Bspw. durch Forschungsgruppen oder von Ministerien begründeten Ausschüssen. Sie erarbeiten unter Einbezug verschiedenster Informationen und wissenschaftlichen Erkenntnissen Bewertungskriterien.

Die folgenden Unterkapitel sollen einen Einblick über verschiedene Beurteilungswerte und Methoden sowie ihre Herkunft und Grundlage liefern.

4.1 Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) Deutschland

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR), ehemals Ad-hoc Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, legt zur gesundheitlichen Bewertung der Innenraumluft von öffentlichen und privaten Gebäuden Richtwerte, hygienische Leitwerte und risikobezogene Leitwerte fest. Sie sollen eine gesundheitliche Beurteilung von Konzentrationen chemischer Stoffe in der Innenraumluft ermöglichen [19].

4.1.1 Richtwerte für die Innenraumluft

Der AIR leitet zur gesundheitlichen Beurteilung der Innenraumluft für von ihm als gesundheitsgefährdend eingestufte Stoffe jeweils zwei toxikologisch begründete Richtwerte ab. Sie beziehen sich auf die Stoffkonzentration in der Luft [20] [19]:

Richtwert I (RW I - Vorsorgerichtwert) beschreibt die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, bis zu der nach gegenwärtigem Erkenntnisstand, auch bei lebenslanger Exposition keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten sind.

Richtwert II (RWII - Gefahrenrichtwert) ist ein wirkungsbezogener, begründeter Konzentrationswert, der sich auf die gegenwärtigen toxikologischen und epidemischen Kenntnisse zur Wirkungsschwelle eines Stoffes stützt. Bei Erreichen oder Überschreiten dieser sind gesundheitliche Schäden mit hinreichender Wahrscheinlichkeit anzunehmen.

Richtwerte des AIR sind Empfehlungen, die aufgrund toxikologischer Überlegungen abgeleitet wurden. Sie unterliegen keiner gesetzlichen Regelung, können aber in Deutschland rechtliche Verbindlichkeit erlangen, wenn sie in Bezug zu rechtlichen Regelungen wie bspw. die der Landesbauordnungen stehen. Dort heißt es das von Gebäuden keine gesundheitliche Gefährdung für die Nutzer ausgehen darf [3].

Diese Liste der Richtwerte für chemische Stoffe umfasst ca. 60 Stoffe und Stoffgruppen, viele können den VOC zugeordnet werden. Die Liste wird bei neuen Erkenntnissen überarbeitet, ergänzt und auf der Internetseite des Umweltbundesamtes veröffentlicht [19].

4.1.2 Leitwerte für die Innenraumluft

Leitwerte des AIR werden hygienisch oder risikobezogen begründet. Ein hygienischer Leitwert wird festgelegt, wenn praktische Erfahrungen wiederholt zeigen, dass mit steigender Konzentration eines Stoffes die Wahrscheinlichkeit für Beschwerden oder nachteilige gesundheitliche Auswirkungen zunimmt, der Kenntnisstand aber nicht für eine Ableitung toxikologisch begründeter Richtwerte ausreicht. Hygienische Leitwerte wurden für Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Feinstaub festgelegt [19].

Für eine hygienische Gesamtbewertung der Innenraumluft unter Beeinflussung durch VOC wurden Leitwerte für fünf TVOC-Konzentrationsbereiche festgelegt. Sie gehen von hygienisch unbedenklich, bis hygienisch inakzeptabel (siehe Tabelle 4) [19]. Dabei dürfen die toxikologisch begründeten Richtwerte der Einzelstoffe nicht überschritten werden [20]. Auf diese Bewertungsmethodik wird häufig in der Literatur im Zusammenhang mit TVOC-Sensoren und Innenraumluftqualität verwiesen.

Tabelle 4:Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft

Stufe	Konzentrationsbereich [mg TVOC/m³]	Hygienische Bewertung
1	≤ 0,3 mg/m³	Hygienisch unbedenklich
2	0,30 - 1,0 mg/m³	Hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen
3	1,0 – 3,0 mg/m³	Hygienisch auffällig
4	3,0 – 10 mg/m³	Hygienisch bedenklich
5	> 10 mg/m³	Hygienisch inakzeptabel

Quelle: [19]

Ein risikobezogener Leitwert liefert Angaben zum gesundheitlichen Risiko krebserzeugende Stoffe in der Innenraumluft. Er wird vom AIR aufgestellt, wenn belastbare Angaben zu seinem Vorkommen in der Innenraumluft (Referenzwert) und seiner Exposition-Risikobeziehung vorliegen. Hierzu wird die Konzentration des Stoffes ermittelt, bei der nach lebenslanger Exposition das theoretische Krebsrisiko bei 10^{-6}, ein Erkrankungsfall pro 1.000.000 Personen liegt. Ist die Konzentration oberhalb des Referenzwertes, wird sie als risikobezogener Leitwert festgelegt. Ist die Konzentration des Referenzwertes mit einem höheren theoretischen Risiko als 10^{-6} verbunden, wird ein vorläufiger Leitwert anhand des Referenzwertes festgelegt. Leitwerte gibt es bspw. für Benzol und Vinylchlorid [3] [19].

4.2 Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB)

Der Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB) stellt als Grundlage für eine einheitliche gesundheitliche Bewertung von VOC-Emissionen aus Bauprodukten, transparente Prüfkriterien und Bewertungsmaßstäbe für innenraumrelevante Bauprodukte zur Verfügung. Diese werden in Form eines Bewertungsschemas für VOC aus Bauprodukten veröffentlicht und fortlaufend weiterentwickelt. Das AgBB-Bewertungsschema dient als Basis für die gesundheitliche Bewertung von Bauproduktemissionen bei Zulassungsverfahren durch das, in Deutschland für die Zulassung von Bauprodukten zuständige Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt). Seit 2017 ist es wesentliche Grundlage der „Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes (ABG)“ der Musterverwaltungsvorschrift Technischen Baubestimmungen (MVV TB) [21] [22].

Die Kriterien des AgBB-Bewertungsschemas sind so gewählt, dass Gesundheitsgefahren für die Allgemeinbevölkerung durch Bauproduktemissionen in Aufenthaltsräumen bei einer Exposition über die gesamte Lebenszeit abgewehrt werden. Ziel ist es, die TVOC-Emission und alle emittierten Einzel-VOC eines Bauproduktes zu beurteilen. Die Bestimmung erfolgt auf Basis von Prüfkammermessungen über einen Zeitraum von 28 Tagen. Die erste Messung erfolgt nach drei Tagen und überprüft, ob Kriterien für den TVOC-Wert und Kanzerogene Stoffe eingehalten werden. Die zweite Messung nach 28 Tagen. Hier werden Kriterien für den TVOC-Wert, TSVOC-Wert, kanzerogene Stoffe und Einzel VOC überprüft. Werden alle Kriterien eingehalten, ist das Produkt für die Verwendung in Innenräumen geeignet. Das AgBB-Bewertungsschema ist in Abbildung 1 dargestellt [18]

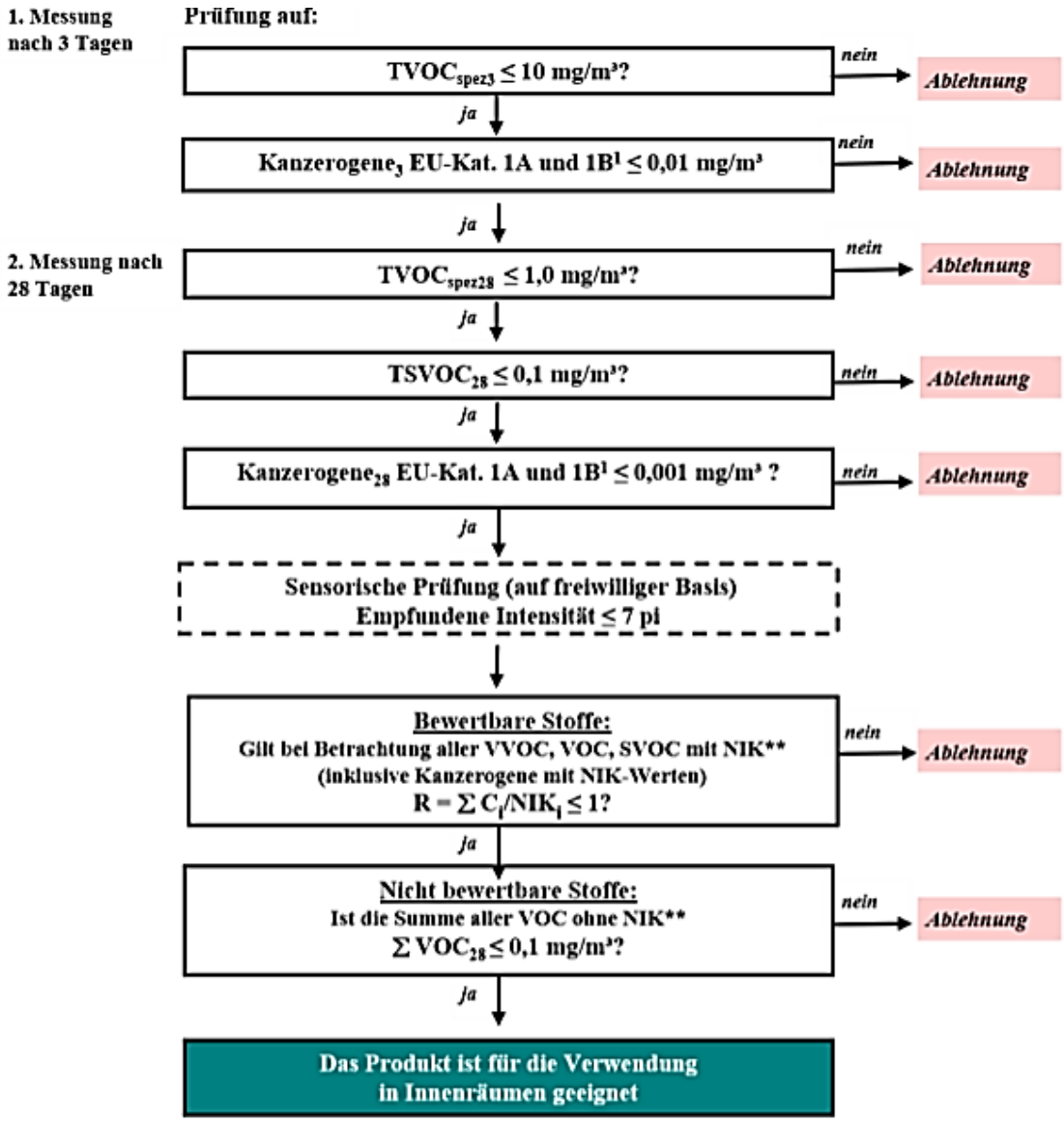


Abbildung 1: AgBB-Bewertungsschema zur Bewertung von Emissionen aus Bauprodukten
Quelle: [18]

Die emittierten VOC Einzelstoffe werden hinsichtlich ihrer toxikologischen Bedeutung, nach der niedrigsten interessierenden Konzentration für den Einzelstoff (NIK) bewertet. Der NIK-Wert eines Stoffes beschreibt ein Konzentrationsniveau, oberhalb dessen nachteilige Wirkungen auf die Gesundheit zu befürchten sind. NIK-Werte werden von einer Arbeitsgruppe innerhalb des AgBB erarbeitet. Sie dienen ausschließlich der Beurteilung von Emissionen aus Bauprodukten auf der Basis von Prüfkammermessungen [18].

4.3 Arbeitskreis Innenraumluft Österreich

Der Arbeitskreis Innenraumluft des BMK Österreichs erarbeitet ebenfalls toxikologisch abgeleitete Richtwerte für die Konzentrationen von Stoffen in der Innenraumluft. Sie sind als Vorsorgerichtwert zu verstehen, bei deren Unterschreitung mit keiner schädigenden Wirkung zu rechnen ist. Sie werden als Wirkungsbezogene Innenraumrichtwerte (WIR) bezeichnet. Die Liste der WIR wurde 2022 um die Richtwerte des AIR ergänzt [23].

Für die Abschätzung und Bewertung der lufttechnischen Gesamtsituation wurde ein Wertebereich von TVOC-Konzentrationen zur Orientierung festgelegt. Die Beurteilung erfolgt in fünf Stufen von „Niedrig“ bis „Stark erhöht“ (siehe Tabelle 5) [16]. Auf diese Bewertungsmethode wird ebenfalls oft in der Literatur im Zusammenhang mit TVOC-Sensoren und Innenraumluftqualität verwiesen.

Tabelle 5: Beurteilung von Summenkonzentrationen

Beurteilung der Summenkonzentration	Konzentrations-bereiche in mg/m³	Bemerkungen
Niedrig	< 0,25	Im langzeitigen Mittel bei Verwendung geeigneter Materialien in Innenräumen erreichbar
Durchschnittlich	0,25 - 0,5	
Geringfügig erhöht	0,5 – 1	Vermutlich spezifische Quellen von VOC im Raum vorhanden. Unmittelbar nach Abschluss von baulichen Maßnahmen sind Konzentrationen in diesem Bereich zu erwarten, wenn lösungsmittelfreie Materialien eingesetzt wurden
Deutlich erhöht	1 - 3	Vermutlich von beschränkter Zahl von chemischen Stoffen verursacht und spezifische Quellen im Raum vorhanden
Stark erhöht	> 3	Unmittelbar nach Abschluss von baulichen Maßnahmen sind Konzentrationen in diesem Bereich zu erwarten, wenn lösungsmittelhaltige Materialien eingesetzt wurden

Quelle: [16]

4.5 Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen berücksichtigt bei der Bewertung von Bürogebäuden mögliche Emissionen von VOC aus Bauprodukten in den Steckbriefen 1.1.6 „Risiken für die lokale Umwelt“ und 3.1.3 „Innenraumlufthygiene“.

Steckbrief 1.1.6 bewertet dabei alle Bauteile eines Gebäudes hinsichtlich ihres möglichen Schadstoffpotentials, unteranderem VOC. Nachweise für VOC-Emissionen erfolgen bspw. über Prüfberichte nach dem AgBB-Schema, oder eine produktspezifische Umwelt-Produktdeklaration. Für einige Bauprodukte wird zusätzlich eine TVOC Emission von < 0,25 mg/m³ gefordert [24].

Steckbrief 3.1.3 „Innenraumlufthygiene“ beurteilt die Innenraumluftqualität hinsichtlich hygienischer Gesichtspunkte anhand der gemessenen TVOC- und Einzelstoffkonzentrationen nach Fertigstellung des Gebäudes. Hierbei erfolgt eine Orientierung der Bewertungskriterien nach den Richtwerten des AIR [25].

5. Regelungen, Normen

Das folgende Kapitel und seine Unterkapitel sollen einen Überblick über gesetzliche Vorgaben, Regelungen, Richtlinien und Normen liefern, die im Zusammenhang mit VOC-Emissionen aus Bauprodukten und dieser Arbeit in Erscheinung treten.

5.1 Gesetzliche Vorgaben, Regelungen

Musterbauordnung/ Landesbauordnung: Anforderungen an Bauprodukte hinsichtlich VOC-Emissionen: Die Musterbauordnung (MBO) dient als Vorlage für die Landesbauordnungen (LBO) der Bundesländer. Die MBO definiert allgemeine Anforderungen und Vorschriften für bauliche Anlagen und Bauprodukte, welche durch Technische Baubestimmungen weiter spezifiziert werden. Ihre Vorgaben können von den Ländern in ihre LBO übernommen und so gesetzlich bindend werden. Da die MBO, sowie ihre Technischen Baubestimmungen gemeinsam von den Ländern erarbeitet werden, bieten sie eine gute Orientierung für die Vorgaben der Landesvorschriften [26] [27].

Die MBO fordert in §3, dass bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass von ihnen unter anderem keine Gefährdung für Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen ausgehen darf. Weiter fordert § 13 MBO, dass von ihnen weder durch chemische, physikalische noch biologische Einflüsse Gefahren oder unzumutbare Belästigungen entstehen dürfen. Bauprodukte haben direkten Einfluss auf diese Anforderungen. Deshalb dürfen nach §16b MBO nur Bauprodukte verwendet werden, die so beschaffen sind, dass bei ihrer Verwendung die bauliche Anlage die gesetzlichen Anforderungen erfüllt und gebrauchstauglich ist [26] [28] [27].

Nach §85a MBO können die Anforderungen aus §3 MBO an bauliche Anlagen und Bauprodukte durch Technische Baubestimmungen konkretisiert werden. Diese werden durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) unter Beteiligung der betroffenen Kreise erarbeitet und in der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) veröffentlicht. Die MVV TB verweist bei spezifischen Anforderungen auf eigene sowie bestehende technische Regeln wie bspw. den DIN-Normen, die einzuhalten sind. Die Landesbauordnungen sehen die Anforderungen der MBO als erfüllt, wenn die einschlägigen Technischen Baubestimmungen oder allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden [26] [1].

Anforderungen an Bauprodukte werden in Kapitel A 3.2 der MVV TB durch Verweis auf die technische Regel „Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes“ (ABG) konkretisiert. Diese Regel stellt Vorgaben an in Aufenthaltsräumen eingesetzte Bauprodukte hinsichtlich ihrer Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen. Sie müssen erfüllt sein, damit ein Bauprodukt verwendet werden darf. Grundlage für die ABG liefert das AgBB-Bewertungsschema. VOC-Emissionen von Bauprodukten werden mittels Prüfkammermessungen bestimmt und dürfen festgelegte VOC- und TVOC-Grenzwerte nicht überschreiten [1] [18].

5.1.2 EU-Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO)

Die Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011 regelt das Inverkehrbringen von Bauprodukten in der Europäischen Union. Sie stellt Grundanforderungen an Bauwerke und Baustoffe in Bezug auf Gesundheit und Sicherheit der Nutzer. Nach Anhang I Nr.3b darf ein Bauwerk u.a. keinen übermäßigen Einfluss auf die Gesundheit der Bewohner durch Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen haben [29]. Anforderungen an die Emission von VOC erfolgen nur auf Bauwerksebene, nicht auf Bauproduktebene, wie in der MBO durch ihre Technischen Baubestimmungen. Hierfür wäre eine weitere Konkretisierung durch eine EU-Norm oder ein europäisches Bewertungsdokument notwendig. Bisher gibt es kein einheitliches europäisches Bewertungskonzept für VOC-Emissionen aus Bauprodukten. Lediglich ein genormtes Prüfverfahren zur Messung von Emissionen aus Bauprodukten, die DIN EN 16516 [30] [31].

5.1.3 Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW)

Die Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) dienen dem Schutz der Gesundheit von Beschäftigten vor Gefahrstoffen. Sie werden in der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) als ein spezifischer Wert einer Konzentration eines Stoffes definiert, bis zu dem keine akute oder chronische schädliche Auswirkung auf die allgemeine Gesundheit zu erwarten ist. Dabei bezieht er sich in der Regel auf eine Exposition von 8h am Tag, fünf Tage die Woche, während der Lebensarbeitszeit. Die Festlegung von AGWs erfolgt auf Basis arbeitsmedizinischer Erfahrungen und toxikologischer Erkenntnisse. Sie werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) aufgestellt und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) als TRGS 900 „Arbeitsplatzgrenzwerte“ im Gemeinsamen Ministerialblatt (GMBI) veröffentlicht [32] [33]. Bei den AGW handelt es sich um rechtlich bindende Grenzwerte. Sie gelten für Arbeitsplätze, an denen mit Gefahrstoffen gearbeitet wird, nicht für Innenräume im Allgemeinen [3].

5.1.4 Arbeitsstättenverordnung

Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) dient der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz von Beschäftigten in Arbeitsstätten. Sie enthält Mindestanforderungen an Arbeitsstätten bezüglich der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz von Beschäftigten. Der Arbeitgeber hat dafür zu sorgen, dass Gefährdungen möglichst vermieden und geringgehalten werden. Eine ihrer Anforderungen nach Anhang 3.6 „Lüftung“ ist, dass in einem Raum, unter Berücksichtigung des spezifischen Nutzungszwecks, der Arbeitsmethodik und der Anzahl der Beschäftigten, während der gesamten Nutzungsdauer ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft vorhanden sein muss [34] [35].

Die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung werden durch technische Regeln, den Arbeitsstättenregeln (ASR), weiter konkretisiert. Sie liefern den erforderlichen Stand der Technik, der Arbeitsmedizin und der Hygiene für einen sicheren Betrieb von Arbeitsstätten. Die ASR A3.6 konkretisiert die Anforderungen an die Lüftung der Arbeitsstättenverordnung. Sie nennt als eine Ursache für die Beeinträchtigung der Innenraumluftqualität Stofflasten, die bspw. als VOC-Emission aus Bauprodukten oder Einrichtungsgegenständen entweichen. Wenn das Bauwerk dem aktuellen Stand der Technik hinsichtlich seiner Schadstoffemissionen entspricht, geht sie davon aus, dass durch ausreichenden Luftwechsel die VOC-Stofflasten abgeführt werden. Konkrete Grenzwerte für VOC werden nicht genannt. Jedoch Angaben zur Bewertung der CO_2–Konzentrationen in der Raumluft und daraus abgeleitete mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität [36] [37].

5.2 Richtlinien, Normen

5.2.1 DIN EN ISO 16000 Innenraumluftverunreinigungen

Mögliche Herangehensweisen für die Messung von Verunreinigungen und Schadstoffen der Innenraumluft werden in der Normenreihe DIN EN ISO 16000 „Innenraumluftverunreinigungen“ thematisiert. Ihre Teile behandeln dabei grundsätzliche Aspekte von Innenraumluftmessungen, wie allgemeine Anforderungen und Randbedingungen, Probenahmestrategien, Prüfverfahren und Messtechniken für spezifische Schadstoffe und Schadstoffgruppen. Die folgenden Teile beschäftigen sich mit flüchtigen VOC:

DIN EN ISO 16000-5 erläutert grundlegende Aspekte, die bei der Festlegung der Probenahmestrategie für die Bestimmung von VOC in der Innenraumluft zu beachten sind.

DIN EN ISO 16000-6 befasst sich mit der Bestimmung von gasförmigen organischen Verbindungen (VVOC, VOC, SVOC) in Innenraum- und Prüfkammerluft. Sie macht Vorgaben für die Bestimmung der Verbindungen durch aktive Probenahme auf Sorbenzien und nachfolgender analytischer Untersuchung mittels Gaschromatographie. Sie spezifiziert Anforderungen an die Probennahme, Probenlagerung und Aufbereitung, die analytischen Systeme sowie die Herangehensweise für die Bestimmung der flüchtigen organischen Verbindungen.

DIN ISO 16000 Teil 9, 10 und 11 behandeln die Bestimmung von VOC-Emissionen aus Proben von Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen mithilfe verschiedener Prüfverfahren sowie die Entnahme, Lagerung und Vorbereitung der Prüfkörper und Probeentnahmestrategien. Ihr Ziel ist es, Herstellern, Bauunternehmern und Endverbrauchern Daten für die Bewertung des Einflusses von Bauprodukten auf die Innenraumluftqualität bereitzustellen und so die Entwicklung emissionsarmer Produkte zu fördern. Teil 9 definiert ein allgemeingültiges Laborprüfverfahren zur Bestimmung der flächenspezifischen Emissionsrate von VOC unter definierten klimatischen Bedingungen mittels einer Emissionsprüfkammer. Teil 10 mittels einer Emissionsprüfzelle.

5.2.2 Din EN 16516 Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen

Die DIN EN 16516 definiert ein sogenanntes horizontales Referenzverfahren zur Prüfung von Bauprodukten auf Emissionen von gefährlichen Stoffen in die Innenraumluft. Mithilfe dieses Prüfverfahrens kann die Emissionsrate von flüchtigen organischen Verbindungen aus einem Bauprodukt in die Innenraumluft bestimmt werden. Das Prüfverfahren ähnelt dem der DIN EN ISO 16000-9 und verwendet eine Emissionsprüfkammer. Angaben zur Bestimmung der Verbindungen in der Prüfkammerluft erfolgen unter Verweis auf die DIN EN ISO 16000-6 [38].

Die Prüfmethodik der DIN EN 16516 vereinheitlicht VOC-Prüfungen für alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union und ermöglicht so eine europaweite Vergleichbarkeit und spätere Festsetzung von Emissionsgrenzwerten für Bauprodukte in den harmonisierten Bauproduktnormen [39].

5.2.3 EN ISO 16017 Probenahme und Analyse flüchtiger organischer Verbindungen durch Sorptionsröhrchen/...

Die ISO 16017 liefert allgemeine Hinweise für die Probennahme und Analyse von VOC. Sie ist Anwendbar für Außen- und Innenraumluft, sowie für die Bewertung von Emissionen aus Materialien in kleinen Prüfkammern und Prüfräumen. Augenmerk liegt hierbei auf der Probennahme durch Sorptionsröhrchen und der gaschromatographischen Analyse [40]

5.2.4 VDI 4300 Blatt 6 Messstrategien für flüchtige Organische Verbindungen (VOC)

Die VDI-Richtlinie 4300 behandelt allgemeine Aspekte für Messungen von Innenraumluftverunreinigungen, sowie Randbedingungen für einzelne Stoffe und Stoffgruppen die während der Messung beachtet werden sollten. Blatt 6 erläutert Grundlagen, Begrifflichkeiten und Messstrategien für VOC [41].

5.2.5 VDI/VDE 3518 Multigassensoren

Die Richtlinie VDI/VDE 3518 beschreibt eine unabhängige Prüfsystematik für VOC-Detektoren. Sie soll eine Vergleichbarkeit verschiedener Messmethoden und Detektoren ermöglichen. Neben der allgemeinen Vorgehensweise werden Vorgaben an die Prüfung und geeignete Prüfgasmischungen, sowie die Bewertung der Messergebnisse erläutert [5].

6. Versuchsaufbau/ Messstand

Der zu entwickelnde Versuchsaufbau soll es später ermöglichen, Materialproben bei definierter Temperatur über einen längeren Zeitraum auf ihre TVOC-Abgabe hin zu untersuchen. Ziel ist es einen Messwert für den Flächenspezifische Anstieg des TVOC-Wertes des Materials pro Stunde zu erhalten. Anforderungen an den Versuchsaufbau waren unteranderem eine geringe Komplexität, preisgünstige Komponenten, mögliche Messungen mehrerer Proben und eine leichte Umsetzbarkeit.

6.1 Entwurf und Aufbau

Das aus den oben genannten Vorgaben entwickelte Konzept für einen möglichen Versuchsaufbau zur TVOC-Messung ist in Abbildung 2 dargestellt.

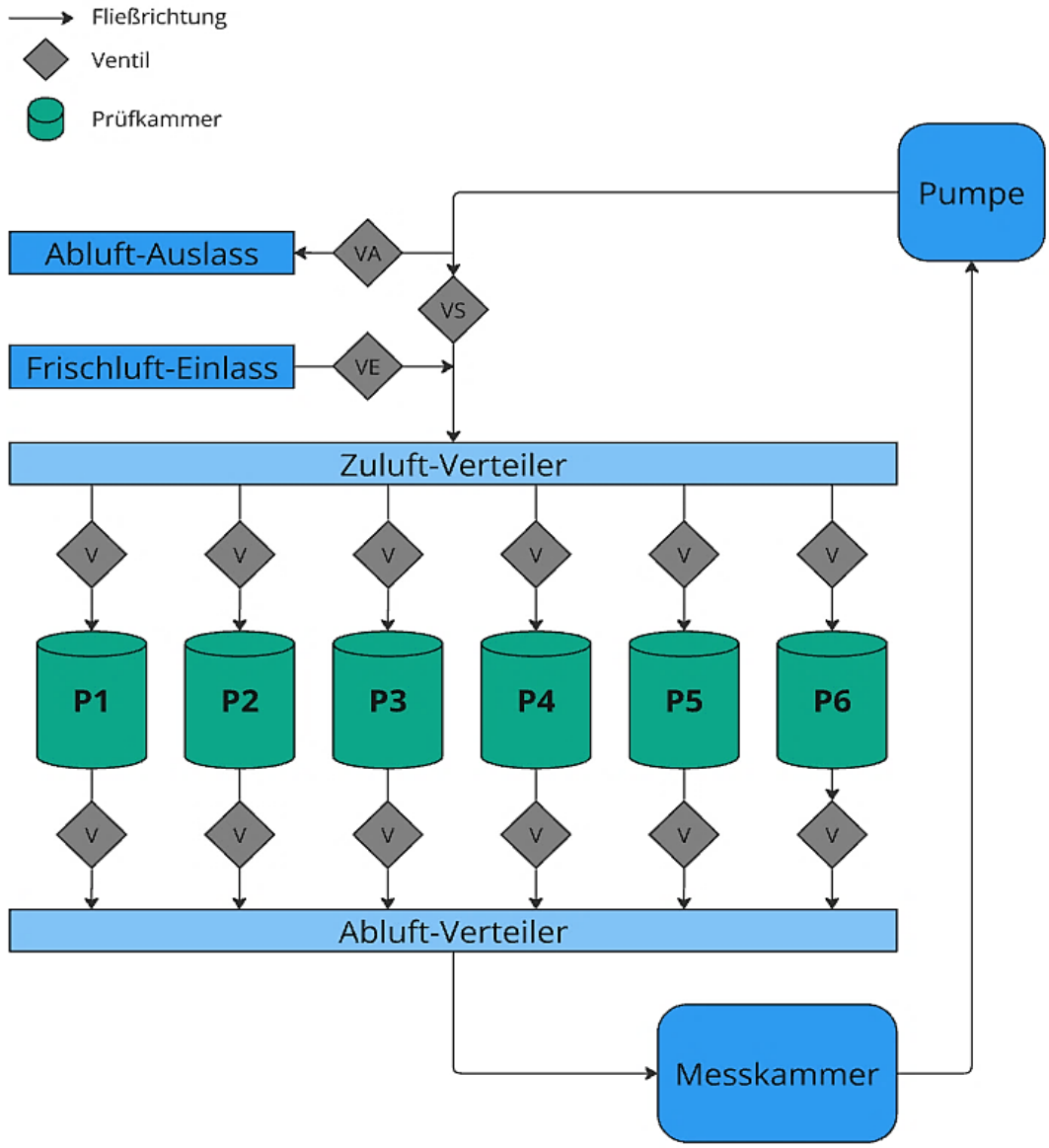


Abbildung 2: Konzept Versuchsaufbau

Das Grundkonzept sieht vor, dass die von der Materialprobe in einem geschlossenen Behälter mit VOC verunreinigte Luft mittels einer Pumpe über Leitungen einer geeigneten Messvorrichtung zugeführt und ihr VOC-Gehalt dort messtechnisch erfasst wird. Der gesamte Versuchsaufbau wird innerhalb eines Trockenschrankes platziert um VOC-Abgaben bei verschiedenen Temperaturen untersuchen zu können.

P1-P6 bezeichnen die „Prüfkammern“. Es handelt sich um verschließbare Behälter, in welchen das jeweilige zu beprobende Material platziert wird. Jede Prüfkammer ist durch eine Zu- und Abluft Leitung, in den weiteren Versuchsaufbau eingebunden. Mittels Magnetventilen V werden die einzelnen Prüfkammern leitungstechnisch angesteuert, sodass immer nur eine Prüfkammer mit der Messkammer verbunden ist. Ihre Anzahl ist variabel, wurde jedoch aufgrund der Größe des Trockenschrankes auf sechs Stück festgelegt.

Hinter den Prüfkammern befindet sich ein Abluft-Verteiler. Seine Aufgabe ist es, die sechs Abluftleitungen auf eine Leitung zu reduzieren. Diese leitet die zu beprobende Luft zur sogenannten „Messkammer“. In ihr befindet sich eine, für VOC-Messungen geeignete Sensorik. Hier wird der jeweilige VOC-Wert der Luftprobe bestimmt. Von der Messkammer aus führt eine Leitung zur Ansaugseite einer Vakuumpumpe. Die Pumpe befördert die Luft innerhalb des Versuchsaufbaus. Von der Auslassseite der Pumpe führt eine Leitung zu einem Ventilknoten. Dieser besteht aus den Ventilen VS, VA und VE.

An diesem können zwei Einstellungen für die weitere Luftführung vorgenommen werden. Entweder wird die Luft aus dem Versuchsaufbau ausgeleitet, währenddessen Frischluft eingeleitet wird, der sogenannte Spülvorgang, oder die Luft aus einer Prüfkammern über einen Zuluft-Verteiler zur selbigen zurückgeführt und im Kreis befördert.

Durch die Spülung mit Frischluft soll jede Prüfkammer nach ihrer Messung auf einen konstanten VOC-Grundwert der Luft zurückgesetzt werden. So können evtl. stagnierende VOC-Abgaben einer Probe über die Zeit beobachtet werden. Zusätzlich werden durch die Spülung alle Komponenten für die nächste Messung gereinigt, sodass möglichst kein VOC der vorherigen Messung diese beeinflusst.

Das Fördern der Luft aus einer der Prüfkammern im Kreis soll vor jeder Messung für eine gute Durchmischung und Verteilung der zu beprobenden Luft im Versuchsaufbau und Messkammer sorgen.

Für die Beprobung einer Prüfkammer ist jeweils ein Messzyklus vorgesehen. Dieser Messzyklus ist für jede Prüfkammer gleich und wird in drei Phasen nach Abbildung 3 Unterteilt: Ansaugen, Messen und Spülen. Jede Phase dauert eine

definierte Zeit t [min], welche als variabler Parameter, unabhängig voneinander, eingestellt werden kann. Die jeweilige Dauer muss vorab durch Voruntersuchungen ermittelt werden. Die Prüfkammern werden nacheinander gemessen. Die Messung aller sechs Prüfkammern wird als ein Messintervall bezeichnet. Nach Beendigung des Messzyklus der letzten Prüfkammer kann eine Wartezeit vor Beginn des nächsten Messintervalls eingestellt werden.

Die VOC-Werte werden in der Messkammer, über den gesamten Versuchszeitraum, kontinuierlich aufgezeichnet. Die genauen Abläufe und Aufgaben der drei Phasen sind wie folgt:

Ansaugen: Zu- und Abluft-Ventile V der Prüfkammer und VS sind geöffnet, VA und VE geschlossen, die Pumpe läuft. Die Luft wird in der Prüfkammer verwirbelt und im System und Prüfkammer gleichmäßig verteilt.

Messen: Alle Ventile sind geschlossen, die Pumpe steht. Die Messwerte werden mit der Kennung der jeweiligen gemessenen Prüfkammer versehen. Die Luft in der Messkammer steht.

Spülen: Zu- und Abluft-Ventile V der Prüfkammer, sowie VA und VE sind geöffnet, VS geschlossen. Die Pumpe läuft. Das gesamte System wird mit Frischluft gespült, sowie die mit VOC kontaminierte Luft aus dem System ausgeleitet.

Die Wartezeit nach Prüfkammer P6 beendet das Messintervall. Die Zu- und Abluft-Ventile V werden geschlossen. ein neues Messintervall beginnt mit dem Messzyklus für Prüfkammer P1, nach Ablauf der eingestellten Zeit t.

Messzyklus:

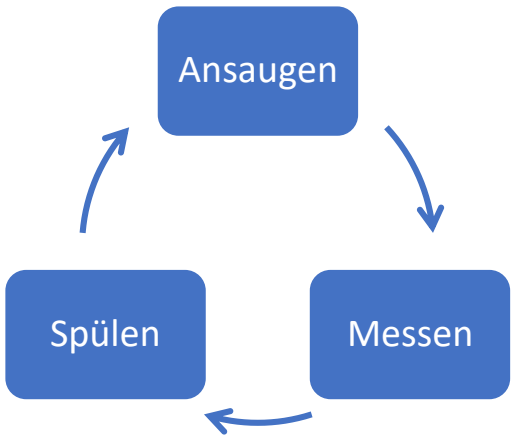


Abbildung 3: Phasen eines Messzyklus

6.2 Komponenten

Die einzelnen Komponenten des in Abbildung 2 skizzierten Versuchsaufbaus werden in den folgenden Unterkapiteln in ihrer Ausführung und jeweiligen Aufgabe näher beschrieben.

6.2.1 Prüfkammer

Die Entwicklung der Prüfkammer erfolgt in Anlehnung an die Vorgaben der DIN EN ISO 16000-9. Diese sieht vor, dass als Materialien für die Prüfkammer vorwiegend Edelstahl oder Glas zum Einsatz kommen sollen. Die Aufgabe der Prüfkammer besteht darin das zu beprobende Material aufzunehmen und emittierende VOC am Entweichen in die Umgebungsluft zu hindern und gesammelt einer Messeinrichtung zuzuführen. Es ist ein luftdicht verschließbarer Behälter mit Anschlüssen für eine regelbare Be- und Entlüftung [42].

Aufgrund der guten Verfügbarkeit und geringen Anschaffungskosten wurde als Basis für die Prüfkammer ein Drahtbügelglas mit einem Volumen von ca. 1l gewählt (siehe Abbildung 4). Es besitzt einen Deckel, welcher mittels eines Spannverschlusses und einem Dichtungsgummi den Behälter luftdicht verschließt.

Abbildung 4: Drahtbügelglas, Deckel

Da das Bohren von Löchern in Glas für die Anschlüsse der Be- und Entlüftung schwierig ist und verwendete Materialien zur Abdichtung evtl. zusätzliche VOC emittieren, wurde beschlossen den Deckel der Gläser aus Metall nachzufertigen.

Anstatt des empfohlenen Edelstahls wurde hier aufgrund der Verfügbarkeit und leichten Verarbeitbarkeit Aluminium gewählt.

Die Konstruktion des „neuen“ Deckels erfolgte in Anlehnung an den originalen, um den Verschlussmechanismus weiter verwenden zu können. Nach Vermessung des Deckels erfolgte die Konstruktion des neuen mithilfe der CAD-Software „Solid Works 2024“. Der entstandene Prototyp (Abbildung 5) wurde für eine erste Überprüfung der Passgenauigkeit und Verschlusswirksamkeit mittels 3D-Druck hergestellt. Nach weiterer Anpassung des Modells wurde eine Fertigungsgerechte Zeichnung des Deckels der Zentralwerkstatt der HRW zur Fertigung übergeben. Abbildung 6 zeigt den fertigen Deckel und die Dichtheitsprüfung des Behälters durch Befüllen mit Wasser.

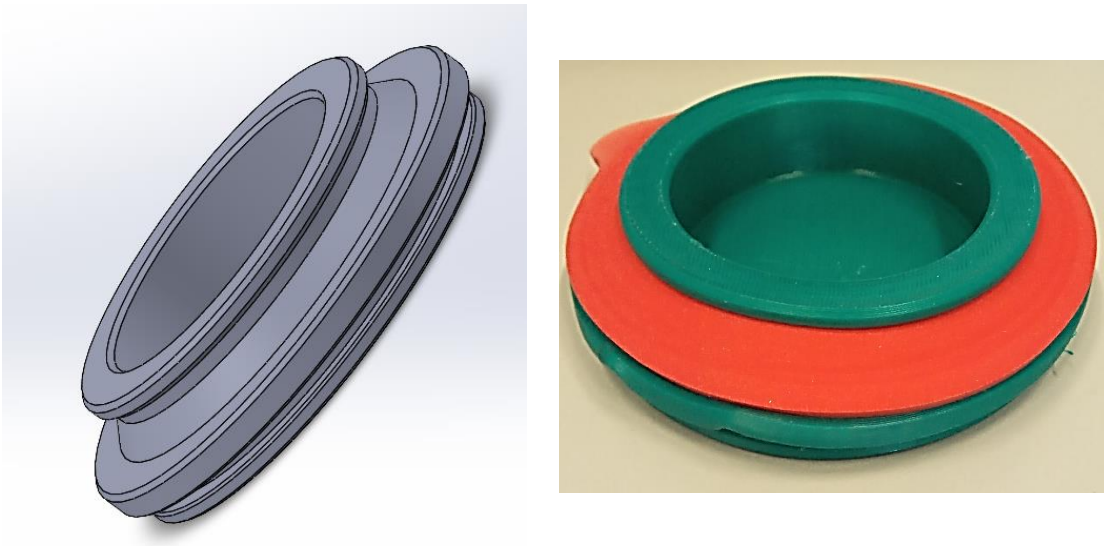


Abbildung 5: 3D Model Deckel (links), Deckel Prototyp gedruckt (rechts)

Abbildung 6: Fertiger Deckel aus Aluminium (links), Dichtheitsprüfung (rechts)

Für die Anschlüsse der Be- und Entlüftung sind Pneumatik-Steckverschraubungen vorgesehen. Sie sind mit einem 1/4‘‘ Außengewinde und einem Dichtring versehen und ermöglichen ein leichtes anschließen der Prüfkammer an den weiteren Versuchsstand. Jeweils zwei Stecknippel sind auf der Oberseite des Deckels montiert. Eine Fertige Prüfkammer ist in Abbildung 7 zu sehen. Insgesamt wurden Deckel für sechs Prüfkammern angefertigt.

Abbildung 7: Fertiger Prüfkammer mit Anschlüssen

6.2.2 Messkammer

Die Messkammer beherbergt die Sensoren der Messeinrichtung (siehe Kapitel 6.3 Messkonzept und dient der Messung der aus den Prüfkammern zugeführten Luft. Sie bildet einen, von der Außenluft abgetrennten Raum mit einem Zu- und Abluftanschluss. Sie soll zweckdienlich konzipiert sein und vier Sensoren aufnehmen. Mittels CAD wurde ein Prototyp entworfen. Die Sensoren sind rechtwinklig zueinander um den Luftstrom, welcher die Messkammer durchfließt, angeordnet. Die Messkammer ist zweigeteilt. In der einen Hälfte sind die Sensoren montiert, die andere bildet die „Außenwand“ der Messkammer (siehe Abbildung 8). Beide Hälften werden mittels einer Überwurfmutter verbunden. Als Anschlüsse für die Zu- und Abluft befinden sich jeweils eine Pneumatik-Steckverschraubung an den Stirnseiten. Die Kabeldurchführung der Sensoren erfolgt durch vier Bohrungen an der Stirnseite der „Sensor“-Hälfte, welche mit Silikon abgedichtet werden. Die Messkammer besteht ebenfalls aus Aluminium, um mögliche Kontaminierungen im Messbetrieb zu verhindern. Die Messkammer wurde von der Zentralwerkstatt der HRW angefertigt. Die fertigen Teile sind in Abbildung 9 sowie montiert in Abbildung 10 abgebildet.

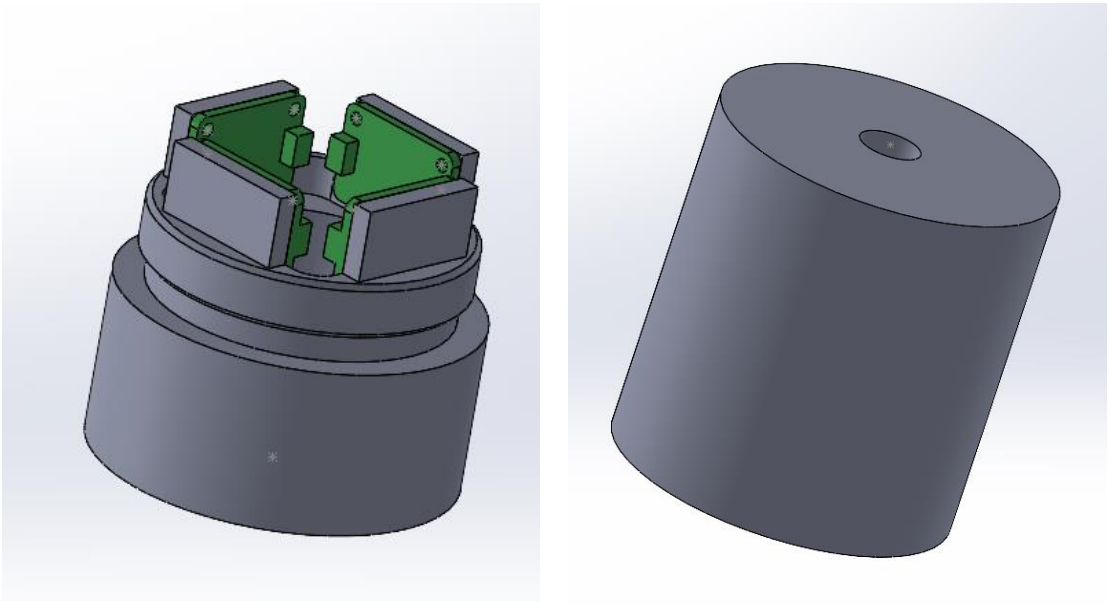


Abbildung 8: Messkammer CAD-Entwurf. „Sensor“-Hälfte (links), „Außenwand“ (rechts)

Abbildung 9: Messkammer fertig

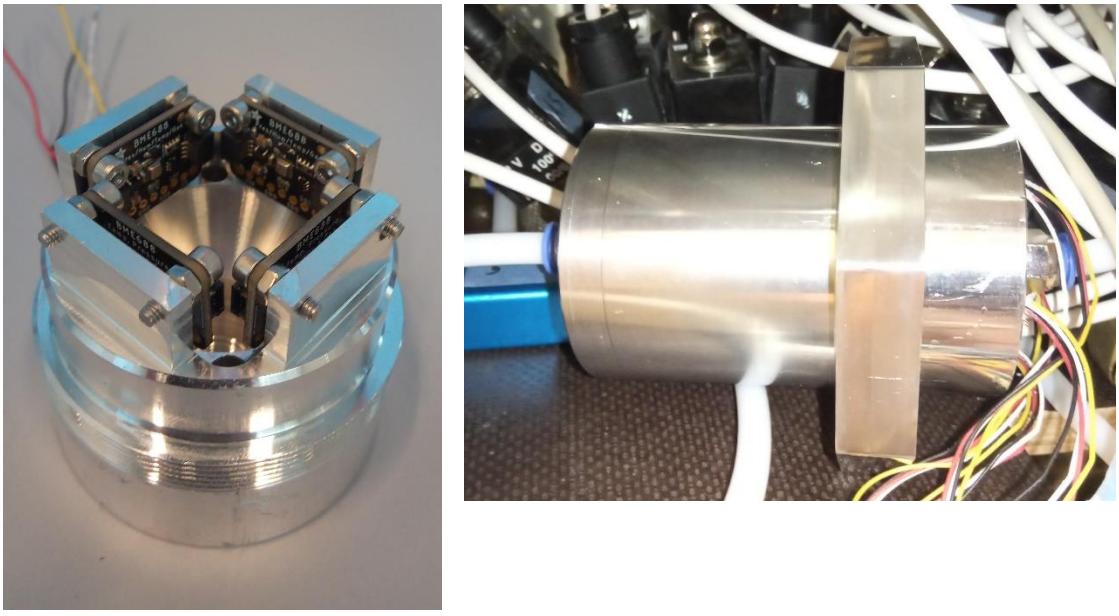


Abbildung 10: Messkammer Sensorik eingebaut (links), Messkammer montiert (rechts)

6.2.3 Pumpe

Als Ausgangsbasis für die verwendete Pumpe wird auf eine handelsübliche 12V Kolben-Vakuumpumpe zurückgegriffen. Laut Datenblatt mit einem Volumenstrom von 40 l/min und einem Vakuum von -85 kPa bei 12V Anschlussleistung.

Zur Vermeidung einer Kontamination der Luft im späteren Versuchsaufbau durch Emissionen aus der Pumpe selbst oder durch Anhaftungen von VOC aus den Messungen wird der Pumpenkopf aus Aluminium und seine Membranen aus PTFE nachgebaut. So soll eine mögliche Abgabe und Anhaftung von VOC minimiert werden. Die fertig modifizierte Pumpe und die einzelnen Bauteile des Pumpenkopfes sind in Abbildung 11 dargestellt. Für den leichten Anschluss an den Versuchsaufbau sind zwei Pneumatik-Steckverschraubungen verbaut.

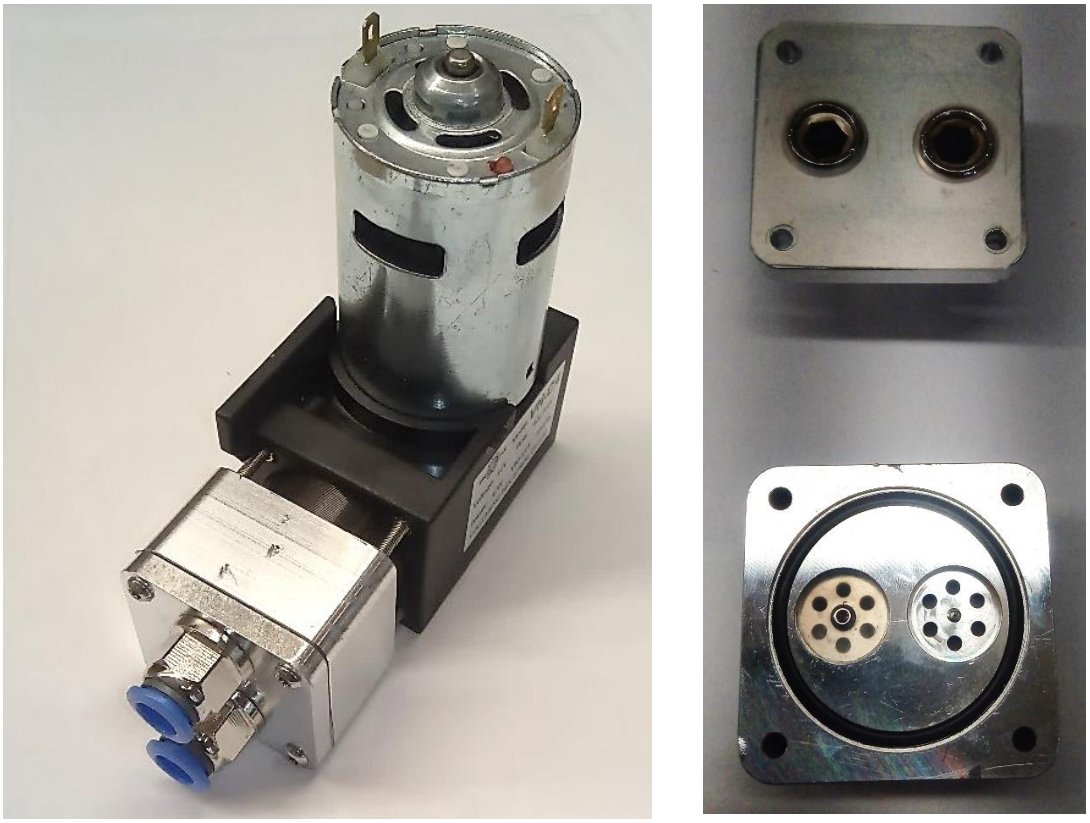


Abbildung 11: Modifizierte Kolben-Vakuumpumpe (links), Bauteile Pumpenkopf (rechts)

6.2.4 Ventile, Ventil-/ Pumpensteuerung

Für das Steuern des Luftflusses werden insgesamt 15 Magnetventile der Firma Fluid Systems & Automation GmbH (Sasbach, Deutschland) verwendet. Exemplarisch in Abbildung 12 dargestellt. Es handelt sich um zwei Wege Ventile mit 12V Schaltspannung, spannungslos dauerhaft geschlossen und einem Arbeitsdruck bis 10 bar. Ihre Anschlussgewinde werden jeweils mit Pneumatik-Steckverschraubungen für eine einfache Integration in den Versuchsaufbau versehen.

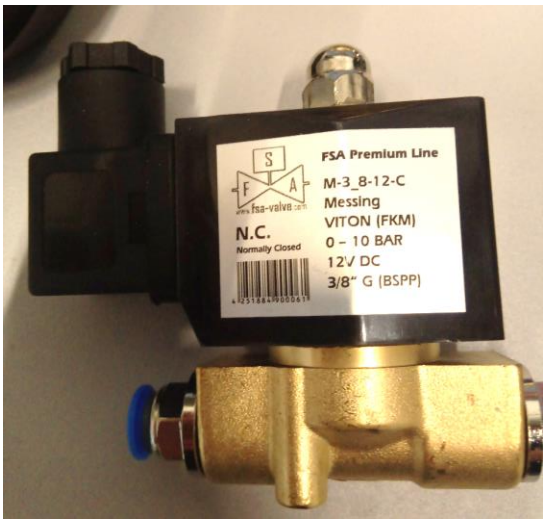


Abbildung 12: Magnetventil

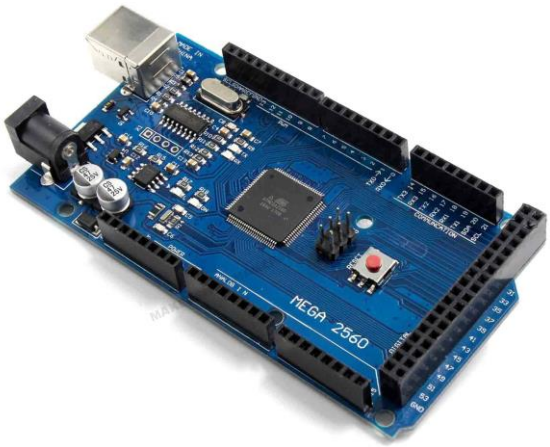


Abbildung 13:ATMEGA 2560 Board
Quelle: [43]

Die Ventil- und Pumpensteuerung erfolgt mittels eines ATMEGA 2560 Boards und drei 4 Kanal Relais-Karten. Der ATMEGA 2650 bietet eine ausreichende Rechenkapazität für die Steuerung des Messstandes. Seine kompakte Bauform von ca. 10x5 cm (Abbildung 13) ermöglicht einen direkten Einbau in den Trockenschrank. Die Ansteuerung der Magnetventile sowie der Pumpe erfolgt über die Relais.

Der Quellcode für die Ansteuerung wurde mithilfe der Arduino-IDE geschrieben. Ein Auszug des Codes ist in Abbildung 14 abgebildet. Der rot umrandete Bereich zeigt die Einstellmöglichkeit für die jeweilige Dauer der vier Phasen eines Messzyklus. Die Angabe der Dauern erfolgt in Millisekunden.

```
2   const int relayPumpe = 2;           // Relais für die Pumpe
3   const int relaySP = 3;              // Relais für die Spülung
4   const int relayB = 4;               // Relais für die die verbindung ohne Spülen
5   const int relayMagnetventil1 = 5;   // Relais für Magnetventil 1
6   const int relayMagnetventil2 = 6;   // Relais für Magnetventil 2
7   const int relayMagnetventil3 = 7;   // Relais für Magnetventil 3
8   const int relayMagnetventil4 = 8;   // Relais für Magnetventil 4
9   const int relayMagnetventil5 = 9;   // Relais für Magnetventil 5
10  const int relayMagnetventil6 = 10;  // Relais für Magnetventil 6
11
12  const unsigned long ventilZeit = 10000;   // 10 Sekunden
13  const unsigned long SPZeit = 10000;   // 10 Sekunden (1 Sekunde länger als die Magnetventile)
14  const unsigned long Messung = 10000;  // 10 Sekunden Messung durchführen
15  const unsigned long pauseZeit = 3600000;  // 1 Stunde
16
```

Abbildung 14: Auszug Quellcode Steuerung

Der Loop eines Messzyklus und seine jeweiligen Phasen sind in Abbildung 15 farblich markiert. Nach jedem Schaltvorgang ist eine Verzögerung von einer halben Sekunde vorgesehen. Die Arbeitsweise des Loops ist für alle Prüfkammern identisch.

```
40  void loop() {
41    // 1. Magnetventil und Pumpe gleichzeitig öffnen
42    digitalWrite(relayMagnetventil1, LOW);
43    digitalWrite(relayB, LOW);
44    delay(500);
45    digitalWrite(relayPumpe, LOW);
46    delay(ventilZeit);
47
48    //Messung durchführen 1. Magnetventil schließen
49    digitalWrite(relayPumpe, HIGH);
50    delay(500);
51    digitalWrite(relayMagnetventil1, HIGH);
52    digitalWrite(relayB, HIGH);
53    delay(Messung);
54
55    // Spülen Magnetventil und Pumpe gleichzeitig öffnen
56    digitalWrite(relayMagnetventil1, LOW);
57    digitalWrite(relaySP, LOW);
58    delay(500);
59    digitalWrite(relayPumpe, LOW);
60    delay(SPZeit);
61
62    // Spülen Magnetventil schließen
63    digitalWrite(relayPumpe, HIGH);
64    delay(500);
65    digitalWrite(relaySP, HIGH);
66    digitalWrite(relayMagnetventil1, HIGH);
67
```

Ansaugen

Messen

Spülen

Warten

Abbildung 15: Loop Messzyklus

6.2.5 Verbindungselemente

Leitungen: Als Verbindungselement zwischen den Komponenten des Versuchsaufbaus werden Polytetrafluorethylen-Schläuche (PTFE, ugs. Teflon) verwendet. PTFE bietet sehr gute Anti Haft Eigenschaften, eine hohe Resistenz gegen Öle, Säuren, Laugen etc., sowie eine hohe Temperaturbeständigkeit [44]. Darum erscheint es als gut geeignet um während der Testreihen keine VOC Anhaftungen anzunehmen, oder die Messergebnisse durch thermische Reaktionen zu beeinträchtigen. Die Schlauchgröße beträgt 6x4mm.

Anschlüsse: Für eine leichte, schnelle und dichte Verbindung der Leitungen mit den verschiedenen Komponenten des Versuchsaufbaus werden Pneumatik-Steckverschraubungen in passenden Größen eingesetzt. Sie ermöglichen ein schnelles Verbinden und trennen der Leitungen, sowie eine 100% Dichtheit der Anschlüsse.

Zu-/ Abluft-Verteiler: Für das Zusammenfassen und Aufteilen der Leitungen kommen handelsübliche Pneumatik-Verteiler aus Aluminium zum Einsatz. Diese können preisgünstig in verschiedenen Längen im Fachhandel bezogen werden. Der Anschluss der Leitungen erfolgt über passende Pneumatik-Steckverschraubungen. Ein Verteiler ist in Abbildung 16 dargestellt.

Abbildung 16: Zu-/ Abluft-Verteiler mit montierten Stecknippeln

6.2.6 Trockenschrank

Als Trockenschrank, für die Aufnahme der Komponenten und zur Temperaturregelung, kommt ein Memmert UF110 zum Einsatz. Sein Einstellbarer Temperaturbereich liegt zwischen +20 bis +300 °C bei einer Einstellgenauigkeit von 0,1 K bis 99,9°C. Sein Fassungsvermögen beträgt 108 l.

6.3 Messkonzept

Das folgende Kapitel behandelt die angedachte Messmethodik und verwendete Messtechnik. Ziel ist es, einen Messwert für die Abgabe von TVOC einer Probe in die Raumluft über einen definierten Zeitraum zu bestimmen. Die messtechnische Erfassung dieses TVOC-Wertes soll über ein direktanzeigendes Messverfahren erfolgen, um so Daten in Echtzeit zu erhalten. So können mögliche Änderungen der TVOC-Emissionen graphisch über den zeitlichen Verlauf dargestellt werden. Der Einsatz eines analytischen Messverfahrens ist aufgrund seiner Komplexität und der zeitlich nachgelagerten Untersuchung nicht praktikabel und nicht sinnvoll.

Als ein geeigneter Sensortyp erscheint ein Metalloxidsensor (MOX). Diese können ein breites Spektrum an verschiedenen Gasen und Dämpfen detektieren, besitzen eine kompakte Bauform, sind preiswert in der Anschaffung und einfach in der Handhabung. Sie finden häufig Anwendung in Geräten zur Überwachung der Luftqualität und Gaskonzentrationen in der Raumluft [14].

Die Messtechnik besteht aus drei Bestandteilen. Dem Sensor, der Sensorsteuerung und der Messdatenerfassung. Die Sensorsteuerung kommuniziert mit dem Sensor und verarbeitet dessen Signale, welche von der Messdatenerfassung kontinuierlich aufgezeichnet werden.

6.3.1 Sensor Bosch BME688

Als Sensor kommt der multifunktionale Gas-Sensor BME688 der Firma Bosch zum Einsatz. Neben der Detektion von Gasen mithilfe eines MOX-Sensorelements bestimmt er durch zusätzliche integrierte Sensoren den Luftdruck, die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur. Laut Hersteller reagiert er auf die meisten VOC und weitere Gase wie flüchtige Schwefelverbindungen, Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Er selektiert dabei nicht nach spezifischen Gasen, sondern misst eine Gesamtkonzentration aller Bestandteile der Luft. Sein Messprinzip basiert auf der elektrischen Leitwertänderung einer sensorisch aktiven Schicht durch Reaktion auf oxidierende und reduzierende Gase. Diese Leitwertänderung wird als Widerstandswert vom Sensor erfasst. Je höher die Gaskonzentration, desto geringer wird der gemessene Widerstand und umgekehrt. Dieser Widerstandswert kann durch weitere Faktoren, wie bspw. der Luftfeuchtigkeit, beeinflusst werden [45].

Die Signale der vier physischen Sensoren (Gas-Widerstand, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck) werden mittels einer von Bosch entwickelten Softwarebibliothek „Bosch Software Enviromental Cluster“ (BSEC)

weiterverarbeitet. Ziel ist es, die Signale von möglichen Beeinflussungen zu bereinigen und eine höhere Signalverarbeitung zu erreichen. Die Bibliothek leitet aus diesen Rohdaten Werte für weitere, sogenannte „virtuelle“ Sensoren ab. Diese virtuellen Sensoren detektieren keine Signale mittels direkter Messungen, sondern leiten aus den Daten der vier physischen Sensoren auf Grundlage von Erfahrungswerten durch Studien und Untersuchungen eigene Messwerte ab (siehe Abbildung 17). Bspw. die CO_2- und b-VOC-Konzentration (typische VOCs der Atemluft) sowie einen Luftqualitätsindex IAQ (Index for Air Quality) [46]. Ihre genauen Herleitungen sind jedoch nicht öffentlich einsehbar. Somit ist die BSCE eine Art „Black-Box“, wobei für die von ihr ausgegebenen Messwerte von einer wissenschaftlichen Herleitung ausgegangen werden kann.

Jedoch kann der Messwert eines virtuellen Sensors deutlich von dem eines reellen Sensors abweichen und ist darum mit Vorsicht zu betrachten.

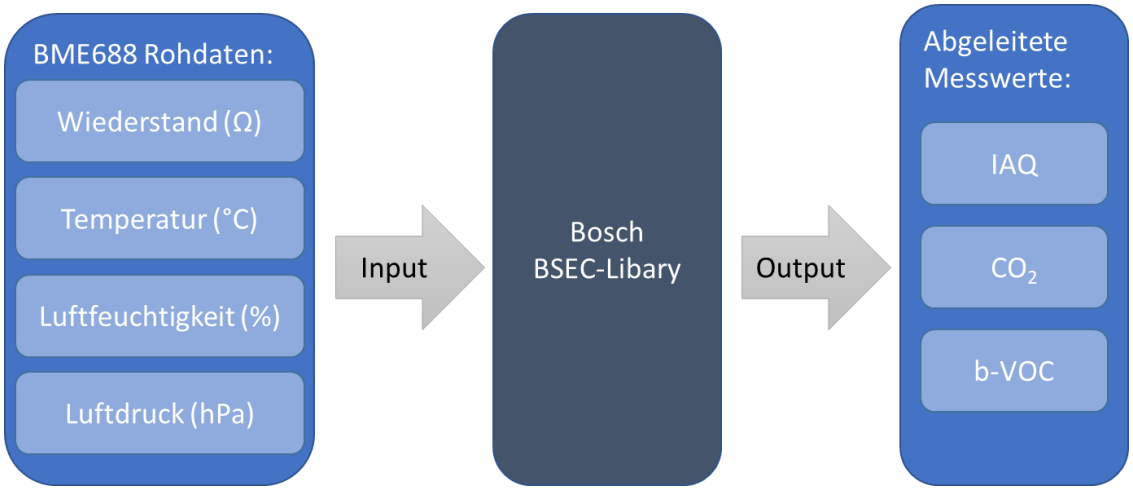


Abbildung 17: Signalverarbeitung BME688 und BSCE

Für die Versuche erscheint eine Auswertung des IAQ-Wertes der Proben am sinnvollsten. Der IAQ-Wert ist ein Summenwert für die gemessene VOC- und Gaskonzentration zum Zeitpunkt der Messung. Er kann als ein Anzeigeindex betrachtet werden, je höher der Wert, desto mehr VOC in der Luft. Er ist einheitenlos und nur mit IAQ-Werten von Sensoren derselben Konfiguration und Einbausituation vergleichbar. Es handelt sich nicht um einen TVOC-Wert, wie er bspw. für die Zulassung von Bauprodukten in Deutschland nach DIN EN ISO 16000-9 bestimmt wird.

Für diese Arbeit wird mit der von Bosch vorgegebenen Standardkonfiguration des Sensors gearbeitet. Alle drei Sekunden wird eine Messung durchgeführt. Der Sensor kann durch Anpassung verschiedener Parameter wie bspw. die der Betriebstemperatur der sensorischen Schicht für spezifische Anwendungsfälle weiter individualisiert werden.

Der BME688 Sensor wird vormontiert auf einer Leiterplatte zur direkten Verwendung, vom Hersteller Adafruit (New York, USA) bezogen. Seine Abmessungen betragen 3x3 mm (Abbildung 18). Die Ansteuerung erfolgt über die Sensorsteuerung mittels eines Microcontrollers und der von Bosch zur Verfügung gestellten Software. Um eine evtl. Abweichung der Messwerte der Sensoren untereinander zu untersuchen, werden vier Sensoren in den Versuchsaufbau integriert.

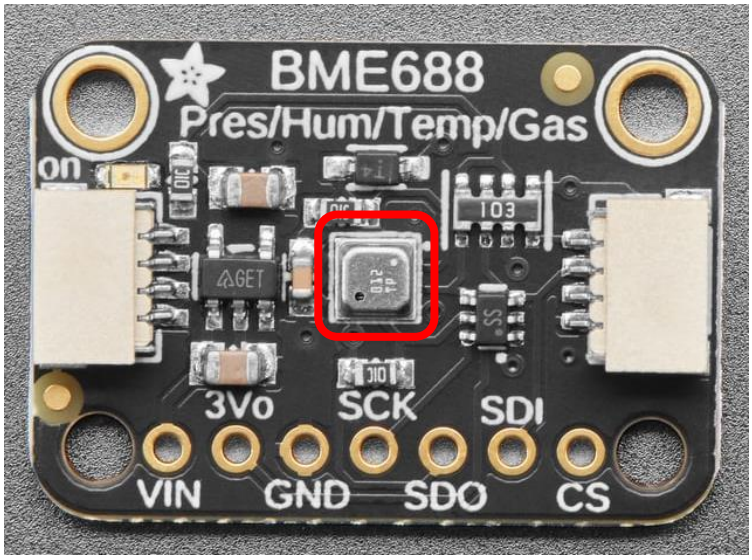


Abbildung 18: Sensor BME688 (rot umrandet) auf Leiterplatte
Quelle: [47]

6.3.2 Sensorsteuerung, Messdatenerfassung

Die Sensorsteuerung kommuniziert mit dem Sensor, gibt diesem seine Konfigurationsparameter und verarbeitet alle ausgegebenen Signale des Sensors weiter. Ausgangsbasis ist ein ESP8266 Microcontroller (Espressif Systems, China) und die von Bosch bereitgestellte Softwarebibliothek. Die Programmierung erfolgt mittels Arduino-IDE, einer integrierten Entwicklungsumgebung für Arduino-Microcontroller, in C++. Die verwendeten Softwarebibliotheken und ihre Aufgaben sind:

- **BME68X Sensor-API:** Programmierschnittstelle zwischen Sensor und Microcontroller. Ermöglicht die Kommunikation und den Datenaustausch zwischen Sensor und weiteren Schnittstellen, wie der BSEC-Softwarebibliothek.
- **BSEC Arduino Softwarebibliothek:** Die BSEC-Softwarebibliothek verarbeitet die durch die Sensor-API übermittelten Signale. Je nach Konfiguration werden die angeforderten Messwerte berechnet, oder direkt an die Messdatenerfassung ausgegeben.

Für jeden Sensor wird ein eigener Microcontroller verwendet. Die Ansteuerung, Stromversorgung und Übermittlung der Messwerte erfolgt per serieller Schnittstelle (hier per USB-Port) an einen PC. Abbildung 19 zeigt die verwendeten vier Microcontroller, montiert auf einem Entwicklerboard. Es werden die seriellen Schnittstellen COM3-6 genutzt. Diese Bezeichnung wird für die weitere Zuordnung der Messdaten zu den jeweiligen Sensoren verwendet.

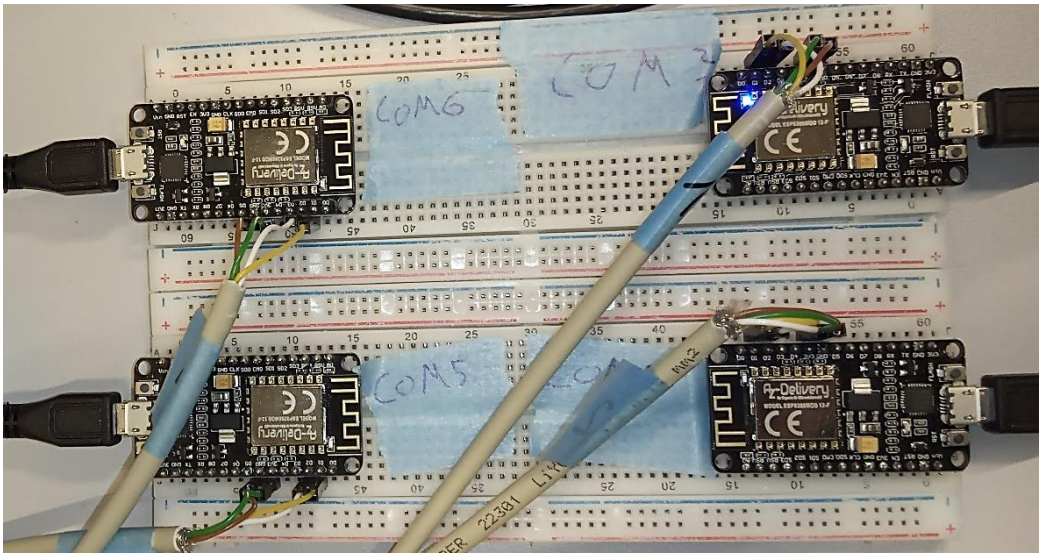


Abbildung 19: Microcontroller Sensorsteuerung

Die von der jeweiligen Sensorsteuerung ausgegebenen Messwerte werden mithilfe der Software „Coolterm“ angezeigt und als txt-Datei abgespeichert. Coolterm ist ein Terminalprogramm und versieht jede übertragene Messung mit einem Zeitstempel Abbildung 20. Die Benennung der txt-Dateien erfolgt nach Datum, Uhrzeit und COM-Port.

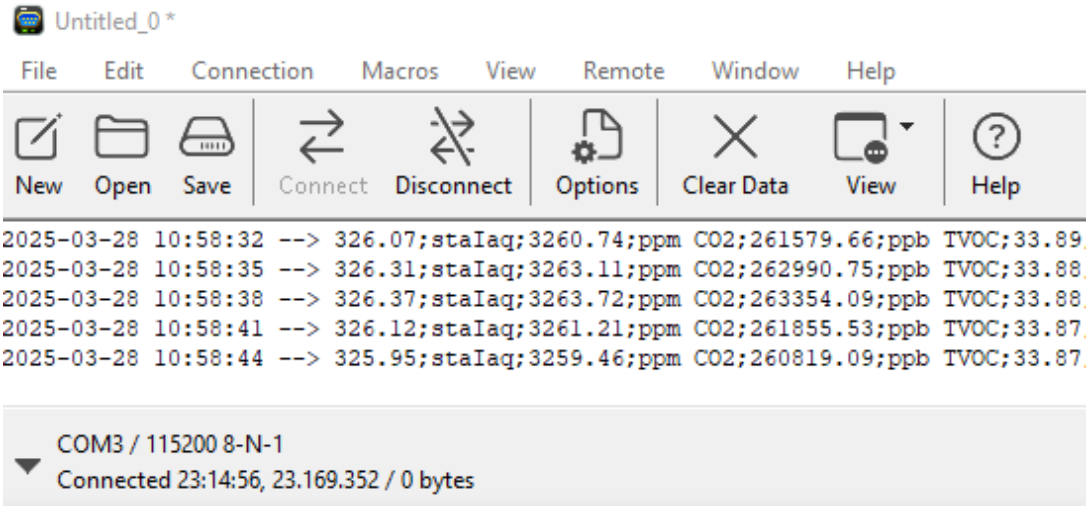


Abbildung 20: Ausschnitt Coolterm

Die für diese Arbeit festgelegten, auszugebenden Messwerten der BSEC-Bibliothek und ihre Herleitung, sowie weitere aufzuzeichnenden Signale sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Festgelegte Messwerte, Signale

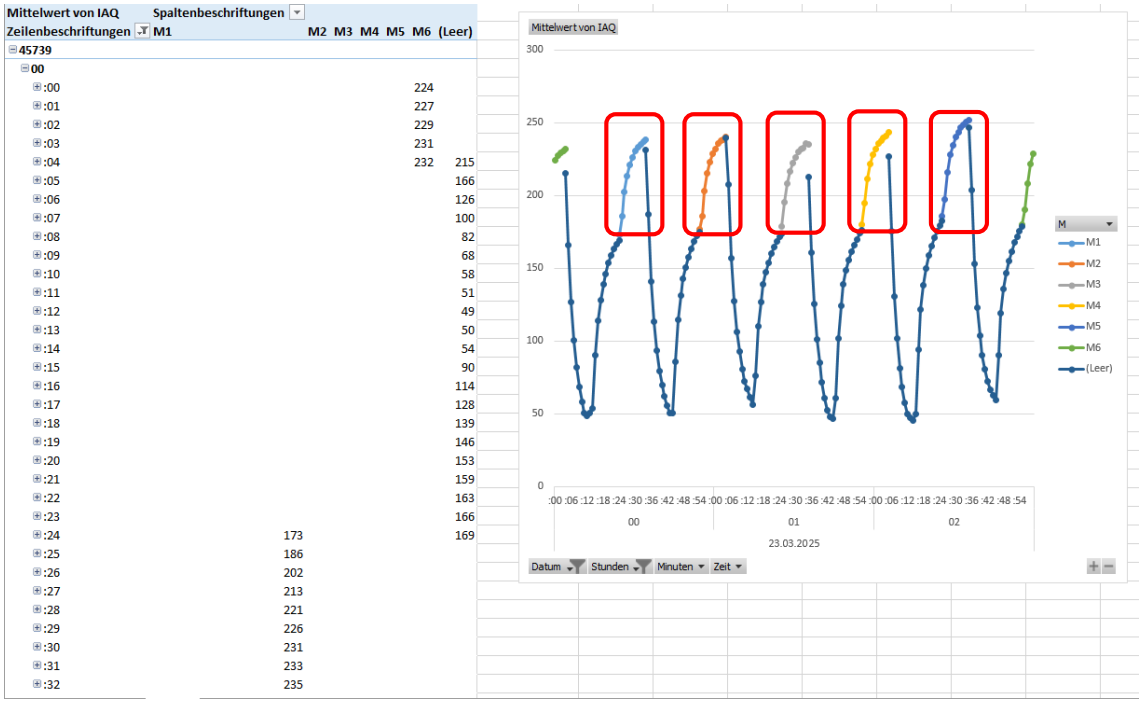
Messwert	Beschreibung	virtueller Sensor	physischer Sensor
s-IAQ	Luftqualitätsindex, von Bosch für stationäre Messungen empfohlen (ohne Auto-Trimm-Algorithmus)	x	
CO_2 [ppm]	Durch BSCE abgeleiteter CO_2 Wert	x	
b-VOC [ppb]	Messwert für typische VOC in der Atemluft	x	
Temperatur [°C]	Temperatur ohne Berechnung durch BSCE		x
Luftdruck [hPa]	Luftdruck ohne Berechnung durch BSCE		x
Luftfeuchtigkeit [%]	Luftfeuchtigkeit ohne Berechnung durch BSCE		x
Gas-Widerstand [Ω]	Widerstand ohne Berechnung durch BSCE		x
Sensor-Status	Funktionalitätsstatus des Sensors		
M1-M6	Markierung für Messzeitraum und Prüfkammer		

6.3.3 Messdatenauswertung

Die Auswertung der aufgezeichneten Messwerte erfolgt mittels Microsoft Excel und dessen Pivot-Tabellen-Funktion. So kann eine schnelle Aufbereitung, Analyse und Visualisierung der Messdaten erfolgen.

Die txt-Dateien werden eingelesen und aufbereitet. In einer Pivot-Tabelle werden die Messwerte auf Mittelwerte pro Minute zusammengefasst und können dort bspw. nach Stunden, Tagen und Prüfkammern gefiltert werden. Die graphische Auswertung erfolgt vorrangig für die gemessenen IAQ-Werte. Bei Bedarf können weitere Messwerte wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit hinzugefügt werden. Eine beispielhafte Auswertung ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Spalte „Leer“ bezeichnet alle Messwerte für den Zeitraum, in dem keine Messung einer Prüfkammer durchgeführt wurde. Die Spalte M1-M6 bezeichnet die Messungen der jeweiligen Prüfkammer/ Probe. Die rot umrandeten farbigen Scheitelpunkte

zeigen den jeweiligen Verlauf einer Messung. Der blaue Verlauf des Graphen zeigt den Ansaug- und Spülvorgang.



Mittelwert von IAQ	Spaltenbeschriftungen						
Zeilenbeschriftungen	M1	M2	M3	M4	M5	M6	(Leer)
45739							
00							
:00						224	
:01						227	
:02						229	
:03						231	
:04						232	215
:05							166
:06							126
:07							100
:08							82
:09							68
:10							58
:11							51
:12							49
:13							50
:14							54
:15							90
:16							114
:17							128
:18							139
:19							146
:20							153
:21							159
:22							163
:23							166
:24		173					169
:25		186					
:26		202					
:27		213					
:28		221					
:29		226					
:30		231					
:31		233					
:32		235					

Abbildung 21: Bsp. einer Pivot-Tabelle zur Auswertung

6.4 Zusammenbau, Inbetriebnahme

Nach Entwicklung und Fertigung aller im vorherigen Kapitel beschriebenen Komponenten sowie Abschluss aller notwendigen Vorarbeiten wie Verkabelung und Programmierung wurde der Versuchsaufbau zusammengebaut und in Betrieb genommen.

Abbildung 22 zeigt den teilmontierten Versuchsaufbau. Links im Bild, rot umrandet, ist die Steuerung der Ventile und Pumpe zu sehen. Rechts die Ventile, Verteiler und Pumpe. Nach einem erfolgreichen Probelauf der Steuerung wurden die im Bild befindlichen Komponenten und die Messkammer auf einer Siebdruckplatte montiert und in den oberen Bereich des Trockenschrankes eingeschoben. Die Prüfkammern befinden sich im unteren Bereich.

Abbildung 23 zeigt den fertig montierten Versuchsaufbau innerhalb des Trockenschrankes. Abbildung 24 die montierte Messkammer und Abbildung 25 liefert einen Überblick über den Raumbedarf des kompletten Messstandes mit PC für die Messdatenerfassung.

Die Abluft der Messungen wird direkt in den Trockenschrank abgeleitet und dort per internem Lüfter über eine Luftklappe ausgeleitet. Die Frischluft wird per Leitung durch eine Kabeldurchführung von außerhalb des Trockenschrankes angesaugt. Die Durchführung aller benötigten Kabel erfolgt über die Abluftklappe oder eine Kabeldurchführung des Trockenschrankes. Ein erster Probelauf verlief reibungslos über 24h.

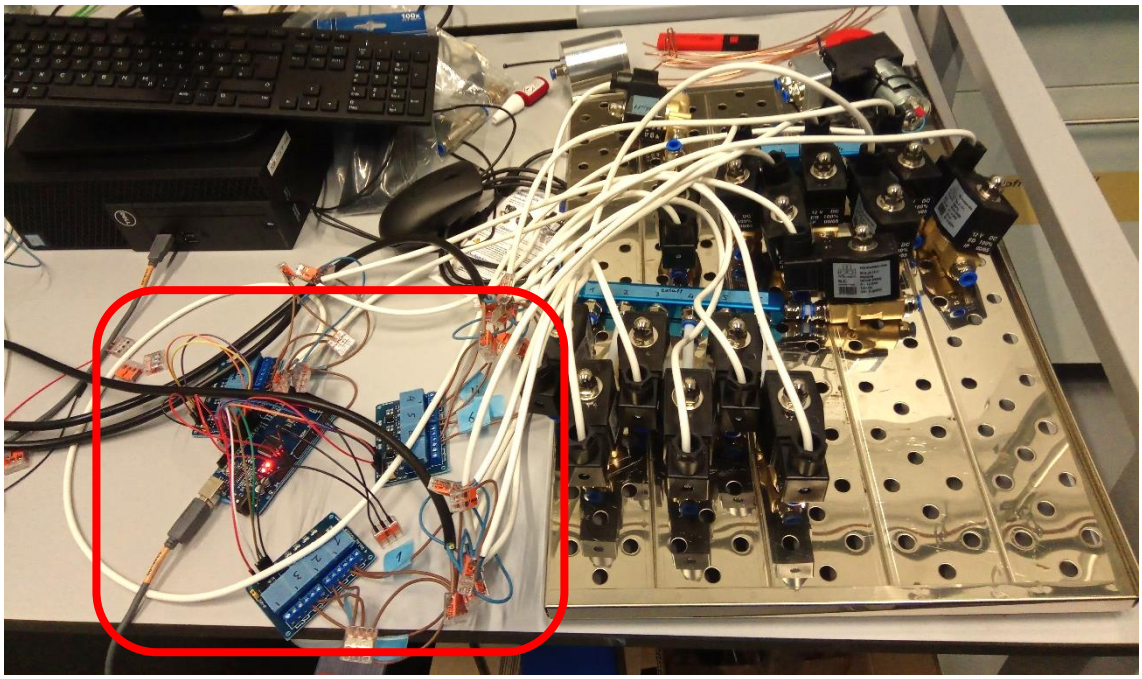


Abbildung 22: Versuchsaufbau testweise montiert

Abbildung 23: Montierter Versuchsaufbau im Trockenschrank mit bestückten Prüfkammern

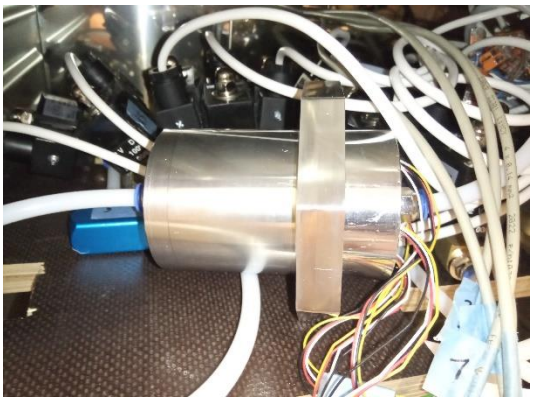


Abbildung 24: Montierte Messkammer

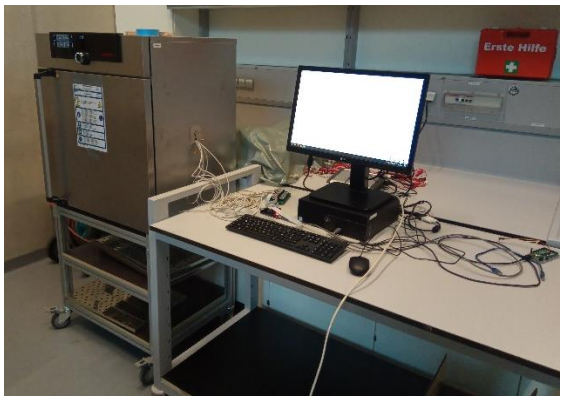


Abbildung 25: Arbeitsplatz Messstand

7. Durchführung

Die Durchführung der Messreihen zur Untersuchungen von Baumaterialien hinsichtlich ihrer VOC-Abgabe und die Erprobung des dafür entwickelten Versuchsaufbaus wird in drei Abschnitte unterteilt:

1. Voruntersuchungen: Ermittlung verschiedener Eigenschaften des Versuchsaufbaus und Festlegung der zu beprobenden Materialien.

2. Parameterermittlung Messzyklus: Festlegung der Dauer der drei Phasen eines Messzyklus. Überprüfung der Funktions- und Dauerlauffähigkeit des Versuchsaufbaus.

3. Finaler Status Versuchsaufbau, Änderungen: Zusammenfassung der Ergebnisse, Ausblick und Überlegungen für mögliche Änderungen.

Jeder Abschnitt wird in einem der folgenden Unterkapitel hinsichtlich seiner Funktion im Versuchskontext erläutert, die Durchführung beschrieben und daraus gewonnenen Erkenntnissen zusammengefasst.

7.1 Voruntersuchungen

Mithilfe der Voruntersuchungen sollen folgende Fragestellungen, hinsichtlich der Eigenschaften des Messstandes und der anschließenden Untersuchungen, geklärt werden:

- Temperaturstabilität des Trockenschrankes, der Prüfkammern
- Volumen einer Prüfkammer
- Volumenstrom der Pumpe
- Welche Materialien/ Baustoffe sollten Untersucht werden
- Welches Material eignet sich für die Parameter Ermittlung

7.1.1 Temperaturstabilität Trockenschrank, Prüfkammern

Die Untersuchung der Temperaturstabilität des Trockenschrankes ist wichtig, um die Genauigkeit der Temperaturregelung, der tatsächlichen Temperatur und der Temperaturverteilung innerhalb des Trockenschrankes zu überprüfen. Im Betrieb regelt die Steuerung des Trockenschrankes dessen Heizleistung, um eine konstante Temperatur zu halten. Gleichzeitig wird die Wärme über einen Lüfter verteilt. So können an unterschiedlichen Stellen im Innenraum verschiedene Temperaturen auftreten.

Da die VOC-Abgabe bei verschiedenen Temperaturbereichen untersucht werden soll, sind Kenntnisse über die tatsächliche Temperatur im Vergleich zur eingestellten Temperatur am und im Trockenschrank sowie in den Prüfkammern für das Auswerten und die Wiederholbarkeit der Messergebnisse wichtig.

Die für die durchgeführten Untersuchungen angefertigten Versuchsprotokolle zum Thema Temperaturstabilität können dem elektronischen Anhang dieser Arbeit entnommen werden. Sie gliedern sich auf in:

Versuch 1: Ermittlung des Temperaturverhaltens im Innenraum des Trockenschrankes und einer Prüfkammer bei Änderung der Soll-Temperatur

Versuch 2: Ermittlung des Temperaturverhaltens von mehreren Prüfkammern im inneren des Trockenschrankes bei verschiedenen Temperaturstufen

Für Versuch 1 wurden fünf Temperatursensoren an verschiedenen Stellen im Innenraum des Trockenschrankes und ein Sensor in einem Glas, welches eine

Prüfkammer repräsentiert, platziert. Abbildung 26 zeigt den Versuchsaufbau, sowie die Positionierung und Bezeichnung der Sensoren. Das Temperaturverhalten wurde für den Temperaturbereich von 30-80°C untersucht. Stündlich wurde die Temperatur in 10°C Stufen erhöht.

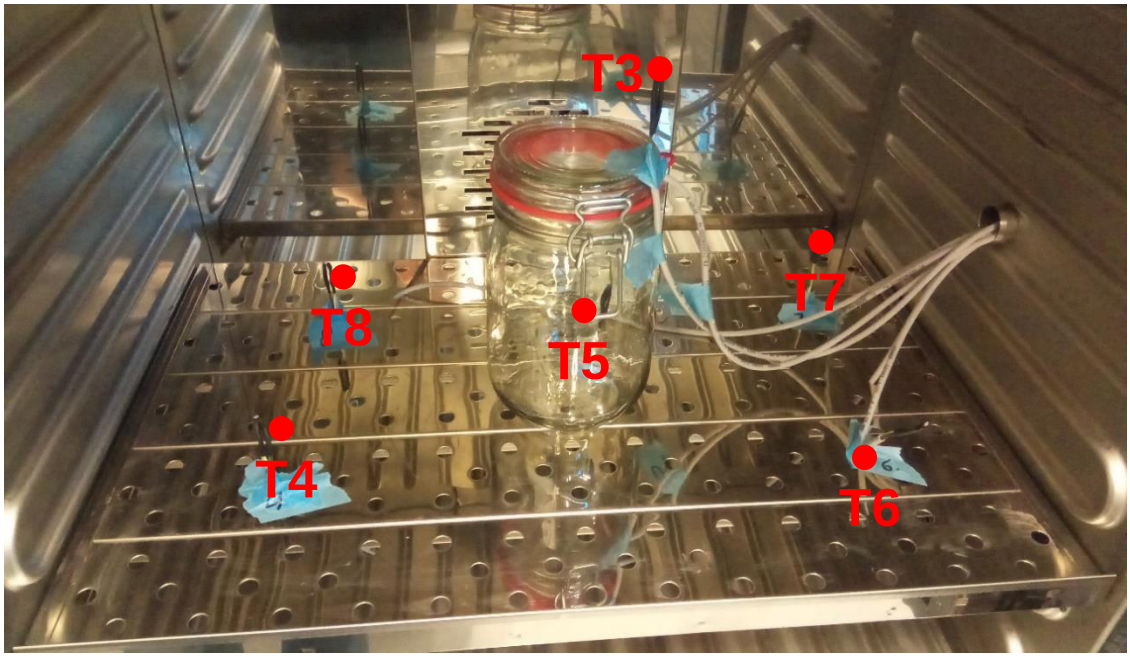


Abbildung 26: Glas im Trockenschrank, Positionierung Temperatursensoren

Als Ergebnis des Versuch 1 kann folgendes zusammengefasst werden:

Nach jeder Temperaturerhöhung dauert es ca. 1h bis sich die Temperaturwerte stabilisiert haben. Die Temperatur innerhalb des Trockenschrankes ist nicht überall gleich und die Messwerte der Sensoren variieren bei höheren Temperaturstufen stärker zwischen den einzelnen Standorten. Sie sind jedoch an diesen, nach der Stabilisierung, selbst relativ konstant. In den Temperaturbereichen unter 50°C kann von einer gleichmäßigen Temperaturverteilung im Innenraum ausgegangen werden. In der Prüfkammer selbst, bei mittiger Positionierung, ist die Temperatur über alle Temperaturstufen stabil, mit einer Abweichung von max. 0,1 °C zur Solltemperatur.

Für Versuch 2 wurden sechs Gläser mit jeweils einem Temperatursensor ausgestattet und im Trockenschrank aufgestellt. Sie simulieren die späteren Prüfkammern. Ein zusätzlicher Sensor misst die Temperatur im Innenraum. Abbildung 28 zeigt den Versuchsaufbau sowie die Positionierung und Bezeichnung der Sensoren. Das Temperaturverhalten wurde für die Temperaturstufen von 30°C, 40°C und 80°C für jeweils ca. 1h untersucht.

Abbildung 27: Gläser im Trockenschrank, Positionierung Temperatursensoren

Als Ergebnis des Versuch 2 kann folgendes zusammengefasst werden:

Die Temperaturverläufe der Sensoren in den Gläsern beschreiben je Temperaturstufe eine, mit der Zeit kleiner werdende, wellenförmige Bewegung. Nach spätestens 1h haben sich die Temperaturwerte in den Prüfkammern annähernd um den eingestellten Soll-Wert stabilisiert. Die Abweichungen der Messwerte zur Soll-Temperatur liegen dann in den Messkammern in einem Bereich von ca. 0,1-0,5 °C.

Schlussfolgerung aus beiden Versuchen für den Versuchsaufbau:

Für die angedachte Verwendung ist die Temperaturstabilität, die Temperaturverteilung sowie die Abweichung zum Soll-Wert im Innenraum des Trockenschrankes und innerhalb der einzelnen Messkammern mehr als ausreichend genau. Die DIN EN ISO 16000-9 fordert eine Temperaturgenauigkeit von ± 1°C für die Bestimmung von flüchtigen organischen Verbindungen mittels Emissionsprüfkammerverfahren [42]. Diese wird eingehalten.

7.1.2 Volumenermittlung Prüfkammer

Für die spätere Berechnung einer möglichen VOC Abgabe einer Probe über die Zeit muss unteranderem das genaue Volumen einer Prüfkammer bekannt sein. Dieses wird mittels gravimetrischer Messung bestimmt. Die geschlossene leere Prüfkammer wird bis zur Oberkante der Anschlüsse mit Wasser befüllt und das Gewicht des Wassers mittels Waage bestimmt. Abbildung 28 zeigt die Herangehensweise und dokumentiert die Messwerte. Die Maße des Wassers beträgt 1130,3 g bei einer Wassertemperatur von 19,8°C. Die Dichte ρ von Wasser beträgt ρ = 0,9982 g/cm³, bei einer Temperatur von ca. 20°C [48]. Das Volumen V der Prüfkammer ergibt sich zu 1132 cm^3.

Abbildung 28: Messung Volumen Prüfkammer

7.1.3 Volumenstrom Pumpe

Nur mithilfe eines ausreichenden Volumenstroms kann bei entsprechender Laufzeit der Pumpe davon ausgegangen werden, dass die Luft im Inneren des Messstandes ausreichend umgewälzt wird. Zur Ermittlung des Volumenstroms der modifizierten Vakuumpumpe für Luft wird die Zeit gemessen, die die Pumpe bei 12 V braucht, um einen definierten Volumenkörper mit Luft zu füllen. Der Volumenkörper ist eine Folientüte mit einem Fassungsvolumen von ca. 33l. Abbildung 29 zeigt den Versuchsaufbau und -ablauf. Wiederholte Messungen ergaben eine durchschnittliche Füllzeit von ca. 50s. Die Berechnungsformel für den Volumenstrom Q einer Pumpe lautet:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Formel 1: Volumenstrom Pumpe für Luft. V= Volumen, t= Zeit bis Volumen gefüllt in s

Die modifizierte Vakuumpumpe liefert, mithilfe von Formel 1 berechnet, einen Volumenstrom von ca. 40l die Minute.

Abbildung 29: Messung Volumenstrom Vakuumpumpe 12V

7.1.4 Materialauswahl zur Untersuchung

Für die Auswahl an zu untersuchenden Materialien wurde vorab Tabelle 7 als eine Übersichtstabelle mit möglichen Bauprodukten als Emissionsquellen für VOC erarbeitet. Dabei handelt es sich vorwiegend um Produkte, die großflächig in Innenräumen zum Einsatz kommen [3]. Zusätzlich wurde sie um Kunststoffe ergänzt, welche für Voruntersuchungen verwendet werden können. Sie unterteilt mögliche Materialien nach Bauproduktgruppen und Untergruppen. Tabelle 7 bietet eine umfangreiche Auflistung an möglichen Probematerialien.

Tabelle 7: Übersicht Bauprodukte als VOC Quelle

Bauproduktgruppe	Untergruppe		Bezeichnung /Material
Bodenbeläge	textile		Teppichboden
	nicht textile	elastisch	PVC
			Vinyl
			Linoleum
			Gummi
			Polyolefine
			Kork
		nicht elastisch	Parket
			Dielen
			Laminat
	Verlegewerkstoffe		Klebstoffe
			Grundierungen
			Spachtelmasse
			Unterlagen
Holz	Vollholz		
	Holzwerkstoffe		Spanplatten
			OSB Platten
			Faserplatten
			Sperrholzplatten
			Leimbinder
	Möbel		
Wandbeläge			Tapete
			Gipskarton
			Putze
			Wandfarben
Lacke, Farben, Dispersionsfarben			
Dichtstoffe, Klebstoffe			Acryl
			Silikon
			Kleber
Kunststoffe			ABS
			PETG
			Polycarbonat
			TPU 95A

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, wurden die in Tabelle 8 aufgeführten Materialien aus den Bauproduktgruppen ausgewählt. Sie wurden als Neuware aus dem Fachhandel bezogen.

Tabelle 8: Ausgewählte Materialien

Probe	Material	Verwendung/ Produkt
A	HDF-Platte	Möbelbau
B	Teppichboden	Bodenbelag
C	Sperrholz	Möbelbau
D	Laminatfliese	Bodenbelag
E	Polypropylen	HT-Rohr
F	PVC	KG-Rohr

Probekörper werden für die spätere Untersuchung mittels einer Bohrkrone aus den Materialien entnommen. Der Durchmesser der Probekörper beträgt 7,9 cm. Er orientiert sich an der Öffnungsgröße der Prüfkammer. Die Dicke variiert.

Jeder Probekörper wird nach der Entnahme in Aluminiumfolie verpackt, um ein Verunreinigen der Proben und ein Entweichen möglicher VOC-Emissionen weitestgehend zu verhindern. Die Verpackung erfolgt in Anlehnung an DIN EN 16516 [38]. Die entnommenen Proben sind in Abbildung 30 abgebildet.

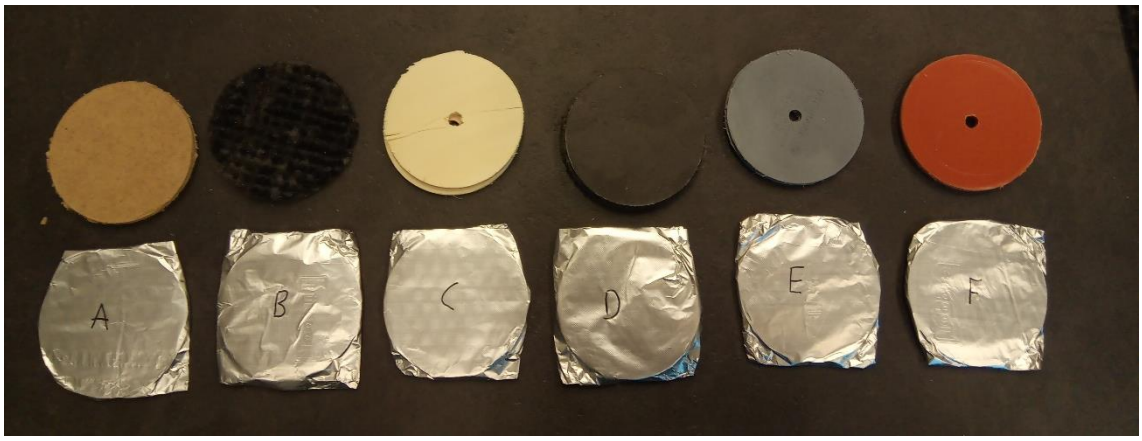


Abbildung 30: Probekörper A-F

7.1.5 Kunststoffe für Parameterermittlung

Die einzelnen optimalen Dauern der Phasen eines Messzyklus müssen vorab mittels Messreihen bestimmt werden. Hierfür soll jede Prüfkammer mit einem Probekörper desselben Materials bestückt sein, um die optimalen Dauern zu ermitteln und die grundlegende Funktionsweise des Versuchsaufbaus zu testen. Der Probekörper sollte eine möglichst hohe Menge an VOC abgeben, sodass gute Messausschläge sichtbar werden. Gleichzeitig können durch die Verwendung derselben Probekörper eventuelle Abweichungen der Kammern untereinander festgestellt werden.

Als geeignetes Material für die Probekörper erscheinen 3D-druckfähige Kunststoffe. Sie bieten einen homogenen Aufbau, hohe Materialvielfalt und können vor jeder Messreihe „frisch“ hergestellt werden. Als Kunststofffilamente stehen ABS, PET, Polycarbonat und TPU 95A zur Auswahl.

Um zu ermitteln, welcher dieser Kunststoffe die höchsten Messwerte für VOC als IAQ-Index abgibt, wird jeweils ein frisch gedruckter Probekörper (Ø 40mm, 2mm dick) in ein verschlossenes Glas mit einem BME688-Sensor gesetzt. Die vier Gläser werden gleichmäßig im Trockenschrank verteilt. Um eine möglichst hohe Oberflächenfreisetzung zu ermöglichen, wird jeder Probekörper hochkant auf einem Halter. Abbildung 31 zeigt exemplarisch einen Probekörper auf seinem Halter und ein zur Messung bestücktes Glas mit Sensor.

Die IAQ-Werte der Probekörper werden bei einer eingestellten Soll-Temperatur von 30°C und 40°C für jeweils ca. 30 min untersucht. Vor der Erhöhung der Temperatur wird jedes Glas mit Druckluft gespült. Der Probekörper aus TPU weist mit Abstand die höchsten IAQ-Werte der Messreihen auf.

Die weitere Parameterermittlung wird mit Probekörpern aus TPU durchgeführt.

Abbildung 31: Probekörper auf Halter (links), Glas mit Sensor und Probekörper (rechts)

7.2 Parameterermittlung Messzyklus

Die Festlegung der jeweiligen Dauern der drei Phasen eines Messzyklus ist für den Betrieb des Versuchsaufbaus und die späteren Messungen der Materialproben entscheidend. Abbildung 32 beschreibt den Ablauf eines Messintervalls, bzw. seiner sechs Messzyklen und deren drei Phasen. Die Dauer t [min] der drei Phasen ist der mögliche einstellbare Parameter. Nach Durchlauf aller sechs Messzyklen und somit dem Abschluss eines Messintervalls folgt die Wartezeit (W). Sie dient dem Festlegen der Häufigkeit der Messintervalle. Hier kann die Gesamtdauer eines Messintervalls bei Bedarf verlängert werden. Bspw. um eine Beprobung der Prüfkammern pro Stunde oder pro Tag festzulegen.

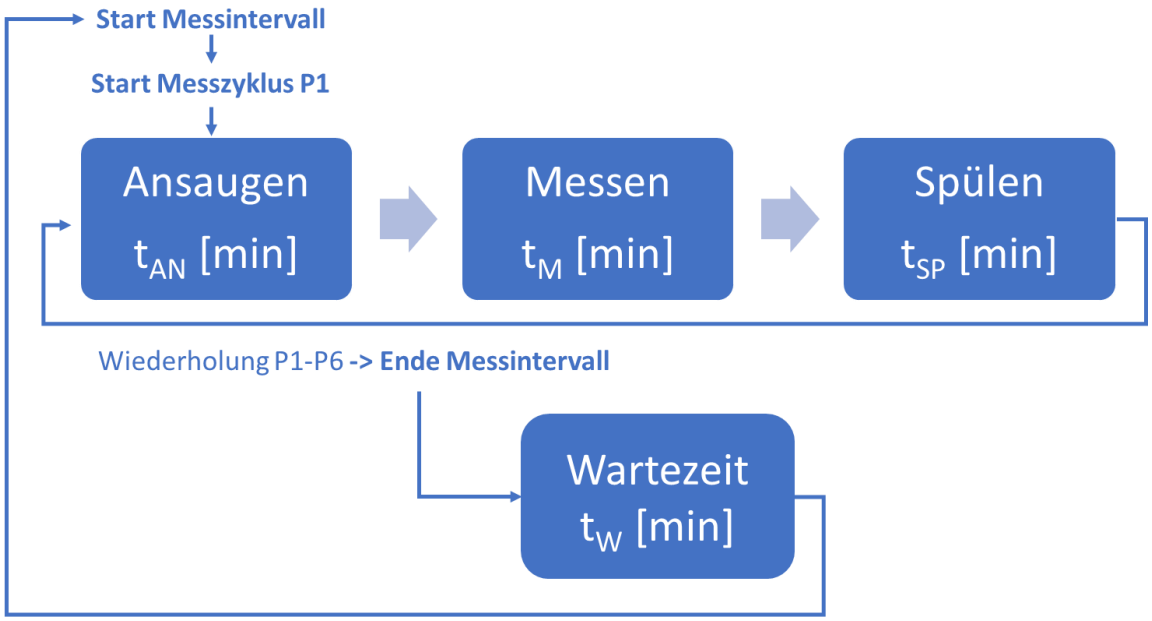


Abbildung 32: Ablauf Messintervall/ Messzyklus, Phasen/Parameter Bezeichnung

Die Wahl der Parameter t der jeweiligen Phase eines Messzyklus haben in Kombination einen direkten Einfluss auf die Messwerte und den Versuchsablauf. Mögliche Einflüsse der drei Phasen Ansaugen (AN), Messen (M) und Spülen (SP) bei zu kurzer oder zu langer Dauer werden in Tabelle 9 umrissen.

Tabelle 9: Auswirkungen Dauer t der Phasen

Phase	Dauer t	Beschreibung
AN	-	Die Luft in der Prüf- und Messkammer wird nicht ausreichend vermischt. Die zumessende Luftprobe ist nicht homogen
	+	Unnötige Laufzeit der Pumpe, Verschleiß und Verlängerung des Messzyklus

M	**-**	Unterschreiten der Reaktionszeit des Sensors. Kein erreichen von Hochpunkten in der Messkurve, geringe Aussagekraft für Vergleiche verschiedener Materialien
	+	Verlängerung des Messzyklus
SP	**-**	Kein vollständiger Luftaustausch in der Prüf- und Messkammer mit Außenluft. Kein zurücksetzen möglicher VOC Belastungen. Keine Regeneration des Sensors
	+	Unnötige Laufzeit der Pumpe, Verschleiß und Verlängerung des Messzyklus
[-] : t < Optimum ; [+] : t > Optimum		

Die Ermittlung der geeigneten Parameter erfolgt durch umfangreiche Versuchsreihen mit verschiedenen Parameterkombinationen. Tabelle 10: Auflistung Versuchsreihen listet alle Versuchsreihen, ihre Bezeichnung, Dauer, die jeweiligen eingestellten Parameter und evtl. Anmerkungen auf. Insgesamt wurden in der Zeit vom 04.02.2025 bis 02.04.2025 15 Versuche durchgeführt. Neben der Parameterermittlung wurde der Versuchsaufbau hinsichtlich seiner Dauerlauffähigkeit und Funktionsfähigkeit erprobt.

Tabelle 10: Auflistung Versuchsreihen

Nr.	Bezeichnung	Dauer in d	Parameter t [min]			Bemerkung
			AN	M	SP	
1	VD_2025.02.04-07	2	5	5	5	Inbetriebnahme, Silikon Abdichtung Kabeldurchführung noch am aushärten
2	VD_2025.02.10-11	1	10	10	10	Erneute Abdichtung Kabeldurchführung, Wartephase deaktiviert
3	VD_2025.02.13-14	1	10	10	20	Messkanal M-Phase implementiert
4	VD_2025.02.14-17	3	10	20	10	
5	VD_2025.02.18-20	2	5	5	10	
6	VD_2025.02.20-21	1	10	10	10	
7	VD_2025.02.21-24	3	20	10	10	Abweichendes Verhalten Messwerte -> defekte Membran Pumpe

8	VD_2025.02.26-28	2	20	10	10	Membran getauscht, weiterhin Abweichendes Verhalten Messwerte
9	VD_2025.02.28-04	4	10	10	10	Veränderung des Messverlaufs über WE -> defekte Membran Pumpe
10	VD_2025.03.05-13	8	10	10	10	neues Membran Material
11	VD_2025.03.14-18	4	10	10	10	Externer CO2 Sensor aufgestellt
12	VD_2025.03.14-20	6	10	10	10	
13	VD_2025.03.21-24	3	10	10	10	Neuer Standort Versuchsaufbau
14	VD_2025.03.21-28	7	10	10	10	26.03. Luftfilter Ansaugung montiert, 28.03. festgestellt Abdichtung Messkammer defekt
15	VD_2025.04.02-04	2	10	10	10	

In den folgenden Kapiteln werden Teile der Versuchsreihen exemplarisch vorgestellt, Beobachtungen erläutert und auf mögliche Erkenntnisse hin analysiert. Jede Prüfkammer wurde mit einem frisch gedruckten Probekörper aus TPU bestückt (siehe Kapitel 7.1.5).

7.2.1 Versuchsreihe 1

Ein Ausschnitt der Messwerte von V1 ist in Abbildung 33 dargestellt. Der Graph beschreibt den jeweiligen gemessenen IAQ-Mittelwert pro Minute. Die verwendeten Parameter können Tabelle 10 entnommen werden. Die Wartezeit beträgt 30 min, die Temperatur des Trockenschrankes 30°C. Der rot umrandete Bereich umfasst ein exemplarisches Messintervall. Die markierten Bereiche 1-6 zeigen die M-Phasen der jeweiligen Messzyklen. Die Senke nach jeder M-Phase ist die SP-Phase und der Anstieg die AN-Phase. Mit jedem Messzyklus steigt der minimale IAQ-Wert zwischen den M-Phasen und die maximalen IAQ-Werte der M-Phase steigen. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass die SP-Phasen zu kurz gewählt sind. Nach dem 6 Messzyklus beginnt die mit W gekennzeichnete Wartephase. Während dieser steigt der IAQ-Wert, was vermutlich an Rest VOC im Versuchsaufbau liegt. Dieser Anstieg macht die Messwerte des ersten Messzyklus unbrauchbar, da der IAQ-Wert in der AN-Phase von P1 nicht steigt, sondern sinkt und sich so atypisch zu den anderen Messzyklen verhält. Als Konsequenz hieraus wird für die nächste Versuchsreihe die Wartezeit nach dem Messintervall auf null Minuten gesetzt sowie die Dauer der Parameter erhöht. Die Messzyklen laufen ab jetzt kontinuierlich.

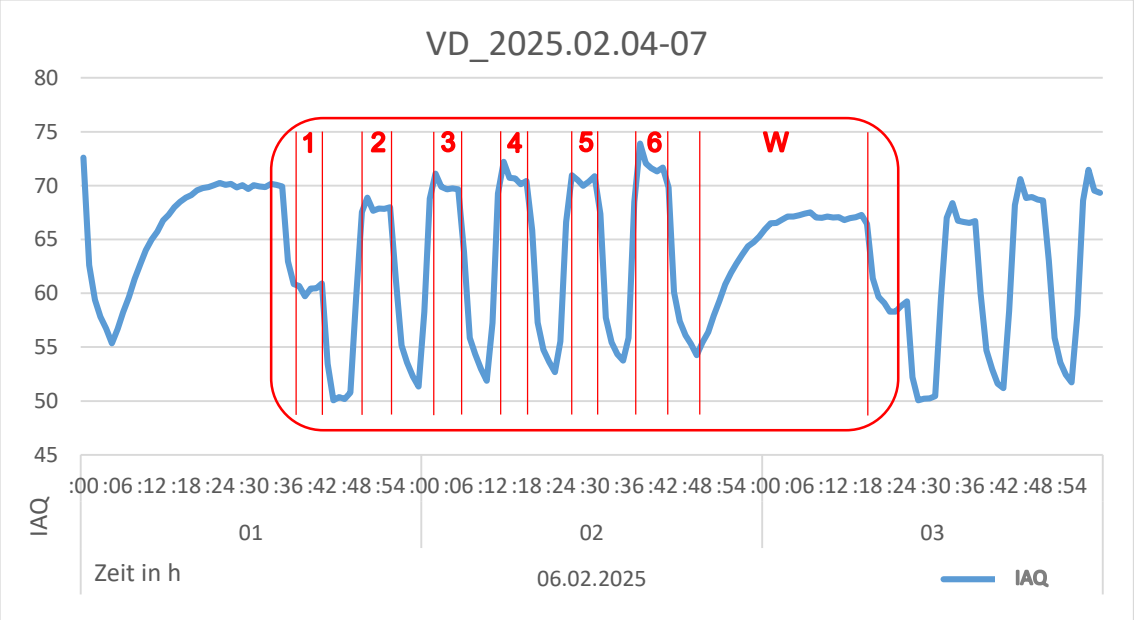


Abbildung 33: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.04-07, M-Phasen markiert

Abbildung 34 zeigt, dass keine konstante Temperatur im Versuchsaufbau herrscht. Sie schwankt in einem Bereich von ca. 34,5-36,2°C. Grund hierfür ist vmtl. die Abwärme der Pumpe. Die Abluftsteuerung des Trockenschrankes alleine ist nicht ausreichend um ein konstantes Temperaturniveau von 30°C im inneren zuhalten. Dies wäre nur möglich, wenn die Pumpe außerhalb des

Trockenschrankes verlegt würde, was jedoch im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist.

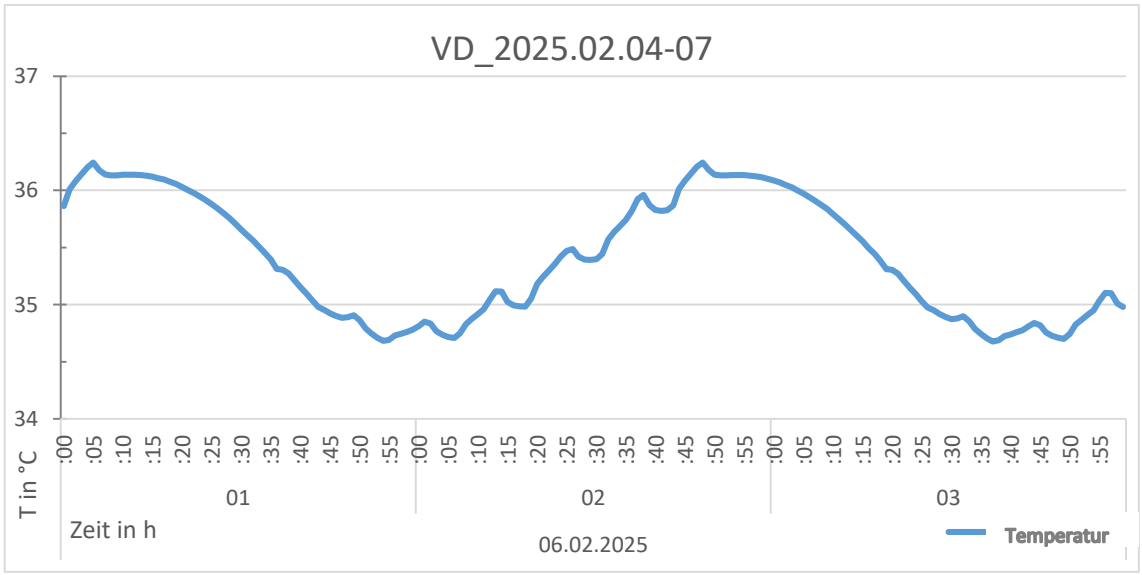


Abbildung 34: Ausschnitt Temperaturverlauf VD_2025.02.04-07

7.2.2 Versuchsreihe 2

Der Ausschnitt in Abbildung 35 lässt erkennen, dass die Messzyklen kontinuierlich verlaufen und das Deaktivieren der Wartezeit W die gewünschte Wirkung hatte. Die Nummerierung über den Scheitelpunkten verweist jeweils auf den Messzyklus der jeweiligen Prüfkammer. Während jedes Spülvorgangs erreichen die IAQ-Werte einen Tiefpunkt von um die 50. Die Verläufe der IAQ-Werte während der Messphasen ähneln sich untereinander und die Messzyklen derselben Prüfkammern ebenso. Es kann von einer guten Wiederholgenauigkeit der Messzyklen ausgegangen werden. Durch das Durchlaufen der Messzyklen wird ein Temperaturniveau von um die 41°C erreicht (siehe Abbildung 36).

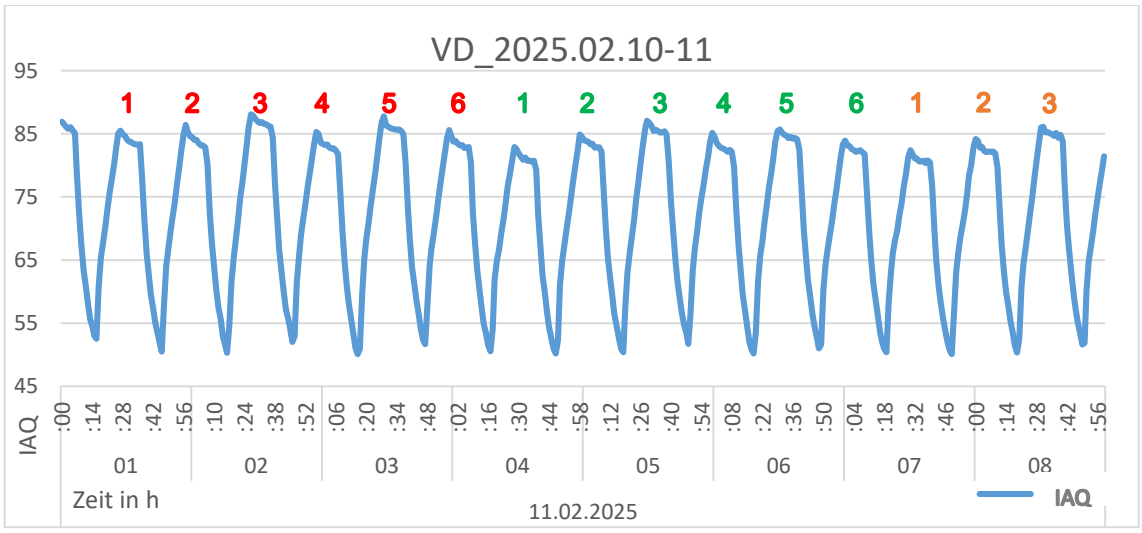


Abbildung 35: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.10-11, M-Phasen markiert

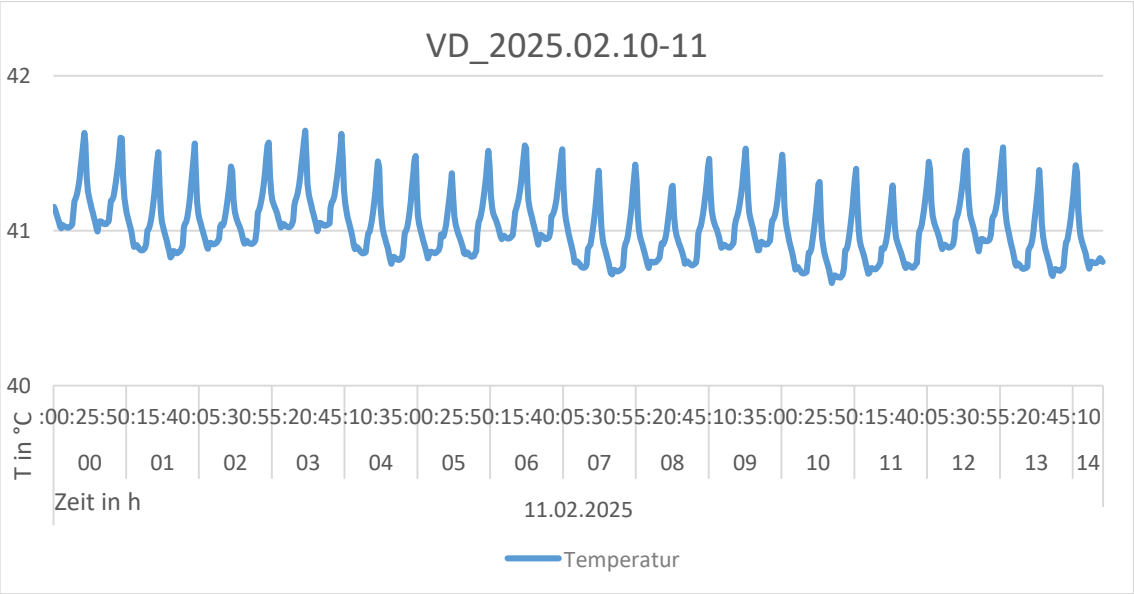


Abbildung 36: Ausschnitt Temperaturverlauf VD_2025.02.10-11

7.2.3 Versuchsreihe 3

Mit V3 wurde ein zusätzlicher Messkanal für das Erfassen und Kennzeichnen der jeweiligen zur Prüfkammer gehörigen M-Phase implementiert. Die Messwerte werden nun jeweils mit einer Markierung der gemessenen Prüfkammer versehen und können bei der Auswertung im Graphen farblich markiert werden. Die Spülphase wurde auf 20 min verlängert, um die Länge der SP-Phase von 10 min als evtl. ausreichend zu validieren. Abbildung 37 zeigt den Messverlauf über 12h. Die Graphen M1-M6 zeigen die jeweilige M-Phase der Prüfkammern P1-P6. Der Graph AN/SP beschreibt die AN- und SP-Phasen. Es ist ein wiederkehrender, sich ähnelnder Messwertverlauf der sechs Messzyklen und ihrer Phasen zu erkennen.

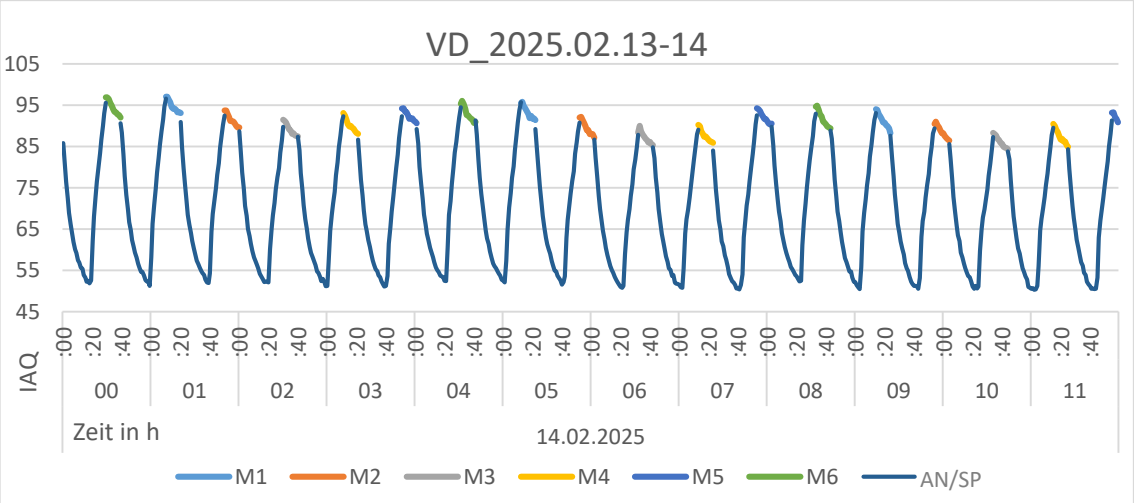


Abbildung 37: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.13-14

Abbildung 38 zeigt eine exemplarisch markierte SP- und AN- Phase. Bei der SP-Zeit von 20 min wird über die gesamte Versuchsdauer ein minimal IAQ-Wert von 50-52 gemessen. Im Vergleich mit den vorherigen Versuchsdaten erscheint eine SP-Phase von 10 min als ausreichend, da mit ihr ebenfalls einen IAQ-Wert von ca. 50 erreicht wird.

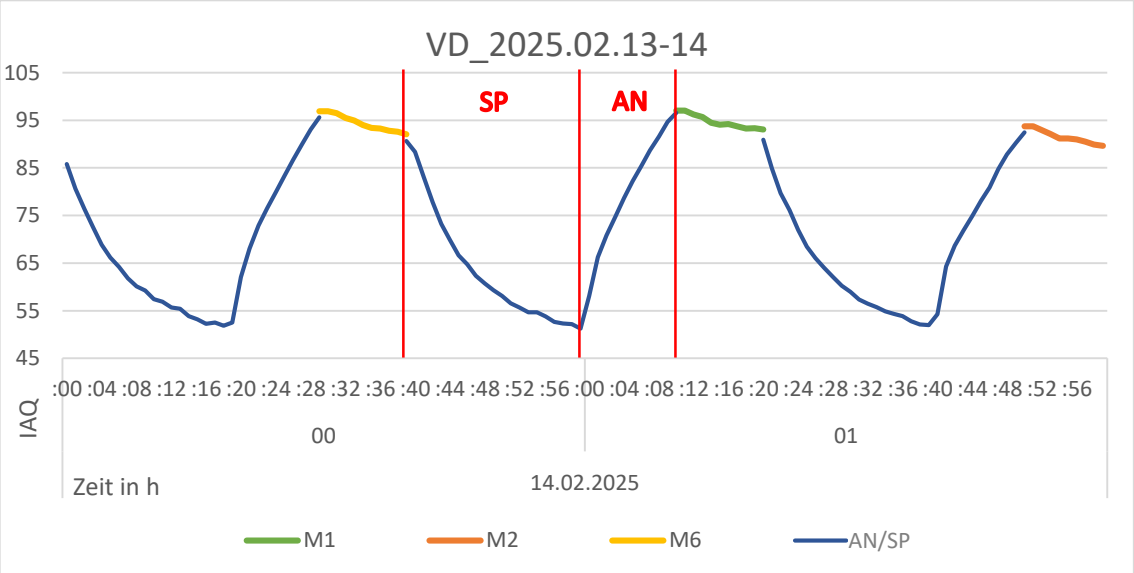


Abbildung 38: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.13-14, Phasen markiert

7.2.4 Versuchsreihe 4-6

In V4-V6 werden weitere Parameterkombinationen der drei Phasen erprobt. Ziel ist es, die Parameter für einen optimalen Messzyklus zu ermitteln. Dabei ist ein Verhältnis zwischen Laufzeit und evtl. Messgenauigkeit zu berücksichtigen.

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen den Verlauf einer 5, 10 und 20 minütigen M-Phase. Bei einer Dauer von 5 min steigt der IAQ-Wert vom Anfang bis zum Ende der M-Phase.

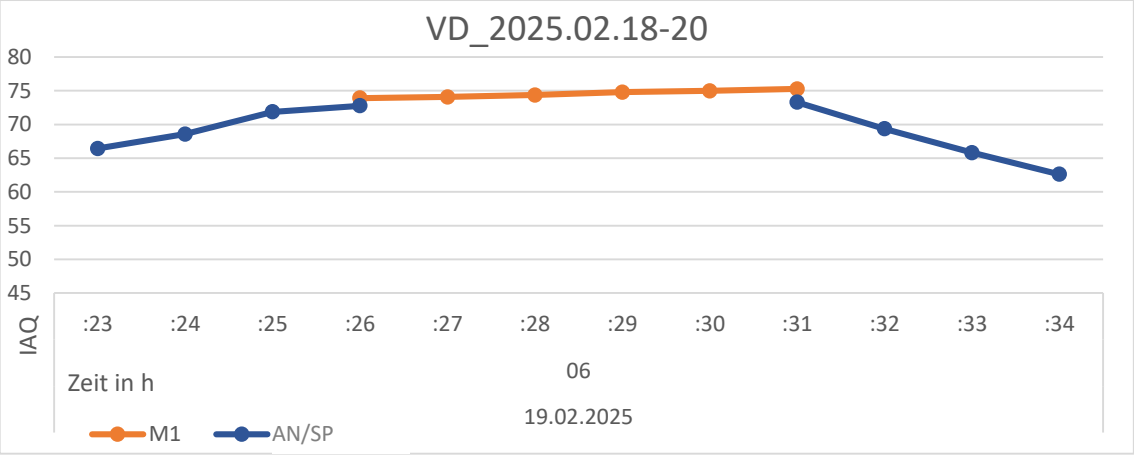


Abbildung 39: Exemplarische M-Phase 5 [min] aus VD_2025.02.18-20

Bei einer Dauer von 10 und 20 min wird nach ca. 3 min ein Maximum erreicht und sinkt ab dann bis zum Ende der M-Phase. Es stellt sich kein stationärer Zustand der Messwerte ein. Die ist vom Sensorprinzip nicht möglich, da sich in der Messkammer vorhandene VOC an der Sensoroberfläche abreagieren. Für einen späteren Vergleich der VOC-Abgabe unterschiedlicher Materialien über die Zeit wird der maximale IAQ-Mittelwert pro Minute der M-Phase herangezogen.

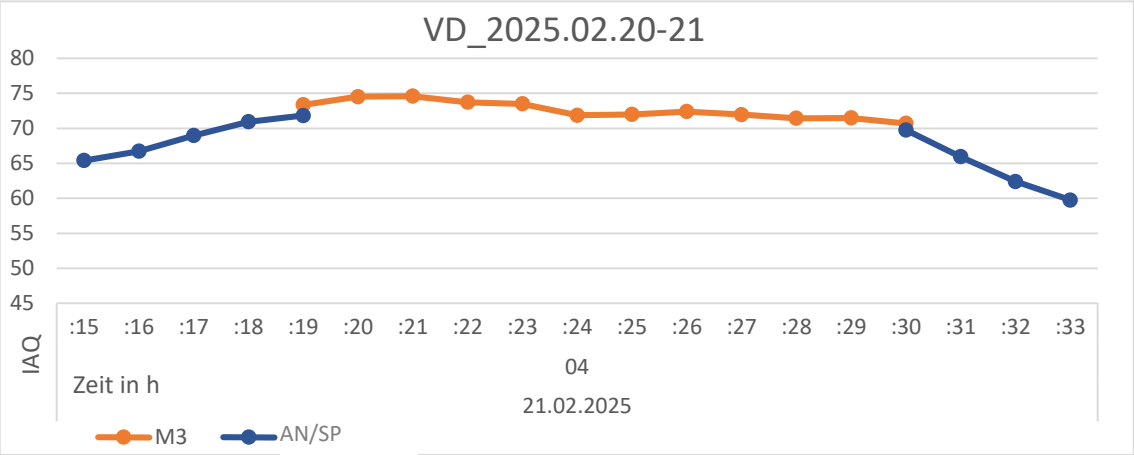


Abbildung 40: Exemplarische M-Phase 10 [min] aus VD_2025.02.20-21

Die Verläufe der 10- und 20-minütigen M-Phase zeigen keine wesentlichen Unterschiede, weshalb eine 10-minütige Dauer ausreichend erscheint.

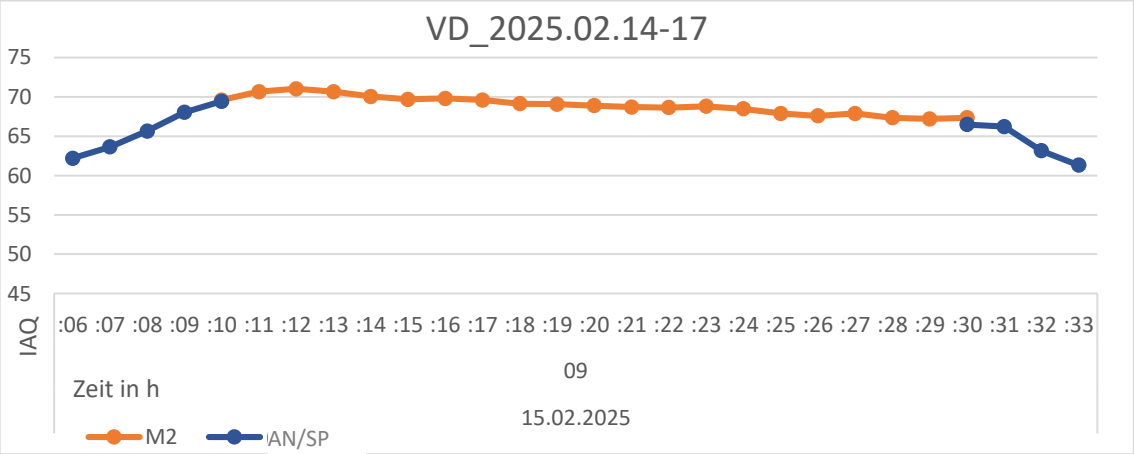


Abbildung 41: Exemplarische M-Phase 20 [min] aus VD_2025.02.14-17

7.2.5 Versuchsreihe 7

Bei der Überprüfung der optimalen Dauer der AN-Phase wurde bei der Auswertung, ca. 2h nach Versuchsbeginn, ein abweichendes Verhalten der Messverläufe zu den vorherigen Versuchsreihen festgestellt. Abbildung 42 zeigt einen Ausschnitt. Die Verläufe weisen keine Kontinuität auf.

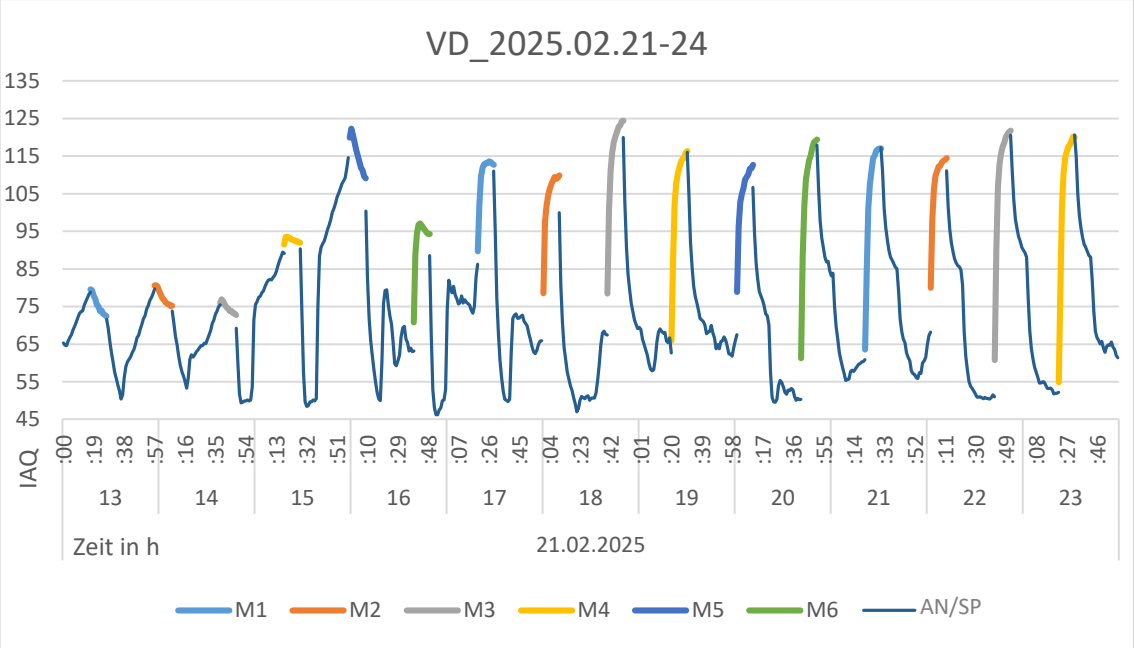


Abbildung 42: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.21-24

Bei einer anschließenden Fehlersuche im Versuchsaufbau wurde ein Defekt der Pumpe festgestellt. Die Pumpenmembran war gerissen und der Pumpenkörper wies starke rußartige Verschmutzungen auf (siehe Abbildung 43). Bei der Kontrolle der Prüfkammern wurden jedoch keine Verschmutzungen innerhalb des Versuchsaufbaus festgestellt. Die Verschmutzungen stammen vermutlich von dem Graphitkolben der Pumpe. Die Pumpenmembran wurde ersetzt und die Versuchsreihe wiederholt.

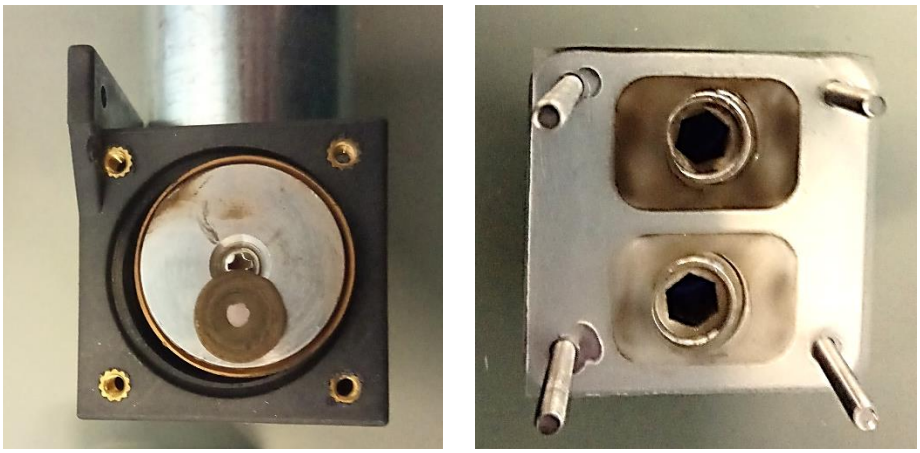


Abbildung 43: Defekte Pumpenmembran, verdreckte Pumpenteile

7.2.6 Versuchsreihe 8-9

Abbildung 44 zeigt einen Ausschnitt der Messwerte für Versuchsreihe 8. Die Verläufe sind trotz Reparatur der Pumpe weiterhin inkonsistent. Über Nacht kommt es zu einem Aufstau von VOC, der durch die SP-Phasen nicht wieder abgebaut wird. Erst in den Morgenstunden kommt es wieder zu einem Erreichen des IAQ-Wertes von 50.

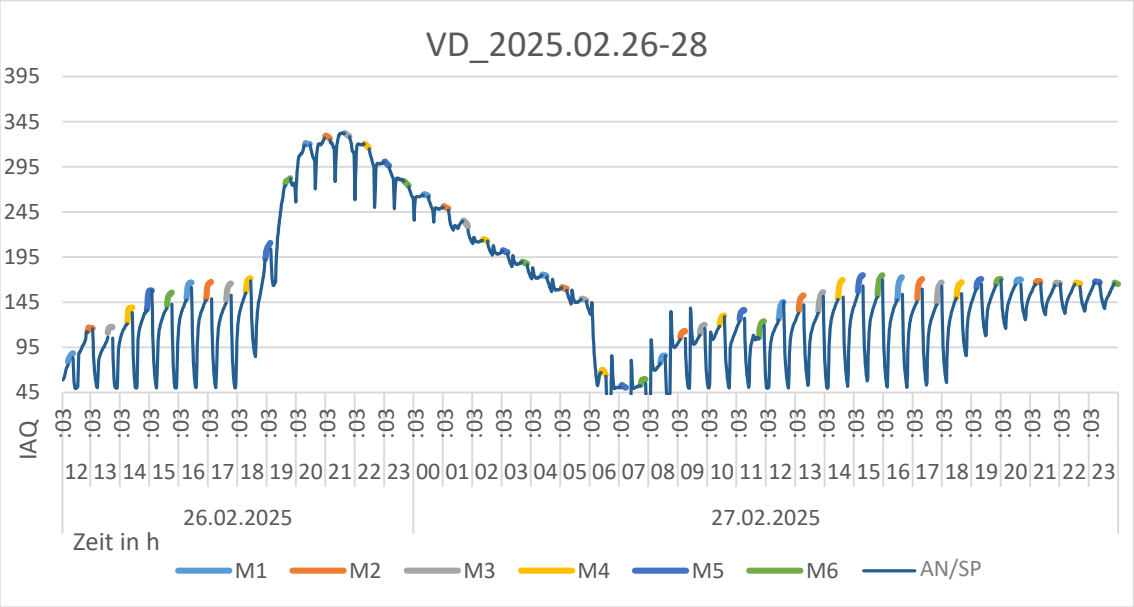


Abbildung 44: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.26-28

Abbildung 45 zeigt den Messwertverlauf für Versuchsreihe 9 über ein Wochenende. Hier kommt es nach Beginn der Versuchsreihe ab ca. 18 Uhr zu einer Erhöhung der IAQ-Werte. Diese bleibt über das gesamte Wochenende erhöht und kommt erst gegen Montagmorgen wieder auf ca. 50 IAQ während der SP-Phasen. Auch scheint nun die M-Phase von 10 min nicht mehr als ausreichend. Es wird kein Hochpunkt der Messkurve in der M-Phase mehr erreicht. Nach erneuter Inspektion der Komponenten wurde ein wiederholter Defekt der Pumpe festgestellt und als Ursache der Messverläufe vermutet. Durch die Funktionsweise der Pumpe kommt es zu Ermüdungsbrüchen an der Pumpenmembran.

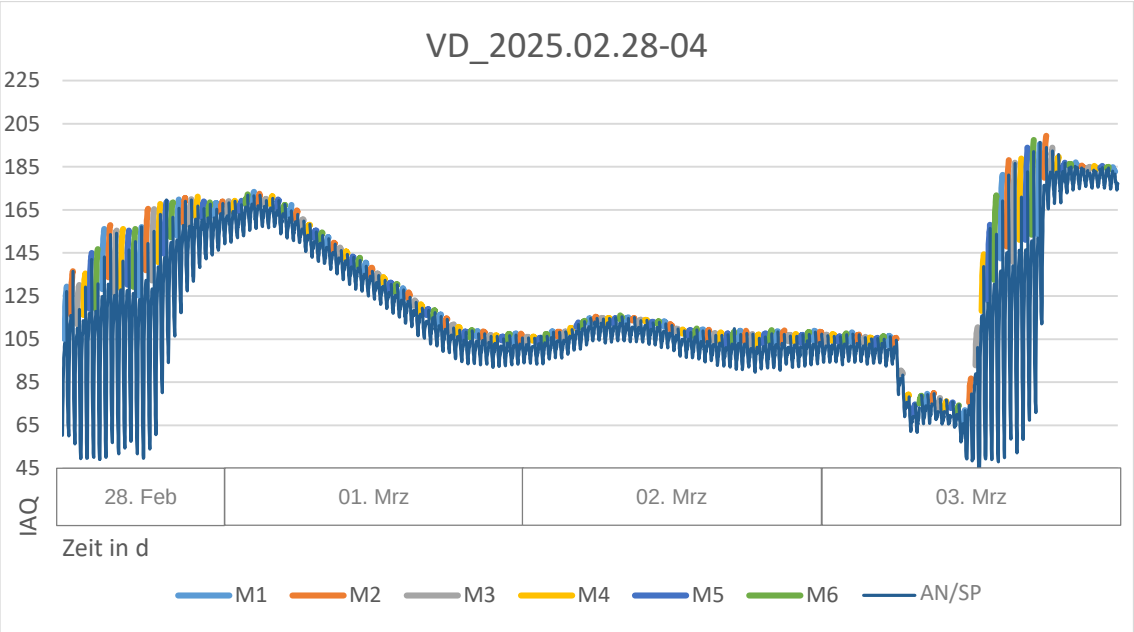


Abbildung 45: Ausschnitt IAQ-Messwerte VD_2025.02.28-04

7.2.7 Versuchsreihe 10

Vor Beginn der Versuchsreihe 10 wurde die Pumpenmembran aus PTFE durch eine Membran aus glasfaserverstärktem PTFE ersetzt. Ausgangsmaterial hierfür war eine handelsübliche Grillmatte. Durch die Glasfaserverstärkung sollen Vibrationsbrüche ausgeschlossen werden. Abbildung 46 zeigt den Pumpenkopf mit neuer Membran.

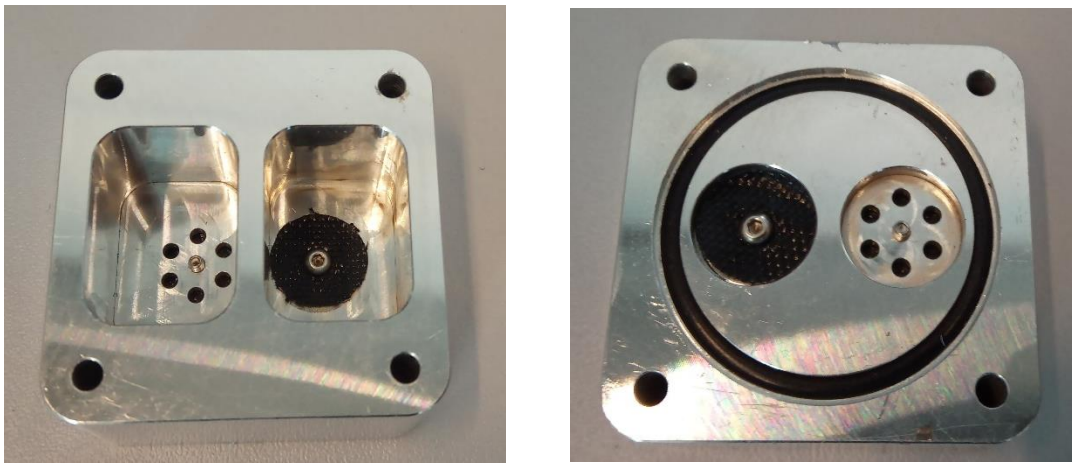


Abbildung 46: Pumpenkopf mit Membran auf Glasfaserverstärktem PTFE

Versuchsreihe 10 war mit einer Dauer von 8 Tagen die längste Versuchsreihe. Nach Beendigung der Versuchsreihe und Inspektion der Pumpe konnte kein Defekt der Membran festgestellt werden. Die Messwertverläufe zeigen jedoch wieder starke Schwankungen über den Tagesverlauf auf (siehe Abbildung 47).

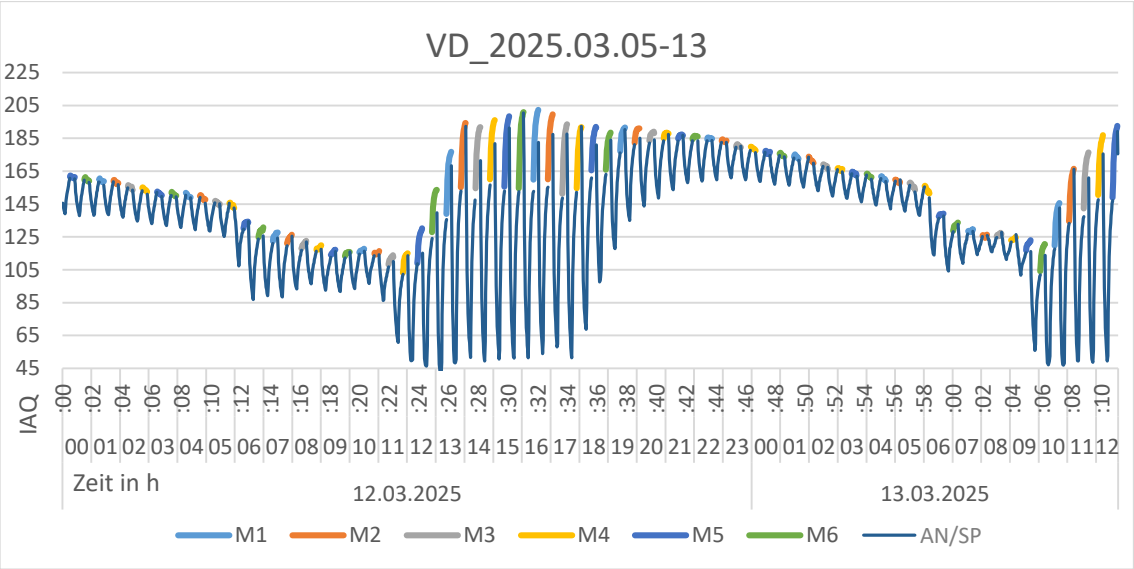


Abbildung 47: Ausschnitt IAQ-Messwerte Tagesverlauf VD_2025.03.05-13

Abbildung 48 zeigt den Verlauf über ein Wochenende. Hier kommt es ab Freitagabend 24 Uhr, zu einem gleichmäßigen Abfall der Werte, welche sich ab Sonntag auf einem Niveau stabilisiert haben. Ab Montagmorgens wird der Messverlauf wieder inkonsistent.

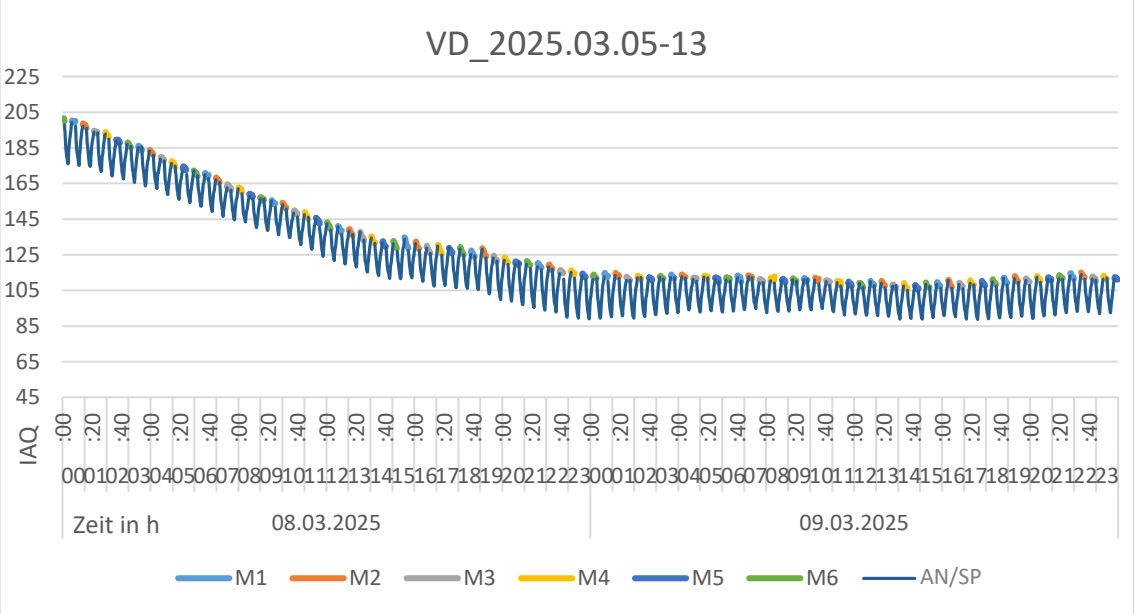


Abbildung 48: Ausschnitt IAQ-Messwerte Wochenende VD_2025.03.05-13

Das Verhalten der Messwerte steht eventuell mit der Qualität der angesaugten Raumluft und der Raumlufttechnischen Anlage des Standortes in Verbindung.

7.2.8 Versuchsreihe 11-12

Zur Überprüfung eines evtl. Zusammenhangs der Messverläufe und der Qualität der Raumluft wurde außerhalb des Messstandes ein CO_2-Sensor installiert. CO_2-Werte können als Indikator für die Raumluftqualität verwendet werden. Abbildung 49 zeigt einen Ausschnitt des CO_2-Messverlauf über ca. 12h. Es sind deutliche Schwankungen im Messverlauf zu sehen. Diese Schwankungen waren über den gesamten Messzeitraum zu beobachten. Die Verläufe der IAQ-Messwerte ähnelten denen der vorherigen Versuchsreihen.

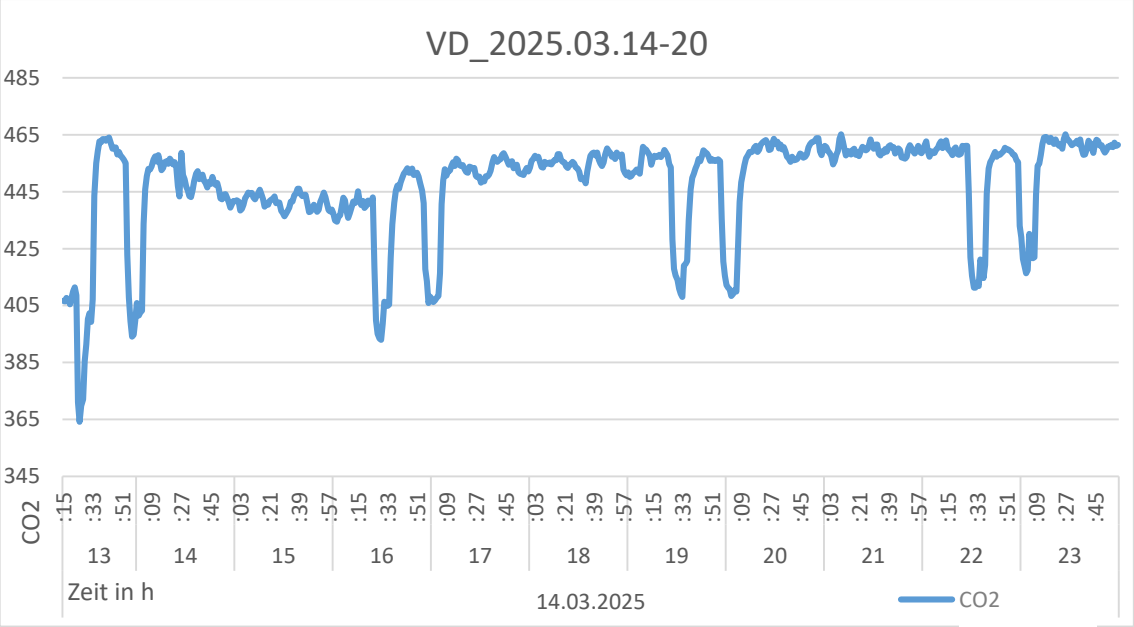


Abbildung 49: Ausschnitt CO_2-Messwerte VD_2025.03.14-20

Nach Auskunft des Gebäudemanagements wird die raumlufttechnische Anlage zur Belüftung des Labors über Nacht und an Wochenenden abgestellt. Eventuell ist der Luftwechsel am Standort nicht ausreichend, um die Abluft des Versuchsaufbaus ausreichend abzuführen und wird wieder angesaugt. Als Konsequenz hieraus wird der Versuchsaufbau an einen anderen Standort mit Fenstern zum manuellen Lüften verlegt.

7.2.9 Versuchsreihe 13-15

Für Versuchsreihe 13 wurden neue TPU Probekörper gedruckt. Die Verlegung des Versuchsaufbaus brachte keine Veränderung der IAQ-Messverläufe. Es konnten weiterhin keine konsistenten Messzyklen erfasst werden. Der CO_2-Messverlauf schwankte auch weiterhin. Neben der Standortverlagerung wurde mit Versuchsreihe 14 ein Luftfilter mit Aktivkohle vor die Ansaugleitung montiert (siehe Abbildung 50). Dieser brachte jedoch keine Verbesserungen der Messverläufe.

Bei einer Sichtkontrolle wurde an den Außenseiten aller Leitungen im Trockenschrank ein schwarzer, staubiger Niederschlag, wie in Abbildung 51 zu sehen, festgestellt. Nach Kontrolle der Innenseiten der Prüfkammern, welche keinen enthielten, konnte eine Kontamination des Systems ausgeschlossen werden. Wahrscheinlich stammt der Staub von den Kohlen des Elektromotors der Pumpe.

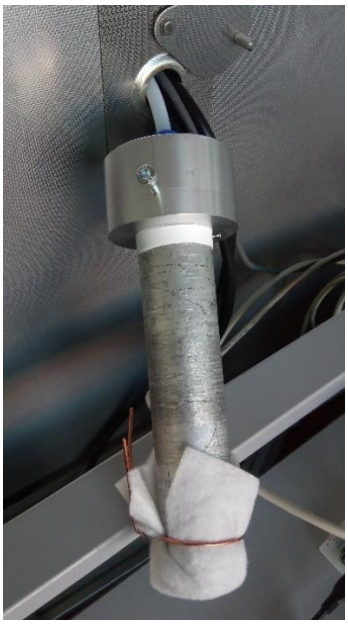


Abbildung 50: Luftfilter

Abbildung 51: Niederschlag Leitungen

Zum Ende der Versuchsreihe 14 wurden Undichtigkeiten an den Kabeldurchführungen an der Messkammer festgestellt. Nach erneuter Abdichtung konnte mit Versuchsreihe 15 weiterhin keine konstanten Messverläufe wie in den ersten Versuchsreihen festgestellt werden. Ein 24h

Ausschnitt der Messverläufe ist in Abbildung 52 dargestellt. Es kommt weiterhin zu unregelmäßigen Messverläufen und Ausreißern.

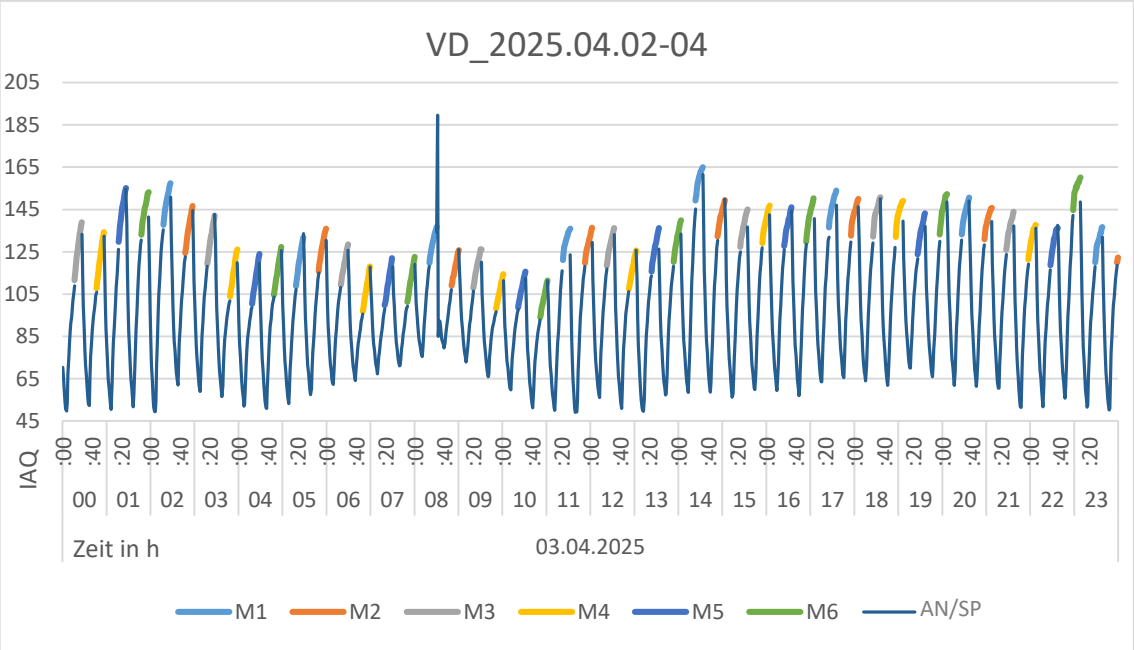


Abbildung 52: Ausschnitt IAQ-Messwerte Tagesverlauf VD_2025.04.02-04

Mit Abschluss der Versuchsreihe 15 wurde die Parameterermittlung beendet. Für einen weiteren Messbetrieb konnten weder die Betriebsfähigkeit des Messstandes erreicht noch geeignete Parameter ermittelt werden. Der Messstand kann keine plausiblen Messdaten liefern. Somit können keine Baustoffe hinsichtlich ihrer VOC-Abgabe untersucht werden. Jedoch konnten das Funktionskonzept der nicht messtechnischen Komponenten sowie die Dauerlaufeigenschaften des Versuchsaufbaus erprobt und als tauglich befunden werden.

7.3 Finaler Status Messstand, Fehlersuche, Änderungen

Der Messstand ist in seiner aktuellen Ausführung nicht geeignet, plausible Messwerte für VOC zu erfassen. Das Konzept sowie die mechanischen Komponenten scheinen dabei nicht die Fehlerursache zu sein. Die einzelnen mechanischen Komponenten, der Ablauf sowie die Ventil- und Pumpensteuerung funktionieren. Das Versuchskonzept ist plausibel.

Hauptfehlerursache scheint der verwendete VOC-Sensor zu sein. Der Bosch BME688 schien auf den ersten Blick zwar geeignet für das geplante Messkonzept, jedoch sind seine genaue Funktionsweise und die Dokumentation nicht ohne weiteres zugänglich. Deshalb kann eine Fehlfunktion des Sensors oder eine Fehlprogrammierung der Sensorsteuerung als Grund für die unplausiblen Messwerte nicht ausgeschlossen werden. Da ein Metalloxidsensor weiterhin als der am geeignetste Sensortyp erscheint, jedoch die Technik hinter dem Messprinzip sehr umfangreich ist, wäre die Verwendung eines besser dokumentierten Sensors zu empfehlen. Zusätzlich sollte sich tiefergehend mit dem Messprinzip auseinandergesetzt werden. Wichtige Themen hierbei wären u.a. die Untersuchung der Reaktions- und Regenerationsdauer des Sensors sowie die Funktionsweise der Sensorsteuerung.

Als ein geeigneter Kandidat erscheint beispielsweise der UST Triplesensor der Firma UST Umweltsensortechnik GmbH (Geratal, Deutschland). Er eignet sich für die hochselektiven und -sensitiven Detektion spezifischer Gase, Gasgemische und ausgewählter VOC-Marker. Zusätzlich bietet der Hersteller ein Evaluation Kit an, welches eine Softwarelösung für die Signalvorverarbeitung, Sensorsteuerung, Datenkommunikation und Datenvisualisierung beinhaltet.

Weiterhin scheint eine Ergänzung der VOC-Sensorik um einen CO_2-, Temperatur- und Volumenstromsensor sinnvoll. Hierdurch würden bessere Einblicke in die Abläufe innerhalb des Versuchsstandes ermöglicht. Der Volumenstromsensor würde Aufschlüsse über die Fördergeschwindigkeit der Pumpe geben, sowie der CO_2-Sensor über die vorhandene Luftqualität. Weiterhin ist zu empfehlen, die Leitungsdurchführungen an der Messkammer mit geeigneten Kabelverschraubungen auszustatten, um mögliche Undichtigkeiten möglichst auszuschließen.

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor für das Gelingen der Messungen ist die Qualität der angesaugten Raumluft. Hierfür wurde bereits ein Aktivkohlefilter vor die Ansaugung und ein $C0_2$-Sensor zur dauerhaften Überwachung der Qualität der angesaugten Umgebungsluft montiert. Diese sollten beibehalten und dauerhaft in den Aufbau integriert werden.

Ein Betrieb des Versuchsaufbaus mit einem Gas anstatt Umgebungsluft ist grundsätzlich möglich, insofern das verwendete Gas den für die Funktion eines MOX-Sensors notwendigen Sauerstoffanteil enthält [49].

Um Proben bei unterschiedlichen Temperaturstufen zu messen, muss die Pumpe nach außerhalb des Trockenschrankes verlegt werden. Ebenso möglichst alle Elektronikkomponenten, um Messreihen auch bei höheren Temperaturen, ohne Schädigung der Elektronik durchführen zu können.

Da sich die eingesetzte, modifizierte Pumpe im Zuge der durchgeführten Versuche als unzuverlässig herausgestellt hat, sollte für zukünftige Arbeiten auf eine unmodifizierte Pumpe aus dem industriellen Umfeld zurückgegriffen werden. Geeignet erscheinen hier trockenlaufende Drehschieber-Pumpen (z.B. Becker, Wuppertal) oder Membranpumpen (z.B. Thomas, Fürstenfeldbruck). Sie bietet eine konstante, regelbare Förderleistung, einen kontaminationsarmen Aufbau sowie gute Dauerlaufeigenschaften. Es handelt sich um renommierte Hersteller und Lieferanten der Industrie.

Die vorgeschlagenen Änderungen für den Versuchsaufbau sind in Tabelle 11 nochmals zusammengefasst und in ihrer Priorität zur Erlangung der Betriebsbereitschaft bewertet.

Tabelle 11: Mögliche Änderungen Versuchsaufbau

Änderung	Priorität
Recherche Messprinzip Metalloxidsensor → Auswahl neuer Sensor	Notwendig
Umbau Messkammer	Notwendig
Implementierung Raumluftüberwachung	Optional
Evtl. Verwendung von Gasen	Optional
Neupositionierung Pumpe und Elektrik	Notwendig
Drehschieber Vakuumpumpe	Optional

8. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, theoretische Grundlagen zu VOC im Kontext des Bauingenieurwesens zu erarbeiten sowie einen geeigneten Versuchsaufbau für die Untersuchung von Baustoffen hinsichtlich ihrer TVOC-Abgabe zu entwickeln und umzusetzen.

Die erarbeiteten Kapitel über VOC, TVOC, Beurteilungskriterien, Richtlinien, Regelungen und Vorkommen in Bauprodukten bieten eine gute Grundlage, um in das weitläufige Themengebiet einzusteigen. Die Grundlagen der messtechnischen Erfassung von TVOCs wurden möglichst kompakt für den Einsteiger dargestellt, können aber bei weitem nicht das vollständige Themenfeld abbilden. Die Erläuterung der möglichen gesundheitlichen Auswirkungen von VOCs auf den menschlichen Organismus unterstreicht die Bedeutung von VOCs bei der Entwicklung neuer Baustoffe. Die entstandene Tabelle für VOC relevante Bauproduktgruppen liefert eine gute Übersicht für untersuchungsrelevante Baumaterialien. Der Grundlagenteil eröffnet Themenfelder für weiterführende Forschungsfragen.

Für den Versuchsaufbau selbst konnte die Funktionalität des entwickelten Versuchskonzeptes für seine nicht messtechnischen Komponenten bestätigt werden. Jedoch ist der Versuchsaufbau als Ganzes zum aktuellen Zeitpunkt nicht betriebsbereit, da die verwendete Messtechnik keine plausiblen Messwerte liefert und ein Untersuchen von Baustoffproben nicht möglich ist.

Für das Erreichen der Betriebsfähigkeit wäre es im nächsten Schritt erforderlich, sich tiefergehend mit der Mess- und Sensortechnik zu befassen und evtl. neue Sensorik zu beschaffen. Kann diese erfolgreich in den Versuchsaufbau integriert werden, bildet er als Ganzes einen funktionsfähigen Messstand zur Ermittlung der TVOC-Abgabe von Baustoffen.

Die vorliegende Arbeit bietet eine solide Ausgangsbasis für weiterführende Fragestellungen und Arbeiten im Themenfeld von VOCs und TVOCs. Wird der Messstand bspw. erfolgreich in Betrieb genommen, sind umfangreiche Untersuchungsreihen von Baustoffen möglich. Auch ergeben sich weitere Fragestellungen hinsichtlich der Messtechnik oder der Bedeutung von VOCs in der Gebäude- und Schadstoffsanierung.

9. Literaturverzeichnis

[1] DIBt, „MVV TB 2024/1,“ 28 08 2024. [Online]. Available: https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P5/Technische_Bestimmungen/MVVTB_2024-1.pdf. [Zugriff am 15 01 2025].

[2] Frauenhofer WKI, „Organische Verbindungen in der Innenraumluft (VVOC, VOC, SVOC),“ [Online]. Available: https://www.iaqip.wki.fraunhofer.de/de/daten-und-fakten/substanzen-und-substanzdaten/organische-verbindungen-in-der-raumluft.html. [Zugriff am 13 12 2024].

[3] Jann, Walker und Witten, Innenraumluftqualität und Bauprodukte, Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH&Co. KG, 2018.

[4] Umweltbundesamt, „Flüchtige organische Verbindungen,“ 21 11 2016. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#fluchtige-organische-verbindungen-voc-. [Zugriff am 13 12 2024].

[5] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, VDI/VDE 3518 Blatt 4: Multigassensoren, Düsseldorf: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, 2024.

[6] Deutsche Norm, DIN ISO 16000-6 Innenraumluftverunreinigungen - Teil 6: Bestimmung organischer Verbindungen, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normen e.V., 2021.

[7] T. Salthammer, „ScienceDirect: TVOC - Revisited,“ 09 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107440. [Zugriff am 13 12 2024].

[8] D. B. Seifert, „Umweltbundesamt: Richtwerte für die Innenraumluft,“ 28 01 2011. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/TVOC.pdf. [Zugriff am 13 12 2024].

[9] Frauenhofer IPM, „Photoakustische Gassensoren,“ [Online]. Available: https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/gastechnologie-spektroskopie/komp/spekt/photoakustische-spektroskopie.html. [Zugriff am 19 12 2024].

[10] Arbeitskreis Prozessanalytik, „Flammenionisationsdetektor FID,“ [Online]. Available: https://arbeitskreis-prozessanalytik.de/wiki/flammenionisationsdetektor-fid/. [Zugriff am 19 12 2024].

[11] ABGS GmbH, „Photoionisationsdetektor PID,“ 26 01 2015. [Online]. Available: https://abgs-gmbh.de/2015/01/26/fachartikel-photoionisationsdetektor-pid/. [Zugriff am 19 12 2024].

[12] WatchGas, „Photoionization Detector PID Grundlagen,“ [Online]. Available: https://watchgas.com/app/uploads/2023/02/WatchGas-TN1-Photoionisationsdetektor-PID-Grundlagen-DE-V1.4.pdf. [Zugriff am 19 12 2024].

[13] DIAS Infrared Systems, „NDIR Gasanalyse,“ [Online]. Available: https://dias-infrared.de/anwendungen/ndir-gasanalyse-ir-spektroskopie/ndir-gasanalyse/. [Zugriff am 20 12 2024].

[14] Frauenhofer IPM, „Halbleiter-Gassensoren,“ [Online]. Available: https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/de/PDFs/produktblaetter/GP/ISS/Halbleiter-Gassensoren.pdf. [Zugriff am 20 12 2024].

[15] MEMBRAPOR, „Elektrochemische Gas-Sensoren,“ [Online]. Available: https://www.membrapor.ch/elektrochemische-gas-sensoren/. [Zugriff am 20 12 2024].

[16] BMK Österreich, „Bewertung der Innenraumluft Summenparameter,“ 03 2020. [Online]. Available: https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:67022e65-6e15-4a70-9bb3-f1742304e60e/Innenraumluft_Richtlinie_Teil5_VOC_Summenparameter.pdf. [Zugriff am 22 01 2025].

[17] LGL Bayern, „Chemische Umweltfaktoren Beurteilungswerte,“ [Online]. Available: https://www.lgl.bayern.de/gesundheit/umweltbezogener_gesundheitsschutz/chemische_umweltfaktoren/beurteilungswerte.htm. [Zugriff am 21 01 2025].

[18] AgBB, Anforderungen an die Innenraumluftqualität in Gebäuden: gesundheitliche Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten, Berlin: AgBB, 2024.

[19] Umweltbundesamt, „Ausschuss für Innenraumrichtwerte,“ 14 01 2025. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-

arbeitsgruppen/ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte#ausschuss-fur-innenraumrichtwerte-air. [Zugriff am 21 01 2025].

[20] Umweltbundesamt, „Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten," 21 07 2007. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/Handreichung.pdf. [Zugriff am 21 12 2024].

[21] Umweltbundesamt, „Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten," 11 09 2024. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/ausschuss-zur-gesundheitlichen-bewertung-von#ausschuss-zur-gesundheitlichen-bewertung-von-bauprodukten-agbb-. [Zugriff am 23 01 2025].

[22] DIBt, „Zulassungen, ETAs und mehr," [Online]. Available: https://www.dibt.de/de/wir-bieten/zulassungen-etas-und-mehr/abz-abg. [Zugriff am 23 01 2025].

[23] BMK Österreich, „Richtlinie zur Bewertung der Luftqualität von Innenräumen," März 2020. [Online]. Available: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum/rl_luftqualitaet.html. [Zugriff am 22 01 2025].

[24] Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), BNB 1.1.3 Risiken für die lokale Umwelt, Berlin: Bundesministerium BMWSB, 2015.

[25] Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), BNB 3.1.3 Innenraumlufthygiene, Berlin: Bundesministerium BMWSB, 2015.

[26] DIBt, „FAQ zum deutschen Regelungssystem für Bauprodukte und Bauarten," [Online]. Available: https://www.dibt.de/de/service/faqs/das-deutsche-regelungssystem-fuer-bauprodukte-und-bauarten. [Zugriff am 01 02 2025].

[27] Umweltbundesamt, „Rechtliche Regelungen für Bauprodukte," 16 07 2018. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/rechtliche-regelungen-fuer-bauprodukte#einleitung. [Zugriff am 01 02 2025].

[28] DIBt, „Musterbauordnung - MBO," 11 2022. [Online]. Available: https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO.pdf. [Zugriff am 15 01 2025].

[29] Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, „EUR-Lex VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN

PARLAMENTS,“ [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A02011R0305-20241117. [Zugriff am 08 02 2025].

[30] Kuebart und Roth, „VOC-Bewertungen von Bauprodukten in Deutschland und in der EU im Vergleich,“ *Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft, Band 2: Emissionen aus Bauprodukten,* pp. 7-15, Mai 2017.

[31] Ökopol GmbH, „Harmonised VOC Emission Classes for Construction Products,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021.

[32] BAuA, TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte, GMBI, 2024.

[33] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung IFA, „Arbeitsplatzgrenzwerte,“ [Online]. Available: https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/arbeitsplatzgrenzwerte/index.jsp. [Zugriff am 28 01 2025].

[34] BAuA, „Informationen zur Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV),“ [Online]. Available: https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung/Arbeitsstaetten/Arbeitsstaettenverordnung. [Zugriff am 11 02 2025].

[35] BMJ, „Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV),“ [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/arbst_ttv_2004/BJNR217910004.html. [Zugriff am 11 02 2025].

[36] BAuA, „Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR),“ [Online]. Available: https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/ASR/ASR. [Zugriff am 11 02 2025].

[37] ASTA, BAuA, „ASR A3.6 Lüftung Technische Regel für Arbeitsstätten,“ [Online]. Available: https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/ASR/ASR-A3-6. [Zugriff am 11 02 2025].

[38] Deutsche Norm, DIN EN ISO 16516 Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normen e.V., 2020.

[39] Umweltbundesamt, „Europäische Prüfverfahren für Emissionen aus Bauprodukten,“ 20 03 2019. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/europaeische-pruefverfahren-fuer-emissionen-aus. [Zugriff am 15 02 2025].

[40] Deutsche Norm, DIN EN ISO 16017 Probenahme und Analyse flüchtiger organischer Vebrindungen durch Sorptionsröhrchen/ thermische Desorption/ Kapillar-Gaschromatographie, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normen e.V., 2000.

[41] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 4300 Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2000.

[42] Deutsche Norm, DIN ISO 16000-9 Innenraumluftverunreinigungen - Teil 9: Emissionsprüfkammerverfahren, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normen e.V., 2024.

[43] Makershop, „Arduino MEGA-2560,“ [Online]. Available: https://www.makershop.de/plattformen/arduino/mega-2560/#tab-documents_tab. [Zugriff am 02 04 2025].

[44] Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, „Kunsstoffe: Polytetrafluorethylen,“ [Online]. Available: https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polytetrafluorethylen-ptfe-285527. [Zugriff am 02 04 2025].

[45] Bosch Sensortec, BME688 - Datasheet, Reutlingen: Bosch Sensortec GmbH, 2024.

[46] Bosch Sensortec, BST-BME680-Integration-Guide-AN008, Bosch Sensortec GmbH.

[47] Adafruit Industries, LLC, „Adafruit,“ [Online]. Available: https://cdn-shop.adafruit.com/970x728/5046-09.jpg. [Zugriff am 28 02 2025].

[48] Schneider, Bautabellen für Ingenieure 23.Auflage, Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2018.

[49] G. Wiegleb, Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut wurden als solches kenntlich gemacht. Die vorgelegte Arbeit hat weder in der gegenwärtigen noch in einer anderen Fassung schon einem anderen Fachbereich der Hochschule Ruhr West oder einer anderen wissenschaftlichen Hochschule vorgelegen.

Duisburg, 25.04.2025 F. König

Ort, Datum Unterschrift