

Untersuchung der Wiederverwendbarkeit von FFP2-Masken im Kontext von COVID-19 anhand der Parameter Filterleistung und Atemwiderstand

Hamid Azizi, Christian Schwarzbauer

Hochschule München, Lothstr. 34, 80335 München, Deutschland

Kontakt: christian.schwarzbauer@hm.edu

Zusammenfassung

Im Verlauf der COVID19-Pandemie wurden FFP2-Masken oder vergleichbare Masken in Deutschland und vielen anderen Ländern vermehrt zum Infektionsschutz eingesetzt. Obwohl FFP2-Masken als Einweg-Produkt konzipiert sind, werden sie im privaten Bereich häufig über einen längeren Zeitraum wiederverwendet. Ziel dieser Untersuchung war es deshalb zu untersuchen, ob die Schutzwirkung von FFP2-Masken nachlässt, wenn diese über einen längeren Zeitraum wiederverwendet werden.

Dazu wurde die Filterleistung und der Atemwiderstand von 15 in Deutschland erhältlichen FFP2-Maskenmodellen vor und nach einer 22-stündiger Gebrauchssimulation untersucht, in welcher Langzeitnutzung und Atmung bei einer leichten körperlichen Arbeit nachgestellt wurden. Im Rahmen der Gebrauchssimulation wurden die Masken auch zweimal bei trockener Hitze für 60 Minuten bei 80°C dekontaminiert.

Bei 8 der 15 der untersuchten FFP2-Maskenmodelle führte die Gebrauchssimulation zu einer signifikanten Abnahme ($p < 0,05$) der Filterleistung. Die gemessenen Werte lagen aber noch im geforderten Bereich der Norm (DIN EN 149:2009-08). Ein Masken-Modell („Mea Vita“) erfüllte weder im fabrikneuen Zustand noch nach der Gebrauchssimulation die Vorgaben der Norm.

Was den Atemwiderstand anbelangt, erfüllte ein Maskenmodell („Altapharma“) nicht die Vorgaben der Norm, sowohl im fabrikneuen Zustand als auch nach der Gebrauchssimulation. Ein weiteres Maskenmodell („Leikang“) lag erst nach der Gebrauchssimulation über dem in der Norm festgelegten Grenzwert.

1. EINLEITUNG

Das Coronavirus SARS-CoV-2 hat sich rasant seit Januar 2020 auf der ganzen Welt verbreitet. Das Virus wurde erstmals in China, in der Provinz Wuhan, nachgewiesen und aufgrund seiner Gefährlichkeit für die menschliche Gesundheit an die Weltgesundheitsorganisation (WHO) gemeldet. Das Virus verursacht Infektionskrankheiten, die vor allem die Atemwege befallen und zu schweren Lungenentzündungen führen können [1]. Die WHO bezeichnete am 11. Februar 2020 die durch das SARS-CoV-2 induzierte Krankheit als COVID-19 (von engl. coronavirus disease 2019) [2]. Die hohe infektiöse Eigenschaft des Virus hat dazu geführt, dass es sich in kürzester Zeit weltweit verbreitete und zu schweren Krankheitsverläufen bei der Bevölkerung führte. Aufgrund der weltweiten Ausbreitung von COVID-19 erklärte die WHO am 11. März 2020 den Ausbruch von COVID-19 zu einer globalen Pandemie [3]. Seitdem bemühen sich die Länder weltweit mit unterschiedlichen Maßnahmen diese Ausbreitung einzudämmen. Die Eindämmungsmaßnahmen basieren auf der Erkenntnis, dass eine COVID-19 Erkrankung beim Menschen hauptsächlich über die Atemwege übertragen wird [4]. Aus diesem Grund werden persönliche Schutzausrüstungen (PSA) vermehrt neben Distanzierungsmaßnahmen und Kontaktbeschränkungen als nichtpharmazeutische Intervention zur Eindämmung der COVID-19 Pandemie eingesetzt. Eine der wichtigsten Komponente der PSA sind Schutzmasken. Sie sind in der Lage eine physikalische Barriere gegen die infektiösen Atemaerosole zu bilden, die von infizierten Personen ausgeatmet werden [5]. Die Verwendung von Masken als Teil der Präventions- und Kontrollmaßnahmen wurde von der WHO im Pandemiefall empfohlen [6]. Ebenfalls empfehlen viele Länder ihren Bürgern das Tragen einer Schutzmaske zum Schutz des Einzelnen und Anderer vor dem Coronavirus (COVID-19). Obwohl die üblichen FFP2-Masken auf dem Markt als Einwegprodukte vorgesehen sind, werden sie im privaten Bereich oftmals wiederverwendet — um Kosten zu sparen oder aus Gründen der Bequemlichkeit. Daher ist es wichtig festzustellen, ob und inwieweit die Schutzwirkung von FFP2-Atemschutzmasken im Fall einer Wiederverwendung erhalten bleibt. Im Verlauf der COVID-19-Pandemie wurden eine Reihe von Dekontaminations- und Wiederverwendungsverfahren für den Einsatz im privaten Bereich und im Gesundheitswesen entwickelt und untersucht [7–11].

In einer Studie von Fisher et al. wurden N95-Atemschutzmasken 4 verschiedenen Dekontaminierungsmethoden, UV-Licht (260–285 nm), 70 °C Trockenhitze, 70 % Ethanol und verdampftes Wasserstoffperoxid unterzogen. Insgesamt wurde der Zyklus dreimal wiederholt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Masken mit UV-Licht-Behandlung bis zu 3-mal, Masken mit trockener Hitze und HPV-Behandlung bis zu 2-mal wiederverwendet werden können, ohne dass sich ihre Schutzwirkung signifikant ändert. Bei einer Dekontamination mit 70 % Ethanol wurde trotz der Inaktivierung des Virus SARS-CoV-2 eine signifikante Abnahme der Schutzwirkung beobachtet [11]. In einer Studie der FH Münster wurden ebenfalls unterschiedlichen Methoden für die Dekontamination von FFP2-Masken, unter anderem mittels eines haushaltsüblichen Backofens untersucht. Die SARS-CoV-2-Viren wurden nach einer Stunde bei mindestens 80 °C im Ofen vollständig inaktiviert, wobei die Filterleistung der Masken erhalten blieb [10].

Was die Wiederverwendung von FFP2-Masken im privaten Bereich anbelangt, stellt sich die Frage, ob sich durch eine Langzeitverwendung wichtige Eigenschaften, wie zum Beispiel Aerosol-Filterleistung oder Atemwiderstand nachteilig verändern. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Fragestellung im Rahmen einer Gebrauchssimulation untersucht. Durch einen Beatmungssimulator wurde die Maskennutzung bei leichter körperlicher Belastung nachgebildet. Im Rahmen der Gebrauchssimulation wurden die untersuchten Maskenmodelle zusätzlich zweimal durch eine Wärmebehandlung bei 80°C in einem Trockenofen dekontaminiert.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Partikelfiltrierende Halbmasken / FFP2-Masken

Partikelfiltrierende Halbmasken kommen aus dem Anwendungsbereich der persönlichen Schutzausrüstung (PSA). Sie bedecken Nase, Kinn und Mund — die Augen bleiben frei. Zu dieser Kategorie gehören auch FFP2-Masken (englisch *Filtering Face Piece*). Sie enthalten ein Filtermedium zum Schutz vor Partikeln, Tröpfchen, festen oder flüssigen Aerosolen [12]. Das Filtermedium besteht aus

schmelzgeblasen geladenen Polypropylen-Elektrofasern, die zu einem Vlies zusammengeführt werden. Diese elektrostatische Eigenschaft führt dazu, dass die Partikel durch elektrostatische Effekte eingefangen werden [13]. Für den Verkauf in der Europäischen Union (EU) benötigen Hersteller eine CE-Kennzeichnung. Diese erlangen sie, indem sie ein EU-Konformitätsbewertungsverfahren gemäß PSA-Verordnung (EU 2016/425) durchlaufen und damit die Anforderungen der EU-Norm EN 149 bzw. DIN EN 149:2009 erfüllen. Dabei legt die Europäische Norm die Mindestanforderungen für filtrierende Halbmasken als Atemschutzgeräte zum Schutz gegen Partikeln fest. Dabei wird zwischen Masken mit Ausatemventil und Masken ohne Ausatemventil unterschieden. Masken ohne Ausatemventil haben eine Filterfunktion sowohl für die eingeatmete Luft als auch für die Ausatemluft, so dass sie einen Eigen- und Fremdschutz bieten, wohingegen Masken mit Ausatemventile die ausgeatmeten Aerosole ungefiltert in die Umgebungsatmosphäre abgeben [12].

FFP-Atemschutzmasken werden nach europäischen Norm EN149:2001+A1:2009 geprüft und klassifiziert. Aufgrund ihrer Filtrationskapazität und nach ihren Leckagen werden sie in drei Klassen FFP1, FFP2 und FFP3 unterteilt [12]. Die gesamte Leckage setzt sich aus den Undichtigkeitsstellen der Maske am Gesicht, dem Filterdurchlass sowie bei den Masken mit Ausatemventil zusammen. Die FFP-Atemschutzmasken werden entsprechend ihrer Filterleistung in den unterschiedlichen Umgebungen eingesetzt. Beispielsweise die Atemschutzmasken der Klasse FFP1 werden gegen nicht toxische Aerosole und Feinstaub eingesetzt, wohingegen die FFP2 bzw. FFP3-Atemschutzmasken dürfen gegen pathogene Biostoffe wie einige Bakterien, Viren oder Pilze verwendet werden [14]. Des Weiteren wird bei den FFP-Masken zwischen "reusable" wiederverwendbar (R) und "not reusable" zum einmaligen Gebrauch (NR) unterschieden [12]. In der vorliegenden Untersuchung wird ausschließlich der Varianten (NR) der FFP2-Masken behandelt.

2.2. Anforderungen an FFP2 Masken

Entsprechend der europäischen Norm EN 149:2001+A1:2009 müssen FFP2-Masken eine Reihe von Normanforderungen erfüllen. Der maximale Durchlassgrad für zwei in der Norm zwei vorgegebene Prüfaerosole muss unter 6% liegen. Die Gesamtleckage muss unter 11% liegen. Darüber hinaus sind die folgenden Grenzwerte für den

maximale Atemwiderstand festgelegt: 0,7 bzw. 2.4 mbar beim Einatmen mit einem Volumenstrom von 30 l/min bzw. 95 l/min, sowie 3 mbar beim Ausatmen mit 160 l/min Volumenstrom. Dabei darf der Kohlendioxid-Gehalt der Einatemluft einen Mittelwert von 1,0 Vol.-% nicht überschreiten. Für FFP2-Atemschutzmasken gelten zusätzliche Anforderungen in Bezug auf Entflammbarkeit, Haltbarkeit, Hautverträglichkeit, Gebrauchsanweisungen, Etiketten und kontinuierliche Herstellungsaufsicht [12].

2.3. Dekontaminationsverfahren bei FFP2-Masken

Als Dekontamination wird die Gesamtheit aller Prozesse bezeichnet, die eine Kontamination reduzieren oder vollständig inaktivieren. Ziel ist es, dass die vorhandenen Infektionserreger nicht mehr nachweisbar sind. In diesem Kontext wird die Dekontaminationsprozess mit trockner Hitze in mehreren Studien als eine effektive Methode vorgeschlagen [7–11]. Durch die Wärmebehandlung können Mikroorganismen effektiv inaktiviert werden. Die Wirksamkeit einer Trockenhitzedekontamination bei 100°C für 50 Minuten wurde zum Beispiel in einer Studie für N95-Masken (vergleichbar zu FFP2) untersucht. Dabei wurden die Masken zuerst mit vier unterschiedlichen Viren-Arten, Tulane-Virus (TV), Rotavirus (RV), Adenovirus (Adv) sowie das transmissible Gastroenteritis-Virus (TGEV) kontaminiert und danach durch einen Elektroherd mit trockner Hitze für 20 Zyklen behandelt. Anschließend wurde die Filterleistung geprüft. Die untersuchten Viren-Arten konnten dadurch effektiv inaktiviert werden. Die Filterleistung der Masken wurde dadurch nicht signifikant beeinträchtigt [7]. Zu ähnlichen Ergebnissen kam eine Studie der Fachhochschule Münster [10]. Die Trockenhitzebehandlung wurde hierbei bei 80°C für eine Dauer von 60 Minuten durchgeführt

3. MATERIAL UND METHODEN

3.1. FFP2-Maskenmodelle

Um diese Experimente durchzuführen, wurden 15 verschiedene kommerziell erhältliche Maskenmodelle ausgewählt (siehe Tabelle 1). Die Auswahl der FFP-Masken erfolgt nach Kriterien der Marktrelevanz und Marktrepräsentanz für den deutschen Markt.

Tab. 1 Liste der untersuchten Maskenmodelle

| Hersteller / Modell | Gekauft bei | ID |
|---------------------|-------------|-----|
| HT Jiu Zhou | Edeka | M01 |
| Baner | Rewe | M02 |
| Textilmacher | Netto | M03 |
| Leikang | Penny | M04 |
| Jifa | Lidl | M05 |
| Vitalis | Aldi | M06 |
| multiTEC | Norma | M07 |
| LP Lindenpartner | dm | M08 |
| Altapharma | Rossmann | M09 |
| CRDLIGHT | Amazon | M10 |
| EUROPAPA | Amazon | M11 |
| Vock Faciem | Amazon | M12 |
| 3M Aura 9320 | Amazon | M13 |
| Mea Vita | Otto | M14 |
| MC Medical | Otto | M15 |

3.2. Konzept

Die ausgewählten Maskenmodelle wurden einer 22-stündigen Gebrauchssimulation unterzogen. Für die Nachbildung der menschliche Atmung bei leichter körperlicher Belastung (Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Druck und Atemzeitvolumen) wurde ein spezieller Beatmungssimulator entwickelt [15]. Für die Gebrauchssimulation wurde jede Maske zunächst für 12 Stunden an dem Beatmungssimulators angeschlossen und anschließend für 60 Minuten in einen Trockenofen bei 80°C gelegt; Die Wärmebehandlung im Backofen bei 80°C wurde als Hygienemaßnahme bei Wiederverwendung von FFP2-Masken im privaten Bereich von der FH Münster untersucht und empfohlen [10]. Danach wurde die Maske für weitere 10 Stunden an den Beatmungssimulator angeschlossen und danach einer zweiten Wärmebehandlung im Trockenofen unterzogen. Die Prüfung der Masken auf Filterleistung und Atemwiderstand erfolgte in Zusammenarbeit mit der ift Rosenheim

GmbH, einem international akkreditiertem und notifiziertem Prüflabor für FFP2-Masken.

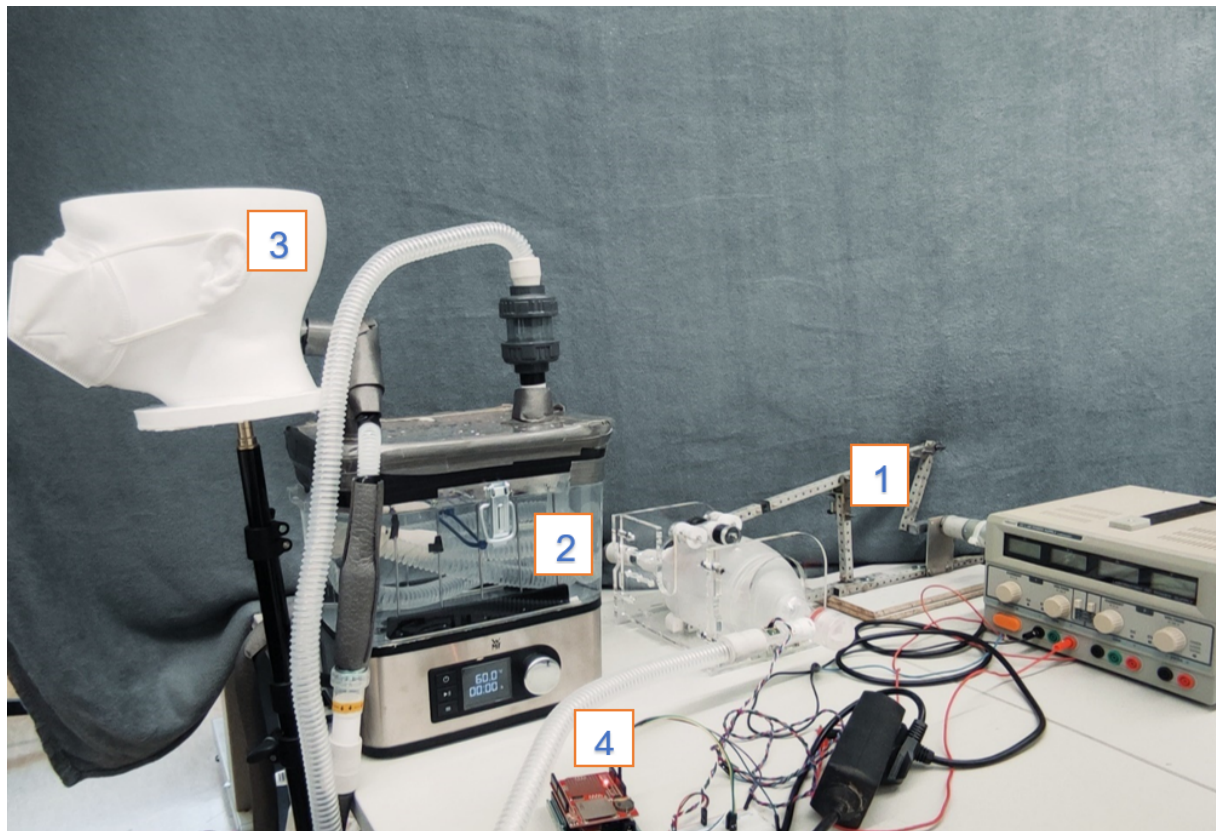


Abb. 1 Aufbau des Beatmungssimulators: 1. Lungensimulator; 2. Befeuchter; 3. Prüfkopf; 4. Hardware-Komponente für Datenerfassung.

3.3. Messungen im fabrikneuen Zustand (Basislinienmessung)

Im Rahmen einer Basislinienmessung wurden Filterleistung (Durchlassgrad) und Atemwiderstand der FFP2-Maskenmodelle im fabrikneuen Zustand gemessen. Dazu wurden 3 Masken pro Maskenmodell untersucht.

3.4. Gebrauchssimulation (Belastungstest)

Für die Gebrauchssimulation wurde eine Maske je Maskenmodell verwendet. Die Gebrauchssimulation wurde für jede der ausgewählten Masken für eine Gesamtdauer von 22 Stunden bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur 21,6°C und relativer Luftfeuchtigkeit von 46,7% im Labor durchgeführt. Dabei wurde zunächst geprüft, dass die Testbedingungen für den Versuch durch den Beatmungssimulator und Befeuchter erfüllt waren. Die expiratorische Luft aus dem

Beatmungssimulator wies dabei ein Atemminutenvolumen von 15 l/min und die einströmende Luft eine Temperatur von 32 °C mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% auf. Danach wurde eine Maske aus ihrer Verpackung genommen und am Prüfkopf (siehe Abbildung 1) angesetzt. Dabei wurde beachtet, dass sie laut der Gebrauchsanleitung des Herstellers korrekt am Prüfkopf angebracht war. Jede Maske wurde zunächst für 12 Stunden an den Beatmungssimulator angeschlossen und anschließend für die Dekontamination für 60 Minuten in einen Trockenofen (UE 500, Memmert GmbH + Co. KG) bei 80°C gelegt. Nach der Dekontamination wurde die Maske noch einmal für 10 Stunden an den Beatmungssimulator angeschlossen. Anschließend wurde die Maske wieder im Trockenofen bei 80°C für eine Dauer von 60 Minuten dekontaminiert. Nach diesem Prozess wurde sie in einer luftdurchlässigen Verpackung aus Papier aufbewahrt. Eine luftdurchlässige Verpackung verhindert, dass die Maske darin Schimmel bildet. Die Verpackung wurde mit der ID-Nummer der Maske beschriftet.

Zur Qualitätskontrolle wurden das Atemminutenvolumen sowie die Temperatur und die relative Feuchte der in die Maske einströmenden Luft während des gesamten Experiments automatisch in einem zeitlichen Abstand von 1 Sekunde gemessen und auf einer SD-Karte abgespeichert. Die Ergebnisse zeigen, dass die gewünschten Zielwerte (siehe oben) bei allen Messungen eingehalten wurden (siehe Tabelle im Anhang).

3.5. Prüfung der FFP2-Masken

Die Prüfung der Masken auf Filterleistung und Atemwiderstand erfolgte bei einer international akkreditierten und notifizierten Prüfstelle für FFP2-Masken (*ift Rosenheim GmbH*). Dort wurde die Masken in Anlehnung an DIN EN 149:2009-08 im fabrikneuen Zustand und nach der Gebrauchssimulation geprüft.

3.5.1. Prüfung der Filterleistung

In Anlehnung an die Norm DIN EN 149:2009-08 wurde die Filterleistung der FFP2-Masken nach DIN EN 13274-7 ermittelt. Dabei sieht diese Norm zwei Prüfaerosole für die Prüfung der Masken vor [16]. Diese sind Natriumchlorid (NaCl) und Paraffinöl. In dieser Untersuchung wurden die Masken lediglich mit Natriumchloridaerosole

geprüft, da die von Menschen ausgeatmeten Aerosole nicht ölhaltig sind. Die Messung wurde durch die Verwendung eines automatischen Filtertesters (TSI 8130A, TSI Incorporated, USA) bei einer Umgebungstemperatur von 21,3°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45,5% durchgeführt. Hierfür wurde zuerst der Filtertester kalibriert und eine 2%ige NaCl-Lösung für den Aerosolgenerator des Filtertesters hergestellt. Mittels einer Präzisionswaage (Sartorius CPA324S, Messgenauigkeit: $\pm 0,1$ Milligramm) wurden 60 Gramm NaCl abgewogen und mit 3L destilliertem Wasser gelöst. Die Leitfähigkeit von NaCl in der Lösung wurde dann durch ein Multiparameter-Labormessgerät (inoLab® Multi 9310 IDS) bei einer Referenztemperatur von 20 °C bestimmt. Diese betrug 29,6 Millisiemens/Zentimeter [mS/cm]. Dieser Wert entspricht einer 1,95%-iger NaCl-Massenkonzentration. Gemäß der DIN EN 13274-7 ist eine Abweichung von $\pm 5\%$ zulässig und somit lag der Konzentration der NaCl-Lösung im Normbereich.

Danach wurde eine konstante Aerosol Massenkonzentration mit einer Durchflussrate von 95 l/min durch den Aerosolgenerator des Filtertesters generiert. Diese Massenkonzentration soll laut der Norm DIN EN 13274-7 im Bereich von 4 mg/m³ bis 12 mg/m³ liegen [16]. Das wurde geprüft, indem die generierten Aerosole durch ein spezielles Filterpapier (A/E Glass fibre 8x10, Pall Corporation) für eine Dauer von 30 Minuten durchgelassen wurde. Danach wurde das Anfang- und Endgewicht des Filterpapiers mit Hilfe einer Präzisionswaage (Kern ACJ 500-4A) erfasst. Durch folgende Gleichung wurde anschließend der Aerosolmassenkonzentration m_c bestimmt:

$$m_c = \frac{m_E - m_0}{t_m V_d}$$

Diese betrug $m_c = 11,7 \text{ mg/ m}^3$. Dabei war das Endgewicht des Filterpapiers $m_E = 599,5 \text{ mg}$, das Anfangsgewicht des Filterpapiers betrug $m_0 = 586,4 \text{ mg}$, die Messzeit t_m betrug 30 Minuten und der durchschnittliche Volumenstrom V_d lag bei 88,5 l/min. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung von NaCl lag bei 0,09 μm , die geometrische Standardabweichung lag bei 2,0.

Die Aerosolmassenkonzentration wurde zusätzlich durch eine sogenannte Neutralizer-Funktion des Filter-Testers ladungsneutralisiert. Danach bewegen sich

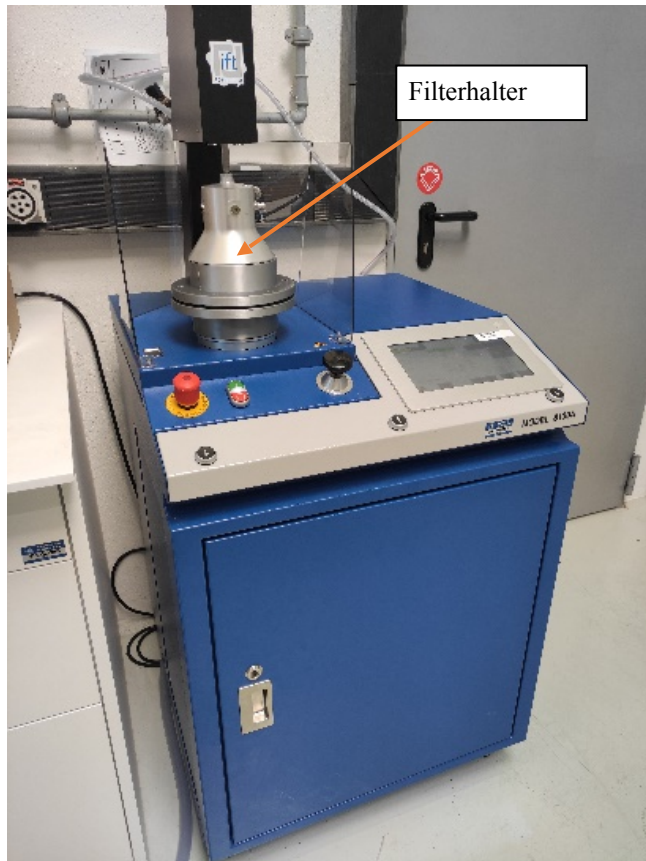


Abb. 2 Filtertester TSI 8130A

die neutralisierten Aerosole in Richtung des Filterhalters. Für den Test wurde die Maske am Filterhalter fixiert. Hierfür wurden die Kopfbänder und die Nasenklemme der Maske entfernt, da diese die Messung verfälschen können. Die prozentuale Durchlassgrad d der Masken wurde durch zwei integrierte Photometer des Filtertesters bestimmt. Diese Photometer detektieren die gesamte Lichtstreuung der Aerosolpartikel und konvertieren die detektierten Signale in eine Spannung. Die Gleichung dafür lautet:

$$d = \frac{U_d}{U_u} \cdot 100$$

Dabei sind U_d und U_u die gemessenen Spannungen am Upstream- bzw. Downstream-Photometer. Anschließend wurde der ermittelte Durchlassgrad auf dem Display des Filtertesters dargestellt und protokolliert. Zusätzlich zur Prüfung der Filterleistung wurde die Anzahl der Schichten je Masken-Modell ermittelt. Hierfür wurde für jedes Masken-Modell die Anzahl der Schichten ermittelt und protokolliert.

Dabei wurde ein Teilstück aus der Maske herausgeschnitten sowie die einzelnen Lagen voneinander getrennt und gezählt.

3.5.2. Prüfung des Atemwiderstands

Für die Messung des Atemwiderstands der FFP2-Masken wurden für die Basislinienmessung drei Masken je Masken-Modell und nach der Gebrauchssimulation eine Maske je Masken-Modell bei einer Umgebungstemperatur von 21,4°C und relativer Luftfeuchtigkeit von 45,7% geprüft. Hierfür wurde ein eigenes Atemwiderstandsprüfgerät verwendet. Dieses misst den Ein- und Ausatemwiderstand der Masken bei drei unterschiedlichen Luftströmen. In Anlehnung der Norm DIN EN 149:2009-08 wurden die Masken für die Atemwiderstandsprüfung sowohl für den Einatem- als auch für den Ausatemwiderstand geprüft. Aus diesem Grund wurden für jede Maske 3 Messungen durchgeführt: 1x Ausatemwiderstand bei 160 l/min Volumenstrom, 2x Einatemwiderstand bei 30 bzw. 95 l/min. Diese Volumenströme sind in der Norm DIN EN 149:2009-08 vorgegeben [16]. Die Einstellungen hierfür erfolgten über ein hausinternes grafisches Programm der *ift Rosenheim GmbH*, das speziell für die Bedienung der Atemwiderstandsprüfrichtung entwickelt wurde. Dort lassen sich die Volumenströme über einen Druckregler, Messungsdauer und die Art der Messung anpassen und einstellen.

Entsprechend der Norm DIN EN 149:2009-08 wurde die Messung an einem speziellen Prüfkopf (z.B. Sheffield-Prüfkopf, Dr. Wiesner Steuerungstechnik GmbH) mit der zu testenden FFP2-Maske in unterschiedlichen Kopfhaltungen, wie sie im Arbeitsleben unter realen Bedingungen entsteht, durchgeführt (Abbildung 3). In dieser Untersuchung erfolgte die Messung des Atemwiderstands jedoch nur in einer senkrechten Kopfposition (geradeaus

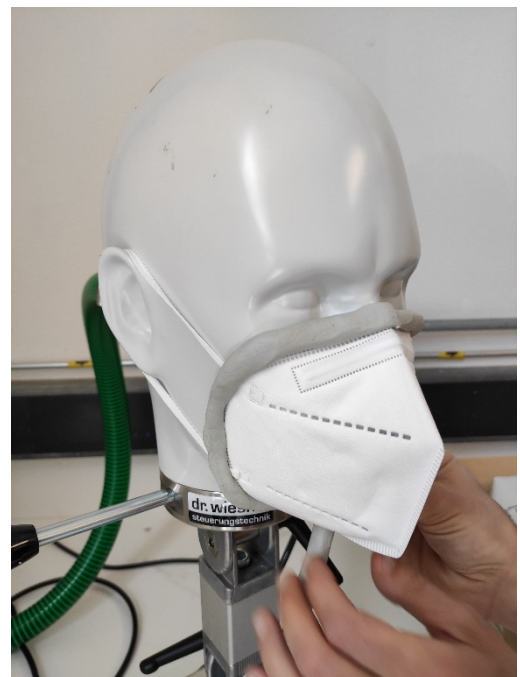


Abb. 3 Die zu testende Maske wird mit einer Knetmasse abgedichtet

sehend). Hierfür wurde die Maske an den Rändern mit einer elastischen wiederverwendbaren Knetmasse abgedichtet (siehe Abbildung 3). Dies dient dazu, Leckagen zu vermeiden, die die Messwerte beeinträchtigen.

Der Prüfkopf war an ein Schlauchsystem angeschlossen, die Druckdifferenz hinter der Maske gegenüber dem Umgebungsdruck wurde von einem Drucksensor aufgezeichnet und grafisch auf dem Bildschirm in einem Programm ausgegeben.

Vor dem Testen der Maske wurde das Prüfgerät für die Atemwiderstandsmessung kalibriert, indem der Widerstand ohne Maske gemessen wurde. Beim Aufsetzen der Masken führt der erzeugte Luftstrom zu einer zunehmenden Luftgeschwindigkeit durch die FFP2-Maske und einem Druckabfall im Schlauchsystem, welches als Maß für den Atemwiderstand gilt. Die Messwerte des Atemwiderstands wurden anschließend in einer Tabelle protokolliert.

4. ERGEBNISSE

4.1. Messungen im fabrikneuen Zustand (Basislinienmessung)

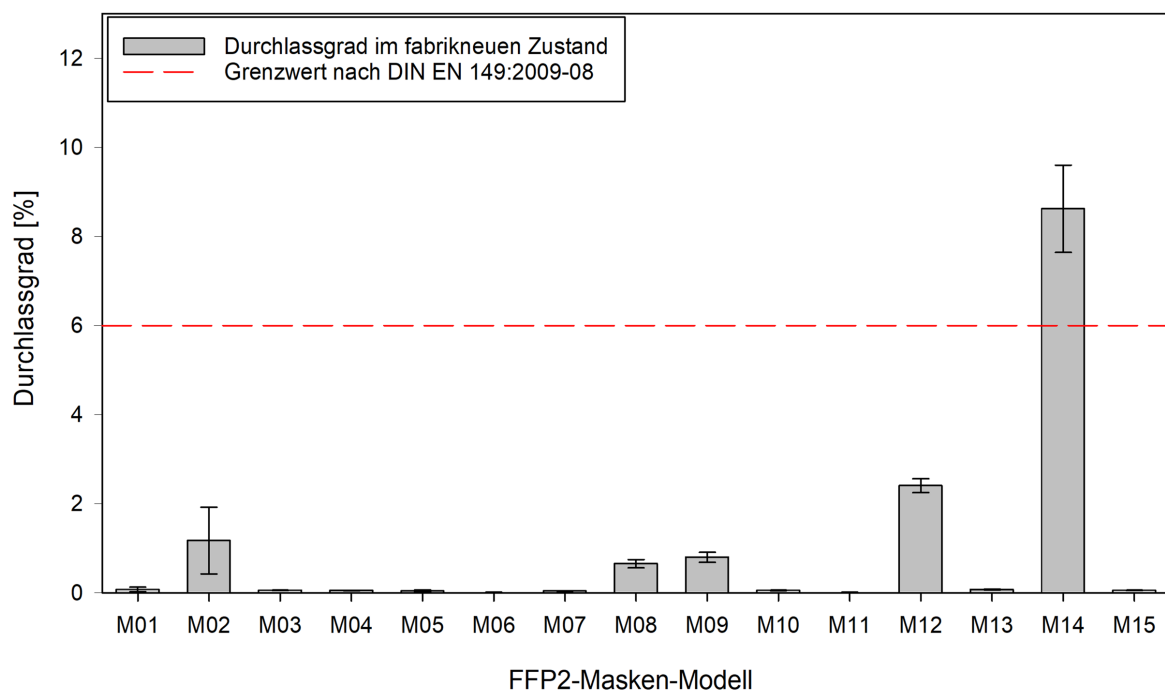


Abb. 4 Gemessener Durchlassgrad der Maskenmodelle im fabrikneuen Zustand (Mittelwert \pm Standardabweichung).

Die Ergebnisse für den Durchlassgrads der Masken im fabrikneuen Zustand sind in in Abbildung 4 bzw. Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2 Gemessener Durchlassgrad [%] im fabrikneuen Zustand (Mittelwert \pm Standardabweichung) sowie Anzahl der ermittelten Filterlagen jedes Maskenmodell. In roter Farbe hervorgehoben sind Werte, die über dem entsprechenden Grenzwert (6%) der Norm DIN EN 149:2009-08 lagen.

| Maskenmodell | Durchlassgrad [%] | |
|--------------|--------------------|-------------|
| | Basislinienmessung | Filterlagen |
| M01 | 0,075 \pm 0,052 | 5 |
| M02 | 1,170 \pm 0,750 | 5 |
| M03 | 0,055 \pm 0,001 | 5 |
| M04 | 0,049 \pm 0,005 | 5 |
| M05 | 0,039 \pm 0,023 | 5 |
| M06 | 0,013 \pm 0,001 | 5 |
| M07 | 0,039 \pm 0,006 | 5 |
| M08 | 0,652 \pm 0,093 | 5 |
| M09 | 0,795 \pm 0,111 | 5 |
| M10 | 0,054 \pm 0,006 | 5 |
| M11 | 0,009 \pm 0,002 | 5 |
| M12 | 2,402 \pm 0,156 | 5 |
| M13 | 0,070 \pm 0,009 | 4 |
| M14 | 8,620 \pm 0,980 | 4 |
| M15 | 0,054 \pm 0,004 | 4 |

Die gemessenen Werte für den Durchlassgrad reichen von 0,009 bis 8,620 %.

14 der 15 getesteten Maskenmodelle lagen im fabrikneuen Zustand im Normbereich und damit unterhalb des Grenzwertes von 6% gemäß DIN EN 149:2009-08. Ein Masken-Modell (M14) erreichte den höchsten Durchlassgrad bei 8,6 % und lag somit 2,6% über dem in der Norm festgelegten Grenzwert. Den niedrigsten Durchlassgrad erreichte das Masken-Modell M11 mit einem Wert von 0,009%.

Für die Messung des Atemwiderstandes wurden ebenfalls 3 Masken je Masken-Modell im fabrikneuen Zustand verwendet. Da die Grenzwerte für den Atemwiderstand in Norm DIN EN 149:2009-08 in mbar angegeben sind, wurden die

Messwerte von der Einheit Pascal [Pa] in Millibar [mbar] umgerechnet. Die ermittelten Messwerte sind in Abbildung 5 bzw. Tabelle 3 zusammengefasst.

Das Säulendiagramm (Abbildung 5) zeigt die Messwerte für den Atemwiderstand [mbar] für die untersuchten FFP2-Maskenmodelle. 14 von 15 Masken im fabrikneuen Zustand erfüllten die Anforderungen der Norm hinsichtlich des maximal zulässigen Atemwiderstandes. Das Masken-Modell M09 erzielte den am höchsten gemessenen Atemwiderstandswert. Dieses Modell wies einen Atemwiderstand von 0,77 mbar bei 30 l/min, 2,77 mbar bei 95 l/min und 3,04 mbar bei 160 l/min auf. Diese Werte liegen jeweils um 10%, 15,4% und 1,3% oberhalb des maximalen zulässigen Grenzwertes der Norm DIN EN 149:2009-08.

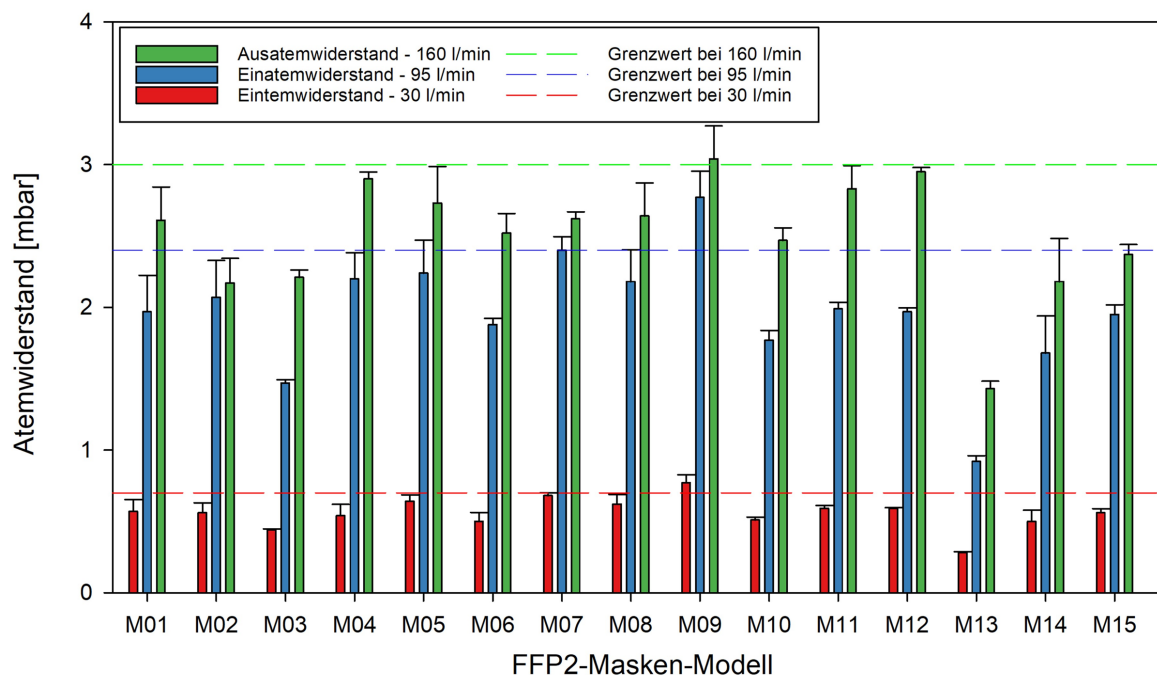


Abb. 5 Gemessener Atemwiderstand [mbar] bei unterschiedlichen Volumenströmen im fabrikneuen Zustand (Mittelwert \pm Standardabweichung)

In Tabelle 3 sind die Atemwiderstandswerte sowie Standardabweichungen SD bei 3 unterschiedlichen Volumenströme (30 l/min, 95 l/min, 160 l/min) zusammengestellt. Der angegebene Atemwiderstand für die Masken im fabrikneuen Zustand wurde aus dem Mittelwert der 3 untersuchten Masken je Masken-Modell berechnet. Gemäß der Norm DIN EN 149:2009-08 sollen die FFP2-Maksen eine maximalen Atemwiderstand von 0,7 mbar bei 30 l/min, 2,4 mbar bei 95 l/min und 3 mbar bei 160 l/min im fabrikneuen Zustand nicht überschreiten.

Tab. 3 Gemessener Atemwiderstand im fabrikneuen Zustand bei inspiratorischem Volumenstrom von 30 l/min, 95 l/min und bei expiratorischem Volumenstrom von 160 l/min gemäß der Norm DIN EN 149:2009-08 (Mittelwert \pm Standardabweichung). In roter Farbe hervorgehoben sind Werte, die über den entsprechenden Grenzwerten der Norm lagen (0,7 mbar bei 30 l/min, 2,4 mbar bei 95 l/min und 3 mbar bei 160 l/min).

| Atemwiderstand [mbar] | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Maskenmodell | bei 30 l/min | bei 95 l/min | bei 160 l/min |
| M01 | 0,57 \pm 0,08 | 1,97 \pm 0,26 | 2,61 \pm 0,23 |
| M02 | 0,56 \pm 0,07 | 2,07 \pm 0,26 | 2,17 \pm 0,17 |
| M03 | 0,44 \pm 0,01 | 1,47 \pm 0,02 | 2,21 \pm 0,05 |
| M04 | 0,54 \pm 0,08 | 2,20 \pm 0,18 | 2,90 \pm 0,05 |
| M05 | 0,64 \pm 0,05 | 2,24 \pm 0,23 | 2,73 \pm 0,26 |
| M06 | 0,50 \pm 0,06 | 1,88 \pm 0,04 | 2,52 \pm 0,14 |
| M07 | 0,68 \pm 0,02 | 2,40 \pm 0,10 | 2,62 \pm 0,05 |
| M08 | 0,62 \pm 0,07 | 2,18 \pm 0,23 | 2,64 \pm 0,23 |
| M09 | 0,77 \pm 0,06 | 2,77 \pm 0,19 | 3,04 \pm 0,23 |
| M10 | 0,51 \pm 0,02 | 1,77 \pm 0,07 | 2,47 \pm 0,09 |
| M11 | 0,59 \pm 0,02 | 1,99 \pm 0,05 | 2,83 \pm 0,16 |
| M12 | 0,59 \pm 0,01 | 1,97 \pm 0,03 | 2,95 \pm 0,03 |
| M13 | 0,28 \pm 0,01 | 0,92 \pm 0,04 | 1,43 \pm 0,05 |
| M14 | 0,50 \pm 0,08 | 1,68 \pm 0,26 | 2,18 \pm 0,30 |
| M15 | 0,56 \pm 0,03 | 1,95 \pm 0,07 | 2,37 \pm 0,07 |

4.2. Gebrauchssimulation (Belastungstest)

Tabelle 4 zeigt die gemessenen Durchlassgrade der Maskenmodelle nach der Gebrauchssimulation.

Tab. 4 Gemessener Durchlassgrad [%] nach der Gebrauchssimulation. In roter Farbe hervorgehoben sind Werte, die über dem entsprechenden Grenzwert (6%) der Norm DIN EN 149:2009-08 lagen.

| Durchlassgrad [%] | |
|-------------------|-------------------------|
| Maskenmodell | nach dem Belastungstest |
| M01 | 0,126 |
| M02 | 2,162 |
| M03 | 0,060 |
| M04 | 0,475 |
| M05 | 0,196 |

| | |
|------------|--------|
| M06 | 0,014 |
| M07 | 0,074 |
| M08 | 1,646 |
| M09 | 2,086 |
| M10 | 0,145 |
| M11 | 0,018 |
| M12 | 4,532 |
| M13 | 0,072 |
| M14 | 12,088 |
| M15 | 0,079 |

Der zulässige Grenzwert für den Durchlassgrad wurde bei 14 von der 15 untersuchten Maskenmodelle einhalten. Für das Masken-Modell M14 wurde ein Durchlassgrad von 12,09% gemessen. Dieser ist mehr als doppelt so hoch wie der zulässige Grenzwert von 6%.

Die Messungen des Atemwiderstands wurden jeweils mit einem Volumenstrom von 30 l/min, 95 l/min inspiratorisch und 160 l/min expiratorisch durchgeführt. Die Messwerte sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Tab. 5 Gemessener Atemwiderstand [mbar] nach der Gebrauchssimulation bei inspiratorischem Volumenstrom von 30 l/min, 95 l/min und bei expiratorischem Volumenstrom von 160 l/min gemäß der Norm DIN EN 149:2009-08 (Mittelwert \pm Standardabweichung). In roter Farbe hervorgehoben sind Werte, die über den entsprechenden Grenzwerten der Norm lagen (0,7 mbar bei 30 l/min, 2,4 mbar bei 95 l/min und 3 mbar bei 160 l/min).

| Atemwiderstand [mbar] | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Maskenmodell | 30 l/min | 95 l/min | 160 l/min |
| M01 | 0,39 | 1,37 | 2,09 |
| M02 | 0,36 | 1,40 | 1,83 |
| M03 | 0,38 | 1,31 | 2,04 |
| M04 | 0,66 | 2,55 | 2,90 |
| M05 | 0,53 | 1,91 | 2,50 |
| M06 | 0,55 | 1,94 | 2,62 |
| M07 | 0,66 | 2,29 | 2,49 |
| M08 | 0,53 | 1,80 | 2,71 |
| M09 | 0,75 | 2,73 | 2,71 |

| | | | |
|------------|------|------|------|
| M10 | 0,39 | 1,35 | 2,02 |
| M11 | 0,47 | 1,62 | 2,47 |
| M12 | 0,41 | 1,40 | 2,17 |
| M13 | 0,26 | 0,92 | 1,43 |
| M14 | 0,39 | 1,48 | 1,91 |
| M15 | 0,44 | 1,57 | 2,23 |

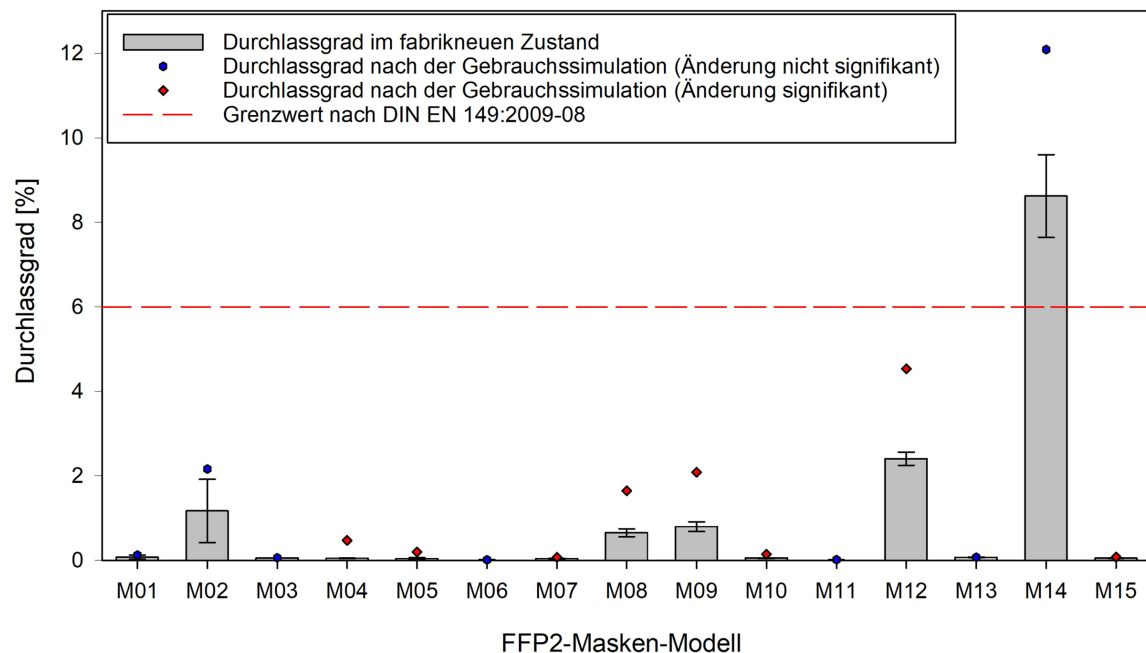


Abb. 6 Vergleich des Durchlassgrads im fabrikneuen Zustand (Mittelwert \pm Standardabweichung) und nach der Gebrauchssimulation.

Für einen Volumenstrom von 30 l/min wurde der Grenzwert für den Atemwiderstand bei 14 der 15 untersuchten Maskenmodelle eingehalten, für einem Volumenstrom von 95 l/min bei 13 von 15 Maskenmodellen und bei einem Volumenstrom von 160 l/min bei allen Maskenmodellen. Nicht eingehalten wurde der Grenzwert bei den Maskenmodell M09 und M04. Die gemessenen Werte lagen bei M09 um 7,1% (bei 30 l/min) und um 13,8% (bei 95 l/min) höher als der zulässige Grenzwert. Bei M04 lag der Messwert bei 2,55 mbar (bei 95 l/min) und lag demzufolge um 6,3% über dem Grenzwert.

4.3. Vergleich der Ergebnisse vor und nach der Gebrauchssimulation

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der Maskenmodelle im fabrikneuen Zustand und nach der Gebrauchssimulation. Der Durchlassgrad der fabrikneuen Masken wird

durch graue Balken dargestellt. Die entsprechenden Messwert nach der Gebrauchssimulation sind durch rote bzw. blaue Punkte dargestellt. Die blauen Punkte zeigen auf, dass keine signifikanten Änderungen in den Werten vor und nach der Gebrauchssimulation bestand, während die roten einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$) kennzeichnen. Bei 8 der untersuchten Maskenmodellen zeigten die Messwerte nach der Gebrauchssimulation eine signifikante Änderung ($p < 0,05$) im Vergleich zum fabrikneuen Zustand. Mit Ausnahme von M14 lagen aber alle Werte unterhalb des Grenzwerts der Norm DIN EN 149:2009-08.

Die Unterschiede zwischen den gemessenen Atemwiderstandswerten im fabrikneuen Zustand (Basislinienmessung) und nach der Gebrauchssimulation (Belastungstest) sind in Abbildungen 7-9 dargestellt.

Abbildung 7 zeigt die Atemwiderstandswerte vor und nach der Gebrauchssimulation bei einem Volumenstrom von 30 l/min. Dabei kann aus der Abbildung eine tendenzielle Senkung der Atemwiderstandswerte nach der Gebrauchssimulation im

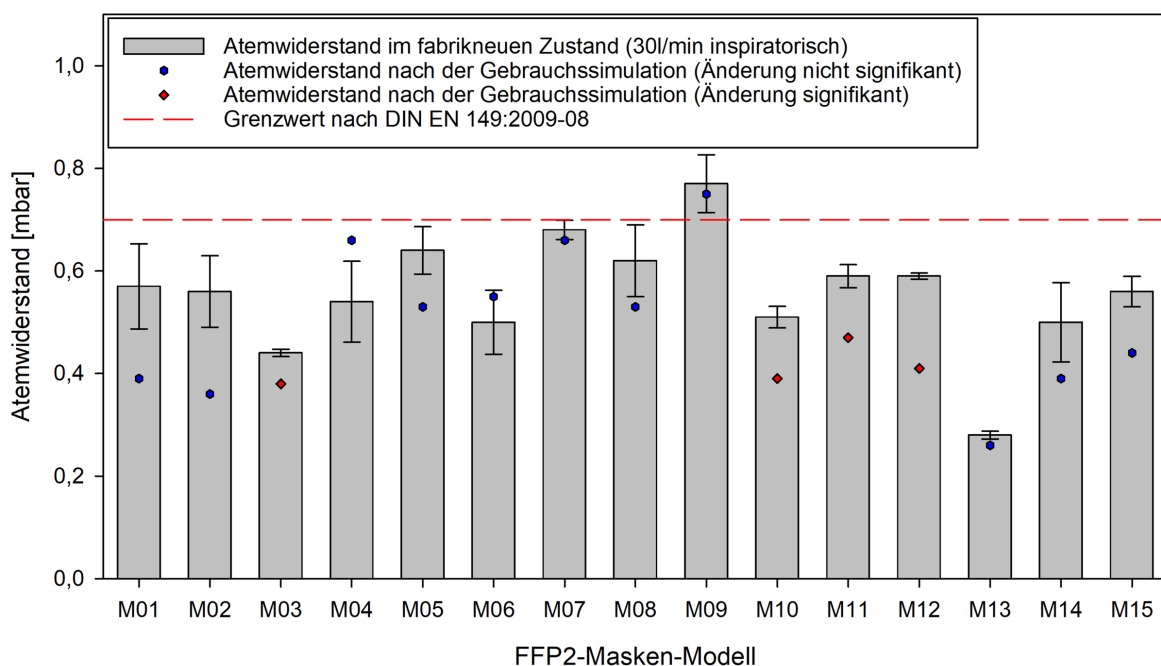


Abb. 7 Vergleich des Atemwiderstands bei 30 l/min Volumenstrom im fabrikneuen Zustand (Mittelwert \pm Standardabweichung) und nach der Gebrauchssimulation.

Vergleich zum fabrikneuen Zustand beobachtet werden. Signifikante Änderungen ($p < 0,05$) sind als rote, nicht signifikante Änderungen als blaue Punkte dargestellt. Bei 4 der 15 untersuchten Maskenmodelle wurde eine signifikante Abnahme ($p < 0,05$) des Atemwiderstandes bei einem Volumenstrom von 30 l/min beobachtet.

Abbildung 8 zeigt die Atemwiderstandswerte vor und nach der Gebrauchssimulation bei einem Volumenstrom von 95 l/min. Auch hier ist eine tendenzielle Verringerung des Atemwiderstands nach der Gebrauchssimulation im Vergleich zum fabrikneuen Zustand erkennbar. Bei 5 der 15 untersuchten Maskenmodelle verringerte sich der Atemwiderstand signifikant ($p < 0,05$). Zudem lag das Masken-Modell M09 mit einem Atemwiderstand von 2,73 mbar um 13,8% über dem zulässigen Grenzwert.

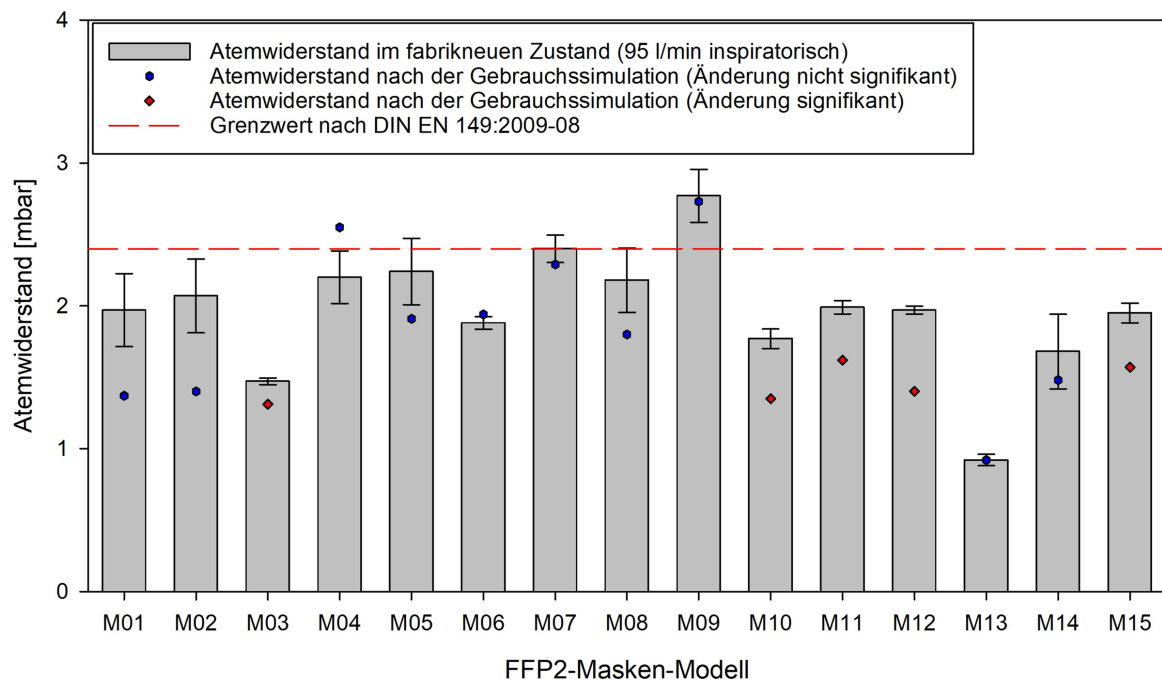


Abb. 8 Vergleich des Atemwiderstands bei 95 l/min Volumenstrom im fabrikneuen Zustand (Mittelwert \pm Standardabweichung) und nach der Gebrauchssimulation.

Abbildung 9 zeigt die Atemwiderstandswerte vor und nach der Gebrauchssimulation bei einem Volumenstrom von 160 l/min. Bei zwei Maskenmodellen (M10 und M12) waren die Atemwiderstände im Vergleich zu Masken im fabrikneuen Zustand signifikant ($p < 0,05$) verringert. M12 weist dabei einen Atemwiderstand von 2,17 mbar auf, der um 26,3% geringer als im fabrikneuen Zustand ist.

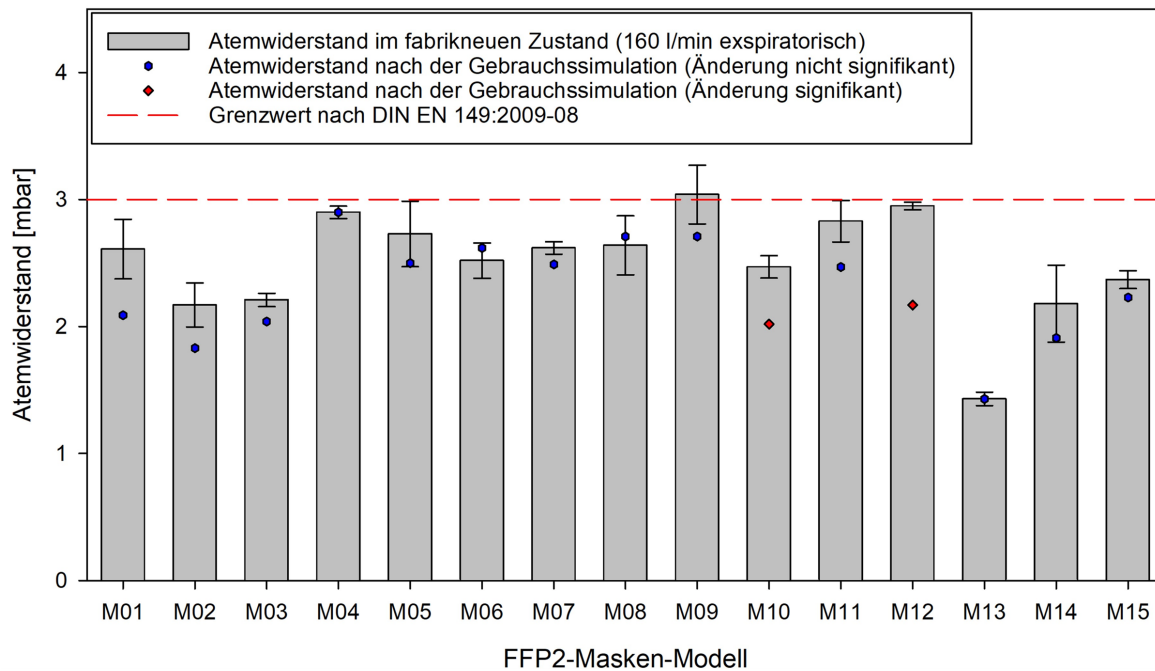


Abb. 9 Vergleich des Atemwiderstands bei 160 l/min Volumenstrom im fabrikneuen Zustand (Mittelwert \pm Standardabweichung) und nach der Gebrauchssimulation.

Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang zwischen den beiden Parametern Atemwiderstand und Durchlassgrad. Verwendet wurden die Atemwiderstandswerte bei 30 l/min, da hier ein Volumenstrom ähnlich wie bei leichter körperlicher Belastung vorherrscht. Deutlich wird hierbei der Unterschied zwischen den fabrikneuen Masken (blaue Punkte) und den Masken nach der Gebrauchssimulation (rote Punkte).

Die beiden Grenzwerte (durchgezogene dunkelgraue Linien) zeigen die entsprechenden Grenzwerte der Norm nach DIN EN 149:2009-08 (Durchlassgrad $\leq 6\%$; Atemwiderstand $\leq 0,7$ mbar). Anzumerken ist hierbei, dass das Masken-Modell M09 sowohl im fabrikneuen Zustand als auch nach der Gebrauchssimulation über dem zulässigen Grenzwert für den Atemwiderstand lag. Das Masken-Modell M14 lag sowohl im fabrikneuen Zustand als auch nach der Gebrauchssimulation über dem zulässigen Grenzwert für den Durchlassgrad. Alle anderen Masken liegen im Normbereich und erfüllen vor und nach der Gebrauchssimulation die Anforderungen gemäß der Norm DIN EN 149:2009-08.

Aus Anwendersicht ist ein niedriger Durchlassgrad bei gleichzeitig niedrigem Atemwiderstand wünschenswert. Dieses Kriterium wurde am besten vom Masken-Modell M13 erfüllt.

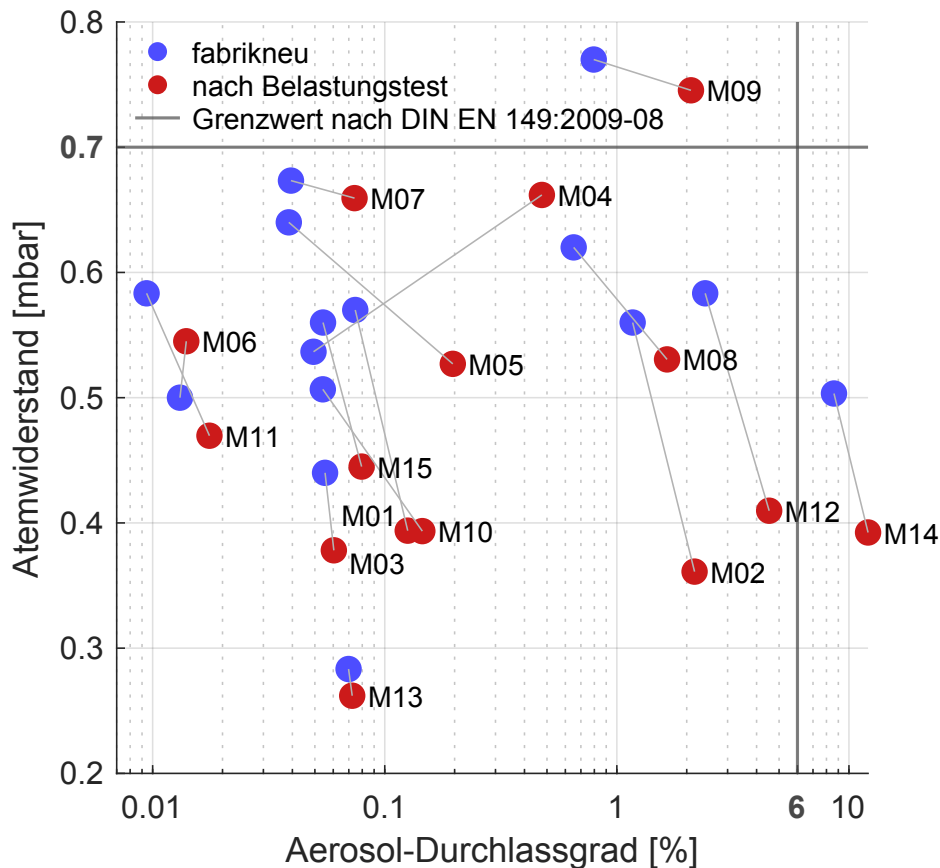


Abb. 10 Durchlassgrad und Atemwiderstand (bei einem Volumenstrom von 30 l/min) im fabrikneuen Zustand und nach der Gebrauchssimulation.

5. DISKUSSION

5.1. Maskenmodelle im fabrikneuen Zustand

Die Ergebnisse im fabrikneuen Zustand zeigen einen deutlich niedrigeren Durchlassgrad als er in der Norm DIN EN 149:2009-08 gefordert ist. Insgesamt wiesen 12 von 15 Masken einen Wert von weniger als 1% auf, was weit unter dem maximal zulässigen Durchlassgrad von 6% gemäß der Norm DIN EN 149:2009-08 liegt. Diese Werte entsprechen dem Standard von FFP3-Masken. Hier ist anzumerken, dass sogar 10 der 15 Maskenmodelle einen Durchlassgrad von weniger als 0,1% aufwiesen. Zugleich wird bei 14 der 15 Maskenmodellen den maximal zulässigen Atemwiderstand von 0,7 mbar bei 30 l/min, 2,4 mbar bei 95 l/min und 3 mbar bei 160 l/min eingehalten. Nur die beiden Maskenmodelle M09 und M14 konnten den vorgegebenen Standard hinsichtlich des Atemwiderstands bzw. des Durchlassgrads nicht erfüllen.

5.2. Vergleich der Ergebnisse vor und nach dem Belastungstest mit Wärmebehandlung

Die Ergebnisse zur Messung des Durchlassgrads zeigen, dass bei 8 der 15 Maskenmodelle der Durchlassgrad nach der Gebrauchssimulation signifikant ($p < 0,05$) erhöht war. Trotz dieser signifikanten Erhöhung liegt das Ergebnis immer noch im Normbereich, welcher sich unter der Grenze von 6% befindet. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die Maskenmodelle im fabrikneuen Zustand einen sehr niedrigen Durchlassgrad aufwiesen, der deutlich unterhalb der 6% Grenze lag (ausgenommen M14).

Die Ergebnisse zur Messung des Atemwiderstandes zeigen eine tendenzielle Abnahme der Atemwiderstandswerte nach der Gebrauchssimulation. Daraus ergibt sich ein verbesserter Atemkomfort. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu einer Studie aus den USA [17], in welcher der Atemwiderstand von N95-Masken nach einer Tragedauer von 4 Stunden untersucht wurde. Die Messungen des Atemwiderstands wurden dabei im durchfeuchteten Zustand durchgeführt. Dabei wurde ein Anstieg des Atemwiderstands um 3% festgestellt [17]. Im Gegensatz dazu wurde in der vorliegenden Untersuchung der Atemwiderstand nach der Gebrauchssimulation im trockenen Zustand gemessen, was ein möglicher Grund für die Diskrepanz der Ergebnisse sein könnte.

Abschließend wird angemerkt, dass im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht der vollständige Test gemäß der Norm DIN EN 149:2009-08 angewendet wurde, wie er für die Zertifizierungsprüfung von FFP2-Masken vorgeschrieben ist. Vielmehr wurden für diese Untersuchung Teilttests in Anlehnung an die oben genannte Norm verwendet, um die Wiederverwendbarkeit von FFP2-Masken im privaten Bereich zu untersuchen. Als Grundlage für diese Untersuchung dienten die Messungen des Durchlassgrades und des Atemwiderstandes vor und nach einer Gebrauchssimulation (Belastungstest), die in Anlehnung an die Beschreibung in der Norm DIN EN 149:2009-08 verwendet wurde.

5.3. Zusammenhang zwischen Maskenschichtanzahl, Filterleistung und Atemwiderstand

Hinsichtlich der Situation, dass die Masken unterschiedliche Anzahl von Schichten haben, war eine Untersuchung diesbezüglich notwendig, um herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Maskenschichten, der Filterleistung und des Atemwiderstands besteht.

Aus der Untersuchung konnte kein Zusammenhang zu der Filterleistung und dem Atemwiderstand festgestellt werden. 12 von 15 Masken sind fünflagig, M13, M14 und M15 bestehen aus vier Schichten. Hierbei ist anzumerken, dass sich die Werte für Filterleistung und Atemwiderstand sowohl bei den fünflagigen als auch bei den vierlagigen Masken untereinander unterscheiden. Infolgedessen war keine Verschlechterung oder Verbesserung der Filterleistung bzw. des Atemwiderstandes in Zusammenhang zu der Schichtanzahl zu erkennen.

5.4. Ausblick

Ein möglicher Ansatz für weitere Untersuchungen ist die mikroskopische Analyse der Filterschichten der Maskenmodelle mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes, um potenzielle Materialveränderungen zu untersuchen. Darüber hinaus könnte eine Langzeituntersuchung der Maskenmodelle mit Probanden durchgeführt werden, um die Ergebnisse mit den Daten dieser Untersuchung zu vergleichen. Aufgrund der COVID-19-Pandemie und der damit verbundenen strengen Auflagen zum Infektionsschutz war eine derartige Untersuchung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht praktikabel. Hierfür könnten weitere Parameter und Test-Bedingungen wie zum Beispiel die mechanische Beanspruchung der Masken sowie Belastungen mit unterschiedlicher Atemvolumina berücksichtigt werden. In diesem Kontext wäre auch eine Überprüfung der Maskenleckage sinnvoll [18].

Literaturverzeichnis

- [1] C. Wang, P. W. Horby, F. G. Hayden und G. F. Gao, „A novel coronavirus outbreak of global health concern“, *The Lancet*, Jg. 395, Nr. 10223, S. 470–473, 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30185-9.
- [2] Weltgesundheitsorganisation, *Novel Coronavirus(2019-nCoV): Situation Report – 22*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200211-sitrep-22-ncov.pdf?sfvrsn=fb6d49b1_2. (Zugriff am: 12. Juni 2021).
- [3] Weltgesundheitsorganisation, *Das Virus*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.euro.who.int/de/health-topics/health-emergencies/coronavirus-covid-19/novel-coronavirus-2019-ncov> (Zugriff am: 13. Juni 2021).
- [4] F. He, Y. Deng und W. Li, „Coronavirus disease 2019: What we know?“ (eng), *Journal of medical virology*, Jg. 92, Nr. 7, S. 719–725, 2020, doi: 10.1002/jmv.25766.
- [5] M. H. Chua *et al.*, „Face Masks in the New COVID-19 Normal: Materials, Testing, and Perspectives“ (eng), *Research (Washington, D.C.)*, Jg. 2020, S. 7286735, 2020, doi: 10.34133/2020/7286735.
- [6] Weltgesundheitsorganisation, *When and how to use masks*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public/when-and-how-to-use-masks> (Zugriff am: 14. Juni 2021).
- [7] C. Oh *et al.*, „Dry Heat as a Decontamination Method for N95 Respirator Reuse“, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, Jg. 7, Nr. 9, S. 677–682, 2020, doi: 10.1021/acs.estlett.0c00534.
- [8] P. de Man, B. van Straten, J. van den Dobbelen, A. van der Eijk, T. Horeman und H. Koeleman, „Sterilization of disposable face masks by means of standardized dry and steam sterilization processes; an alternative in the fight against mask shortages due to COVID-19“ (eng), *The Journal of hospital infection*, Jg. 105, Nr. 2, S. 356–357, 2020, doi: 10.1016/j.jhin.2020.04.001.
- [9] L. Liao *et al.*, „Can N95 Respirators Be Reused after Disinfection? How Many Times?“ (eng), *ACS nano*, Jg. 14, Nr. 5, S. 6348–6356, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c03597.
- [10] Team „Wiederverwendung von FFP2-Masken“, *Möglichkeiten und Grenzen der eigenverantwortlichen Wiederverwendung von FFP2-Masken für den*

- Privatgebrauch: im Rahmen einer epidemischen Lage.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fh-muenster.de/gesundheit/forschung/forschungsprojekte/moeglichkeiten-und-grenzen-der-eigenverantwortlichen-wiederverwendung-von-ffp2-masken-im-privatgebrauch/index.php> (Zugriff am: 22. Juni 2021).
- [11] R. J. Fischer *et al.*, „Effectiveness of N95 Respirator Decontamination and Reuse against SARS-CoV-2 Virus“ (eng), *Emerging infectious diseases*, Jg. 26, Nr. 9, 2020, doi: 10.3201/eid2609.201524.
- [12] *Atemschutzgeräte –Filterierende Halbmasken zum Schutz gegen Partikeln – Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung;: Deutsche Fassung EN 149:2001+A1:2009*, DIN EN 149, DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-149/118506130>
- [13] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, *FFP-Faltmaske*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/LifeSciencesEngineering/gemeinsam-gegen-das-corona-virus/lifebelt/ffp-faltmaske.html> (Zugriff am: 26. Juni 2021).
- [14] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., *Benutzung von Atemschutzgeräten: DGUV Regel 112-190*.
- [15] H. Azizi, Untersuchung der Wiederverwendbarkeit von FFP2-Masken im Kontext von COVID-19 anhand der Parameter Filterleistung und Atemwiderstand. Bachelorarbeit, Hochschule München, 19.8.2021.
- [16] *Atemschutzgeräte –Filterierende Halbmasken zum Schutz gegen Partikeln – Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung;: Deutsche Fassung EN 149:2001+A1:2009*, DIN EN 149, DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-149/118506130>
- [17] R. J. Roberge, E. Bayer, J. B. Powell, A. Coca, M. R. Roberge und S. M. Benson, „Effect of exhaled moisture on breathing resistance of N95 filtering facepiece respirators“ (eng), *The Annals of occupational hygiene*, Jg. 54, Nr. 6, S. 671–677, 2010, doi: 10.1093/annhyg/meq042.
- [18] Robert Koch-Institut, *Infektionsschutzmaßnahmen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rki.de/SharedDocs/FAQ/NCOV2019/FAQ_Liste_Infektionsschutz.html.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns herzlich bei den Mitarbeitern des Unternehmens *ift Rosenheim GmbH* für die großartige Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Insbesondere danken wir Herrn Stephan Rauscher und Herrn Michael Beckl-Stock für die hilfreichen Diskussionen zum experimentellen Design der Studie sowie für die kostenfreie Bereitstellung von Ressourcen.

Wir bedanken uns bei der Firma *Intersurgical Beatmungsprodukte GmbH* für die kostenfreie Bereitstellung von Verbindungsstücken und Schläuchen für den Bau des Beatmungssimulators.

Ebenfalls ein herzliches Dankeschön an Herrn Cäsar Kaiser von der Firma *Weinmann Emergency Medical Technology GmbH + Co. KG* für die kostenfreie Leihgabe eines Beatmungsgeräts.

A. Anhang

Tabelle A1 Darstellung der Mittelwerte MW, Standardabweichungen SD sowie Minima und Maxima der gemessenen Werte für Atemminutenvolumen (AMV), Temperatur und relative Feuchte jedes Maskenmodells

| Masken-ID | Masken-Modell | MW±SD für AMV [l/min] | Min/Max für AMV [l/min] | MW±SD für Temperatur [°C] | Min/Max für Temperatur [°C] | MW±SD für rel. Feuchte [%] | Min / Max für rel. Feuchte [%] |
|-----------|------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| M01 | HT Jiu Zhou | 15,0±0,4 | 14,1 / 15,6 | 32,3±0,2 | 30,2 / 33,4 | 99,9±0,4 | 97,3 / 100 |
| M02 | Baner | 14,9±0,4 | 13,6 / 15,6 | 32,4±0,2 | 30,2 / 33,5 | 99,8±0,6 | 97,7 / 100 |
| M03 | Textilmacher | 14,9±0,4 | 14,2 / 15,6 | 32,3±0,3 | 30,9 / 35,9 | 99,8±0,8 | 98,3 / 100 |
| M04 | Leikang | 14,9±0,3 | 14,3 / 15,4 | 32,2±0,2 | 30,3 / 34,7 | 99,8±0,6 | 97,4 / 100 |
| M05 | Jifa | 14,9±0,3 | 14,3 / 15,4 | 32,7±0,5 | 30,6 / 34,9 | 99,8±0,4 | 98,1 / 100 |
| M06 | Vitalis | 14,9±0,3 | 14,4 / 15,4 | 32,2±0,5 | 31,1 / 34,8 | 99,9±0,4 | 98,4 / 100 |
| M07 | multiTEC | 14,9±0,3 | 14,3 / 15,4 | 32,4±0,3 | 31,2 / 34,0 | 99,8±0,5 | 98,1 / 100 |
| M08 | LP Lindenpartner | 15,0±0,2 | 14,4 / 15,3 | 32,7±0,5 | 31,8 / 35,7 | 99,8±0,4 | 98,1 / 100 |
| M09 | Altapharma | 15,0±0,2 | 14,1 / 15,4 | 32,4±0,3 | 30,9 / 34,6 | 99,8±0,6 | 96,7 / 100 |
| M10 | CRDLIGHT | 14,9±0,3 | 14,3 / 15,4 | 32,1±0,6 | 30,8 / 34,7 | 99,9±0,5 | 98,1 / 100 |
| M11 | EUROPAPA | 14,9±0,2 | 14,3 / 15,4 | 32,4±0,3 | 31,1 / 34,3 | 99,8±0,6 | 97,6 / 100 |
| M12 | Vock Faciem | 15,0±0,2 | 14,4 / 15,4 | 32,2±0,2 | 30,6 / 33,6 | 99,8±0,6 | 97,3 / 100 |
| M13 | 3M Aura 9320 | 14,9±0,3 | 14,3 / 15,4 | 32,4±0,4 | 30,0 / 34,9 | 99,8±0,4 | 98,0 / 100 |
| M14 | Mea Vita | 14,9±0,2 | 14,4 / 15,4 | 32,3±0,4 | 30,9 / 34,1 | 99,8±0,4 | 97,8 / 100 |
| M15 | MC Medical | 14,8±0,3 | 14,3 / 15,4 | 32,8±0,5 | 30,3 / 35,1 | 99,8±0,4 | 98,1 / 100 |