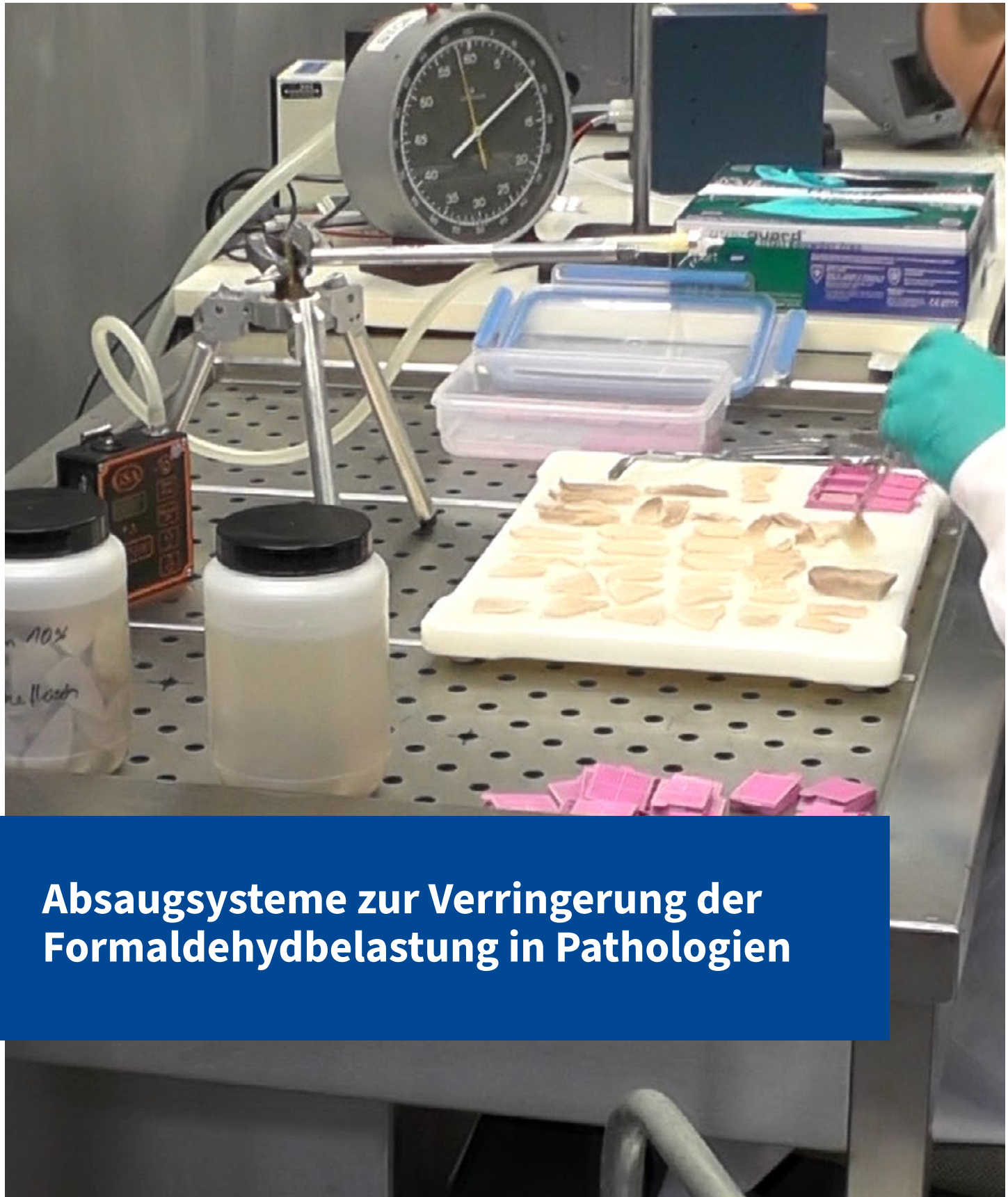
IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

IFA Report 2/2025



Absaugsysteme zur Verringerung der Formaldehydbelastung in Pathologien

Impressum

Herausgegeben von:	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) Glinkastraße 40 10117 Berlin Telefon: 030 13001-0 (Zentrale) E-Mail: info@dguv.de Internet: www.dguv.de
Verfasst von:	Saskia Schlatter, Reinhard Stockmann, Jörg Rissler Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. Wolfgang Wegscheider, Bennedikt Thomas Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Hamburg.
Ausgabe:	April 2025
Satz und Layout:	Satzweiss.com Print Web Software GmbH, Saarbrücken
Bildnachweis:	DGUV/IFA/BGW
ISBN (online):	978-3-948657-71-0
ISSN:	2190-7994
Copyright:	Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung gestattet.
Bezug:	Bei Ihrem zuständigen Unfallversicherungsträger oder unter www.dguv.de/publikationen › Webcode: p022763

Kurzfassung

Absaugsysteme zur Verringerung der Formaldehydbelastung in Pathologien

In Pathologien werden Gewebeproben histologisch aufbereitet und ausgewertet. Durch die Fixierung des Probenmaterials in Formaldehydlösungen sind die Beschäftigten in der Regel gegenüber Formaldehyd exponiert. Zur Reduzierung der Belastung werden Tätigkeiten mit Formaldehydlösung wie Zuschneidearbeiten an speziellen, abgesaugten Arbeitstischen mit Lochblechen (Pathologietischen) ausgeführt. Trotz Verwendung dieser Tische zeigt die Praxis, dass der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) für Formaldehyd (0,37 mg/m³) in Pathologien oftmals überschritten wird.

An einem Pathologietisch wurden im Rahmen dieses Projektes strömungstechnische und nachstellende Untersuchungen durchgeführt. Für die nachstellenden Untersuchungen wurden zum einen Zuschneidearbeiten simuliert und die dabei in der Raumluft auftretenden Formaldehydkonzentrationen durch Wiederholungsmessungen an unterschiedlichen Messpunkten und unter Variation von Randbedingungen (insbesondere Absaugvolumenstrom) ermittelt. Zum anderen wurden weitere Tätigkeiten mit Formaldehydlösungen in Pathologien (z. B. Umfüllen, Abgießen) simuliert und die dabei auftretenden Expositionen gemessen.

Im Projekt wurde gezeigt, dass die Erfassungsluftgeschwindigkeit an Pathologietischen mit einfach zu handhabenden Messeinrichtungen (z. B. Anemometer) mit hinreichender Genauigkeit zu ermitteln ist, sodass die ausreichende Wirksamkeit der Erfassung an Arbeitsplätzen mit Lochblechabsaugung ohne aufwändige Arbeitsplatzmessungen beurteilt werden kann. Für die Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) wurde damit eine einfache Möglichkeit geschaffen, die Wirksamkeit einer Untertisch-Absaugung in Pathologien zu überprüfen. Mit dem von der BGW verwendeten Messsystem (Volumenstrom-Messhaube und 100 mm-Flügelradsonde der Fa. Testo) bedeutet ein Messwert von 0,9 m/s eine ausreichend wirksame Absaugung. Dies entspricht einem Absaugvolumenstrom von ca. 500 m³/h je Quadratmeter Tischfläche.

Eine wichtige Erkenntnis des Projektes ist, dass beim Zuschnitt eine Absaugung zwischen Schneidbrett und Person vorhanden sein muss, da ansonsten Formaldehyddämpfe infolge des thermischen Auftriebs die Konzentration im Atembereich erhöhen. Hierzu reicht ein kleiner Abstand zwischen Schneidbrett und vorderer Tischkante. Der Einsatz einer Haube („halboffene Erfassung“) reduziert den für eine ausreichende Erfassung erforderlichen Luftvolumenstrom. Die Erfahrung der Praxis und Prüfstandsversuche haben gezeigt, dass die Ergonomie beim Einsatz einer Haube beachtet werden muss, um das Arbeiten nicht zu behindern. Des Weiteren wurde gezeigt, dass für Entsorgungs- und insbesondere für Umfüllvorgänge selbst bei Absaugvolumenströmen zwischen 300 und 1 000 m³/h bei der gewählten abgesaugten Fläche keine sichere Grenzwerteinhaltung möglich ist. Gründe hierfür sind zum einen große emittierende Flüssigkeitsoberflächen und zum anderen der Abstand zur Erfassungsebene. Für eine Einhaltung des AGW wird empfohlen, Umfülltätigkeiten in einem Abzug durchzuführen. Ob der Einsatz einer Haube bei diesen Tätigkeiten möglich ist, müssen Praxiserfahrungen zeigen.

Abstract

Exhaust systems for reducing formaldehyde exposure in pathology departments

Histologic tissue specimens are prepared and analysed in pathology departments. Fixing of the specimen material in formaldehyde solutions generally results in the workers in these departments being exposed to formaldehyde. To reduce the exposure, activities involving formaldehyde solutions, such as dissection work, are performed on special perforated sheet metal dissection tables. Despite the use of these tables, practical experience shows that the occupational exposure limit (OEL) for formaldehyde (0.37 mg/m³) is often exceeded in pathology departments.

In this project, flow and simulation studies were performed on a dissection table. For the simulation studies, dissection work was simulated and the formaldehyde concentrations in the room air arising during the process were determined by repeat measurements at a number of measurement points and under varying boundary conditions (in particular the volumetric exhaust flow rate). Further activities involving formaldehyde solutions and performed in pathology departments (e. g. decanting, pouring) were also simulated and the exposure levels arising were measured.

The project demonstrated that the velocity of the air captured at dissection tables can be measured with sufficient accuracy by means of equipment that is easy to use (e. g. anemometers) and that an adequate efficacy of air exhaust through perforated sheet metal dissection tables at workplaces can be assessed without the need for complex workplace measurements. A straightforward means was thus created for the German Social Accident Insurance Institution for the health and welfare services (BGW) to study the efficacy of under-table air exhaust in pathology departments. The value of 0.9 m/s measured by the system used by the BGW (Testo volume flow hood and 100 mm vane probe) indicates an adequate efficacy of the exhaust. This corresponds to a volumetric exhaust flow of approximately 500 m³/h per square metre of table top.

One important finding of this project is that the air must be exhausted between the dissection board and the person, as the thermal uplift otherwise increases the concentration of formaldehyde vapours in the breathing air. A small distance between the dissection board and the front table edge is sufficient for this purpose. The use of a hood (semi-open capture) reduces the volumetric air flow required for adequate exhaust. Experience gained in the field and from test-bench studies has shown that when a hood is used, consideration must be given to ergonomics to prevent obstruction to the work. It was further shown that for disposal and, in particular, decanting processes, reliable observance of the exposure limit is not possible on the selected ventilated surface, even at volumetric exhaust flow rates of between 300 und 1 000 m³/h. The reasons for this are, on the one hand, large liquid surface areas emitting formaldehyde vapours, and on the other the distance from the vapour capture plane. It is recommended that decanting tasks be performed in a fume cupboard in order for the OEL to be observed. Whether use of a hood is possible during these activities must be determined by practical experience.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 6

2 Aufgaben und Ziele ... 8

3 Methodik ... 9

3.1 Allgemeiner Versuchsaufbau ... 9

3.2 Durchführung lüftungstechnischer Untersuchungen ... 10

3.3 Durchführung nachstellender Untersuchungen ... 11

4 Ergebnisse der lüftungstechnischen Untersuchungen ... 16

5 Ergebnisse der nachstellenden Untersuchungen ... 17

5.1 Zuschneiden ... 17

5.2 Asservate Entsorgen ... 20

5.3 Umfüllen ... 20

5.4 Vergleich der Tätigkeiten und Zusammenfassung der Ergebnisse der nachstellenden Untersuchungen ... 22

6 Diskussion ... 23

7 Fazit ... 25

Literatur ... 26

Danksagung ... 27

Anhänge ... 28

Anhang A: Messverfahren und Dokumentation ... 29

Anhang B: Lüftungstechnische Untersuchungen ... 31

Anhang D: Statistische Auswertung ... 50

1 Einleitung

Viele Tätigkeiten in Pathologien werden mit Chemikalien durchgeführt, wobei Formaldehyd prozesstechnisch eine herausragende Rolle spielt. Aus Sicht des Arbeitsschutzes steht Formaldehyd im Fokus der Ermittlungen zur inhalativen Belastung der Beschäftigten in Pathologien. Formaldehyd ist leicht flüchtig und hat gefährliche Eigenschaften wie krebserzeugend (K 1B) und keimzellmutagen (M 2) [1] (**Tabelle 1**). Für die Begrenzung der inhalativen Exposition gibt es einen Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) nach TRGS 900 [2] von 0,37 mg/m³ mit einer zulässigen Kurzzeitwerthöhe über 15 Minuten von 0,74 mg/m³. Im betrieblichen Alltag ist es zum aktuellen Stand der Technik unvermeidbar, dass für bestimmte Tätigkeiten Emissionen von Formaldehyd auftreten. Arbeitsplatzabsaugungen müssen im betrieblichen Ablauf gewährleisten, dass Expositionen bei allen Tätigkeiten im zulässigen Bereich bleiben (Unterschreitung des AGW sowie Einhaltung der Kurzzeitwertbedingungen).

In den meisten deutschen Pathologien werden Lochblechtische mit Untertischabsaugungen eingesetzt, im Folgenden auch „Pathologietisch“ genannt. Aktuelle messtechnische Untersuchungen der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) in Kooperation mit einzelnen Unfallkassen und Messstellen der Länder haben gezeigt, dass auch bei subjektiv gut ausgestatteten Pathologien inhalative Expositionen mit Grenzwertüberschreitungen für Formaldehyd auftreten können [3]. Valide Daten zu Volumenströmen für eine ausreichende Erfassung der entstehenden Emissionen lagen bisher nicht vor.

Vor dem beschriebenen Hintergrund dient das vorliegende Projekt dazu, die Exposition gegenüber Formaldehyd bei in Pathologien typischen Tätigkeiten und unter Variation bestimmter Randparameter mittels nachstellender Versuche zu untersuchen. Im Rahmen des Projektes wurden vier expositionsrelevante Tätigkeiten mit Formaldehydlösung, die in Pathologien routinemäßig stattfinden, identifiziert (**Tabelle 2**). Die Tätigkeiten „Chemikalienwechsel“ und „Probenbehälter füllen“ wurden im Projekt zusammengefasst durch das Umfüllen von Formaldehydlösungen abgebildet. Somit lassen sich im Projekt drei verschiedene nachgestellte Tätigkeiten (Zuschnitt, Umfüllen von Formaldehydlösung und Asservate entsorgen) unterscheiden. Gewebeproben, die Patienten entnommen wurden, werden histologisch aufbereitet und diagnostiziert. Dazu werden die Proben üblicherweise unmittelbar nach der Entnahme im Operationsbereich in vierprozentiger Formaldehydlösung fixiert. Die Präparation in der Pathologie beginnt mit dem makroskopischen Begutachten und Zuschneiden der Gewebeproben. Die Teilproben werden im Anschluss histologisch untersucht. Nebentätigkeiten wie Leeren und Füllen von Vorrats- und Probenbehältern mit Formaldehydlösung sowie Entsorgen von Asservaten gehören zum weiteren Tätigkeitsspektrum in einer Pathologie. Bei den aufgeführten Tätigkeiten kann das Fachpersonal – Pathologe/Pathologin und medizinisch-technische Assistenz (MTA) – gegenüber Formaldehyd exponiert sein. Die Tätigkeiten wurden am Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) nachgestellt und begleitende Expositionsmessungen durchgeführt. Des Weiteren wurden lüftungstechnische Untersuchungen an einem Pathologietisch durchgeführt.

Tabelle 1:
Eigenschaften und Grenzwerte von Formaldehyd [1; 2]

	KMR-Einstufung	Kennzeichnung	Bemerkung TRGS 900	AGW [mg/m³]	Kurzzeitwertfaktor (Kategorie)
Formaldehyd	K 1B, M 2		Sh, Y, X	0,37	2 (I)

K 1B Stoffe, die wahrscheinlich beim Menschen karzinogen sind; die Einstufung erfolgt überwiegend aufgrund von Nachweisen bei Tieren [1].

M 2 Stoffe, die für Menschen bedenklich sind, weil sie möglicherweise vererbbare Mutationen in Keimzellen von Menschen auslösen können [1].

Sh sensibilisierend über die Haut [2]

Y Bei Einhaltung des AGW und des biologischen Grenzwertes (BGW) ist ein Risiko der Fruchtschädigung nicht zu befürchten [2].

X krebserzeugender Stoff der Kat. 1A oder 1B oder krebserzeugende Tätigkeit oder Verfahren nach § 2 Absatz 3 Nr. 4 der GefStoffV – es ist zusätzlich § 10 GefStoffV zu beachten

Tabelle 2:
Expositionsrelevante Tätigkeiten mit Formaldehydlösung

Tätigkeit Nr.	Tätigkeit	Exponierte
1	Zuschnitt	Pathologe und MTA
2	Chemikalien wechseln	MTA
3	Asservate entsorgen	MTA
4	Probenbehälter füllen	MTA

Die wesentlichen Expositionen entstehen unmittelbar durch die Tätigkeiten mit Formaldehydlösung. Messtechnische Untersuchungen der BGW, einiger Unfallkassen und der Länder zeigten, dass zwar die Arbeitsplatzabsaugungen die wesentliche Schutzmaßnahme darstellen, dass aber in der Praxis nur in Kombination mit weiteren Maßnahmen (z. B. strikte Arbeitsplatzhygiene) Grenzwerteinhaltungen für Formaldehyd sicher erreichbar sind [3]. Zusätzlich können sich Emissionsquellen außerhalb der Absaugung auf die Exposition auswirken (Ansaugen kontaminierter Luft). Trotz wirksamer Absaugung können diese Emissionsquellen Gefahrstoffbelastungen verursachen. Derartige Emissionsquellen waren nicht Bestandteil der Untersuchungen des vorliegenden Projektes und wurden bei den Prüfstandsuntersuchungen durch technische und organisatorische Maßnahmen ausgeschlossen.

2 Aufgaben und Ziele

Ziel des Projektes war die Ermittlung einer ausreichenden Erfassung von Formaldehyddämpfen zur Reduzierung der Exposition gegenüber Formaldehyd von Beschäftigten in Pathologien. Die oben geschilderte Tatsache, dass Grenzwertüberschreitungen trotz etablierter technischer Schutzmaßnahmen (in erster Linie Untertischabsaugungen) auftreten, erforderte eine nähere Betrachtung der Wirksamkeit der Absaugungen. Dafür wurden für das Projekt mehrere Teilziele definiert, die im Folgenden erläutert werden. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden im Zuge des Projektes „Pathologie“ der BGW im Rahmen der Gemeinsamen Deutschen Arbeitsschutzstrategie (GDA) zur Beratung der Betriebe genutzt. Zusätzlich dienen die Informationen als Grundlage zur Planung eines Messprogrammes „Pathologie“.

Ein wesentliches Ziel der Prüfstandsuntersuchungen war es, die Volumenströme bzw. Absauggeschwindigkeiten zu ermitteln, die für die untersuchten Tätigkeiten eine ausreichend wirksame Erfassung gewährleisten. Dies ist eine wichtige Grundlage für Planer und Betreiber von Pathologien zur technisch sicheren Gestaltung von Pathologie-Arbeitsplätzen. Die Wirksamkeit der üblichen Lochblechabsaugung sollte nachgewiesen und ein Mindestabsaugvolumenstrom für den im Projekt eingesetzten Absaugtisch ermittelt werden. Dieser Mindestvolumenstrom sollte eine sichere Erfassung der Formaldehydemission und eine ausreichende Reduzierung der Formaldehydbelastung gewährleisten. Ein wichtiger Aspekt des Projektes war es, für die Beratung der Pathologien durch Aufsichtspersonen unmittelbar anwendbare Überprüfungsmöglichkeiten zu benennen, z. B. in Form einer vor Ort bei Besichtigungen einfach zu messenden Mindestgeschwindigkeit auf der abgesaugten Lochblechfläche.

Des Weiteren war ein Ziel des Projektes, durch lüftungstechnische Untersuchungen Informationen über das Absaugverhalten des eingesetzten Tisches zu generieren und Einflüsse auf das Strömungsprofil zu ermitteln. Die so gewonnenen Erkenntnisse können Pathologieausstattern bei der Weiterentwicklung Ihrer Produkte helfen.

Die Identifikation und Untersuchung von Einflussgrößen auf die Exposition bei pathologietypischen Tätigkeiten war ein weiteres wesentliches Ziel des Projektes. Dafür wurden verschiedene Randparameter in nachstellenden Untersuchungen variiert und die Formaldehydkonzentrationen während der Durchführung der Tätigkeiten an verschiedenen Messpunkten gemessen. Diese Randparameter waren neben dem Absaugvolumenstrom die Art der Erfassung (offen und halboffen) sowie die Größe und Position des Schneidbrettes. Ziel war es, den jeweiligen Einfluss auf die Exposition zu ermitteln, um so zu statistisch abgesicherten Aussagen bezüglich relevanter Randparameter zu gelangen.

3 Methodik

Im Folgenden wird zunächst der Versuchsaufbau im Allgemeinen beschrieben, um anschließend näher auf die Methodik bei der Versuchsdurchführung der lüftungstechnischen und der nachstellenden Untersuchungen einzugehen. Weitere Details zum Aufbau und zur Durchführung der lüftungstechnischen Untersuchungen sowie Angaben zu den verwendeten Messgeräten und zu Mess- und Analyseverfahren befinden sich in den Anhängen.

3.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Im IFA wurde für das Projekt ein spezieller Prüfstand in einer Prüfkabine eingerichtet (**Abbildung 1**). Als Arbeitsplatz diente ein praxisüblicher Lochblechtisch mit abnehmbarer Haube (Leihgabe der Fa. Vogel MedTec). Die Erfassung erfolgte über die Lochblechabsaugung. Da andere Absaugungen, wie Wandabsaugungen, Schlitzabsaugungen oder Laborabzüge, selten in der Praxis vorzufinden sind, waren diese Sonderformen nicht Bestandteil der Untersuchungen. Die Raumabmessungen der Prüfkabine betrugen: Raumgrundfläche 7 x 3 m (ca. 20 m²), Höhe 2,25 m, Raumvolumen ca. 45 m³. Über einen einstellbaren Ventilator und davor geschaltetem Staugitter inkl. der Messstrecke wurden Absaugvolumenströme je nach Tätigkeit zwischen 100 und 1 000 m³/h realisiert. Die Abluft wurde als Fortluft aus der Prüfhalle abgeführt. Die Zuluft strömte passiv über den gesamten Querschnitt des Zugangs zur Prüfkabine (3 x 2,25 m) aus der Prüfhalle in den Arbeitsbereich. Die Probenahme für die Formaldehydmessung erfolgte teilweise personengetragen, teilweise stationär personenbezogen oder auch an weiteren stationären Messpunkten, z. B. im Abluftkanal der Absaugung. Auch direktanzeigende Messgeräte kamen zum Einsatz. In **Abbildung 1** sind alle Messstellen für Formaldehydmessungen eingezeichnet, wobei zu beachten ist, dass nicht jede Messstelle bei allen Messungen zum Einsatz kam. In diesem Projektbericht werden die Bezeichnungen aus **Tabelle 3** für die Messstellen verwendet.

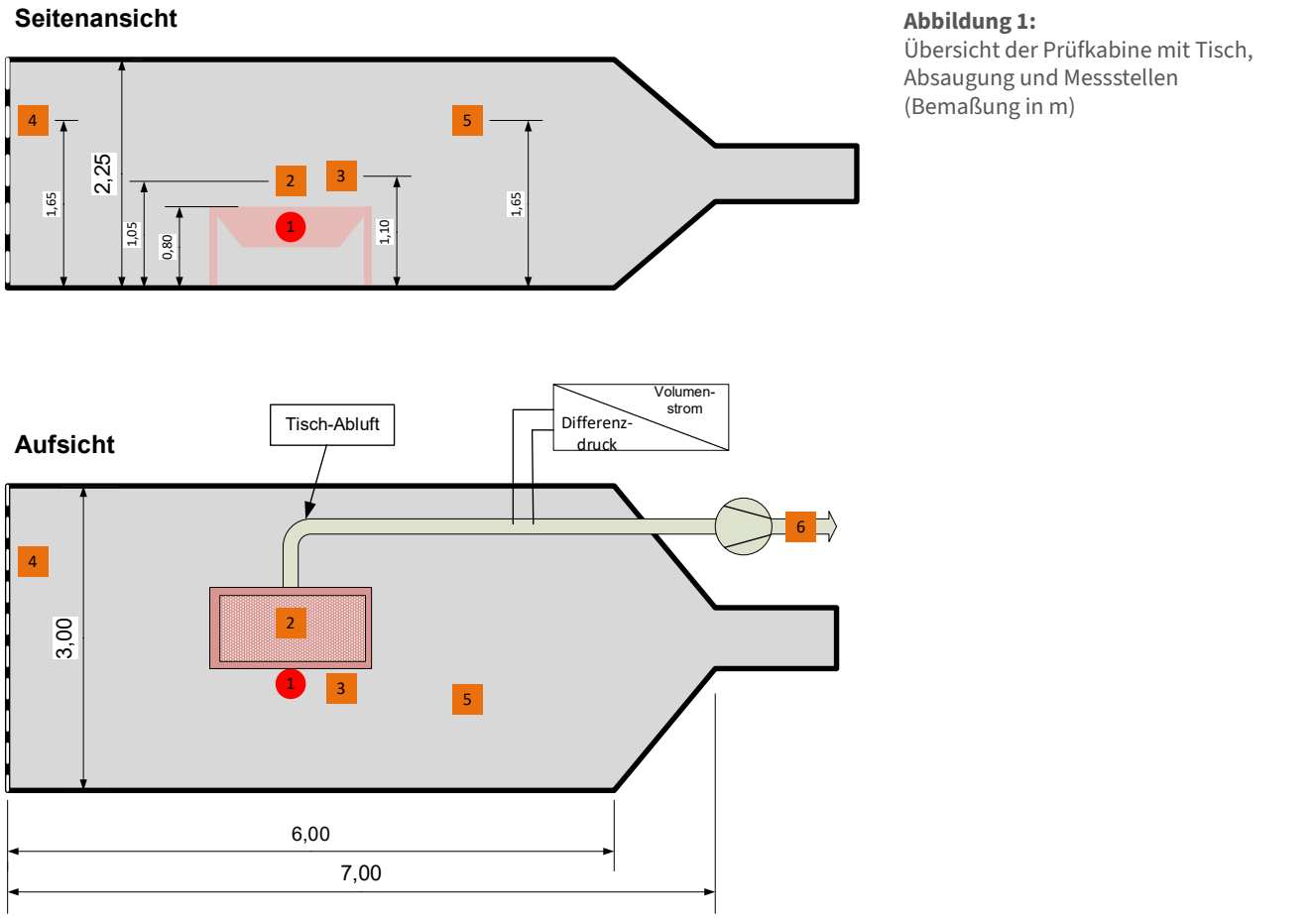


Abbildung 1:
Übersicht der Prüfkabine mit Tisch, Absaugung und Messstellen (Bemaßung in m)

Tabelle 3:
Messstellenbezeichnungen

Messstellen-Nr.	Bezeichnung	Bemerkungen	Aktiv bei Tätigkeit…
1	Pathologe	personengetragen	Zuschneiden
2	Tisch	personenbezogen (20 cm über Schneidbrett)	Zuschneiden
3	Assistenz A	personengetragen	Asservate entsorgen, Umfüllen
3	Assistenz B	personenbezogen stationär	Zuschneiden, Asservate entsorgen, Umfüllen
4	Raumzuluft	stationär	Zuschneiden (teilweise)
5	Raumluft	stationär	Zuschneiden (teilweise)
6	Tischabluft	in der Abluft des Ventilators	Zuschneiden, Asservate entsorgen, Umfüllen

Der eingesetzte Pathologietisch (**Abbildung 2**) kam sowohl ohne Haube frei ansaugend (offene Erfassung) als auch mit einer Haube ausgestattet (halboffene Erfassung) zum Einsatz. Der Deckel der Haube kann geöffnet oder geschlossen sein. In der Mitte des Tisches befindet sich eine absaugbare Fläche von 0,585 m^2 (0,65 x 0,9 m). Diese Fläche wird durch drei Lochbleche mit den Abmessungen 0,3 x 0,65 m abgedeckt. Jedes dieser Lochbleche hat 137 Löcher mit einem Durchmesser von 12 mm und ein Fingerloch mit einem Durchmesser von 25 mm. Die real abgesaugte Fläche beträgt somit 0,048 m^2 entsprechend 8 % der absaugbaren Fläche.

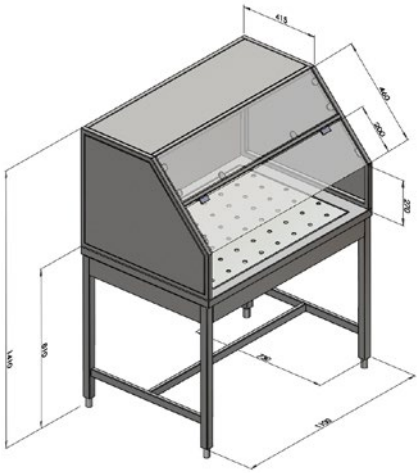
3.2 Durchführung lüftungstechnischer Untersuchungen

Vor und zeitlich parallel zu den nachstellenden Untersuchungen wurden auch lüftungstechnische Untersuchungen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde überprüft, ob die Einströmung über die Lochblechfläche gleichmäßig erfolgt. Hierzu wurde der Gesamtabsaugvolumenstrom mittels eines frequenzgesteuerten Ventilators eingestellt und mit einem Flügelradanemometer die Einströmgeschwindigkeit an ausgewählten Rasterpunkten, verteilt über die Fläche, gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind detailliert in Anhang B aufgeführt.

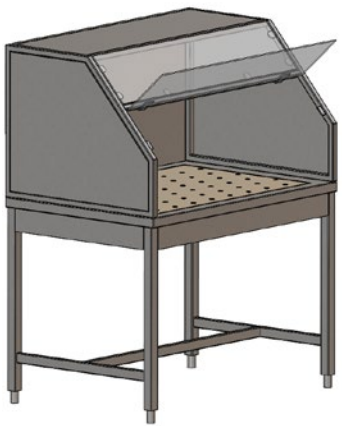
Abbildung 2:
Pathologietisch in den drei verwendeten Varianten



Pathologietisch ohne Haube



Pathologietisch mit geschlossener Haube



Pathologietisch mit geöffneter Haube

Neben den Messungen der Absauggeschwindigkeit wurden die Strömungsverhältnisse noch visuell mittels Theaternebels überprüft. Hierbei wurde der Theaternebel induktionsfrei über ein Dosiersystem in geringem Abstand oberhalb der Absaugfläche ausgebracht. Die sich ergebenen Strömungspfade wurden mittels Fotographie und mittels Videoaufnahmen dokumentiert.

Zum Abschluss der lüftungstechnischen Untersuchungen wurde noch ein Messsystem mittels Hauben-Messung etabliert und überprüft. Damit kann die Absauggeschwindigkeit bzw. der Absaugvolumenstrom über eine bestimmte Fläche und mit einem Messsystem (Wöhler-Haube, Testo-Absaughaube) ermittelt werden. Dies diente dazu, ein möglichst praktikables und einfach zu bedienendes System zur Verfügung zu stellen, mit dem Vor-Ort Messungen in einzelnen Pathologien möglich sind.

3.3 Durchführung nachstellender Untersuchungen

Im Folgenden wird die Vorgehensweise für die nachstellenden Untersuchungen beschrieben. Pathologietypische Tätigkeiten wurden von Beschäftigten des IFA (nachfolgend Proband genannt) mit pathologieüblichen Arbeitsmitteln und vierprozentiger Formaldehydlösung nach einer Arbeitsanweisung praxisnah simuliert. Da die durchführenden Personen kein pathologisches Fachpersonal waren, erfolgte eine ausführliche Einweisung in die entsprechenden Tätigkeiten mithilfe von Videoaufnahmen aus der Praxis, die die BGW zur Verfügung stellte, und durch eine Fachkraft einer Pathologie, die Instruktionen zu üblichen Arbeitsweisen gab und die Arbeitsvorgänge und die Rahmenbedingungen in Augenschein nahm. So konnte eine realitätsgetreue Ausführung gewährleistet werden.

Die Randparameter wie Absaugvolumenströme, offene und halboffene Erfassung sowie Größe und Position des Schneidbrettes wurden variiert und die Formaldehydkonzentrationen während der Tätigkeiten an verschiedenen Messstellen gemessen. Für jede Versuchsanordnung wurden in der Regel mehrere Einzelversuche durchgeführt, um eine statistisch höhere Aussagekraft zu erzielen. **Tabelle 4** stellt eine Übersicht über die in diesem Rahmen durchgeführten Versuche dar. Erkennbar ist, dass der größte Teil der nachstellenden Versuche zur Tätigkeit „Zuschneiden“ erfolgte. Insgesamt wurden für dieses Projekt ca. 500 Probenträger beaufschlagt.

Tabelle 4 :
Übersicht der Versuchsanordnungen zu den nachstellenden Untersuchungen

Tätigkeit	Erfassung	Volumenstrom SOLL (IST) [m³/h]	Anzahl Versuche	Gesamtzahl Versuche
Zuschneiden	offen	100 (90 bis 115) 200 (198 bis 228) 300 (285 bis 331) 400 (396 bis 421)	9 3 18 15	45
	halboffen	100 (95 bis 108) 200 (132 bis 211) 300 (288 bis 318 400 (389 bis 422)	12 9 18 12	51
Asservate entsorgen	offen	300 (295 bis 318) (445)[1] (503)[1]	4 1 1	6
Umfüllen/ Chemikalienwechsel	offen	(406)[1] 700 (705 bis 711) 1000 (1007 bis 1014)	1 4 4	9
Gesamtzahl				111

1 Diese Versuche waren Vorversuche, die lediglich zum Eingrenzen eines geeigneten Volumenstrombereiches erfolgten mit dem Ziel, den Probanden nicht unnötig hohen Formaldehydkonzentrationen auszusetzen, aber dennoch messbare Konzentrationen zu erzeugen. Da es jeweils nur eine Durchführung gab, ist hier lediglich der IST-Wert für den Volumenstrom angegeben.

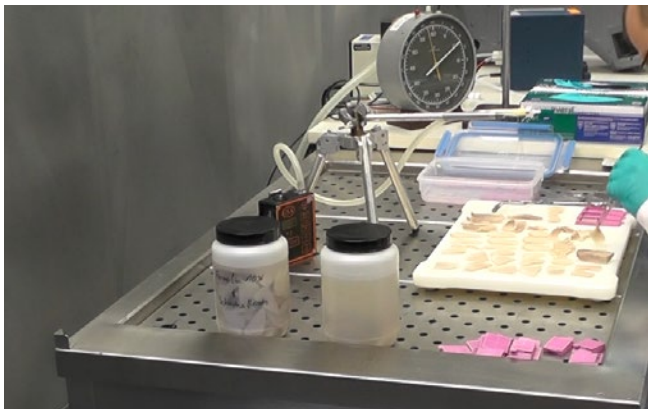
Der Proband war durch persönliche Schutzausrüstung (PSA) wie Augenschutz, Nitril-Handschuhe nach EN 374 und Laborkittel geschützt. Mit einem direktanzeigenden Formaldehydmessgerät (Interscan Typ 1066-Formaldehyd) wurden die Konzentrationen dauerüberwacht. Damit war erkennbar, ob der AGW überschritten wurde. Somit konnte auf das Tragen von Atemschutz verzichtet werden, zumal die Verwendung einer belüfteten Atemschutzhaube die personengetragene Messung verfälschen könnte.

Die Versuche wurden über mehrere Wochen verteilt, da die Ergebnisse der Laboranalysen auch in das weitere Versuchsprogramm einfließen sollten. Die Messungen begannen stets mit hohen Absaugvolumenströmen, da hier die Formaldehydkonzentration im Atembereich des Probanden am niedrigsten ist. So konnten die Rahmenbedingungen, z. B. der Volumenstrom, unter kontrollierten Bedingungen schrittweise „verschlechtert“ werden. Wie oben bereits ausgeführt erfolgte eine Dauerüberwachung der Konzentration, sodass Versuchssettings, die zu einer erhöhten Belastung führten, unmittelbar abgebrochen werden konnten. Einzelne Konstellationen kamen zum Schutz des Probanden zum Nachstellen nicht infrage, wenn schon bei einer „günstigeren“ Konstellation eine hohe Exposition gemessen wurde. Neben dem Probanden befand sich stets eine weitere Person außerhalb des Prüfstands, die die Tätigkeiten und den Konzentrationsverlauf beobachtete und die Geräte bediente.

3.3.1 Zuschneiden

Zur Simulation von menschlichen Gewebeproben wurde Schweinefleisch in gleichmäßige Würfel von ca. 3 bis 5 cm Kantenlänge geschnitten und diese in Kunststoffbehälter gelegt, die etwa zu Dreiviertel gefüllt waren. Im Anschluss wurden die Behälter mit vierprozentiger Formaldehydlösung aufgefüllt, sodass die Fleischstücke vollständig mit Flüssigkeit bedeckt waren. Die Kunststoffbehälter wurden mit einem Schraubverschluss verschlossen. Die Fixierungs- und Konservierungsdauer bis zum Zuschnitt betrug mindestens 24 Stunden, teilweise weit mehr. Zum Zuschnitt der Fleischstücke am Arbeitsplatz wurde der Kunststoffbehälter auf dem Lochblech abgestellt (**Abbildung 3**). Ein Versuch startete mit dem Öffnen des Behälters, der Entnahme von drei bis vier Fleischstücken (je nach Größe) mit einer Pinzette und dem unverzüglichen Verschließen des Behälters. Die Stücke wurden auf dem Zuschneidebrett ausgelegt und dann mit einem Zuschneidemesser in kleine Streifen von ca. 1 bis 2 cm Kantenlänge und 2 bis 3 mm Dicke geschnitten. Die Schnitte wurden auf dem Zuschneidebrett ausgelegt, bis die Brettoberfläche voll war. Dann wurden sie in die bereitgestellten Kunststoffkapseln gegeben. Die Kunststoffkapseln wurden verschlossen und in eine Ablagewanne abgelegt. Die Lagerwanne mit den Abmessungen 130 x 200 mm war mit vierprozentiger Formaldehydlösung gefüllt und stand ebenfalls auf dem Lochblech. Die Wanne war für die Dauer des Zuschnitts mit einem passenden Kunststoffdeckel abgedeckt, der nur zum Einlegen der Kapseln geöffnet wurde (**siehe Abbildung 3**).

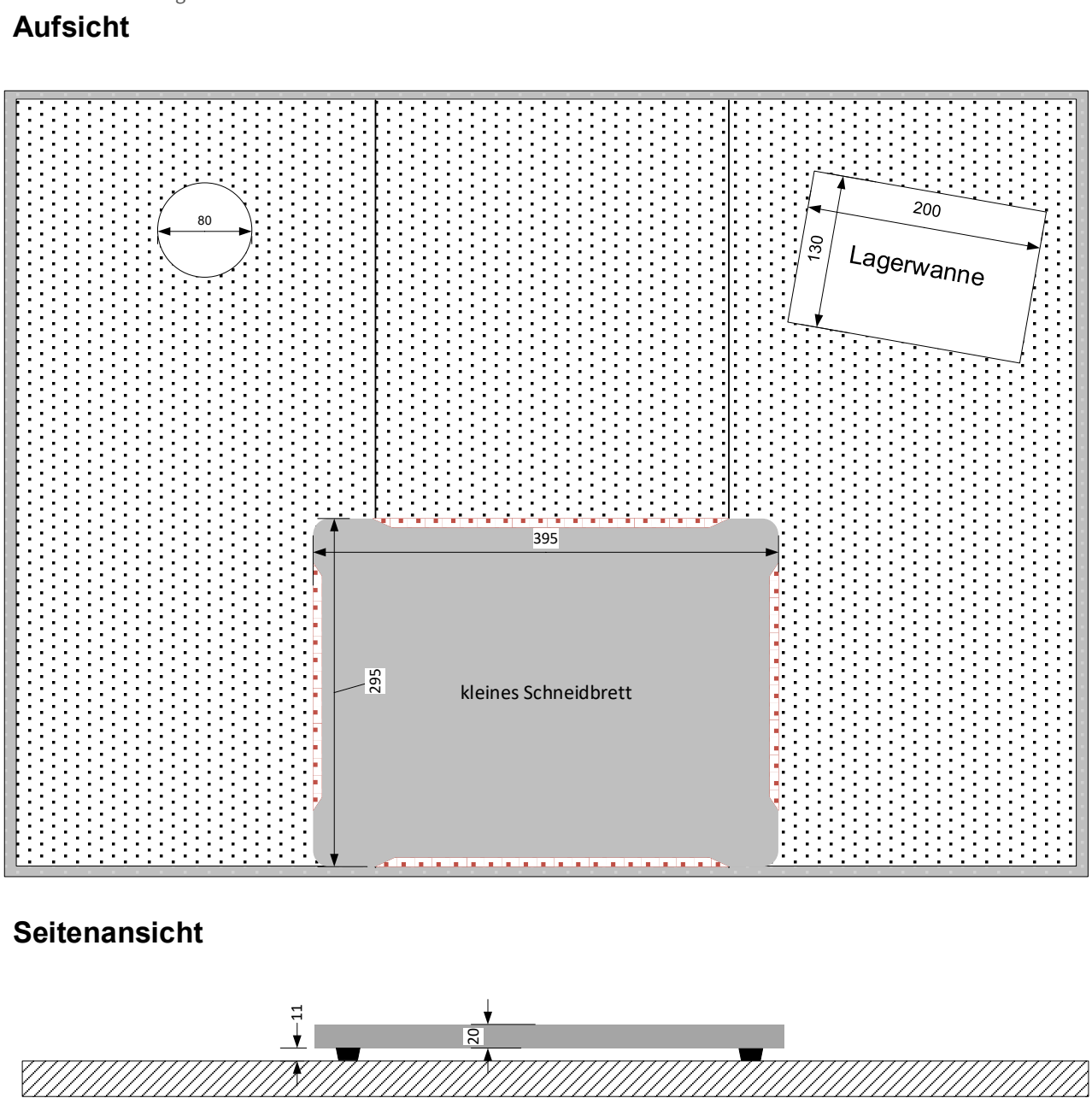
Abbildung 3:
Versuchsaufbau Zuschneiden



Für die Zuschneideversuche wurden ein kleines und ein großes Schneidbrett verwendet. Das kleine Schneidbrett hatte eine Aussparung, die einen Abstand zur Tischkante bedingte (**Abbildung 4**). Das große Schneidbrett hatte gerade Kanten, sodass es bündig an die Tischkante angelegt werden konnte. Für einzelne Versuche wurde auch dieses Brett mit Abstandhaltern von 8 mm Stärke zur Vorderkante des Tisches ausgestattet, um die Luftführung an der vorderen Tischkante zu ändern und den Einfluss zu untersuchen. Die Details der Schneidbretter sowie die Anordnung auf der Tischfläche sind Abbildung 4 und **Abbildung 5** zu entnehmen.

Das große Zuschneidebrett wurde teilweise mit und teilweise ohne Abstand zur Tischvorderkante positioniert, sodass die erste Lochreihe frei blieb oder verdeckt war. Bei dem kleinen Brett war der Abstand aufgrund der Brettform per se vorgegeben und vorhanden, wurde jedoch durch Abkleben bei einer Versuchsanordnung mit drei Wiederholungen abgedeckt. Der Proband schnitt in festgelegter Form je Versuch 15 Minuten das Material zu. Der Ablauf orientierte sich an dem Bewegungsmuster eines Pathologen. Die Position einer daneben sitzenden Assistenz wurde durch eine stationäre Probenahme in Atemhöhe simuliert und damit deren Exposition ermittelt. Die Assistenz führt je nach Arbeitsorganisation ergänzende Arbeiten durch, wie das Einkapseln und das Platzieren der Kapseln in eine Wanne mit Formaldehydlösung. Dies übernahm bei den nachgestellten Zuschnitten der Proband.

Abbildung 4:
Skizze mit Bemaßung in mm für die Zuschneideversuche mit kleinem Schneidbrett



Aufsicht

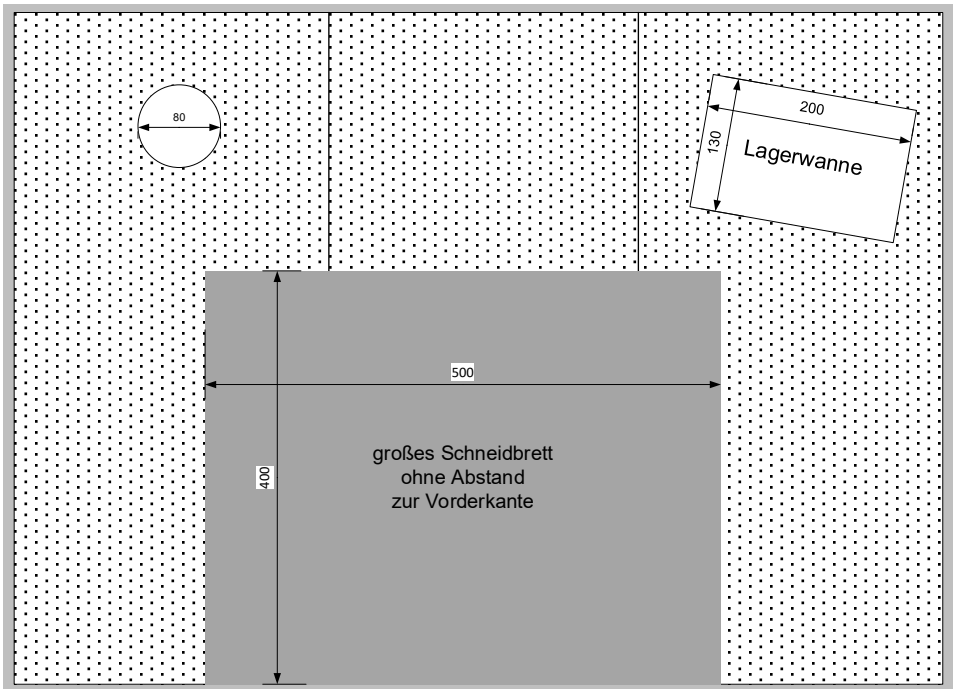
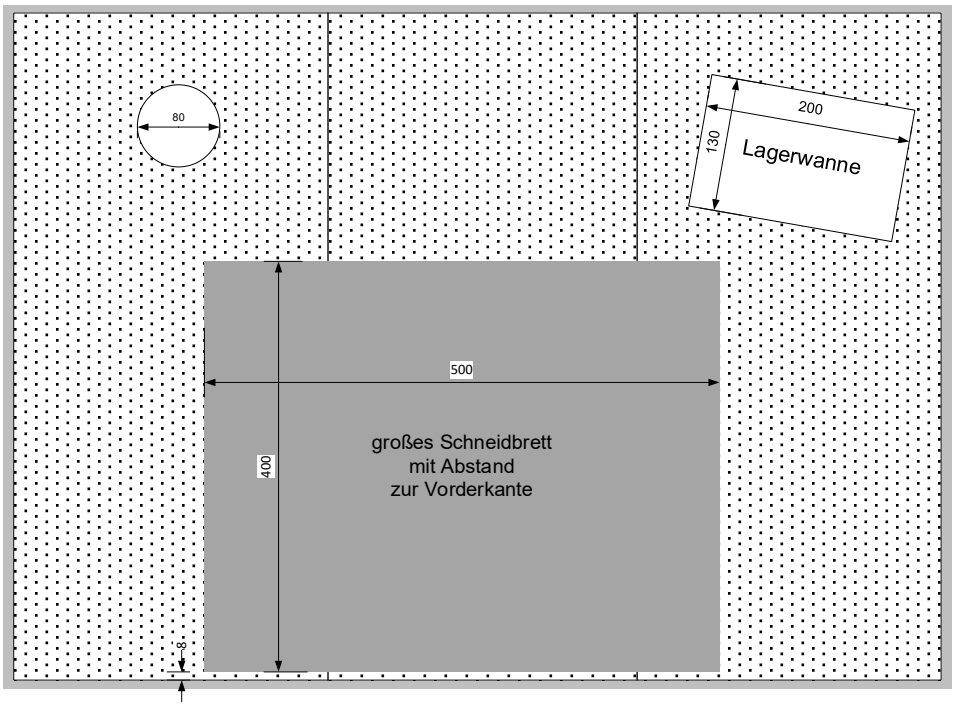
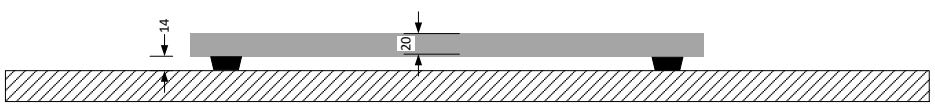


Abbildung 5:
Skizze mit Bemaßung in mm für die Zuschneideversuche mit großem Schneidbrett

Aufsicht



Seitenansicht



3.3.2 Formaldehydlösung umfüllen

Um den Chemikalienwechsel der Formaldehyd-Kanister des Entwässerungsautomaten und das Befüllen von Probenbehältern mit vierprozentiger Formaldehydlösung nachzustellen, wurden in diesen Versuchen Behälter mit Formaldehydlösung gefüllt und entleert.

Fünf Liter vierprozentiger Formaldehydlösung wurden aus einem Einwegkanister mithilfe eines Trichters in einen zweiten Kanister, der auf der Tischarbeitsfläche stand, vollständig abgegossen. Der entleerte Kanister wurde im Anschluss auf die Arbeitsfläche gestellt und der Trichter umpositioniert, sodass der leere Behälter mit dem befüllten Kanister wieder aufgefüllt werden konnte. Dieses Vorgehen wurde über eine Dauer von 15 Minuten insgesamt viermal durchgeführt (insgesamt 20 Liter Umfüllvolumen je 15 Minuten Versuch).

Die Versuche erfolgten ohne den Einsatz der Haube und bei drei verschiedenen Volumenströmen, wobei zunächst drei Vorversuche erfolgten (bei 400, ca. 700 und ca. 1 000 m^3/h), die dazu dienten, einen geeigneten Volumenstrombereich für diese Versuchskonstellation zu finden. Danach erfolgte für die Soll-Volumenströme 700 und 1 000 m^3/h jeweils eine dreifache Wiederholung des Versuchs. Der Versuchsaufbau ist in **Abbildung 6** zu sehen.

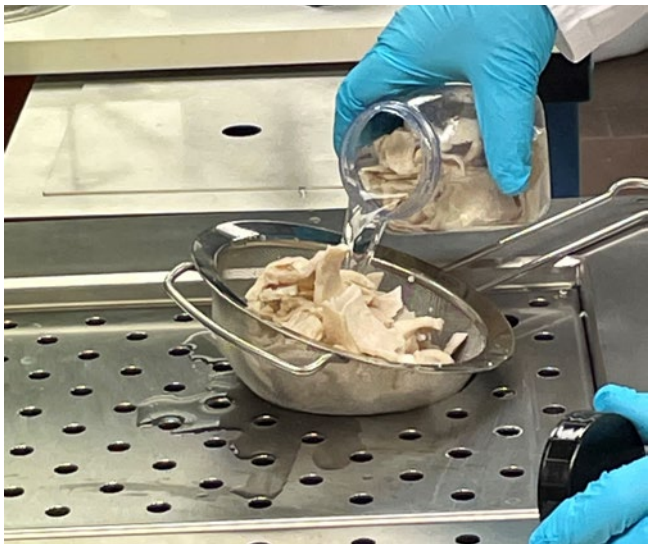
3.3.3 Entsorgen der Gewebeproben (Asservate)

Zum Einsatz kam bei diesen Versuchen, die das Entsorgen der Asservate simulierten, eine Sonderform des Lochblechs mit eingelassenem Abgießtrichter, daraufgesetztem Sieb und einer neben dem Lochblech angeordneten, abgesaugten Abwurföffnung für die Feststoffe. Der Absaugvolumenstrom der Abwurfschachtabsaugung betrug bei geöffneten Deckel 29,7 bis 32,7 m^3/h, was bei einer Fläche von 0,2 x 0,2 m einer Absauggeschwindigkeit von 0,2 m/s entspricht. Bei geschlossenem Deckel betrug der Absaugvolumenstrom, der dann nur noch durch das Fingerloch strömte, noch 8,2 bis 10,9 m^3/h (Durchmesser des Fingerlochs: 35 mm, Absauggeschwindigkeit: 2,5 m/s). Unter dem Abgießtrichter befand sich ein abgesaugter Kanister.

Abbildung 6:
Versuchsaufbau Umfüllen/Chemikalienwechsel



Abbildung 7:
Versuchsaufbau Asservate entsorgen



Als Versuchsmaterial dienten die Fleischzuschnitte aus den Zuschneideversuchen, die vor Versuchsbeginn aus den Kassetten genommen und in 500 ml-Kunststoffbehälter gegeben wurden. Diese wurden dann mit vierprozentiger Formaldehydlösung aufgefüllt. Im Versuch wurde der Behälter geöffnet und der gesamte Inhalt in das Sieb geleert (**Abbildung 7**). Das Gewebe wurde dabei im Sieb zurückgehalten, die Flüssigkeit floss in den abgesaugten Kanister unter der Arbeitsfläche. Nach drei entleerten Behältern war das Sieb voll und das Gewebe wurde über eine Abwurföffnung in einen ebenfalls abgesaugten Sammelbehälter entsorgt. Dieses Vorgehen wurde je Versuch (15 Minuten) fünfmal wiederholt, sodass je Versuch insgesamt 15 Behälter auf diese Weise geleert wurden. Die abgesaugte Luft wurde nach außen abgeführt, um Querkontamination zu vermeiden.

Zunächst wurde bei drei verschiedenen Volumenströmen (ca. 300, ca. 450 und ca. 500 m^3/h) je ein Vorversuch durchgeführt, um einen passenden Volumenstrombereich zu finden Im Anschluss erfolgte eine Versuchsserie (drei Wiederholungen) bei einem Soll-Volumenstrom von 300 m^3/h. Alle Versuche erfolgten ohne den Einsatz der Haube.

4 Ergebnisse der lüftungstechnischen Untersuchungen

An dieser Stelle folgt eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der lüftungstechnischen Untersuchungen. Alle Details zum Versuchsaufbau, zum verwendeten Equipment und zu weiteren Ergebnissen sind dem Anhang B zu entnehmen.

Die Nebelaerosolversuche mit Theaternebel dienten dazu, die Strömungsverhältnisse unter verschiedenen Bedingungen qualitativ sichtbar zu machen. Wenn die vordere Lochreihe frei war, zeigte sich, dass die Luft überwiegend über die vordere Tischkante einströmt. Über die Seiten sowie über die hintere Tischkante strömte deutlich weniger ein. Bei den Versuchen mit Haube war zu beobachten, dass im oberen Bereich des Öffnungsquerschnittes der Haube wenig Nebel einströmte, wohingegen dieser über die untere Vorderkante des Tisches gut sichtbar eingesaugt wurde. Mit höherem Absaugvolumenstrom erhöhte sich auch sichtbar die Strömungsgeschwindigkeit.

Bei den Versuchen mit offener Erfassung (d. h. ohne Haube) und ohne Abstand des großen Schneidbrettes zur vorderen Tischkante (vordere Lochreihe verdeckt, also kein Absaugschlitz zwischen Proband und Schneidbrett) konnte beobachtet werden, dass der Nebel am Probanden aufstieg (**Abbildung 8**). Dies wird noch verstärkt, wenn die Unterarme rechts und links Teile des Lochbleches abdecken.

Abbildung 8:
Am Kopf des Probanden aufsteigender Theaternebel bei Anordnung des großen Schneidbrettes ohne Abstand zur Tischvorderkante



Die Luftgeschwindigkeitsmessungen (**siehe Anhang B**) mit halboffener Erfassung (mit Haube) in der Querschnittsfläche der Haubenöffnung zeigten, dass die höchsten Luftgeschwindigkeiten mittig in der untersten Messebene auftreten, d. h. nah an der Tischoberfläche. Dies gilt sowohl für die Versuche mit geöffnetem als auch mit geschlossenem Haubendeckel und deckt sich mit den Beobachtungen beim Theaternebel. Aufgrund der größeren Querschnittsfläche bei geöffnetem Haubendeckel waren die Geschwindigkeiten bei kleineren Absaugvolumenströmen (≤ 410 m^3/h) in den oberen Messebenen so gering, dass sie mit den eingesetzten Messgeräten nicht mehr messbar waren (< 0,2 m/s).

Die Versuche zur Luftgeschwindigkeitsmessung auf der abgesaugten Tischfläche mit unterschiedlichen Messhauben (Fa. Wöhler und Testo) zeigten insgesamt eine gute Übereinstimmung der Messwerte beider Messgeräte, wobei die Übereinstimmung bei höheren Volumenströmen bzw. Geschwindigkeiten besser ist als bei niedrigen. Weitere Details finden sich in Anhang B.

5 Ergebnisse der nachstellenden Untersuchungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei nachgestellten Tätigkeiten Zuschneiden, Asservate entsorgen und Formaldehydlösung umfüllen in Bezug auf die an den jeweiligen Messorten gemessenen Formaldehydkonzentrationen dargestellt. Dabei wird der Einfluss verschiedener relevanter Randbedingungen (Haube, Größe und Position des Schneidbrettes, Absaugvolumenstrom) untersucht. Hierfür liegen die Messwerte mit dem Standardverfahren des Messystem Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (MGU) zugrunde, das heißt Probennahme auf sammelnde Probenträger mit nachfolgender Laboranalytik. Ergänzende, direktanzeigende Messungen zeigen den zeitlichen Verlauf der Formaldehydkonzentration während der jeweils ausgeübten Tätigkeiten.

In Anhang C sind alle hier dargestellten Messwerte in Tabellenform einzusehen. Anhang D enthält statistische Untersuchungen der Datenpunkte für die Versuche der Zuschneidetätigkeit.

Im Folgenden wird im Zusammenhang mit Bezügen zum AGW davon ausgegangen, dass der über 15 Minuten gemessene Wert auch als Schichtmittelwert über acht Stunden erreicht werden kann. Wenn im Folgenden von „Grenzwertüberschreitung“ gesprochen wird, ist damit gemeint, dass der Messwert im entsprechenden Versuch über dem AGW (Schichtmittelwert) von 0,37 mg/m³ lag.

5.1 Zuschneiden

Bei den insgesamt 96 Zuschneideversuchen wurde die Formaldehydkonzentration an den Messstellen „Patholoqe“, „Tisch“ und „Tischabluft“ mittels Probenträger gemessen, sodass insgesamt 288 Messwerte für die Zuschneideversuche generiert wurden (exklusive direktanzeigende Messgeräte). Einige wenige Messergebnisse wurden aus der Auswertung ausgeschlossen, wenn es Probleme während der Probenahme gab. Dadurch ist die Anzahl der auswertbaren Messwerte je Messstelle (N) kleiner als 96. Aus den gemessenen Konzentrationen an den definierten Messstellen lassen sich unterschiedliche Aussagen ableiten. Im Folgenden werden die Messergebnisse (mittels Probenträger) für die Messstellen „Tischabluft“, „Pathologe“ und „Tisch“ dargestellt. Im Anschluss erfolgt zudem eine Darstellung der Messergebnisse aus direktanzeigenden Messgeräten und eine kurze Zusammenfassung.

5.1.1 Messstelle „Tischabluft“

Zunächst werden die Ergebnisse der Messungen von Formaldehyd in der Tischabluft in Abhängigkeit des abgesaugten Volumenstromes aufgetragen (N = 91). Um die verschiedenen Volumenströme vergleichen zu können, erfolgte für **Abbildung 9** die Umrechnung der gemessenen Konzentrationen von Formaldehyd in der Abluft in eine Masse je 15 Minuten Probenannahmedauer:

$m = c * Q * 0{,}25\ h$

m: Masse [mg]
c: Formaldehydkonzentration in der Abluft [mg/m³]
Q: Abluftvolumenstrom [m³/h]

Außerdem werden bei der Darstellung der Messwerte die Fälle „ohne Haube“, „offene Haube“ und „geschlossene Haube“ unterschieden. Bei dem Volumenstrom von ca. 400 m³/h wurden keine Versuche mit geschlossener Haube durchgeführt, da davon ausgegangen wurde, dass bei geschlossener Haube bereits bei niedrigeren Volumenströmen die gesamte Emission erfasst war.

Aus **Abbildung 9** ist ersichtlich, dass sich bei einem Volumenstrom von ca. 100 m³/h niedrigere Werte für die je 15 Minuten in der Abluft enthaltene Masse an Formaldehyd ergeben als für höhere Volumenströme. Das heißt, dass bei ca. 100 m³/h ein größerer Anteil des Formalde-

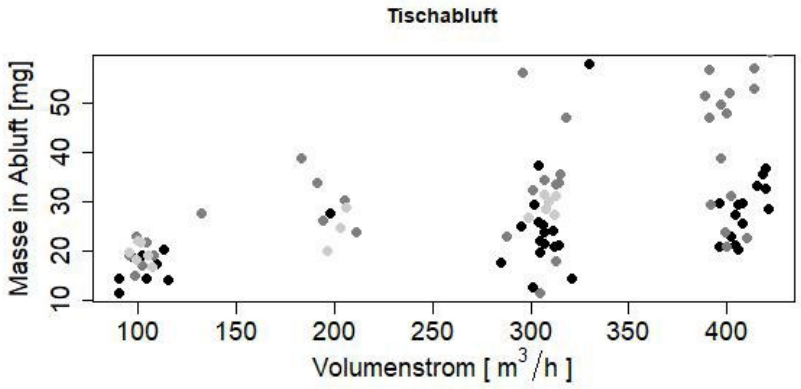


Abbildung 9:
Formaldehydmasse je 15 Minuten Probenahme in der Tischabluft als Funktion des Volumenstroms für die Tätigkeit „Zuschneiden“ ohne Haube (schwarz), bei offener Haube (dunkelgrau) und geschlossener Haube (hellgrau)

hyds nicht von der Absaugung erfasst wird, verglichen mit den höheren Volumenströmen. Bei steigendem Volumenstrom ist irgendwann der Punkt erreicht, bei dem die abtransportierte Masse an Formaldehyd nicht mehr steigen kann, solange die Quelle dieselbe bleibt – dann werden sämtliche Formaldehyddämpfe erfasst. Dies wird auch in **Abbildung 9** deutlich, da für Volumenströme oberhalb von 200 m³/h keine wesentlich höheren Werte für die abtransportierte Masse an Formaldehyd erkennbar sind. Des Weiteren ist erkennbar, dass das Fehlen einer Haube zu einer schlechteren Erfassung und damit zu weniger Formaldehyd in der Abluft führt. Besonders bei ca. 300 m³/h und ca. 400 m³/h stammen die niedrigen Messwerte überwiegend von Messungen ohne Haube.

Der signifikante Einfluss beider hier untersuchter relevanter Randbedingungen (Volumenstrom und Haube) auf die je 15 Minuten abgesaugte Masse an Formaldehyd kann auch durch statistische Modellrechnungen bestätigt werden (**siehe Anhang D**).

5.1.2 Messstelle „Pathologe“

Als nächstes werden die personengetragenen Messungen (Messstelle „Pathologe“) dargestellt (N = 81). In **Abbildung 10** sind die Messwerte für die Formaldehydkonzentration über den Absaugvolumenstrom aufgetragen. Darüber hinaus wird zwischen den Situationen „ohne Haube“, „offene Haube“ und „geschlossene Haube“ und dem Fehlen oder Vorhandensein eines Abstandes zwischen Brett und Tischvorderkante unterschieden. Die 48 Messwerte, die unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze liegen, sind an der Bestimmungsgrenze von 0,02 mg/m³ aufgetragen.

Zu beachten ist, dass bei den Messungen ohne Abstand zunächst die Versuche bei höheren Volumenströmen durchgeführt wurden. Da es bereits hier zu Überschreitungen des Formaldehyd-Wertes von 0,37 mg/m³ kam, wurden in der Folge keine Messungen ohne Abstand zwischen Brett und Tischkante bei niedrigeren Volumenströmen durchgeführt (= keine umkreisten Datenpunkte), um den Probanden nicht den erwartungsgemäß noch höheren Formaldehydkonzentrationen auszusetzen (> Kurzzeitwert). Deshalb sind bei niedrigen Volumenströmen in **Abbildung 10** keine Grenzwertüberschreitungen zu beobachten.

Es ist klar ersichtlich, dass die Werte aus den Messungen ohne Haube (schwarz) im Mittel höher liegen als die Werte mit dem Einsatz der Haube. Alle Grenzwertüberschreitungen stammen aus Messungen ohne den Einsatz der Haube und ohne Abstand zwischen dem Schneidbrett und der Tischvorderkante. Dagegen liegen die Messwerte aus den Messungen mit Haube und mit Abstand ausschließlich unterhalb oder sehr nah an der Bestimmungsgrenze und damit deutlich unter dem Grenzwert. Auch wenn nur eines dieser beiden Merkmale zutrifft, konnte der Grenzwert für die höheren Volumenströme eingehalten werden. Der bereits beschriebene Effekt des Volumenstromes ist anhand der Messungen ohne Haube auch in dieser Darstellung zu erkennen (schwarze, nicht umkreiste Datenpunkte liegen bei ca. 100 m³/h höher als bei höheren Volumenströmen).

5.1.3 Messstelle „Tisch“

Abschließend werden in **Abbildung 11** die Werte des stationären Messpunktes über dem Zuschneidebrett dargestellt (Messstelle „Tisch“, N = 83). Im Mittel liegen diese Werte aufgrund des geringeren Abstandes zur Emissionsquelle höher als die Werte aus den personengetragenen Messungen, weshalb hier nur 15 Werte unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze liegen. Diese sind an der Bestimmungsgrenze von 0,02 mg/m³ aufgetragen. In **Abbildung 11** wird neben dem Faktor „Haube“ auch der Faktor „Brettgröße“ differenziert dargestellt.

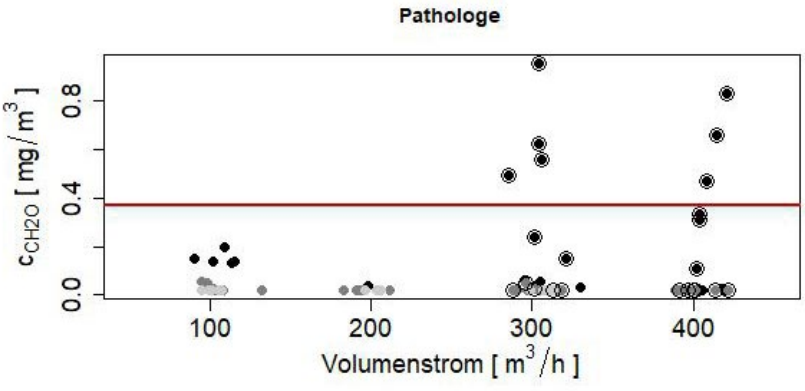


Abbildung 10:
Formaldehydkonzentration aus personengetragener Messung als Funktion des Volumenstroms für die Tätigkeit „Zuschneiden“ ohne Haube (schwarz), bei offener Haube (dunkelgrau) und geschlossener Haube (hellgrau). Umkreiste Werte kommen aus Messungen ohne Abstand zwischen Schneidbrett und Tischvorderkante. Die Linie zeigt den Arbeitsplatzgrenzwert von 0,37 mg/m³ an

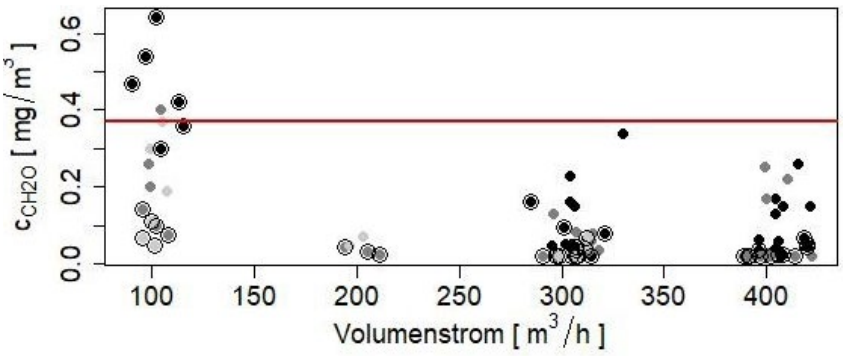


Abbildung 11:
Formaldehydkonzentration gemessen stationär über dem Tisch als Funktion des Volumenstroms für die Tätigkeit „Zuschneiden“ ohne Haube (schwarz), bei offener Haube (dunkelgrau) und geschlossener Haube (hellgrau). Umkreiste Werte kommen aus Messungen mit kleinem Brett. Die Linie zeigt den Arbeitsplatzgrenzwert von 0,37 mg/m³ an

Es ist zu beachten, dass bei einem Volumenstrom von ca. 100 m³/h keine Versuche mit dem großen Brett und ohne Haube durchgeführt wurden, um den Probanden nicht den erwartungsgemäß hohen Formaldehydkonzentrationen auszusetzen (> Kurzzeitwert). Daher ist für den Faktor „ohne Haube“ ein Vergleich kleines vs. großes Brett bei diesem Volumenstrom nicht möglich. Der Einfluss der Brettgröße wird dennoch erkennbar, wenn nur die Datenpunkte der Messungen mit Haube (hell- und dunkelgrau) betrachtet werden. Bei der Gruppe um 100 m³/h führt das Merkmal „kleines Brett“ (umkreist) zu niedrigeren Werten. Bei diesem Volumenstrom ist außerdem gut zu erkennen, dass das Fehlen der Haube selbst beim Einsatz des kleinen Brettes zu Grenzwertüberschreitungen führt (schwarz und umkreist). Auch für die höheren Volumenströme stammen die Messpunkte, die etwas höher liegen (> 0,1 mg/m³), fast ausschließlich aus Messungen mit dem großen Brett. Die drei schwarzen, umkreisten Datenpunkte bei ca. 300 m³/h, die etwas höher liegen (um ca. 0,1 mg/m³) stammen aus dem Versuch ohne Haube, mit kleinem Brett und abgeklebter Vorderkante. Hier wurde durch Abkleben der Aussparung des kleinen Schneidbretts, die normalerweise immer einen Abstand zur vorderen Tischkante bewirkte, die Konstellation „ohne Abstand“ erzeugt. Offensichtlich führte dies zu einer höheren Formaldehydkonzentration an der Messstelle „Tisch“, verglichen mit den anderen Messwerten mit kleinem Brett.

5.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Zuschneideversuche und direktanzeigende Messungen

Zusammenfassend lassen sich bei den am IFA durchgeführten Zuschneideversuchen für beide für die Exposition relevanten Messstellen („Pathologe“ und „Tisch“) Grenzwertüberschreitungen feststellen. Diese treten insbesondere für die Faktoren „Volumenstrom < 200 m³/h“, „ohne Haube“ und „ohne Abstand (zwischen Schneidbrett und Tischvorderkante)“ auf. Treffen beide letztgenannten Faktoren gleichzeitig zu, so kam es bei den Versuchen sogar bei hohen Volumenströmen (ca. 300 und ca. 400 m³/h) zu Grenzwertüberschreitungen. Der Einsatz des kleinen Schneidbrettes führte tendenziell zu etwas niedrigeren Expositionswerten als die Verwendung des großen Brettes. Neben diesen Beobachtungen fällt außerdem insgesamt eine große Streuung der Messwerte auf, die nicht vollständig durch die untersuchten Faktoren erklärt werden kann. Dies spiegelt sich auch in einem niedrigen Bestimmtheitsmaß der statistischen Modelle wider (**siehe Anhang D**).

Die bisher dargestellten Messwerte stammen aus Luftprobenahmen mit anschließender analytischer Auswertung. Sie stellen also jeweils den Mittelwert über die Probenannahmedauer dar. Anhand der Messwerte aus dem direktanzeigenden Messgerät (Messstelle „Tischabluft“) lässt sich der zeitliche Verlauf der Formaldehydkonzentration in der Tischabluft ablesen. Da der abgesaugte Volumenstrom und die Randbedingungen während eines Versuchs konstant blieben, kann unterstellt werden, dass der Kurvenverlauf der Formaldehydkonzentration in der Tischabluft gut mit dem (unbekannten) Kurvenverlauf der Emissionsrate übereinstimmt. Denn ein Konzentrationsanstieg in der Tischabluft ist unter ansonsten gleichbleibenden Bedingungen einer erhöhten Emissionsrate zuzuschreiben. In **Abbildung 12** ist die Formaldehydkonzentration in der Tischabluft beispielhaft für die drei Wiederholungen einer Versuchsanordnung im zeitlichen Verlauf dargestellt.

Auch wenn die absoluten Zahlenwerte der direktanzeigenden Messungen aufgrund im Vergleich zur Laboranalytik geringerer Genauigkeit mit Vorsicht interpretiert werden sollten, zeigt die Abbildung doch sehr deutlich, dass nach etwa 120 und 570 s ein sprunghafter Anstieg sowie nach etwa 780 s ein abruptes Absinken der Formaldehydkonzentration erfolgte. Dabei stimmt der erste Anstieg mit dem Öffnen der Probenbehälter und der zweite Anstieg

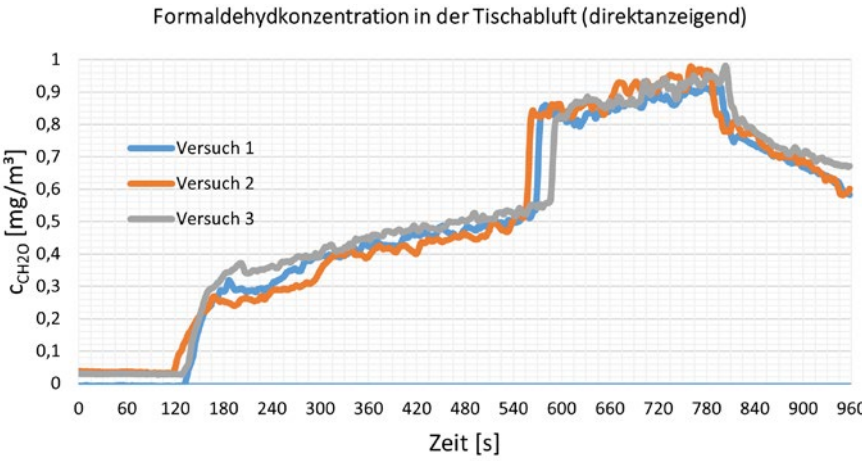


Abbildung 12:
Formaldehydkonzentration gemessen mit direktanzeigendem Messgerät in der Tischabluft als Funktion der Zeit für die Tätigkeit „Zuschneiden“. Die dargestellten Versuche erfolgten bei einem Abluftvolumenstrom von ca. 100 m³/h, unter Verwendung des kleinen Schneidbrettes und mit geschlossener Haube

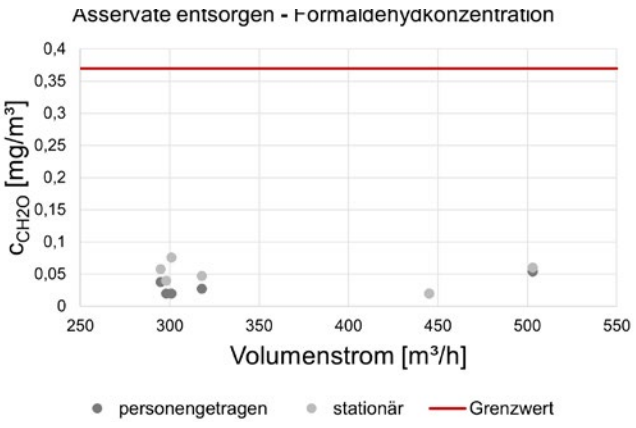
mit dem Öffnen des mit Formaldehydlösung gefüllten Behälters, in den die Kunststoffkapseln gelegt wurden, zeitlich überein. Der Beginn des Absinkens der Konzentration beschreibt den Zeitpunkt, an dem der Behälter wieder verschlossen wurde und keine weiteren Fleischstücke mehr bearbeitet, sondern Reinigungs- und Aufräumarbeiten durchgeführt wurden.

5.2 Asservate Entsorgen

Für die Tätigkeit „Asservate entsorgen“ wurden insgesamt sechs Versuche durchgeführt. In **Abbildung 13** sind die Messwerte aus der personengetragenen (Messstelle „Assistenz A“) sowie aus der stationären personenbezogenen Probenahme (Messstelle „Assistenz B“) je nach Absaugvolumenstrom in einem Diagramm eingetragen.

Für die untersuchten Volumenströme liegen alle Messwerte deutlich unter dem Grenzwert, vier Messwerte lagen unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze von 0,02 mg/m³ und sind daher an dieser aufgetragen. Bei höheren Absaugvolumenströmen ist kein Absinken der Konzentration erkennbar. In der Tendenz liegen die Werte aus der stationären personenbezogenen Messung etwas höher als die Messungen aus der personengetragenen Probenahme.

Abbildung 13:
Formaldehydkonzentration gemessen durch Probenahme personengetragen (Messstelle „Assistenz A“; dunkel) sowie personenbezogen stationär (Messstelle „Assistenz B“; hell) und als Funktion des Volumenstroms für die Tätigkeit „Asservate entsorgen“. Alle Messungen erfolgten ohne den Einsatz der Haube. Die Linie zeigt den Arbeitsplatzgrenzwert von 0,37 mg/m³ an



5.3 Umfüllen

Die Tätigkeit „Umfüllen/Chemikalienwechsel“ wurde ohne den Einsatz der Haube bei verschiedenen Volumenströmen insgesamt in neun Versuchen nachgestellt (bei ca. 400, ca. 700 und ca. 1000 m³/h). In **Abbildung 14** ist der qualitative Verlauf der Formaldehyd-Konzentration (auf Basis des direktanzeigenden Messgerätes, stationär personenbezogen) sowie der Absaugvolumenstrom im zeitlichen Verlauf aufgetragen. Hierbei handelt es sich um einen Vorversuch zur Ermittlung eines passenden Absaugvolumenstromes für die eigentlichen Versuche. Für je vier aufeinanderfolgende Umfüllvorgänge bei drei verschiedenen Volumenströmen wurde in **Abbildung 14** außerdem jeweils der Mittelwert (über 15 min) aus den Daten des direktanzeigenden Messgerätes abgebildet (roter Balken).

Zunächst lässt **Abbildung 14** jeden Umfüllvorgang am Peak der dunkelblauen Linie erkennen. Die Maxima der Peaks stellen die Spitzenwerte der Formaldehydexposition dar. Diese sind bei einem Volumenstrom von ca. 400 m³/h im Mittel höher als bei einem Volumenstrom von

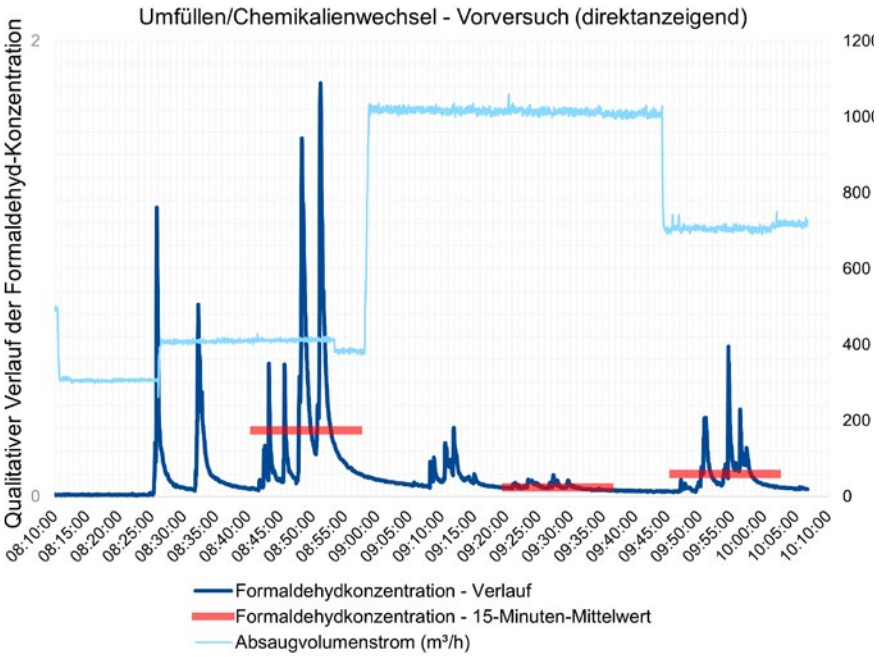


Abbildung 14:
Formaldehydkonzentration gemessen mit direktanzeigendem Messgerät (stationär personenbezogen, dunkelblaue Linie) und Absaugvolumenstrom (Achse rechts, hellblaue Linie) als Funktion der Zeit für die Tätigkeit „Umfüllen/Chemikalienwechsel“. Die roten Balken stellen die 15-Minuten-Mittelwerte der Formaldehydkonzentration dar. Die dargestellten Versuche erfolgten ohne den Einsatz der Haube

ca. 700 m³/h und bei diesem wiederum höher als bei einem Volumenstrom von ca. 1 000 m³/h. Auch die Mittelwerte bilden dies ab. Zu beobachten ist aber auch eine gewisse Streuung der Maxima innerhalb eines Volumenstromes. So sind die ersten beiden Peaks bei ca. 400 m³/h deutlich kleiner als die beiden darauffolgenden Peaks.

Während der eigentlichen Versuche zum Umfüllen wurde die Formaldehydkonzentration durch Probenahme an der Person (personengetragen) und stationär (personenbezogen im Atembereich des Probanden) gemessen. Diese Messwerte sind in **Abbildung 15** dargestellt.

Die Messwerte aus den personengetragenen Messungen liegen ausnahmslos höher als die Messungen des stationären, personenbezogenen Messpunktes. Zudem ist erkennbar, dass alle Messwerte bei einem Volumenstrom von ca. 1 000 m³/h unter dem Grenzwert liegen, wohingegen es bei den Versuchen mit niedrigeren Volumenströmen teilweise zu einer ca. dreifachen Grenzwertüberschreitung kam. Zu beobachten ist außerdem eine breite Streuung, insbesondere bei dem Volumenstrom von ca. 700 m³/h.

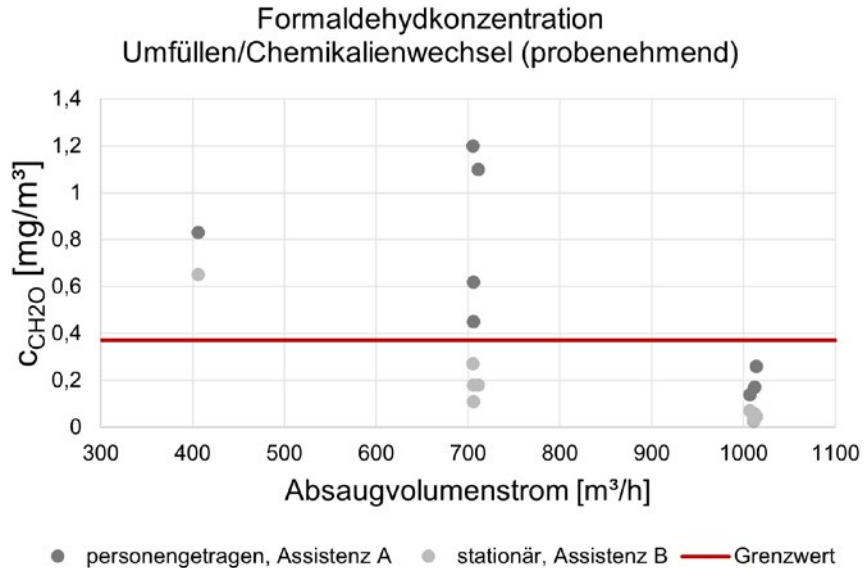


Abbildung 15:
Formaldehydkonzentration gemessen durch Probenahme personengetragen (Messstelle „Assistenz A“; dunkel) sowie personenbezogen stationär (Messstelle „Assistenz B“; hell) und als Funktion des Volumenstroms für die Tätigkeit „Umfüllen/Chemikalienwechsel“. Alle Messungen erfolgten ohne den Einsatz der Haube. Die Linie zeigt den Arbeitsplatzgrenzwert von 0,37 mg/m³ an

5.4 Vergleich der Tätigkeiten und Zusammenfassung der Ergebnisse der nachstellenden Untersuchungen

Die Höhe der je Zeiteinheit emittierten Formaldehydmengen (Emissionsrate) ist für die dargestellten Versuche nicht bekannt. Nur für den Fall, dass die bei einer Tätigkeit entstehenden Dämpfe vollständig erfasst würden, könnte die Emissionsrate mithilfe der Messstelle „Tischabluft“ berechnet werden. Um dennoch eine grobe Einschätzung der entstehenden Formaldehydmengen je nach Tätigkeit vornehmen zu können und als Ergänzung zu den Expositionswerten, erfolgt hier eine Gegenüberstellung des abgesaugten Formaldehyd-Massenstroms (mg/h) für alle drei Tätigkeiten. Dieser wurde mittels Multiplikation der Konzentrationswerte der Messstelle „Tischabluft“ (mg/m³) mit dem Wert des jeweiligen Absaugvolumenstroms (m³/h) ermittelt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden Messwerte bei einem Volumenstrom von ca. 400 m³/h gewählt, da dieser bei allen drei Tätigkeiten angewandt wurde. Beim „Asservate entsorgen“ und beim „Umfüllen“ war dies jeweils nur ein Einzelversuch, wohingegen für das Zuschneiden aus den für diesen Volumenstrombereich vorliegenden 27 Messwerten sowohl für den Volumenstrom als auch für den Formaldehyd-Massenstrom in der Tischabluft jeweils der arithmetische Mittelwert gebildet wurde. Die Werte der **Tabelle 5** sind als Orientierung anzusehen und spiegeln nicht unmittelbar die Emissionsrate wieder.

Tabelle 5:
Formaldehyd in der Tischabluft – Tätigkeiten im Vergleich

	Zuschneiden	Asservate entsorgen	Umfüllen
Mittlerer Absaug-Volumenstrom [m³/h]	405	445	406
Mittlerer Massenstrom Formaldehyd an Messstelle „Tischabluft“ [mg/h]	147	668	49

Bei vergleichbarem Absaugvolumenstrom führte die Tätigkeit „Asservate entsorgen“ verglichen mit den anderen beiden Tätigkeiten zu den mit Abstand höchsten Mengen Formaldehyd in der Tischabluft. Am wenigsten Formaldehyd in der Tischabluft war für die Tätigkeit „Umfüllen“ zu messen. Die Interpretation dieser Beobachtungen erfolgt im Kapitel "Diskussion".

Zusammenfassend lassen sich aus den dargestellten Ergebnissen zunächst einige Kernaussagen ableiten, die im Kapitel „Diskussion“ schließlich noch diskutiert und bewertet werden, bevor darauf aufbauend im Kapitel „Fazit“ zusammenfassende Schlussfolgerungen und Empfehlungen ausgesprochen werden.

1. Die Höhe des Absaugvolumenstroms bei gegebener abgesaugter Fläche wirkt sich signifikant auf die Effektivität der Erfassung von Formaldehyddämpfen und damit auf die Exposition von Beschäftigten gegenüber Formaldehyd aus (entscheidende Messgröße ist die Absauggeschwindigkeit, die jedoch nicht bei allen Versuchen messtechnisch ermittelt wurde. Sie korreliert aber mit dem Absaugvolumenstrom und ist außerdem von der abgesaugten Fläche und der Gestalt des Lochblechs abhängig).
2. Das Vorhandensein einer Haube über dem Pathologietisch hat einen großen Effekt auf die Wirksamkeit der Erfassung von Formaldehyddämpfen und führt dadurch zu einer wesentlich niedrigeren Exposition der Beschäftigten gegenüber Formaldehyd.
3. Das Vorhandensein einer freien Lochreihe (eines Abstandes) zwischen Schneidbrett und vorderer Tischkante führt bei der personengetragenen Messung zu deutlich niedrigeren Expositionswerten gegenüber Formaldehyd.
4. Ein Einfluss der Brettgröße (und damit der verdeckten Fläche des Lochbleches) auf die Expositionswerte wurde beobachtet (kleines Brett → niedrigere Exposition), konnte jedoch statistisch nicht als signifikant bestätigt werden.
5. Bei der Tätigkeit „Zuschneiden“ führt insbesondere das Öffnen von mit Formaldehydlösung gefüllten Behältnissen zu einem sprunghaften Anstieg der Exposition.
6. Die Tätigkeit „Umfüllen/Chemikalienwechsel“ führt zu weitaus höheren Expositionen als die beiden anderen untersuchten Tätigkeiten. Erst bei einem Volumenstrom von ca. 1 000 m³/h war eine Einhaltung des Grenzwertes unter den beschriebenen Bedingungen möglich.
7. Die Grenzwerteinhaltung war für die Tätigkeit „Asservate entsorgen“ bei Volumenströmen ≥ 290 m³/h möglich. Bei dieser Tätigkeit wurden die höchsten Formaldehydkonzentrationen in der Tischabluft gemessen (verglichen mit den anderen beiden Tätigkeiten und bei einem Volumenstrom von ca. 400 m³/h).
8. Die Signifikanz der unter den Punkten 1 bis 3 genannten Determinanten konnte anhand statistischer Modellrechnungen nachgewiesen werden (**siehe Anhang D**). Es fällt aber auf, dass die Modellrechnungen ein vergleichsweise niedriges Bestimmtheitsmaß aufweisen. Dies bedeutet, dass die untersuchten Determinanten nur einen Teil der großen vorliegenden Streuung verursachen und dass es also noch weitere, die Messwerte beeinflussende Faktoren geben muss.

6 Diskussion

Insgesamt fällt eine große Streuung der Messwerte auf, insbesondere bei einigen der Zuschneideversuche und beim Umfüllen. Dies könnte unter anderem an unterschiedlichen Emissionsraten trotz „gleicher“ Versuchsbedingungen liegen. Denn auch wenn sowohl die beschriebenen Faktoren Haube, Volumenstrom, Brettgröße, Abstand als auch das Vorgehen des Probanden bei der Ausführung der jeweiligen Tätigkeiten für Wiederholungsmessungen konstant gehalten wurden, ergeben sich zwangsweise nicht beherrschbare Unterschiede, die die Emissionsrate beeinflussen können. Beim Zuschneiden sind dies z. B. die Größe der Fleischstücke vor dem Zerschneiden, die Größe der Oberfläche, die sich nach dem Zerschneiden und Auslegen des Fleisches ergibt oder die Struktur des Fleisches (mehr oder weniger Fett-/Knorpelanteil). Beim Asservate entsorgen und Umfüllen können Spritzer entstehen und kleinere Flüssigkeitsmengen können auf und unter das Lochblech gelangen. Auch dies ist ein Faktor, der nicht für alle Wiederholungsversuche konstant gehalten werden kann und somit zu einer Variabilität der Messwerte führt. Eine vollumfängliche Reproduzierbarkeit ist demnach bei dieser Art der Versuchsanordnung nicht gegeben, was sicherlich ein Grund für die beobachtete Streuung ist. Die tatsächlichen Emissionsraten sind nicht bekannt. Der Massenstrom in der Tischabluft nähert sich jedoch der Emissionsrate an, je vollumfänglicher die Erfassung der entstehenden Dämpfe ist. Näherungsweise könnten daher die Werte des Massenstroms in der Tischabluft für eine Versuchsanordnung, die zu einer sehr guten Erfassung führt (Zuschneiden mit Haube, mit Abstand, Volumenstrom ≥ 290 m^3/h) als Orientierung für eine mögliche Emissionsrate dienen. Für diese Versuchsanordnung, für die ein sehr hoher Erfassungsgrad angenommen werden kann, liegen die Werte für den Massenstrom in der Tischabluft zwischen 38 mg/h und 202 mg/h, was die Vermutung bestärkt, dass die Streuung der Expositionswerte zu einem großen Teil auf die Streuung der Emissionsraten zurückzuführen ist.

Im Folgenden wird auf die Unterschiede und die Bedeutung der beiden Messpunkte „Pathologe“ (personengetragen) und „Tisch“ (stationär) bei den Zuschneideversuchen eingegangen. Bedingt durch die Körpertemperatur erwärmt sich die Luft in der nahen Umgebung einer Person und führt zu einem thermischen Auftrieb der Luft am Körper (für Exposition relevant: der Kopf). Der Kopf stellt daher eine Senke dar – es strömt Luft von unten und von den Seiten nach. Diese Tatsache führt dazu, dass Formaldehyddämpfe bei den untersuchten Tätigkeiten zum Kopf der exponierten Person hinströmen und an ihm aufsteigen. Personengetragene Messungen sind aus diesem Grund bevorzugt einzusetzen. Vorversuche zeigten jedoch sehr geringe Konzentrationen bei der personengetragenen Messung, was mit realen Messungen in Pathologien nicht übereinstimmte. Daher wurde ein Messpunkt zusätzlich eingerichtet, der die Position des Pathologen simuliert, die sich zur Begutachtung der Gewebeprobe näher am Präparat befindet (Abstand ca. 20 cm). Tatsächlich ergaben sich für diesen Messpunkt im Mittel höhere Expositionswerte. Da die Messstelle „Tisch“ keinen thermischen Auftrieb erzeugt, wie es bei einem menschlichen Kopf der Fall ist, sind die Messwerte der Messstelle „Tisch“ für eine Person tendenziell sogar noch höher zu erwarten. Zu beachten ist allerdings, dass sich dieser Messpunkt bei den durchgeführten Versuchen mit geschlossener Haube innerhalb der Haube befand – der Kopf des Pathologen könnte sich dagegen bei geschlossener Haube nicht innerhalb der Haube befinden. Je nach Gestalt der Haube könnte sich der Pathologe bei geöffneter Haube mal mit dem Kopf in der Haube befinden.

Die dargestellten Versuche konnten die Effektivität einiger technischer und organisatorischer Schutzmaßnahmen zeigen. So konnte die Exposition insbesondere durch die Erhöhung des Absaugvolumenstromes bzw. der Absauggeschwindigkeit, das Vorhandensein einer freien Lochreihe zwischen Schneidbrett und vorderer Tischkante (beim Zuschneiden) und durch den Einsatz einer Haube (beim Zuschneiden) deutlich reduziert werden. Für das Zuschneiden unter den gegebenen Bedingungen, insbesondere bei einer gesamt abgesaugten Fläche von 0,585 m^2, lag die Exposition bei Volumenströmen von mind. 300 m^3/h und mit Abstand zwischen Schneidbrett und Tischvorderkante unter dem AGW. Für diesen Volumenstrom wurde mit der Testo-Haube eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,8 m/s gemessen (**siehe Anhang B**, diese Korrelation gilt nur für den verwendeten Tisch und das verwendete Lochblech). Unter Einbeziehung eines Sicherheitspuffers wird daher eine Mindestabsauggeschwindigkeit von 0,9 m/s, gemessen mit der Testo-Haube, für Zuschneidearbeiten empfohlen. Bei Verwendung einer halboffenen Erfassung kann die Absauggeschwindigkeit ggf. reduziert werden. Zu beachten ist, dass sowohl die Absauggeschwindigkeit als auch der Einsatz einer Haube Grenzen haben. Die Erhöhung der Absauggeschwindigkeit ist durch Lärm, Zugerscheinungen und die hohen Energiekosten limitiert. Der Einsatz einer Haube ist nicht immer möglich und praktikabel. Für Tätigkeiten, die den Einsatz einer Haube, wie sie hier verwendet wurde, nicht erlauben, ist zu prüfen, ob zumindest eine Begrenzung der hinteren und seitlichen Tischränder eine Verbesserung der Erfassung der Formaldehyddämpfe

zeigt. In den meisten Fällen wird eine Kombination verschiedener Schutzmaßnahmen erforderlich sein.

Der Einfluss der verdeckten Tischoberfläche durch auf dem Lochblech stehende Gegenstände und durch die Grundfläche des Schneidbrettes beim Zuschneiden konnte mittels der durchgeführten Versuche nicht abschließend geklärt werden. Zwar ergab der Einsatz des kleinen Schneidbrettes tendenziell etwas niedrigere Expositionswerte im Vergleich zum größeren Schneidbrett. Doch aufgrund der fehlenden Unabhängigkeit der Faktoren „Brettgröße“ und „Abstand“ (kleines Brett hatte aufgrund der Form bis auf den Versuch mit abgeklebter Vorderkante immer einen Abstand), ist diese Beobachtung nicht eindeutig dem Effekt der abgedeckten Tischoberfläche zuzuordnen.

Bei der Tätigkeit „Asservate entsorgen“ kann es zu Ausbreitungen von Formaldehydlösungen kommen. Die Flüssigkeit kann dabei auch unter die Lochplatte in den Tischunterbau gelangen. Bei eingeschalteter Absaugung können die hier freiwerdenden Dämpfe gut erfasst werden und führen so vermutlich nicht zu einer erhöhten Belastung des Personals. Zu beachten ist allerdings, dass dies eine Emissionsquelle darstellt, die nach Abschaltung der Absaugung zu vermutlich nicht unerheblichen, anhaltenden Emissionen führt. Es ist daher unbedingt darauf zu achten, dass vor dem Abschalten der Absaugung die Tischoberfläche und der Tischunterbau auf derartige Ausbreitungen kontrolliert und jegliche Flüssigkeiten entfernt werden. Der Vergleich der Formaldehyd-Massenströme in der Tischabluft je Tätigkeit (**siehe Tabelle 5**) lässt sehr deutlich die hohen Emissionen bei der Tätigkeit „Asservate entsorgen“ erkennen. Der Formaldehyd-Massenstrom in der Tischabluft liegt für das Asservate entsorgen bei vergleichbarem Absaugvolumenstrom ca. fünffach höher als für das Zuschneiden und sogar etwa um den Faktor 14 höher als beim Umfüllen. Die Betrachtung der Expositionswerte macht hingegen deutlich, dass der hohe Formaldehyd-Massenstrom in der Tischabluft beim „Asservate entsorgen“ auch durch einen besonders hohen Erfassungsgrad zu erklären ist. Denn die beobachteten Expositionen waren für diese Tätigkeit besonders niedrig (Volumenstrom ca. 400 m^3/h). Genauso ist der niedrige Wert des Formaldehyd-Massenstroms in der Tischabluft beim Umfüllen durch einen besonders schlechten Erfassungsgrad bei dieser Tätigkeit zu begründen, wie die hohen Expositionswerte für diese Tätigkeit zeigen (Volumenstrom ca. 400 m^3/h). Die Höhe der Exposition wird also immer durch die Höhe der Emission einerseits und die Wirksamkeit der Erfassung andererseits beeinflusst.

Es wurde deutlich, dass das Umfüllen von Formaldehydlösungen zu teilweise sehr hohen Expositionen führte. Eine Grenzwerteinhaltung war in den Versuchen erst bei einem Absaugvolumenstrom von ca. 1 000 m^3/h möglich. Die entscheidende Messgröße ist zwar auch hier die Absauggeschwindigkeit, die jedoch bei den nachstellenden Versuchen nicht messtechnisch ermittelt wurde. Sie korreliert aber mit dem Absaugvolumenstrom und ist außerdem von der abgesaugten Fläche und der Gestalt des Lochblechs abhängig. Naheliegende Erklärungen für die hohen erforderlichen Luftmengen sind zum einen der größere vertikale Abstand zur Tischoberfläche, der eine Verschlechterung der Erfassung bewirkt. Denn wie mit den Versuchen zur Strömungsgeschwindigkeit gezeigt wurde, nimmt die induzierte Geschwindigkeit mit steigendem Abstand zur Tischoberfläche deutlich ab, was eine schlechtere Absaugung der Dämpfe bedeutet (siehe Messreihen zur Strömungsgeschwindigkeit in Anhang B). Zum anderen führen die großen Phasengrenzflächen, die durch das Umfüllen entstehen, vermutlich zu hohen Emissionen. Den hohen Expositionswerten für die Tätigkeit „Umfüllen“, wie sie hier durchgeführt wurde, liegt also vermutlich eine Kombination aus hoher Emissionsrate und niedrigem Erfassungsgrad zugrunde. Es ist zu erwarten, dass das „Asservate entsorgen“ zwar ähnlich hohe Emissionen verursacht, die jedoch in der beschriebenen Versuchsanordnung sehr viel besser erfasst wurden (niedrige Expositionen, hoher Formaldehyd-Massenstrom in der Tischabluft). Es wurde deutlich, dass die Untertischabsaugung nur für Tätigkeiten, die nah an der Tischoberfläche stattfinden, eine wirksame technische Schutzmaßnahme darstellt. Für emissionsverursachende Tätigkeiten, die nicht unmittelbar auf der Tischoberfläche stattfinden können, ist zur Einhaltung des Arbeitsplatzgrenzwertes für Formaldehyd eine Einhausung mit Absaugung oder ein Laborabzug erforderlich.

Auffällig ist, dass die gemessenen Expositionen in den nachstellenden Versuchen im Schnitt deutlich niedriger lagen als Expositionen aus realen, von der BGW durchgeführten Arbeitsplatzmessungen in Pathologien. Dies könnte auf zusätzliche Emissionsquellen zurückzuführen sein, die an realen Arbeitsplätzen vorhanden sind (z. B. Mülleimer, verunreinigte Geräte und Instrumente, weitere Behältnisse) und die in den Laborversuchen ausgeschlossen waren. Weitere Unterschiede in den Randbedingungen, wie die Nähe des Pathologen zum Präparat, könnten ebenfalls zu der beobachteten Differenz führen.

7 Fazit

In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurde der Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die Exposition gegenüber Formaldehyd bei pathologietypischen Tätigkeiten untersucht. Die Wirksamkeit der Untertischabsaugung als technische Schutzmaßnahme konnte unter Einhaltung definierter Bedingungen für die Tätigkeiten „Zuschneiden“ und „Asservate entsorgen“ bestätigt werden. Für Tätigkeiten, die in größerem Abstand zur Tischoberfläche stattfinden, wie das Umfüllen von Formaldehydlösungen aus/in Kanister, hat sich die Untertischabsaugung nicht als wirksame Schutzmaßnahme erwiesen. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche können Empfehlungen für die Umsetzung tätigkeitsspezifischer Schutzmaßnahmen abgeleitet werden (**Tabelle 6**).

Tabelle 6:
Empfehlungen für tätigkeitsspezifische Schutzmaßnahmen

Tätigkeit	Empfohlene Schutzmaßnahmen
Allgemein	• Einsatz einer Haube (halboffene Erfassung), wenn möglich • Emissionsquellen erkennen und minimieren oder vermeiden: z. B. mit Formaldehydlösung befüllte Behältnisse nur so oft und lang wie nötig öffnen, möglichst verschlossen halten oder umgehend wieder verschließen • mit Formaldehydlösung und Gewebeproben befüllte Behältnisse möglichst verschlossen entsorgen • Konsequente Kontrolle auf und Beseitigung von Ausbreitungen der Formaldehydlösung auf und unter dem Lochblech vor Abschaltung der Absaugung • Nicht vermeidbare Emissionsquellen (z. B. Mülleimer, die getränkte Zellstofftücher enthalten) in den Erfassungsbereich einer Absaugung bringen
Zuschneiden	• Lochblechabsaugung mit Absaugvolumenstrom von mind. 500 m^3/h je 1 m^2 Tischfläche • Absaugfläche/Abstand zwischen Schneidbrett und Tischvorderkante (Pathologe)
Asservate entsorgen	• Absaugung der Sammelbehälter für Gewebeproben und Formaldehydlösung • Abgießen der Flüssigkeiten im Erfassungsbereich einer wirksamen Absaugung
Umfüllen von Formaldehydlösungen/ Chemikalienwechsel	• Verwendung eines Laborabzuges oder einer Einhausung mit Absaugung (halboffene Erfassung)

Literatur

[1] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen; konsolidierte nicht rechtsverbindliche Fassung vom 20.04.2023

[2] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). Ausg. 1/2006 BArBl. (2006) Nr. 1, S. 41-55, zul. geänd. GMBl. (2023) Nr. 35, S. 755-756

[3] Wegscheider, W.; Brohmann, P. et.al.: Expositionsermittlungen in Pathologien von 2016-2019-Schwerpunkt Formaldehyd. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 80 (2020) Nr. 9, S. 349-360

Danksagung

Besonderen Dank möchten wir an die Firma Vogel MedTec GmbH richten, die uns freundlicherweise den Pathologie-Absaugtisch inkl. Haube für die Realisierung der nachstellenden Versuche zur Verfügung gestellt hat. Außerdem möchten wir uns beim MVZ-Zentrum für Pathologie und Zytodiagnostik GmbH für die Unterstützung und Beratung bezüglich der pathologietypischen Arbeitsweisen herzlich bedanken.

Anhänge

- Anhang A: Messverfahren und Dokumentation (Gefahrstoffmessungen)
- Anhang B: Lüftungstechnische Untersuchungen (inkl. Versuchsaufbau)
- Anhang C (als separate Exceldatei bei den Autor*innen verfügbar): Messwerte in Tabellenform, nach Tätigkeit
- Anhang D: Statistische Auswertung

Anhang A: Messverfahren und Dokumentation

1 Probenahme

Die Probenahme erfolgte gemäß den Vorgaben des Messsystems Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (MGU).

Für die Probenahme wurden Probenahmepumpen vom Typ GSA 4000 für den Volumenstrom von 1,33 l/min. und Gillian PP1 für den Volumenstrom von 0,33 l/min verwendet. Als Probenträger wurden die vom Labor bereitgestellten Standardprobenträger für Formaldehyd vom Typ „Waters Sep-Pak XPoSure“ (Codierung: 817) verwendet. Die Kapazität des Probenträgers 817 reicht bis zu einem Probenluftvolumen von 120 Litern zur Erfassung des zweifachen Arbeitsplatzgrenzwertes (AGW) für Formaldehyd. Zur Überwachung der Konzentrationen in der Kabine wurde bei Erwartung von vergleichsweise geringen Konzentrationen der Volumenstrom bei einer Probenahmedauer von 15 Minuten (Kurzzeitmessung) auf 1,33 l/min eingestellt. Dies betraf sowohl die personengetragene Messung als auch die stationären Messungen. Die Messungen in der Tischabluft erfolgten mit einem Probenahmevolumenstrom von 0,33 l/min., da hier höhere Konzentrationen zu erwarten waren. Vor und nach jeder Messserie (maximal drei Einzelmessungen) wurden die Absaugvolumenströme kontrolliert.

Probenahmekenndaten:

- Probenträgerart: Waters Sep-Pak XPoSure Kartusche (Codierung: 817)
- Probenahmesystem: PAS-Pumpe (Codierung: 511)
- Volumenstrom: 1,33 l/min (Messungen in der Kabine)
- Volumenstrom: 0,33 l/min (Messung in der Abluft)
- Probenahmedauer: 15 min
- Analysenkennung: 52 (Aldehyde)

2 Dokumentation

Jede einzelne Messung wurde entsprechend dem Beispiel-Schema auf der nächsten Seite dokumentiert.

3 Aufarbeitung und analytische Bestimmung

Die analytische Bestimmung erfolgte entsprechend dem im MGU beschriebenen Verfahren „Aldehyde, AK 52“, das in der IFA-Arbeitsmappe unter der Kennzahl 6045 beschrieben ist. Zur Probenaufarbeitung wurden die beaufschlagten Sep-Pak-Kartuschen mit Acetonitril in einen Messkolben eluiert und nach Ansäuern mit Phosphorsäure mit Acetonitril bis zur Marke aufgefüllt. Die Messkolben wurden anschließend 48 Stunden im Kühlschrank gelagert.

Von der Probenlösung wurde mittels einer Kolbenhubpipette Flüssigkeit abgenommen, in ein Autosamplervial pipettiert und mittels Hochleistungsflüssigchromatographie und Diodenarray-Detektion analysiert.

Die Verfahrenskenndaten für Formaldehyd sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Arbeitsbereich der Kalibrierung	0,10 bis 1,0 µg/mL
Kalibrierfunktionstyp	Funktion 1. Grades, mit Achsenabschnitt
Verfahrensvariationskoeffizient	0,5 %
Präzision (S_x) im Mindestmessbereich	S_x = 2,28 % bei β = 0,062 mg/m³ S_x = 0,76 % bei β = 0,62 mg/m³ S_x = 2,52 % bei β = 1,24 mg/m³
Mittlere Wiederfindungsrate	97,9 %
Bestimmungsgrenze der analytischen Bestimmung	0,038 µg/ml
Bestimmungsgrenze über das Gesamtverfahren für ein Probenluftvolumen von 40 l	**0,010 mg/m³**

Beispiel-Schema, Versuchsreihe: (25.03.2021)
Versuch Nr. 11, Wiederholung 1

Die Probenindividual-Nr. setzt sich wie folgt zusammen:
Versuchs-Nr.-Probenahmestelle-Wiederholungs-Nr.

Randbedingungen der Messung:

Versuch Nr. 11	Wiederholung 1
Absaugvolumenstrom (m^3/h)	400
Haube geöffnet; großes Schneidbrett	

Versuch Nr. 11; Probenahmestellen:

Probenahmestelle	Pathologe Personen-getragen	Tischstationär	Assistenz	Raumzuluft	Raumluft	Abluft
Proben-Individual Nr.	11-01-01	11-02-01	11-03-01	11-04-01		11-06-01
Pumpen Nr.:	1199	0930	0933	1196		1005
Messung Start	12:43					
Messung-Ende	12:58					
Messdauer (Min)	15					
Volumenstrom Messgerät-Nr.:	0228					
Volumenstrom vor der Probenahme (l/min)	1,335	1,331	1,330	1,335		0,338
Volumenstrom nach der Probenahme (l/min)	s. Wiederholung 3					
Probenahmevolumen (l)	20,02	19,97	19,95	20,02		5,07

Anhang B: Lüftungstechnische Untersuchungen

1. Versuchsaufbau
2. Beschreibung der Nebelaerosolversuche
3. Ansauggeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Absaugvolumenstroms und weiterer Randparameter
4. Versuche mit unterschiedlichen Messhauben

1. Versuchsaufbau

Alle Versuche fanden in einer Prüfkabine (**Abbildungen B.1** und **B.2**) statt.

Für die Versuche wurde ein Pathologietisch der Fa Vogel MedTec verwendet. Der Pathologietisch kann sowohl frei ansaugend als auch mit einer Haube ausgestattet werden.

In der Mitte des Tisches befindet sich eine absaugbare Fläche von 0,65 x 0,9 m. Diese Fläche wird durch drei Lochbleche mit den Abmessungen 0,3 x 0,65 m abgedeckt. Jedes dieser Lochbleche hat 137 Löcher mit einem Durchmesser von 12 mm und einem Fingerloch mit einem Durchmesser von 25 mm.

Abbildung B.1:
Seitenansicht der Prüfkabine

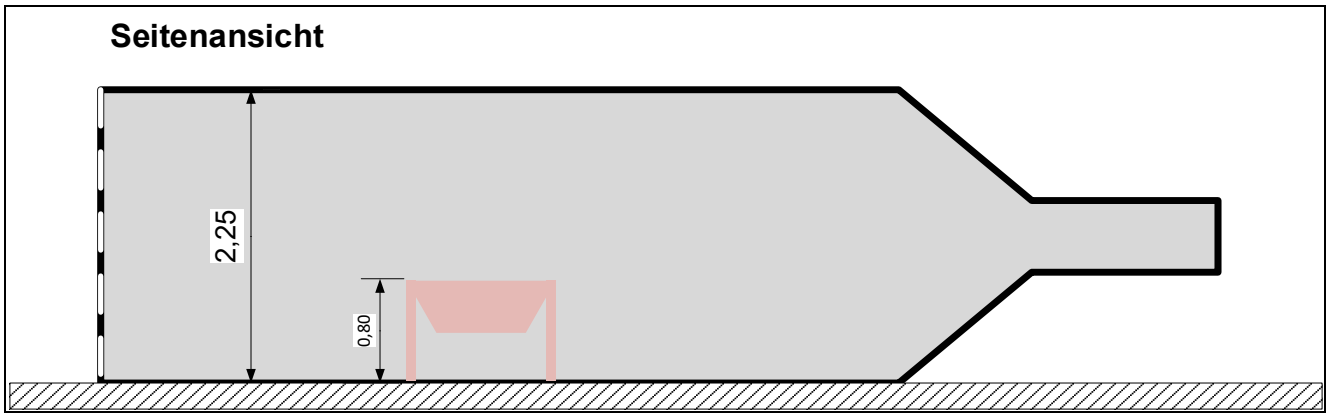


Abbildung B.2:
Aufsicht der Prüfkabine

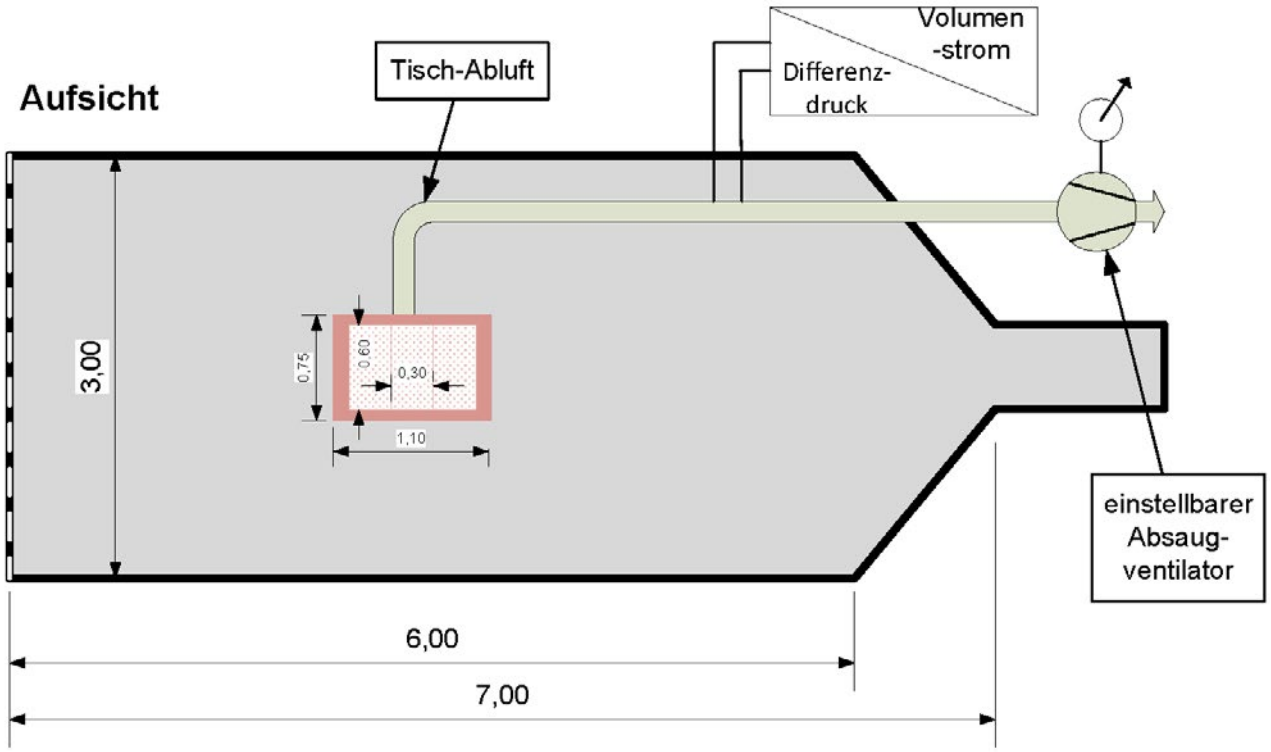
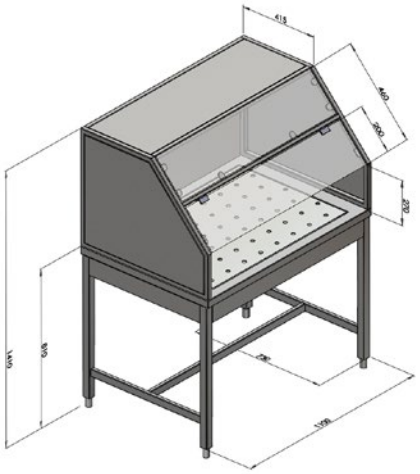


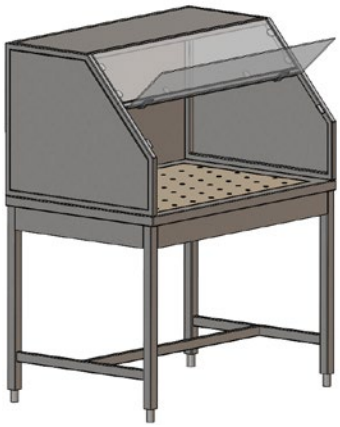
Abbildung B.3:
Verwendete Varianten des Pathologietischs



Pathologietisch ohne Haube



Pathologietisch mit geschlossener Haube



Pathologietisch mit geöffneter Haube

Über einen einstellbaren Ventilator und davor geschaltetem Staugitter inkl. der Messstrecke konnten Absaugluftvolumenströme zwischen 100 und 1 250 m^3/h realisiert werden.

Für einige Versuche wurden Weithals-Kunststoffflaschen mit einem Durchmesser von 80 mm und eine Lagerwanne mit den Abmessungen 130 x 200 mm auf der abgesaugten Fläche positioniert.

Für die Zuschneideversuche wurden zwei verschiedene Schneidbretter verwendet. Das große Schneidbrett wurde für einzelne Versuche mit Abstandhaltern (8 mm) zur Vorderkante ausgestattet, um eine Absaugung zur vorderen Tischkante zu bewirken. Beim kleinen Schneidbrett wurde bei einigen Versuchen die vordere Kante (Lochbrettreihe) abgeklebt, damit großes und kleines Schneidbrett vergleichbare Versuchsbedingungen hatten.

In den **Abbildungen B.4** bis **B.9** sind die Details dargestellt.

2. Beschreibung der Nebelaerosolversuche

Zur visuellen Überprüfung der Strömungen am Pathologietisch wurde ein Verdampfer-Nebelgerät Typ Tiny S der Fa. Look Solutions verwendet. Bei den Einströmversuchen wurde hiermit Theaternebel außerhalb des Erfassungsbereiches des Absaugfeldes des Pathologietisches ausgebracht und es wurde visuell kontrolliert, wie der Nebel in das Absaugfeld eingesaugt wird. Zur Dokumentation wurden Videoaufnahmen angefertigt. Ein Bild aus einem Video ist mit **Abbildung B.10** dargestellt.

Bei der Beurteilung der Einströmvorgänge zeigte sich, dass überwiegend über die vordere Tischkante die Luft einströmt. Über die Seiten sowie über die hintere Tischkante strömt deutlich weniger ein. Im oberen Bereich der Haube wird weniger eingesaugt als im unteren Bereich der Haube.

Abbildung B.4:
Skizze mit Bemaßung für die Versuche mit kleinem Schneidbrett

Seitenansicht

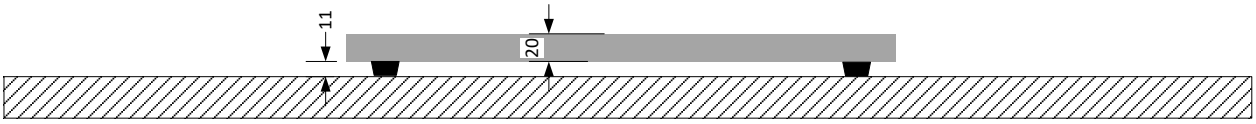


Abbildung B.5:
Skizze mit Bemaßung für die Versuche mit kleinem Schneidbrett

Aufsicht

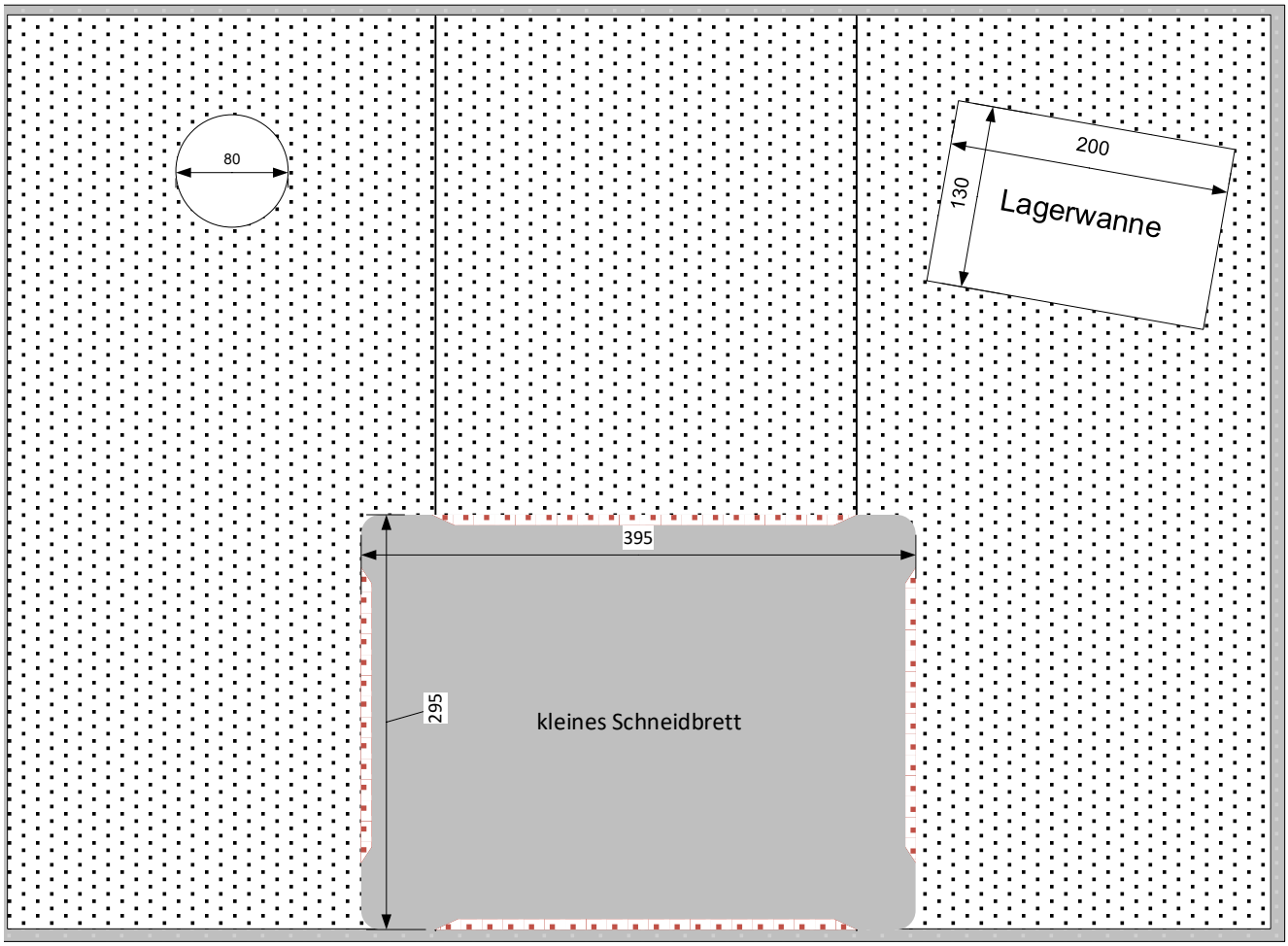


Abbildung B.6:
Skizze mit Bemaßung für die Versuche mit großem Schneidbrett

Seitenansicht

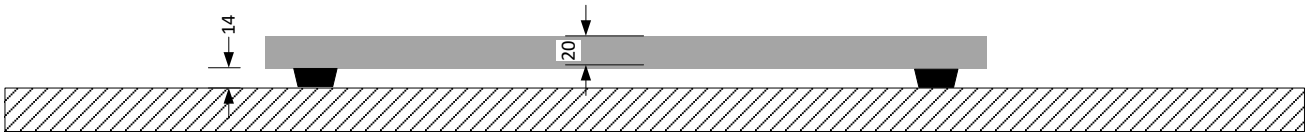


Abbildung B.7:
Skizze mit Bemaßung für die Versuche mit großem Schneidbrett ohne Abstand

Aufsicht

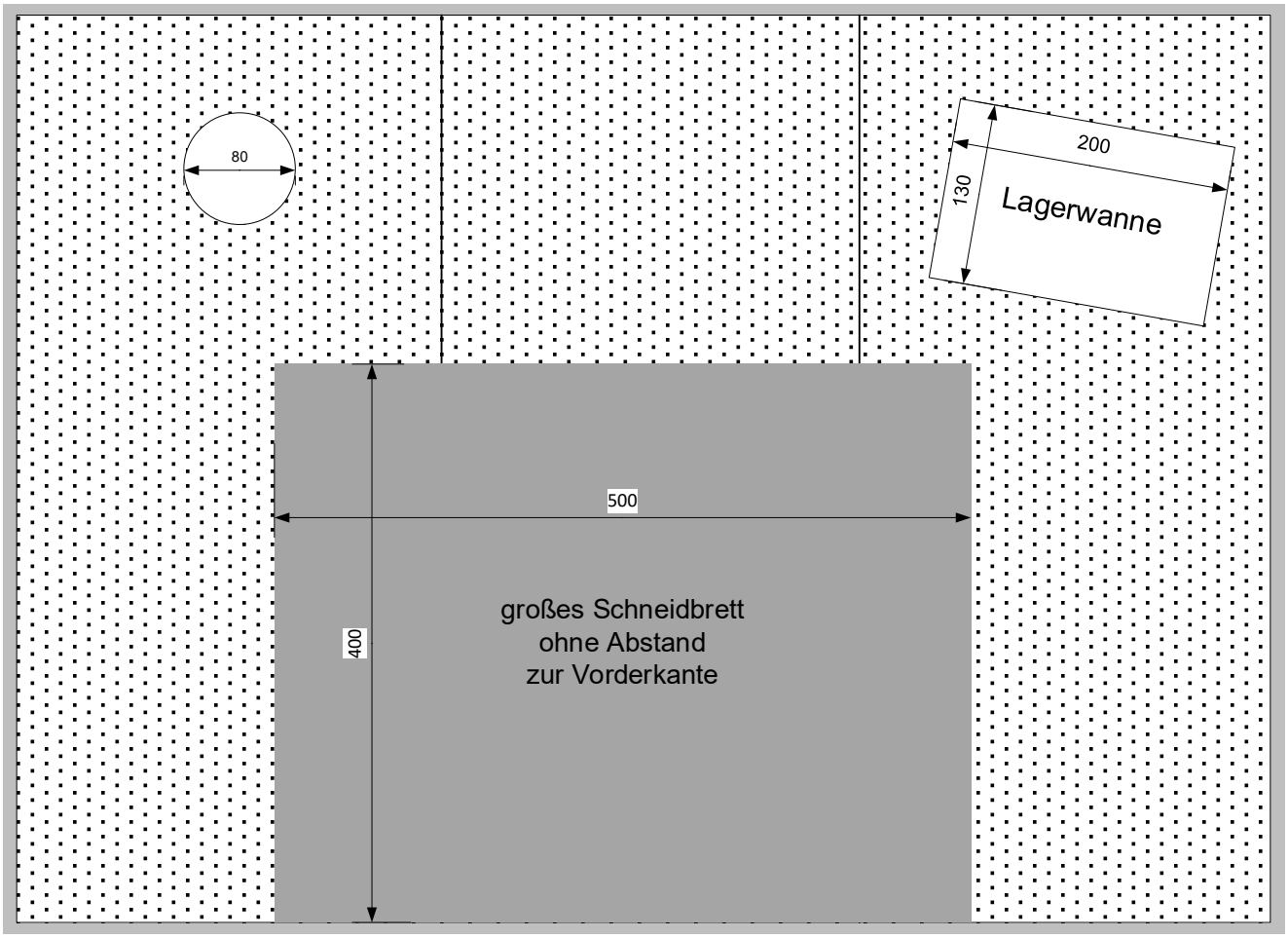


Abbildung B.8:
Skizze mit Bemaßung für die Versuche mit großem Schneidbrett zur Vorderkante

Seitenansicht

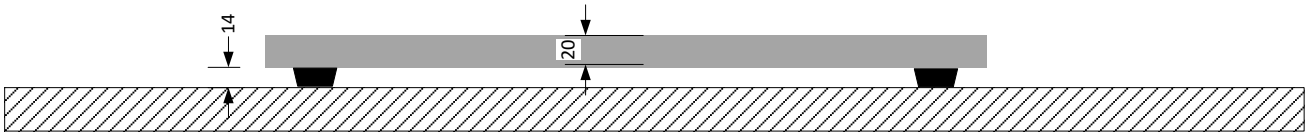


Abbildung B.9:
Skizze mit Bemaßung für die Versuche mit großem Schneidbrett mit Abstand zur Vorderkante

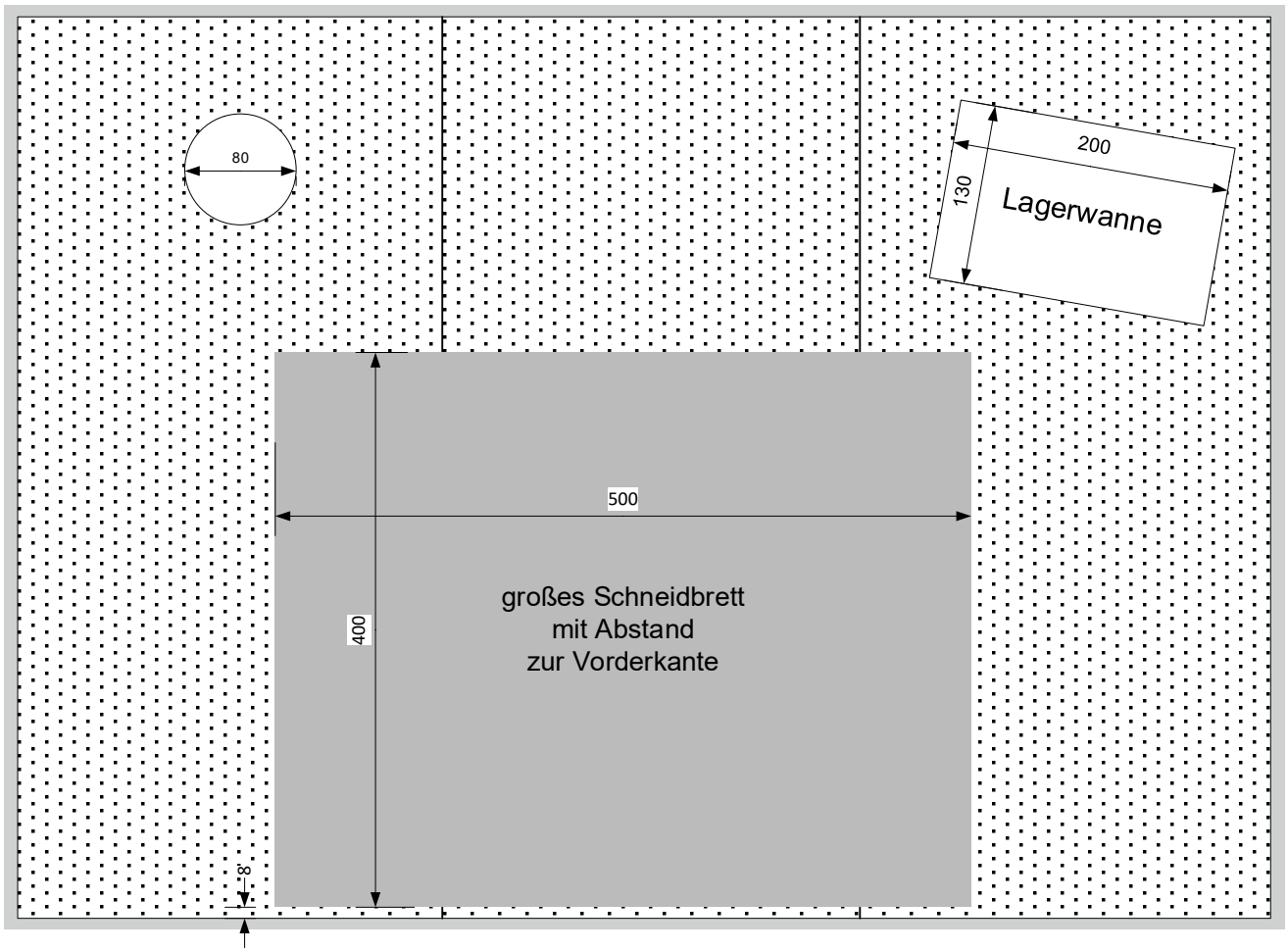




Abbildung B.10:
Versuchsaufbau der Nebelaerosolversuche

Abbildung B.11:
Lochplattensystem

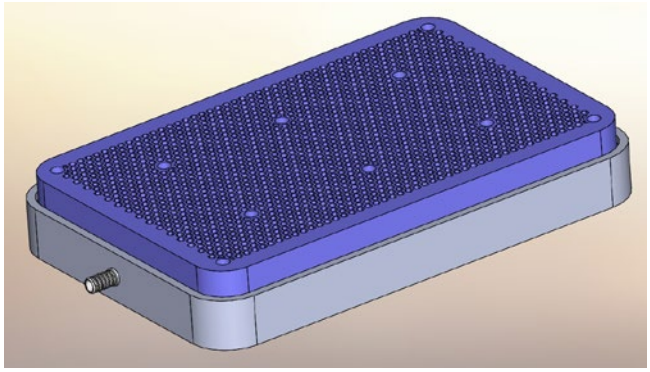
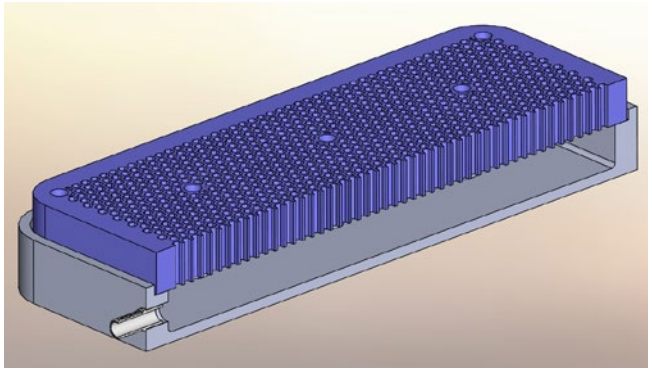


Abbildung B.12:
Lochplattensystem im Schnitt



Zur Simulation von Ausbreitungsvorgängen mit geringer Eigendynamik ist das Verdampfer-Nebelgerät nicht geeignet, da der Ausstoß von Nebelfluid mit einem Blasstrahl mit hoher Luftgeschwindigkeit erfolgt. Damit diese Ausbreitungsvorgänge auch nachgestellt werden konnten, wurde eine flächige Kammer mit einer Lochplatte versehen, wobei seitlich mittels Überdruck Nebelfluid eingebracht werden konnte, das dann über die Lochplatte von der Größe 190 x 290 mm induktionsarm ausgebracht werden konnte. Die Höhe des Systems betrug 45 mm.

Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Einströmung von Luft im Wesentlichen über die untere Vorderkante des Tisches erfolgte. Mit höherem Absaugvolumenstrom erhöhte sich auch erwartungsgemäß sichtbar die Strömungsgeschwindigkeit.

Auch bei Einsatz der Haube (halboffene Erfassung) erfolgte die Einströmung über die untere Vorderkante des Tisches.

Diese bisher beschriebenen Versuche fanden alle mit dem kleinen Schneidbrett oder mit dem großen Schneidbrett mit Abstand zur Vorderkante statt. Ein wesentlich anderes Bild ergab sich, wenn kein Abstand und somit auch kein Absaugschlitz zwischen dem Pathologen und dem Schneidbrett vorhanden waren. Selbst bei mittleren Absaugvolumenströmen ist der Nebel infolge des durch die Person erzeugten thermischen Auftriebes an der Person nach oben geströmt. Dies wird noch verstärkt, wenn die Unterarme rechts und links Teile des Schneidbrettes abdecken.

Als Fazit ist festzustellen, dass ein Absaugschlitz zwischen Schneidbrett und Pathologe die Erfassung der Emissionen voraussichtlich verbessert.

3. Ansauggeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Absaugvolumenstroms

Zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Ansauggeschwindigkeiten wurden insgesamt vier Versuchsreihen durchgeführt, bei denen mit Hilfe eines Flügelradanemometers der Fa. Ahlborn (**Tabelle B.1**) die Luftgeschwindigkeit über dem Absaugfeld und bei Verwendung der Haube, die Luftgeschwindigkeiten in den Öffnungsquerschnitten ermittelt wurden. Bei den Messungen ohne Haube wurde das Flügelrad auf die festgelegten Positionen der Lochplatte gelegt, bei den Messungen mit Haube wurde das Flügelrad mittels Halterungen so positioniert, dass das Flügelrad immer senkrecht zur Öffnungsfläche positioniert war (**s. Abbildungen B.14** bis **B.17**).

Abbildung B.13:
Nebeldosiersystem auf dem kleinen Schneidbrett in Pathologietisch mit geöffneter Haube

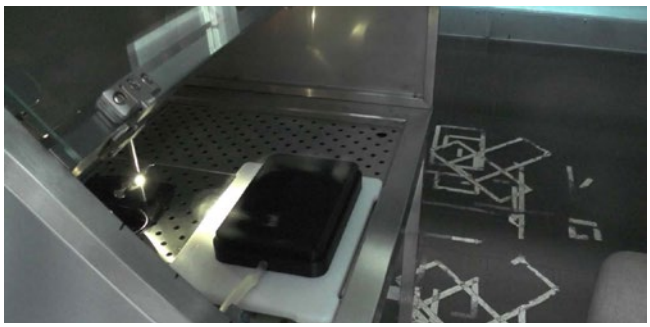


Abbildung B.14:
Ermittlung der Absauggeschwindigkeit auf dem Absaugfeld (für Versuchsreihe1 und 2)

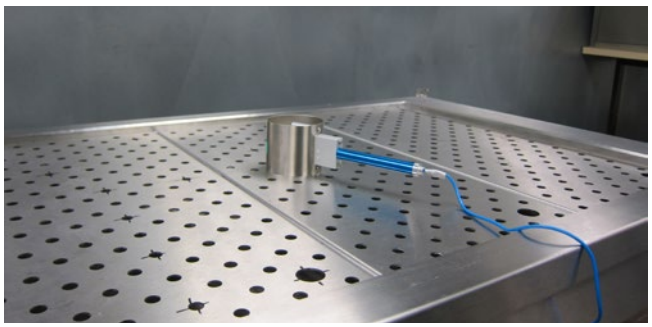


Abbildung B.15:
Beispielhafte Darstellung der Position des Flügelrades bei der Bestimmung der Einströmgeschwindigkeit (für Versuchsreihe 3 und 4)

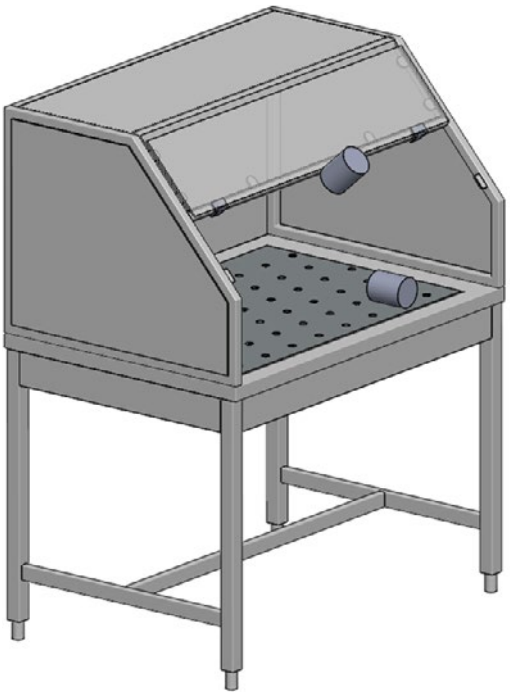


Tabelle B.1:
Typ und technische Daten des Flügelradanemometers der Fa. Ahlborn

Typ	FVA 915-SMA1
Durchmesser	80 mm
Messbereich	0,2 m/s bis 20 m/s
Genauigkeit	±0,5 % vom Endwert; ± 1,5 % vom Messwert

Auf der abgesaugten Fläche von 650 x 900 mm befinden sich 411 Löcher mit einem Durchmesser von 12 mm und drei Löcher mit einem Durchmesser von 25 mm.

In jeder Versuchsreihe wurden die folgenden fünf Absaugvolumenströme vorgegeben:

- a: 300 m^3/h
- b: 400 m^3/h
- c: 550 m^3/h
- d: 700 m^3/h
- e: 850 m^3/h

Die je Versuchsreihe messtechnisch ermittelten IST-Volumenströme sind in den Ergebnistabellen dargestellt.

Abbildung B.16:
Ermittlung der Einströmgeschwindigkeit in der Einströmöffnung der Haube

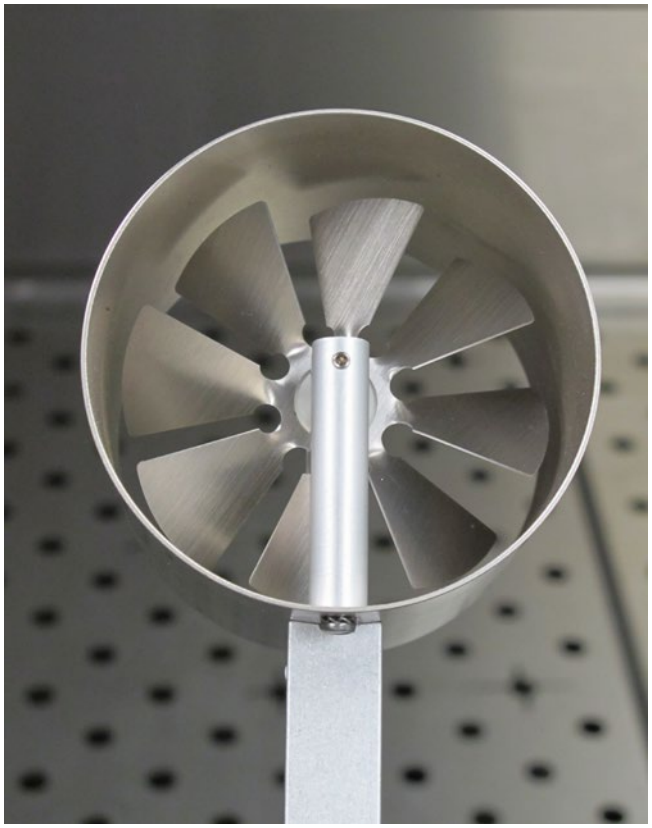
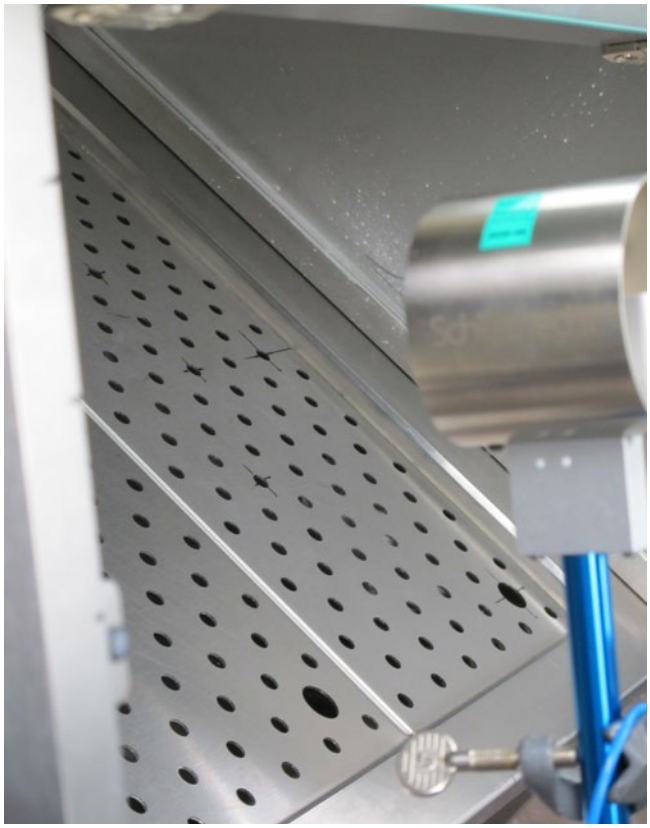


Abbildung B.17:
Ermittlung der Einströmgeschwindigkeit in der Einströmöffnung der Haube



Bei vier Versuchsreihen wurden die Luftgeschwindigkeiten ermittelt.

- Versuchsreihe Nr.1: Messung der Luftgeschwindigkeiten ohne Haube und mit kleinem Schneidbrett
- Versuchsreihe Nr. 2: Messung der Luftgeschwindigkeit ohne Haube und mit großem Schneidbrett

Bei den nachfolgenden zwei Versuchen mit installierter Haube standen keine Gegenstände auf der abgesaugten Fläche.

- Versuchsreihe Nr. 3: Messung der Luftgeschwindigkeit im Erfassungsquerschnitt bei mit Haube versehenem Pathologietisch. Der Haubendeckel (Glasscheibe) ist geschlossen
- Versuchsreihe Nr. 4: Messung der Luftgeschwindigkeit im Erfassungsquerschnitt bei mit Haube versehenem Pathologietisch. Der Haubendeckel (Glasscheibe) ist geöffnet

3.1 Ergebnisse der Versuchsreihe 1

In der nachfolgenden **Abbildung B.18** sind die Messpunkte graphisch dargestellt. In der nachfolgenden **Tabelle B.2** und der **Abbildung B.19** sind die Ergebnisse dargestellt.

Abbildung B.18:
Anordnung der Messpunkte

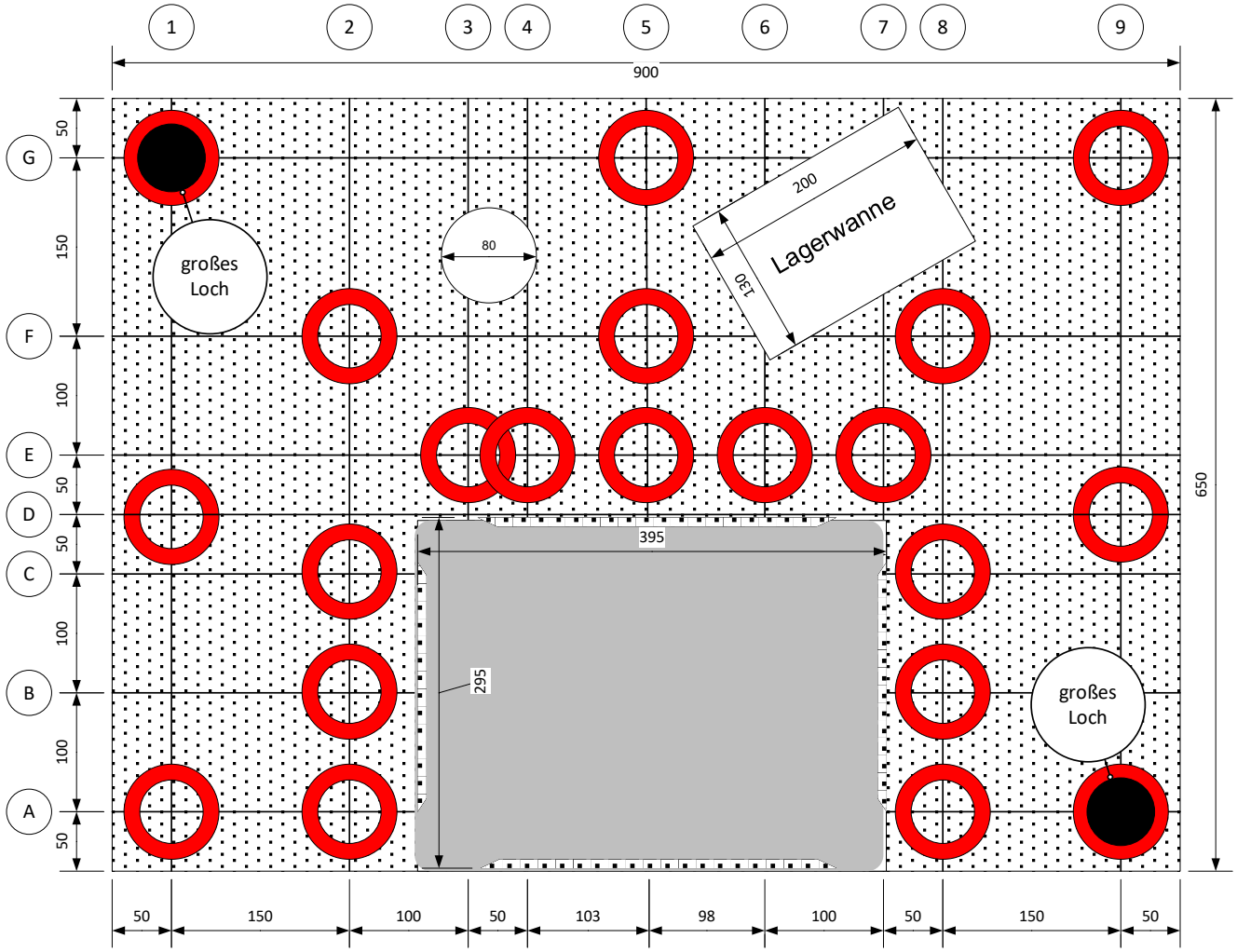


Tabelle B.2:
Ergebnisse der Luftgeschwindigkeitsmessungen

Messpunkt	Versuch 1 a	Versuch 1 b	Versuch 1 c	Versuch 1 d	Versuch 1 e
Absaugvolumenstrom (m^3/h)	290	400	560	700	850
A-1	0,35	0,39	0,48	0,58	0,60
A-2	0,32	0,39	0,46	0,55	0,62
A-8	0,29	0,39	0,47	0,59	0,60
A-9	0,50	0,50	0,73	0,87	1,03
B-2	0,34	0,38	0,45	0,52	0,60
B-8	0,27	0,37	0,50	0,53	0,65
C-2	0,34	0,38	0,48	0,53	0,57
C-8	0,30	0,37	0,50	0,52	0,64
D-1	0,32	0,36	0,40	0,50	0,55
D-9	0,34	0,38	0,47	0,50	0,58
E-3	0,26	0,29	0,37	0,45	0,45
E-4	0,34	0,36	0,47	0,53	0,61
E-5	0,34	0,39	0,48	0,54	0,59
E-6	0,34	0,39	0,48	0,55	0,59
E-7	0,32	0,38	0,48	0,48	0,59
F-2	0,34	0,38	0,46	0,57	0,58
F 5	0,36	0,38	0,45	0,50	0,59
F-8	0,32	0,37	0,49	0,50	0,56
G-1	0,50	0,58	0,68	0,85	1,00
G-5	0,38	0,40	0,49	0,55	0,62
G-9	0,32	0,37	0,48	0,52	0,59
Mittelwert	**0,34**	**0,39**	**0,49**	**0,56**	**0,63**

Die erhöhten Werte an den Messpunkten A-9 und G-1 sind durch die größeren Lochdurchmesser zu erklären. Die geringeren Werte an Messpunkt E-3 sind dadurch zu erklären, dass dieser Messpunkt genau auf der Schnittstelle zweier Lochplatten ohne Öffnungslöcher liegt.

3.2 Ergebnisse der Versuchsreihe Nr.2

In der nachfolgenden **Abbildung B.20** sind die Messpunkte graphisch dargestellt. In der nachfolgenden **Tabelle B.3** und der **Abbildung B.21** sind die Ergebnisse dargestellt.

Abbildung B.19:
graphische Darstellung der Luftgeschwindigkeitsmessergebnisse

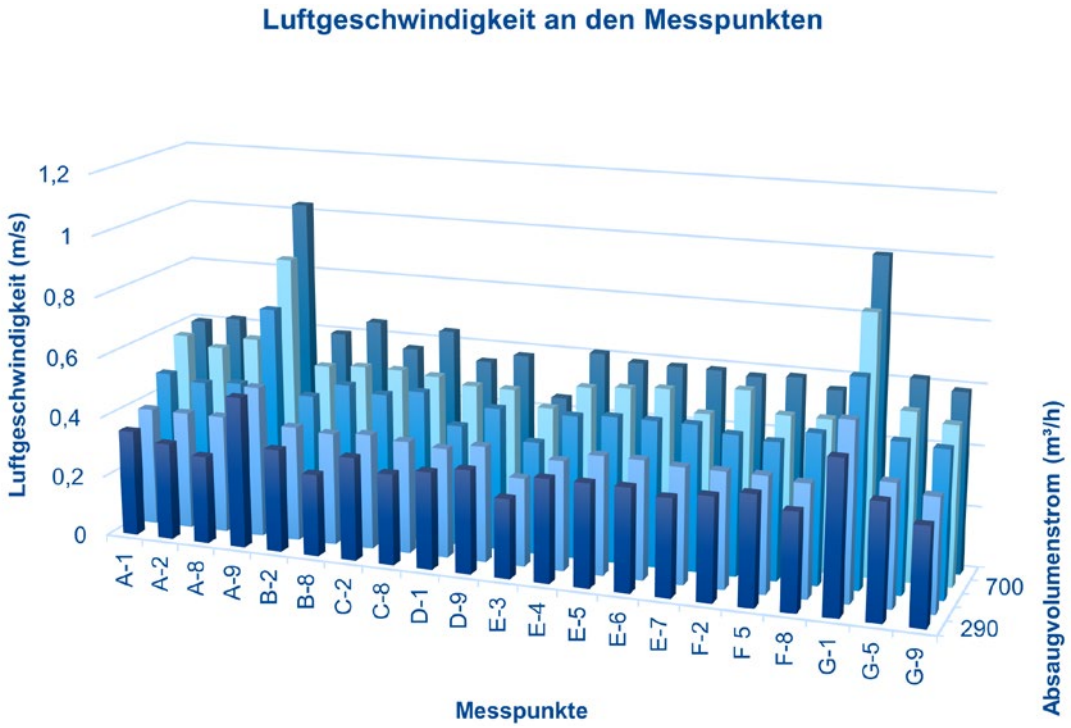


Abbildung B.20:
Anordnung der Messpunkte

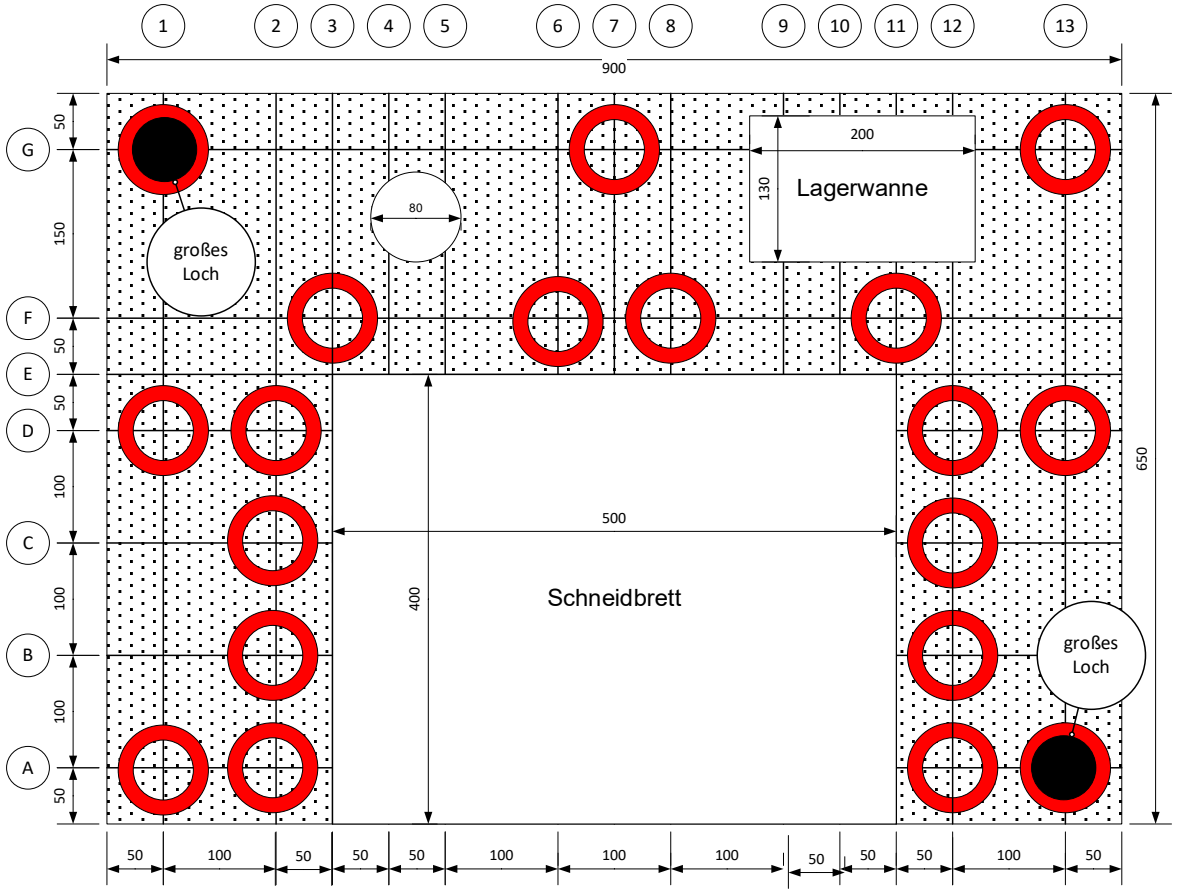
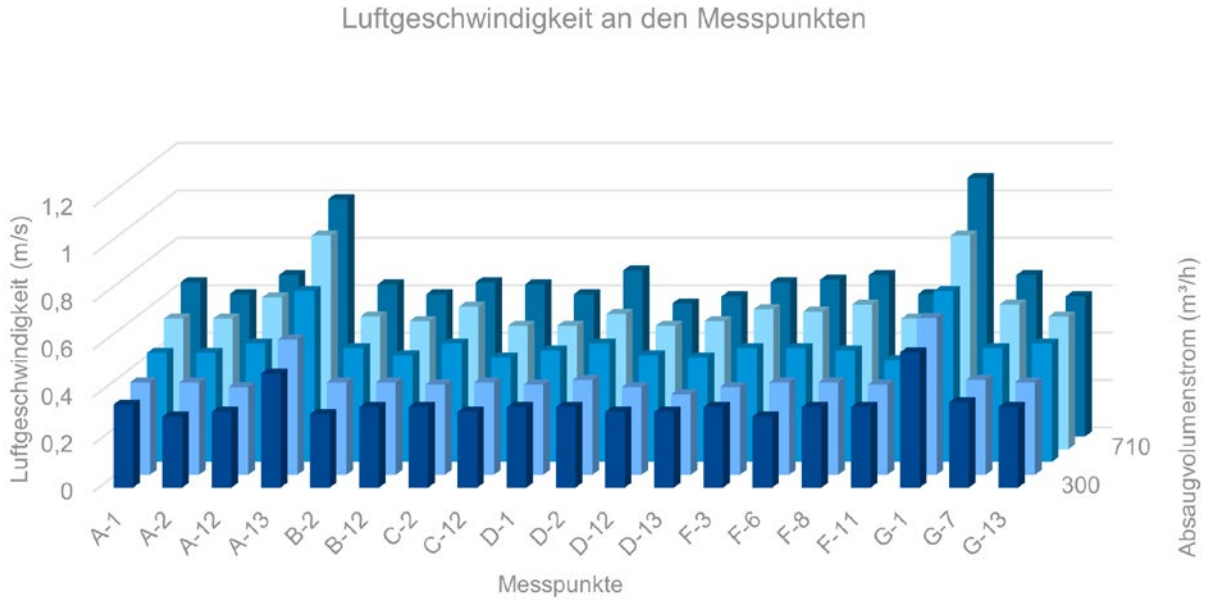


Tabelle B.3:
Ergebnisse der Luftgeschwindigkeitsmessungen

Messpunkt	Versuch 2 a	Versuch 2 b	Versuch 2 c	Versuch 2 d	Versuch 2 e
Absaugvolumenstrom (m³/h)	300	410	560	710	850
A-1	0,35	0,39	0,46	0,55	0,65
A-2	0,30	0,39	0,46	0,55	0,60
A-12	0,32	0,37	0,50	0,64	0,68
A-13	0,48	0,57	0,72	0,90	1,00
B-2	0,31	0,39	0,48	0,56	0,64
B-12	0,34	0,39	0,45	0,54	0,60
C-2	0,34	0,38	0,50	0,60	0,65
C-12	0,32	0,39	0,44	0,52	0,64
D-1	0,34	0,38	0,47	0,52	0,60
D-2	0,34	0,40	0,50	0,57	0,70
D-12	0,32	0,37	0,45	0,52	0,56
D-13	0,32	0,34	0,44	0,54	0,59
F-3	0,34	0,37	0,48	0,59	0,65
F-6	0,30	0,39	0,48	0,58	0,66
F-8	0,34	0,39	0,47	0,61	0,68
F-11	0,34	0,38	0,43	0,55	0,60
G-1	0,57	0,66	0,72	0,9	1,09
G-7	0,36	0,40	0,48	0,61	0,68
G-13	0,34	0,39	0,50	0,56	0,59
Mittelwert	**0,35**	**0,41**	**0,50**	**0,60**	**0,68**

Abbildung B.21:
graphische Darstellung der Luftgeschwindigkeitsmessergebnisse



Wie bei Versuch Nr. 1 auch sind die erhöhten Luftgeschwindigkeiten an den Messpunkten A-13 und G-1 darauf zurückzuführen, dass an diesen Stellen größere Lochdurchmesser vorhanden sind.

3.3 Ergebnisse der Versuchsreihe 3

In der nachfolgenden **Abbildung B.22** sind die Messpunkte graphisch dargestellt.

In der nachfolgenden **Tabelle B.4** und der **Abbildung B.23** sind die Ergebnisse dargestellt.

Abbildung B.22:
Anordnung der Messpunkte in der vorderen Hauben Öffnung (vertikale Messposition, siehe Seitenansicht rechts)

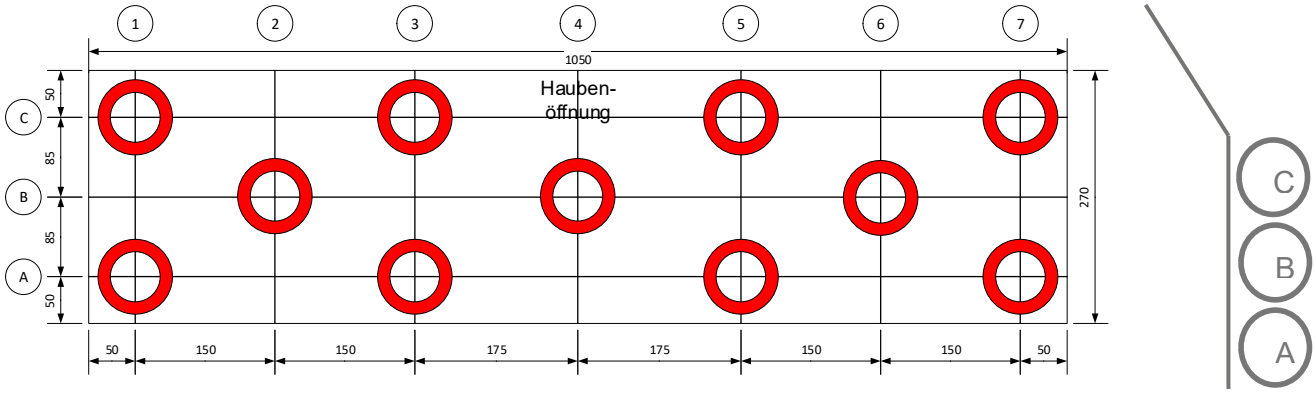


Tabelle B.4:
Ergebnisse der Luftgeschwindigkeitsmessungen

Messpunkt	Versuch 3 a	Versuch 3 b	Versuch 3 c	Versuch 3 d	Versuch 3 e
Absaugvolumenstrom (m³/h)	290	390	560	710	850
A-1	0,34	0,37	0,50	0,60	0,65
A-3	0,40	0,44	0,62	0,64	0,85
A-5	0,43	0,50	0,65	0,79	0,89
A-7	0,34	0,39	0,54	0,68	0,70
B-2	0,27	0,32	0,45	0,55	0,56
B-4	0,32	0,39	0,48	0,55	0,70
B-6	0,34	0,39	0,48	0,56	0,66
C-1	0,27	0,30	0,39	0,52	0,58
C-3	0,30	0,36	0,46	0,55	0,65
C-5	0,32	0,38	0,44	0,54	0,64
C-7	0,34	0,39	0,47	0,54	0,64
Mittelwert	**0,33**	**0,38**	**0,50**	**0,59**	**0,68**

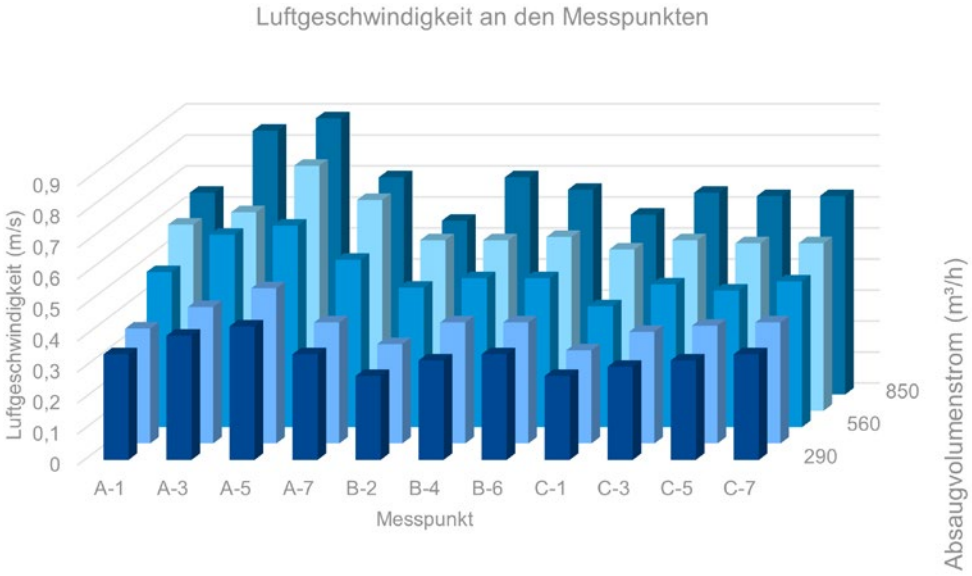


Abbildung B.23:
graphische Darstellung der Luftgeschwindigkeitsmess-ergebnisse

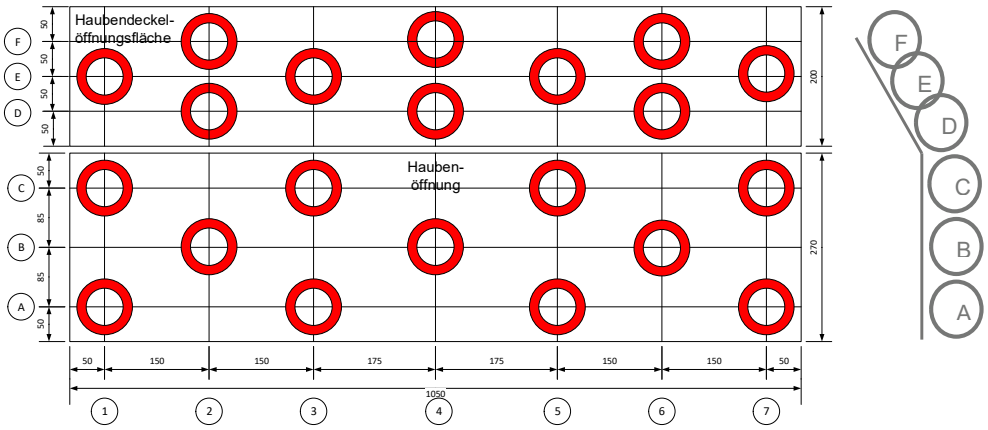


Abbildung B.24:
Anordnung der Messpunkte in der gesamten Öffnungsfläche der Haube (s. Abbildung 19)

Da die Luftgeschwindigkeiten an den Messpunkten der A-Reihe gegenüber den Luftgeschwindigkeiten an den anderen Messpunkten leicht höher liegen, bestätigt sich auch das visuelle Ergebnis der Strömungsuntersuchungen mittels Theaternebel, wobei festgestellt wurde, dass die Luft über die untere Kante in der Mitte des Tisches in das Absaugfeld des Tisches einströmt.

3.4 Ergebnisse der Versuchsreihe 4

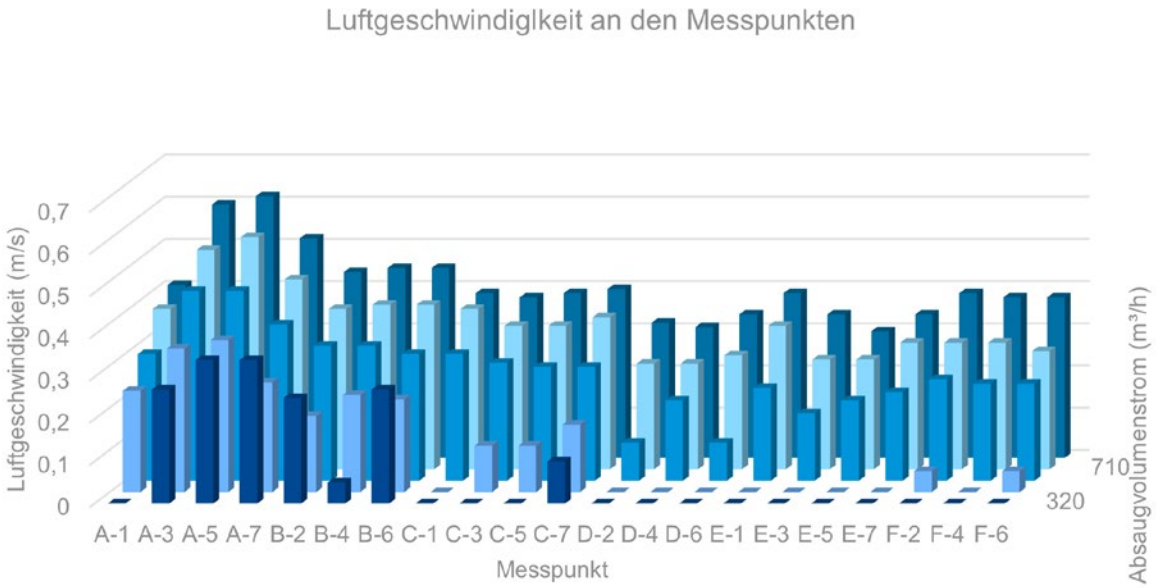
In der nachfolgenden **Abbildung B.24** sind die Messpunkte graphisch dargestellt. In der nachfolgenden **Tabelle B.5** und der **Abbildung B.25** sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle B.5:
Ergebnisse der Luftgeschwindigkeitsmessungen

Messpunkt	Versuch 4 a	Versuch 4 b	Versuch 4 c	Versuch 4 d	Versuch 4 e
Absaugvolumenstrom (m³/h)	320	410	560	710	870
A-1	–	0,24	0,30	0,38	0,41
A-3	0,27	0,34	0,45	0,52	0,60
A-5	0,34	0,36	0,45	0,55	0,62
A-7	0,34	0,26	0,37	0,45	0,52
B-2	0,25	0,18	0,32	0,38	0,44

Messpunkt	Versuch 4 a	Versuch 4 b	Versuch 4 c	Versuch 4 d	Versuch 4 e
B-4	< 0,2	0,23	0,32	0,39	0,45
B-6	0,27	0,22	0,30	0,39	0,45
C-1	< 0,2	< 0,2	0,30	0,38	0,39
C-3	< 0,2	< 0,2	0,28	0,34	0,38
C-5	< 0,2	< 0,2	0,27	0,34	0,39
C-7	< 0,2	< 0,2	0,27	0,36	0,40
D-2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,25	0,32
D-4	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,25	0,31
D-6	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,27	0,34
E-1	< 0,2	< 0,2	0,22	0,34	0,39
E-3	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,26	0,34
E-5	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,26	0,30
E-7	< 0,2	< 0,2	0,21	0,30	0,34
F-2	< 0,2	< 0,2	0,24	0,30	0,39
F-4	< 0,2	< 0,2	0,23	0,30	0,38
F-6	< 0,2	< 0,2	0,23	0,28	0,38
Mittelwert			**0,26**	**0,35**	**0,41**

Abbildung B.25:
graphische Darstellung der Luftgeschwindigkeitsmessergebnisse



Auch hier ist erkennbar, dass wie bei Versuch Nr. 3 die Luft über die untere Kante des Tisches in die Haube einströmt. Nach oben hin ist aufgrund der größeren Öffnungsfläche eine Einströmgeschwindigkeit, zumindest bei den kleineren Absaugvolumenströmen, nicht mehr messbar.

4. Bestimmung der Luftgeschwindigkeiten und der Absaugluftvolumenströme mittels unterschiedlicher Messhauben

Zur Überprüfung, ob direktanzeigende Messhauben geeignet sind, den Absaugvolumenstrom der Flächenabsaugung ausreichend genau zu bestimmen, wurden Versuche mit zwei Messhauben durchgeführt. Bei den Versuchen wurde sowohl eine Haube der Fa. Wöhler (**Abbildungen B.26 und B.28**) als auch eine Haube der Firma Testo (**s. Abbildungen B.27 und B.29**) verwendet.

Die technischen Daten der Volumenstrommesshauben sind in **Tabelle B.6** aufgeführt.

Abbildung B.26:
Bild der Wöhler-Haube auf dem Absaugfeld



Abbildung B.27:
Bild der Testo-Haube auf dem Absaugfeld





Abbildung B.28:
Form und Abmessung der Messebene der Wöhler Haube



Abbildung B.29:
Form und Abmessung der Messebene der Testo-Haube

Tabelle B.6:
technische Daten der Luftvolumenstrommesshauben

	Wöhler-Haube	Testo-Haube
Typ	SWF 236	Testo 440 Klima-Messgerät
Messöffnung	190 x 200 mm; 0,038 m²	Ø: 200 mm; 0,0314 m²
Messbereich	3,6 bis 236 m³/h	0,3 bis 20 m/s (35 m/s)
Genauigkeit	± 3,5 % vom Messwert	± 0,1 m/s + 1,5 % vom Messwert

Die Versuche fanden auf einer nicht mit Utensilien belegten Absaugfläche statt. Insgesamt wurden die Absaugvolumenströme an sechs Messpunkten ermittelt (**Abbildung B.30**).

Bei der Wöhler-Haube, die als Messprinzip ein Hitzedrahtanemometer beinhaltet, wird der durch die Haube durchströmende Luftvolumenstrom direkt ausgegeben. Die Testo-Haube arbeitet mit einem Flügelradanemometer

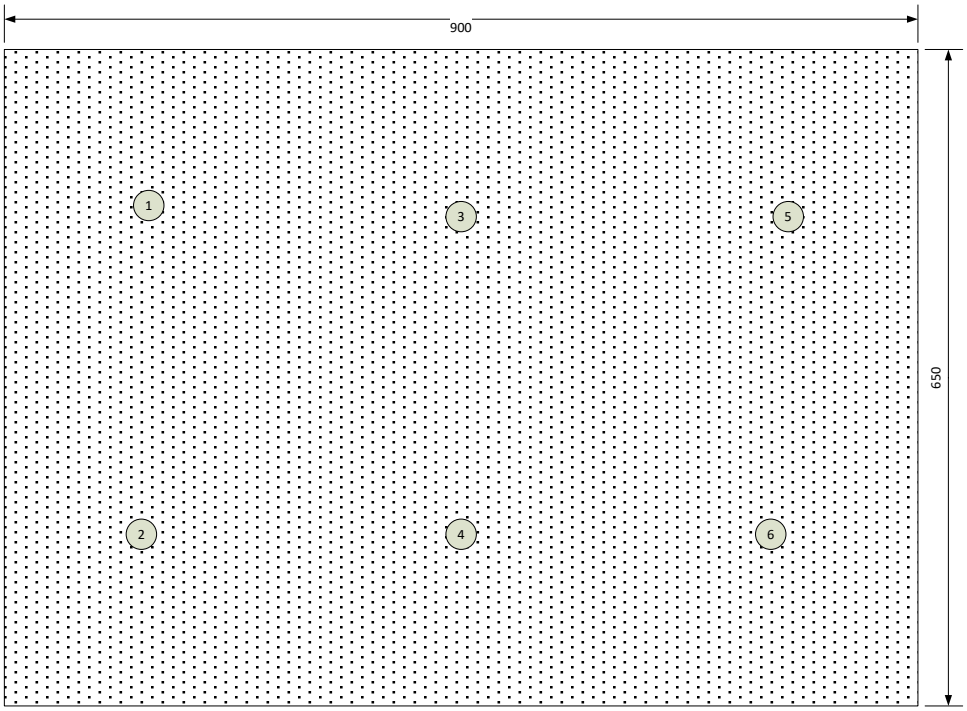


Abbildung B.30:
Anordnung der Messpunkte

als Messprinzip und gibt die Luftgeschwindigkeit und den mit einem internen Kalibrierfaktor versehenen Luftvolumenstrom aus. Dieser Luftvolumenstrom repräsentiert den Luftvolumenstrom, der durch die abgedeckte Fläche der Messgeräte, strömt. Der gesamte abgesaugte Luftvolumenstrom, ist der Luftvolumenstrom der Messgeräte, multipliziert mit dem Quotienten aus gesamter abgesaugter Fläche dividiert durch die abgedeckte Fläche des jeweiligen Messgerätes.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in **Tabelle B.7** aufgelistet.

Tabelle B.7:
Ergebnisse der Versuchsreihe zum Vergleich der Messhauben

Position	Absaugvolumenstrom	Wöhler-Haube		Testo-Haube		
	(Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom (Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom der Absaugfläche (Istwert) in m³/h	Luftgeschwindigkeit des Flügelrades (Istwert) in m/s	Luftvolumenstrom (Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom der Absaugfläche (Istwert) in m³/h
1	108	10	164	0,51	10	186
2		11	175	0,53	11	195
3		11	173	0,51	10	190
4		10	169	0,50	10	186
5		10	154	0,48	10	177
6		8	130	0,45	9	164
Mittelwert		10	161	0,50	10	183

Position	Absaugvolumenstrom	Wöhler-Haube		Testo-Haube		
	(Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom (Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom der Absaugfläche (Istwert) in m³/h	Luftgeschwindigkeit des Flügelrades (Istwert) in m/s	Luftvolumenstrom (Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom der Absaugfläche (Istwert) in m³/h
1	206	13	212	0,65	14	257
2		14	225	0,70	14	266
3		15	240	0,64	15	276
4		14	230	0,70	14	266
5		14	220	0,65	14	253
6		12	186	0,57	11	209
Mittelwert		14	219	0,65	14	254
1	302	20	321	0,86	19	346
2		19	310	0,88	18	339
3		19	314	0,80	17	311
4		20	316	0,78	16	302
5		19	313	0,78	16	302
6		18	295	0,59	13	240
Mittelwert		19	311	0,78	16	307
1	345	24	395	0,97	22	406
2		22	361	0,84	18	330
3		23	379	0,85	19	346
4		23	365	0,92	20	374
5		22	360	0,90	19	361
6		20	329	0,81	17	324
Mittelwert		23	365	0,88	20	357
1	398	25	397	0,96	21	387
2		25	397	0,97	22	410
3		25	407	0,98	22	410
4		23	379	1,01	22	410
5		25	397	1,01	22	406
6		21	335	0,93	19	348
Mittelwert		24	385	0,98	21	395

Position	Absaugvolumenstrom	Wöhler-Haube		Testo-Haube		
	(Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom (Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom der Absaugfläche (Istwert) in m³/h	Luftgeschwindigkeit des Flügelrades (Istwert) in m/s	Luftvolumenstrom (Istwert) in m³/h	Luftvolumenstrom der Absaugfläche (Istwert) in m³/h
1	503	32	510	1,18	27	495
2		31	509	1,27	29	531
3		31	506	1,30	29	544
4		32	510	1,23	28	518
5		30	491	1,20	26	477
6		28	459	1,03	22	413
Mittelwert		31	497	1,20	27	496
1	607	42	674	1,48	32	588
2		37	601	1,33	29	531
3		38	619	1,49	33	614
4		36	575	1,50	34	629
5		39	627	1,58	36	667
6		32	523	1,26	27	508
Mittelwert		37	603	1,44	32	590
1	703	46	741	1,65	40	735
2		44	716	1,51	36	661
3		46	750	1,78	41	758
4		43	690	1,52	40	613
5		42	681	1,65	37	696
6		41	658	1,42	32	598
Mittelwert		44	706	1,59	36	677

Insgesamt sind nur leichte Abweichungen der Werte zwischen den beiden Messsystemen und zum Messwert des Staugitters feststellbar. Beim geringsten Absaugvolumenstrom sind die Abweichungen zum Messwert des Staugitters deutlicher. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich der verwendete frequenzgesteuerte Absaugventilator bei diesem geringen Absaugvolumenstrom an der unteren Einstellgrenze bewegte und deutlichen Schwankungen unterlegen war. Ebenso konnte beobachtet werden, dass der Ablauftrichter für die Entsorgung (Position 6) einen deutlichen Einfluss auf die sich ergebene Luftverteilung hat. Trotz mehrmaliger Überprüfungen und dem Versuch, die beim geringsten Volumenstrom deutlichen Abweichungen zum Wert des Staugitters zu erklären, blieb die Ursachensuche erfolglos.

Die angezeigte Luftgeschwindigkeit des Flügelrades bei den Messungen mit der Testo-Haube wurde ebenfalls dargestellt, da die BGW diesen Wert für die Überprüfung der Absaugfelder verwenden möchte.

Anhang D: Statistische Auswertung

1 Allgemeines (Messorte und Einflussgrößen)

Die Konzentration von Formaldehyd wird an drei Messorten bestimmt:

- personengetragen am Probanden,
- stationär über dem Tisch,
- und stationär in der Abluft.

Über dem Tisch und in der Abluft sind zum einen Formaldehydproben genommen worden. Zum anderen ist die Formaldehydkonzentration an diesen Messorten mit direktanzeigenden Geräten bestimmt worden. Die Abweichungen zwischen den beiden Verfahren sind zum Teil beträchtlich und folgen keinem offensichtlichen Trend. Daher beschränken sich die folgenden Auswertungen auf die Messungen mit Probenahme.

Die Messungen am Probanden sollten am besten die Exposition beschreiben. Da es fraglich ist, wie nah am Präparat üblicherweise gearbeitet wird, kann die stationäre Messung am Tisch über dem Präparat auch einen Anhaltspunkt für die Exposition liefern.

Die Messorte unterliegen unterschiedlichen Einflüssen, was am Beispiel der Messungen 17 (PV17W1-3) und 23 (PV23W1-3) augenfällig wird. Dort stimmen die Randbedingungen überein: Volumenstrom etwa 300 m³/h, keine Haube, großes Brett mit Abstand. Nur ist die Menge an Material bei Messung 23 deutlich erhöht. Dies führt bei den Messungen am Probanden nicht zu deutlich höheren Werten, bei den stationären Messungen am Tisch aber schon (**Tabelle D.1**).

Tabelle D.1
Vergleich der Messpunkte bei Messungen 17 und 23

Messnummer	$c(CH_2O)\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	
	personengetragen	stationär Tisch
17 (PV17W1-3)	0,037 0,056 0,06	0,049 0,052 0,053
23 (PV23W1-3)	0,019 0,033 0,061	0,32 0,33 0,34

Daher wird die Messung 23 für die personengetragenen Messungen berücksichtigt, aber nicht für die stationären Messungen am Tisch.

Bei sechs Messungen und einem Volumenstrom von 200 m³/h ist die Temperatur auf 30°C erhöht worden. Dieser Effekt kann nicht direkt verglichen werden, da es bei diesem Volumenstrom nur noch sechs weitere Messwerte gibt, die aber nicht in den anderen Einflüssen genau mit den Messungen bei 30°C übereinstimmen. Bei den personengetragenen Messungen gibt es nur drei Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze. Dieselben drei Messungen haben auch über dem Tisch zu den höchsten Werten geführt. Bei diesen drei Messungen beträgt zwar die Temperatur 30°C. Die hohen Messwerte können aber auch darauf zurückgeführt werden, dass sie ohne Haube aufgenommen worden sind. Für die Analyse wird der Einfluss der Temperatur daher ausgeklammert. Wenn die sechs Werte bei 30°C testweise in den Datensatz aufgenommen werden, geht die Analyse davon aus, dass die Temperatur keinen Effekt hat bzw. sie dieselbe Temperatur wie die anderen Werte haben.

Bei den restlichen Messungen sind mehrere Einflussgrößen variiert worden:

- der Volumenstrom: Es gibt vier Bereiche, in denen der Volumenstrom liegen kann: etwa um $100\frac{m^3}{h}$, $200\frac{m^3}{h}$, $300\frac{m^3}{h}$, $400\frac{m^3}{h}$. Innerhalb dieser Bereiche kommt es zu Schwankungen,
- die Haube: keine Haube (0), geöffnete Haube (1), geschlossene Haube (2),
- das Schneidebrett: groß (0), klein (1), nur beim Tisch,
- der Abstand: bei kleinem Brett immer gegeben (1), bei großem Brett mit Abstand (1) und ohne (0), nur beim Probanden.

Bei den nicht-metrischen Variablen ist die Kodierung in Klammern angegeben. Diese Einflussgrößen werden sowohl für den Messort über dem Tisch als auch am Probanden berücksichtigt. Da bei großen Schneidebrettern immer ein Abstand vorhanden ist, sind die beiden Einflüsse Brett und Abstand nicht unabhängig. Da der Abstand für das Strömungsgeschehen am Messort Tisch keine Rolle spielt, wird das Brett nur für die stationären Messungen (Tisch) berücksichtigt und der Abstand für die personengetragenen Messungen (Proband). Es gibt auch keinen fachlichen Grund, weswegen diese beiden Einflüsse für die Werte in der Abluft eine große Rolle spielen sollten.

Insgesamt sind bei 13 Messungen an unterschiedlichen Messorten die Pumpen ausgefallen. Daher werden alle Messungen entfernt, bei denen an dem Messort Tisch oder Proband keine Werte vorliegen. Außerdem werden immer die Messungen entfernt, bei denen in der Abluft keine Messungen vorliegen. Zusätzlich wurden alle Messwerte entfernt, bei den Probleme beobachtet worden sind (**siehe Abschnitt 1.7 in diesem Anhang**). Daher stehen nicht zu allen 99 Messungen Messwerte zur Verfügung.

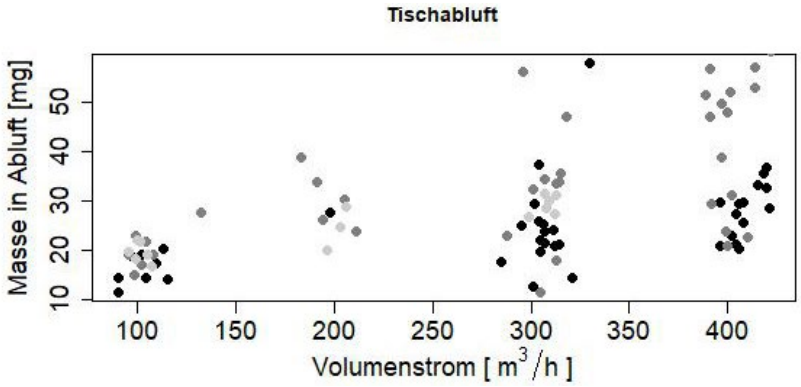


Abbildung D.1:
Formaldehydmasse in der Abluft als Funktion des Volumenstroms ohne Haube (schwarz), bei offener Haube (dunkelgrau) und geschlossener Haube (hellgrau)

2 Abluft

Bei steigendem Volumenstrom wird irgendwann der Punkt erreicht sein, bei dem die abtransportierte Masse an Formaldehyd nicht mehr steigen kann, solange die Quelle dieselbe bleibt. Um die verschiedenen Volumenströme vergleichen zu können, sind in **Abbildung D.1** die gemessenen Konzentrationen von Formaldehyd in der Abluft in Massen umgerechnet worden (Probenahmedauer ist jeweils 0,25 h).

Bei $200\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ sind in **Abbildung D.1** auch die Messwerte bei 30°C enthalten. Da alle Messwerte trotz unterschiedlicher Temperatur aus derselben Normalverteilung zu kommen scheinen (Shapiro-Wilk Test [1] $p > 0{,}80$), werden die Werte hier zusammen ausgewertet.

In **Abbildung D.1** ist deutlich zu sehen, dass die Messwerte bei einem Volumenstrom von etwa $100\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ im Mittel unter denen bei den anderen Volumenströmen liegen. Bei den Gruppen über $100\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ ist kein deutlicher Anstieg im Mittel zu sehen.

Daneben ist deutlich, dass das Vorhandensein einer Haube bei gegebenem Volumenstrom dazu führt, dass mehr Formaldehyd in der Abluft ist. Besonders bei $300\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ und $400\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ stammen die niedrigen Messwerte überwiegend von Messungen ohne Haube. Es handelt sich also um ein multifaktorielles Geschehen. Aber auch, wenn man sich nur die Werte ohne Haube ansieht (schwarz in **Abbildung D. 1**), ist kein klarer Anstieg in der abtransportierten Masse über einen Volumenstrom von $200\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ hinaus zu sehen.

Erwartungsgemäß spielen die beiden abhängigen Einflüsse Brett und Abstand hier keine Rolle. So fallen beispielsweise die Messwerte für das kleine Brett (hellgrau in **Abbildung D.2**) bei $300\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ tendenziell geringer aus als beim großen Brett (schwarz). Bei $400\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ ist die Situation eher umgekehrt. Auch für den Abstand ergibt sich kein klares Bild.

Aus der deskriptiven Analyse ergibt sich also, dass es mindestens zwei Einflüsse gibt, die eine Rolle spielen: der Volumenstrom *Q* und die Haube *H*. Das Brett und der Abstand scheinen nicht mit der Masse von Formaldehyd in Abluft m_{Abl} zusammenzuhängen. Obwohl in **Abbildung 1** kein klarer Anstieg von m_{Abl} bei hohen Volumenströmen mehr zu sehen ist, wird im Folgenden ein einfaches, lineares Modell betrachtet, um m_{Abl} als Funktion von *Q* und *H* zu beschreiben:

$$m_{\mathrm{Abl}} = \alpha_0 + \alpha_{\mathrm{Q}} Q + \alpha_{\mathrm{Haube}} H \qquad (1)$$

Der Volumenstrom *Q* ist der gemessene Wert in Einheiten von $\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$. Der Einfluss der Haube wird kodiert, wie im vorigen Abschnitt beschrieben (ohne Haube $H = 0$, mit offener Haube $H = 1$, mit geschlossener Haube $H = 2$). Schließlich ist m_{Abl} die errechnete Größe der Masse in der Abluft aus den **Abbildungen D.1** und **D.2**.

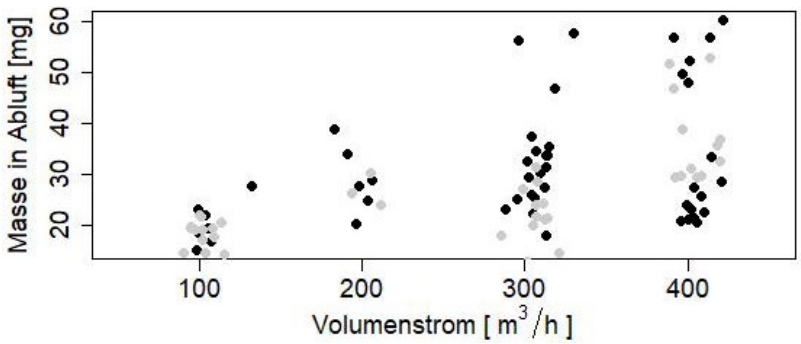


Abbildung D.2:
Formaldehydmasse in der Abluft als Funktion des Volumenstroms mit großem Brett Abstand (schwarz) und kleinem Brett (hellgrau)

Wenn man eine Regressionsrechnung [2] (kleinste Fehlerquadrate) mit dem Modell aus Gl. 1 für die vorliegenden Daten macht, sind die gewählten Parameter alle signifikant von null verschieden (*p*-Werte in **Tabelle D.2**). Das ist für den Schätzer von α_0 nur sehr knapp der Fall, was auch zu erwarten ist, da Formaldehyd nicht ubiquitär vorhanden sein und damit α_0 also durchaus null sein sollte.

Allerdings beträgt das Bestimmtheitsmaß nur $R^2 = 0{,}31$. Das heißt, dass Gl. 1 nur 31 % der Varianz in den Daten erklärt. Man kann das Modell um den Faktor Abstand (ohne, mit: $A = \{0{,}1\}$) oder Brett (groß, klein $B = \{0{,}1\}$) erweitern. Beide Faktoren sind aber nicht signifikant, was nach der Diskussion im vorigen Abschnitt und der **Abbildung D.2** zu erwarten gewesen ist. Es müssen also andere Faktoren gefunden werden, die m_{Abl} beschreiben können.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Streuung der Residuen mit zunehmendem $\widehat{m_{\mathrm{Abl}}}$ zunimmt. Das ist der Schätzer für m_{Abl}, der sich ergibt, wenn man die gemessenen Werte für *Q* und *H* zusammen mit den Schätzern α_i aus **Tabelle D.2** in Gl. 1 einsetzt. Diese Varianzungleichheit (Heteroskedastizität) in den Residuen schränkt die Ergebnisse vor allem zu den Standardfehlern in **Tabelle 2** ein. Die Varianzzunahme ist vor allem getrieben durch die zunehmende Streuung mit dem Volumenstrom, der schon in **Abbildung D.2** zu sehen ist. Aber auch eine gewichtete Regression, die die Varianzen bei den Gruppen $100\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$, $200\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$, $300\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ und $400\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ als Gewichte nutzt, bringt nur eine geringe Verbesserung des Modells.

Eine weitere Verbesserung des Modells könnte darin liegen, dass die beiden Einflüsse nicht linear sind. Nach **Abbildung D.1** ist zwar der Unterschied zwischen $100\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ und $200\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ augenfällig, ein linearer Anstieg mit steigendem Volumenstrom aber nicht. Ebenso sollte nach Gl. 1 das Aufsetzen einer offenen Haube denselben Effekt haben, wie das Schließen einer vorhandenen Haube. Die Linearität ist also bei beiden Einflüssen fraglich.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Volumenstrom und das Vorhandensein einer Haube einen positiven Einfluss auf die abtransportierte Masse an Formaldehyd haben. Dies lässt sich sowohl deskriptiv (**Abbildung D.1**) als auch mit Tests (**Tabelle D.2**) zeigen. Ein starker positiver Effekt über Volumenströme von $200\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ hinaus ist fraglich.

3 Proband

In **Abbildung D.3** sind die 81 Konzentration von Formaldehyd gemessen am Probanden als Funktion des Volumenstroms aufgetragen. Die 48 Messwerte unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze sind an der Bestimmungsgrenze von $0{,}02\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{m}^3}$ aufgetragen. Die Werte bei 30°C sind nicht ausgeschlossen worden.

Es ist zunächst zu sehen, dass sieben Werte oberhalb von $0{,}37\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{m}^3}$ liegen. Das bedeutet, dass der Arbeitsplatzgrenzwert in diesen Fällen bei einer Einwirkungsdauer von acht Stunden überschritten wäre. Diese Situation tritt zwar bei hohen Volumenströmen auf, aber auch ausnahmslos bei Messungen ohne Haube (schwarz) und ohne Abstand (eingekreist).

Dies zeigt, dass auch hier wieder eine multifaktorielle Situation vorliegt. Neben dem Volumenstrom und der Haube zeigt **Abbildung D.3**, dass auch der Abstand beim Probanden eine Rolle spielt. Das Fehlen hoher Messwerte bei $100\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ und $200\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ kann auf die kleine Stichprobengröße zurückzuführen sein. Es können aber auch weitere Faktoren einen Einfluss haben, die noch nicht untersucht worden sind.

Wegen des hohen Anteils an Werten unter der Bestimmungsgrenze ist eine Regression mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wie bei den Werten in der Abluft nicht möglich. Zielführender ist eine logistische Regression [3]. Dabei werden die Messwerte zunächst zusammengefasst. Die abhängige Variable ist nur noch 0, falls der Messwert oberhalb der Bestimmungsgrenze liegt, und 1, falls er an oder unter der Bestimmungsgrenze liegt. Die Wahrscheinlichkeit $P(c < BG)$, dass ein Pathologe unterhalb der Bestimmungsgrenze belastet ist, kann dann beschrieben werden mit:

$$P(c < BG) = \frac{1}{1+e^{-\left(\beta_0+\beta_{\mathrm{Q}}Q+\beta_{\mathrm{Haube}}H+\beta_{\mathrm{Abstand}}A\right)}} \qquad (2)$$

Tabelle D.2:
Schätzer für Parameter in Gl. 1 ($n = 94$). Ausgehend von dem Standfehler kann mit der t-Statistik getestet werden, ob der Schätzer sich signifikant von null unterscheidet ($p < 0{,}05$)

Parameter	Schätzer	Einheit	Standardfehler	t-Statistik	*p*
α_0	8,417	1 mg	3,24	2,60	0,01
α_{Q}	0,058	$1\ \frac{\mathrm{mg\,h}}{\mathrm{m}^3}$	0,01	6,29	$1 \cdot 10^{-8}$
α_{Haube}	4,151	1 mg	1,47	2,82	0,0059

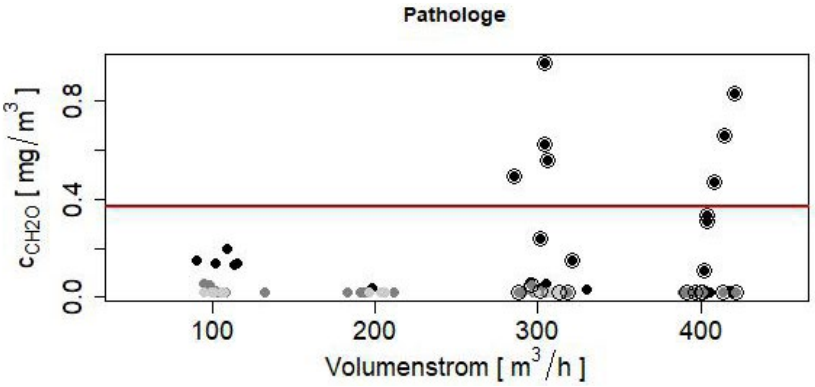


Abbildung D.3:
Formaldehydkonzentration gemessen am Probanden als Funktion des Volumenstroms ohne Haube (schwarz), bei offener Haube (dunkelgrau) und geschlossener Haube (hellgrau). Umkreiste Werte kommen aus Messungen ohne Abstand. Die Linie zeigt den Arbeitsplatzgrenzwert von 0,37mg/m³ an

Tabelle D.3:
Schätzer für Parameter in Gl. 2 (n = 81). $OR_i = e^{ßi}$: Odds-Ratio des Parameters. Ausgehend von dem Standfehler kann getestet werden, ob der Schätzer sich signifikant von null unterscheidet (p < 0,05)

Parameter	Schätzer	OR_i	Standardfehler	p
$ß_0$	-12,192	$5{,}1 \cdot 10^{-6}$	3,32	$2{,}44 \cdot 10^{-4}$
$ß_Q$	0,0229	1,02	0,01	$4{,}72 \cdot 10^{-4}$
$ß_{Haube}$	5,3292	206	1,38	$1{,}14 \cdot 10^{-4}$
$ß_{Abstand}$	4,2717	71,6	1,35	$15{,}94 \cdot 10^{-4}$

Der Volumenstrom Q und der Faktor für die Haube H entsprechen den Faktoren aus Gl. 1. Zusätzlich gibt es den Faktor A. Ohne Abstand ist A = 0, mit Abstand A = 1.

Mit Gl. 2 lassen sich die Chancen (Odds) auf Belastung unter der Bestimmungsgrenze ausdrücken als $P/(1\,P)$. Der natürliche Logarithmus der Odds ergibt mit Gl. 2 die Logit-Funktion, die der logistischen Regression ihren Namen gibt:

$$Logit = \ln\left(\frac{P(c<BG)}{1-P(c<BG)}\right) = \beta_0 + \beta_Q Q + \beta_{Haube} H + \beta_{Abstand} A \qquad (3)$$

Die Regressionsrechnung bestimmt wiederum Schätzer für die Parameter $ß_i$. Ihre Bedeutung ist jetzt, dass das Odds-Ratio eines Faktors i angegeben werden kann als $OR_i = e^{ßi}$. Das ist die Chance, dass $c < BG$ ist, wenn alle $x_{j\neq i} = 0$. Wie aus **Tabelle D.3** zu sehen ist, sind alle Parameter aus Gl. 2 für das Modell signifikant (p < 0,05). Aus den OR_i lässt sich ablesen, dass der konstante Term $ß_0$ kaum dazu beiträgt, dass die Belastung unter der Bestimmungsgrenze liegt. Beim Volumenstrom nimmt das Odds-Ratio um 1,02 pro $1\,\frac{m^3}{h}$ zu. Das bedeutet, dass bei einem Anstieg von $100\,\frac{m^3}{h}$ das Odds-Ratio um 102 steigt. Auch beim Aufstellen der Haube und dem Schließen der Haube erhöht sich das Odds-Ratio stark (um 206). Der Parameter Abstand ist zwar signifikant, aber der p-Wert ist größer als bei den anderen Faktoren und das Odds-Ratio etwas kleiner.

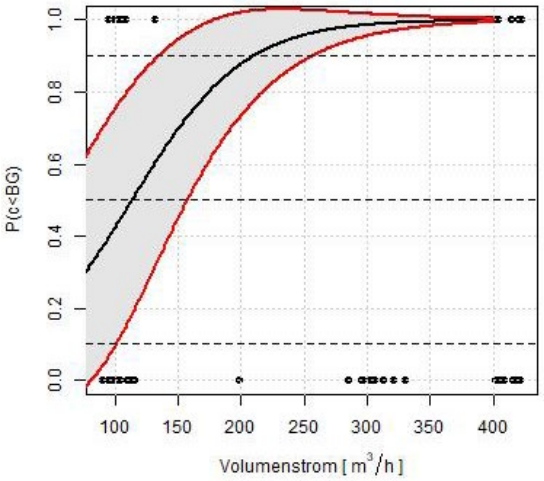
Man kann in Gl. 2 alle anderen Faktoren gleich eins setzen (offene Haube, Abstand vorhanden) und nur den Volumenstrom erhöhen. Mit den Regressionsparametern aus **Tabelle D.3** erhöht sich dann die Wahrscheinlichkeit für eine Belastung unterhalb der Bestimmungsgrenze wie in **Tabelle D.4** und grafisch in **Abbildung D.4** angegeben. Daraus ist ersichtlich, dass der größte Anstieg zwischen $100\,\frac{m^3}{h}$ und $200\,\frac{m^3}{h}$ liegt. Darüber ist der Anstieg nicht mehr so stark, was sich auch schon in der Diskussion der Messwerte in der Abluft angedeutet hat.

Tabelle D.4:
Werte für $P(c < BG)$ aus Gl. 2 mit den Schätzern aus Tabelle 3 und $A = H = 1$

$Q\left[\frac{m^3}{h}\right]$	$P(c < BG)$
100	0,424
200	0,879
300	0,986
400	0,999

Das Bestimmtheitsmaß für die Regressionsrechnung (**Tabelle D.3**) beträgt R^2 = 0,73. Das bedeutet, dass zwar immer noch 27 % der Varianz nicht durch das Modell erklärt werden. Es zeigt sich aber erneut, dass Volumenstrom und das Vorhandensein einer Haube einen großen Einfluss auf die Belastung haben. Auch weitere Effekte wie der Abstand spielen eine Rolle.

Abbildung D.4:
Werte für Gl. 2 in Abhängigkeit vom Volumenstrom mit den Schätzern aus Tabelle D.3 und *A* = *H* = 1 (schwarze Linie). Rot: 95%-Konfidenzbereich. Punkte: Beobachtung *c* < *BG* → 1, *c* > *BG* →0



4 Tisch

Falls sehr nah am Präparat und ohne viel Bewegung gearbeitet wird, können die stationären Messwerte vom Tisch auch einen Hinweis auf die Exposition geben. In **Abbildung D.5** sind die 83 Konzentration von Formaldehyd gemessen stationär über dem Tisch als Funktion des Volumenstroms aufgetragen. Weil der Messort näher an der Quelle liegt, liegen jetzt weniger Messwerte unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze. Diese 15 Werte sind an der Bestimmungsgrenze von $0{,}02\,\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{m}^3}$ aufgetragen. Die Werte bei 30°C sind wegen Ihres Einflusses ausgeschlossen worden (**Tabelle D.1**).

Von den fünf Werten, die oberhalb des Arbeitsplatzgrenzwertes liegen, stammen vier von Messungen ohne Haube (schwarz). Diese Messungen haben auch ein kleines Brett (umkreist). Aber insgesamt haben die Messungen mit kleinem Brett eher die Tendenz zu niedrigeren Werten, auch bei etwa $100\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$. Die Messungen ohne Haube hingegen haben in der Tendenz bei jedem Volumenstrom hohe Werte.

Diese multifaktorielle Situation können wir wieder mit einem Regressionsmodell beschreiben.

$$c(\mathrm{CH2O})_{\mathrm{Tisch}} = \gamma_0 + \gamma_{\mathrm{Q}} Q + \gamma_{\mathrm{Haube}} H + \gamma_{\mathrm{Brett}} B \qquad (4)$$

Zusätzlich zum Volumenstrom *Q* und der Haube *H* aus den Gl. 1, 2 gibt es noch den Faktor Brett (Großes Brett *B* = 0, kleine Brett *B* = 1). Die Konzentration von Formaldehyd über dem Tisch ist $c(\mathrm{CH2O})_{\mathrm{Tisch}}$. Wegen der geringen Zahl von Werten unter der Bestimmungsgrenze bietet sich die Tobit-Regression [4] an, bei der die Paramter y_{i} mit der Maximum-Likelihood-Methode bestimmt werden. Der zweite Wert bei Messnummer 22 (PV22W2) liegt genau auf der Bestimmungsgrenze und wird in dieser Rechnung zu den Werten unter der Bestimmungsgrenze gezählt, was eine leichte Verzerrung darstellt.

In **Tabelle D.5** ist zu sehen, dass alle Parameter aus Gl. 4 einen signifikanten Beitrag zum Modell leisten. Die Parameter sind alle negativ, das heißt, dass die Formaldehydkonzentration abnimmt, wenn sie zunehmen. Bei y_{Q} bezieht sich das auf die Zunahme von $1\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$. Das heißt bei einer Zunahme von $100\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ ist die Abnahme in der $c(\mathrm{CH2O})_{\mathrm{Tisch}}$ in derselben Größenordnung wie die anderen Parameter. Bemerkenswert ist auch, dass der Parameter y_{Brett} einen so großen Einfluss hat, wobei unklar ist, ob dies an dem geänderten Strömungsfeld durch die Brettgröße und/oder dem anderen Abstand zum Messort liegt.

Wenn man die gemessenen Werte $c(\mathrm{CH2O})_{\mathrm{Tisch}}$ mit *c* abkürzt, ihren Mittelwert $\bar{c}$ mit und den Schätzer von Gl. 4 mit $\hat{c}$, dann kann man das Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 1 - \frac{\sum (c-\hat{c})^2}{\sum \left(c-\bar{c}\right)^2} = 0{,}38$ angeben. Das Modell erfasst also nur 38 % der Varianz. Das heißt, dass auch hier andere Faktoren wahrscheinlich noch eine Rolle spielen.

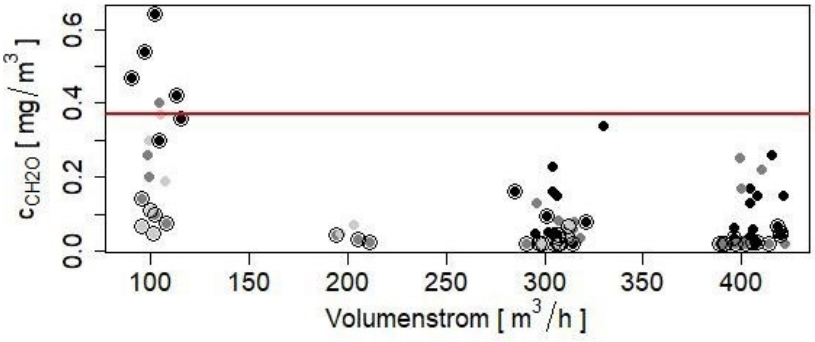


Abbildung D.5:
Formaldehydkonzentration gemessen stationär über dem Tisch als Funktion des Volumenstroms ohne Haube (schwarz), bei offener Haube (dunkelgrau) und geschlossener Haube (hellgrau). Umkreiste Werte kommen aus Messungen bei kleinem Brett. Die Linie zeigt den Arbeitsplatzgrenzwert von 0,37mg/m³ an

Tabelle D.5:
Schätzer für Parameter in Gl. 4 ($n = 83$). Ausgehend von dem Standfehler kann getestet werden, ob der Schätzer sich signifikant von null unterscheidet ($p < 0{,}05$)

Parameter	Schätzer	Standardfehler	p
y_0	0.5683	0,0478	$< 2 \cdot 10^{-16}$
y_Q	-0.0011	0,0001	$< 2 \cdot 10^{-16}$
y_{Haube}	-0.1227	0,0186	$4{,}38 \cdot 10^{-11}$
y_{Brett}	-0.1300	0,0264	$8{,}35 \cdot 10^{-7}$

Bei der Tobit-Regression geht ebenso wie bei der Regression mit kleinsten Fehlerquadraten (Gl. 2) die Annahme ein, dass es einen Streuterm mit einer Normalverteilung gibt. Die Residuen erscheinen normalverteilt (Shapiro-Wilk Test [1] $p < 0{,}18$), was auch an der geringen Anzahl an zensierten Werten liegen kann. Um dies zu klären, müsste man die Regressionsrechnung wiederholen und Varianzungleichheit (Heteroskedastizität) bei den Parametern zulassen, um dann über einen Vergleich der Likelihood-Funktionen zu entscheiden, welches Modell am besten die Daten beschreibt.

5 Zusammenfassung

Aus der Analyse wird deutlich, dass ein Volumenstrom von $200 \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$ und höher und das Vorhandensein einer Haube dazu führen, dass die Konzentration am Probanden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (>87 %) unter der Bestimmungsgrenze liegt (**Tabelle D.4**). Am Tisch wird bei diesen Bedingungen keine Konzentration oberhalb des Grenzwertes beobachtet (**Abbildung D.5**). Sowohl die Beschreibungen des Datensatzes (**Abbildungen D.1, D.3, D.5**) als auch die Modellrechnungen deuten dabei in dieselbe Richtung.

Die Modellrechnungen (**Tabellen D.1, D.3, D.5**) sollten aber nicht dazu verwendet werden, die Belastung an Arbeitsplätzen vorherzusagen. Sie beziehen sich ausschließlich auf die Laborbedingungen – und selbst hier ist es deutlich, dass es weitere Faktoren gibt, die auf die Messwerte einwirken, was schon an den zum Teil sehr geringen Bestimmtheitsmaßen der Modelle ablesbar ist. Hier sind der Abstand und die Brettgröße untersucht worden. Diese tragen zwar nicht signifikant zum Modell der abtransportieren Masse bei (Gl. 1), dafür aber zu den Modellen an den andern Messorten (Gl. 2,4). Dies macht deutlich, dass auch kleine Einflüsse neben der Haube und dem Volumenstrom einen signifikanten Einfluss haben können.

6 Literatur

[1] *Shapiro, S. S.; Wilk; M. B.*: An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). Biometrika 52 (1965), S 591 – 611.

[2] *Draper, N. R.; Smith, H.*: Applied regression analysis. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1998.

[3] *Kreienbrock, L.; Pigeot, I.; Ahrens, W.*: Epidemiologische Methoden. Heidelberg, Springer Spektrum 2012.

[4] *Tobin, J.*: Estimation of relationships for limited dependent variables. Econometrica (1958), S. 26, 24 – 26.

7 Verwendete Daten

Nr.: Messnummer Nummer der Messung PV(1-33) mit je drei Wiederholungsmessungen (W(1-3);
Q: Volumenstrom in $\frac{m^3}{h}$; Pat < BG: Messwert am Pathologen unter Bestimmungsgrenze? Ja (1) Nein (0); **T<BG:** Messwert am Tisch (stationär) unter Bestimmungsgrenze? Ja (1) Nein (0); **Pathologe:** Konzentration von Formaldehyd in der Luft, am Pathologen gemessen in $\frac{mg}{m^3}$; **Abluft:** Konzentration von Formaldehyd stationär in der Abluft gemessen in $\frac{mg}{m^3}$; **Tisch:** Konzentration von Formaldehyd in der Luft, stationär am Tisch gemessen in $\frac{mg}{m^3}$; **B:** Großes Brett (0) teils mit, teils ohne Abstand, kleines Brett (1) mit Abstand; **A:** Abstand (1), kein Abstand (0); **Q-Kat:** Kategorie Volumenstrom: 1 - $Q \approx 100\frac{m^3}{h}$, 2 - $Q \approx 200\frac{m^3}{h}$, 3 - $Q \approx 300\frac{m^3}{h}$, 4 - $Q \approx 400\frac{m^3}{h}$; **Probleme:** Anmerkungen zu problematischen Messungen; m_{Abl}: Masse in der Abluft, errechnet aus **Q***0,25h*Abluft (Messdauer immer 0,25 h.)

Nr.	Q	Pat < BG	T < BG	Pathologe	Abluft	Tisch	B	H	A	Q-Kat.	Probleme	m_{Abl}
PV1W1	109	0	NA	0,2	0,64	NA	1	0	1	1		17,44
PV1W2	90	0	NA	0,15	0,51	NA	1	0	1	1		11,475
PV1W3	109	0	NA	0,3	NA	NA	1	0	1	1	Abluft-Problem	NA
PV7W1	97	0	0	0,067	0,78	0,54	1	0	1	1	Pathologe Problem	18,915
PV7W2	104	0	0	0,03	0,56	0,3	1	0	1	1	Pathologe Problem	14,56
PV7W3	115	0	0	0,14	0,49	0,36	1	0	1	1		14,0875
PV2W1	102	0	0	0,14	0,75	0,64	1	0	1	1		19,125
PV2W2	113	0	0	0,13	0,72	0,42	1	0	1	1		20,34
PV2W3	90	0	0	0,051	0,64	0,47	1	0	1	1	Pathologe Problem	14,4
PV3W1	101	1	0	0,02	0,86	0,049	1	2	1	1		21,715
PV3W2	95	1	0	0,02	0,83	0,066	1	2	1	1		19,7125
PV3W3	100	1	0	0,02	0,88	0,11	1	2	1	1		22
PV4W1	308	1	1	0,02	0,37	0,02	1	2	1	3		28,49
PV4W2	307	1	1	0,02	0,41	0,02	1	2	1	3		31,4675
PV4W3	299	1	1	0,02	0,36	0,02	1	2	1	3		26,91
PV5W1	312	1	0	0,02	0,27	0,066	1	0	1	3		21,06
PV5W2	305	1	0	0,02	0,26	0,04	1	0	1	3		19,825
PV5W3	311	1	0	0,019	0,31	0,039	1	0	1	3	Pathologe Pumpe ausgefallen	24,1025
PV6W1	307	1	0	0,019	0,28	0,037	1	0	1	3		21,49
PV6W2	307	1	0	0,019	0,31	0,044	1	0	1	3		23,7925
PV6W3	314	1	0	0,019	0,27	0,019	1	0	1	3		21,195
PV8W1	297	1	1	0,019	0,11	0,019	1	1	1	3		8,1675
PV8W2	305	1	1	0,019	0,15	0,019	1	1	1	3		11,4375
PV8W3	291	1	1	0,019	0,12	0,019	1	1	1	3		8,73
PV9W1	402	NA	1	NA	0,31	0,02	1	1	1	4		31,155
PV9W2	397	NA	1	NA	0,39	0,02	1	1	1	4		38,7075
PV9W3	392	NA	1	NA	0,3	0,02	1	1	1	4		29,4
PV10W1	406	NA	0	NA	0,29	0,025	1	0	1	4		29,435

Nr.	Q	Pat < BG	T < BG	Pathologe	Abluft	Tisch	B	H	A	Q-Kat.	Probleme	m_{Abl}
PV10W2	396	NA	0	NA	0,3	0,034	1	0	1	4		29,7
PV10W3	408	NA	0	NA	0,29	0,024	1	0	1	4		29,58
PV11W1	399	0	0	0,36	0,24	0,25	0	1	0	4	Pathologe Probleme	23,94
PV11W2	400	0	0	0,24	0,21	0,17	0	1	0	4	Pathologe Probleme	21
PV11W3	410	0	0	0,72	0,22	0,22	0	1	0	4	Pathologe Probleme	22,55
PV12W1	301	0	0	0,024	0,43	0,038	0	1	0	3	Tisch Probleme	32,3575
PV12W2	288	1	1	0,019	0,32	0,019	0	1	0	3	Tisch Probleme	23,04
PV12W3	313	1	1	0,019	0,23	0,019	0	1	0	3	Tisch Probleme	17,9975
PV15W1	296	0	0	0,047	0,76	0,13	0	1	0	3		56,24
PV15W2	318	1	0	0,02	0,59	0,034	0	1	0	3		46,905
PV15W3	313	0	0	0,021	0,43	0,032	0	1	0	3		33,6475
PV13W1	402	0	0	0,11	0,23	0,089	0	0	0	4	Tisch Probleme	23,115
PV13W2	404	0	0	0,33	0,27	0,17	0	0	0	4		27,27
PV13W3	421	0	0	0,83	0,27	0,15	0	0	0	4		28,4175
PV16W1	404	0	0	0,31	0,27	0,13	0	0	0	4		27,27
PV16W2	408	0	0	0,47	0,25	0,15	0	0	0	4		25,5
PV16W3	415	0	0	0,66	0,32	0,26	0	0	0	4		33,2
PV14W1	306	0	0	0,56	0,33	0,15	0	0	0	3		25,245
PV14W2	304	0	0	0,62	0,34	0,16	0	0	0	3		25,84
PV14W3	304	0	0	0,95	0,49	0,23	0	0	0	3		37,24
PV17W1	302	0	0	0,037	0,39	0,052	0	0	1	3		29,445
PV17W2	295	0	0	0,06	0,34	0,049	0	0	1	3		25,075
PV17W3	305	0	0	0,056	0,29	0,053	0	0	1	3		22,1125
PV18W1	404	1	0	0,02	0,21	0,038	0	0	1	4		21,21
PV18W2	396	1	0	0,02	0,21	0,062	0	0	1	4		20,79
PV18W3	406	0	0	0,023	0,2	0,059	0	0	1	4		20,3
PV19W1	321	0	0	0,15	0,18	0,077	1	0	0	3	abgeklebte Vorder-kante = kein Abstand	14,445
PV19W2	301	0	0	0,24	0,17	0,093	1	0	0	3	abgeklebte Vorder-kante = kein Abstand	12,7925
PV19W3	285	0	0	0,49	0,25	0,16	1	0	0	3	abgeklebte Vorder-kante = kein Abstand	17,8125
PV20W1	389	1	1	0,02	0,53	0,019	1	1	1	4		51,5425
PV20W2	391	1	1	0,02	0,48	0,019	1	1	1	4		46,92
PV20W3	414	1	1	0,02	0,51	0,019	1	1	1	4		52,785
PV21W1	420	1	0	0,02	0,35	0,05	1	0	1	4		36,75
PV21W2	418	0	0	0,028	0,34	0,068	1	0	1	4		35,53
PV21W3	420	0	0	0,023	0,31	0,042	1	0	1	4		32,55
PV22W1	401	1	1	0,02	0,52	0,019	0	1	0	4	A=0 ok	52,13

Nr.	Q	Pat < BG	T < BG	Pathologe	Abluft	Tisch	B	H	A	Q-Kat.	Probleme	m_{Abl}
PV22W2	397	1	0	0,02	0,5	0,02	0	1	0	4	A=0 ok	49,625
PV22W3	400	1	0	0,02	0,48	0,029	0	1	0	4	A=0 ok	48
PV23W1	330	0	0	0,033	0,7	0,34	0	0	1	3	doppelte Menge, siehe PV17	57,75
PV23W2	331	0	0	0,061	NA	0,32	0	0	1	3	doppelte Menge, siehe PV17	NA
PV23W3	306	0	0	0,019	NA	0,33	0	0	1	3	doppelte Menge, siehe PV17	NA
PV24W1	198	0	0	0,037	0,56	0,17	0	0	1	2	30° C	27,72
PV24W2	228	0	0	0,039	NA	0,19	0	0	1	2	30° C	NA
PV24W3	202	0	0	0,054	NA	0,084	0	0	1	2	30° C	NA
PV25W1	183	1	0	0,019	0,85	0,08	0	1	1	2	30° C	38,8875
PV25W2	132	1	0	0,019	0,84	0,06	0	1	1	2	Q-Kat=2 ok 30° C	27,72
PV25W3	191	1	0	0,019	0,71	0,042	0	1	1	2	30° C	33,9025
PV26W1	414	1	1	0,02	0,55	0,02	0	1	0	4		56,925
PV26W2	422	1	1	0,02	0,57	0,02	0	1	0	4		60,135
PV26W3	391	1	0	0,02	0,58	0,023	0	1	0	4		56,695
PV27W1	108	1	0	0,019	0,71	0,074	1	1	1	1		19,17
PV27W2	95	0	0	0,054	0,81	0,14	1	1	1	1		19,2375
PV27W3	102	0	0	0,024	0,67	0,1	1	1	1	1		17,085
PV28W1	98	0	0	0,05	0,61	0,26	0	1	1	1		14,945
PV28W2	99	0	0	0,032	0,93	0,2	0	1	1	1		23,0175
PV28W3	104	0	0	0,02	0,84	0,4	0	1	1	1		21,84
PV29W1	194	1	0	0,019	0,54	0,045	1	1	1	2		26,19
PV29W2	205	1	0	0,019	0,59	0,03	1	1	1	2		30,2375
PV29W3	211	1	0	0,019	0,45	0,022	1	1	1	2		23,7375
PV30W1	307	1	0	0,019	0,45	0,081	0	1	1	3		34,5375
PV30W2	315	1	0	0,019	0,45	0,078	0	1	1	3		35,4375
PV30W3	314	1	0	0,019	0,43	0,059	0	1	1	3		33,755
PV31W1	105	1	0	0,019	0,73	0,37	0	2	1	1		19,1625
PV31W2	99	1	0	0,019	0,74	0,3	0	2	1	1		18,315
PV31W3	107	1	0	0,019	0,63	0,19	0	2	1	1		16,8525
PV32W1	206	1	NA	0,02	0,56	NA	0	2	1	2	Problem Tisch	28,84
PV32W2	203	1	0	0,02	0,49	0,072	0	2	1	2		24,8675
PV32W3	196	1	0	0,02	0,41	0,047	0	2	1	2		20,09
PV33W1	312	1	0	0,02	0,35	0,043	0	2	1	3		27,3
PV33W2	309	1	0	0,02	0,39	0,034	0	2	1	3		30,1275
PV33W3	313	1	0	0,02	0,4	0,07	0	2	1	3		31,3

Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Glinkastraße 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de