

Strömungsmechanische Bewertung der Umströmung des Gesichtsschildes *PlexyCap* der Firma *Hans Keim Kunststoffe GmbH*

J. Kriegseis^{1, a)}

¹ *Institut für Strömungsmechanik (ISTM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe, Deutschland*

(Dated: 2. Juni 2020)

Die Erstellung dieses Berichts wurde von der Firma *Hans Keim Kunststoffe GmbH* in Auftrag gegeben, um das firmeneigene, CE-zertifizierte Produkt *PlexyCap*^{1,2} als Gesichtsschild hinsichtlich seiner strömungsmechanischen Wirksamkeit zur Minimierung der Tröpfchen- und Aerosolausbreitung vor dem Hintergrund einer Ansteckungsgefahr durch das Virus SARS-CoV-2 zu bewerten. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle getroffenen Aussagen und abgeleiteten Schlussfolgerungen in diesem Dokument auf rein kontinuumsmechanischer Grundlage ohne jederart medizinischer und/oder virologischer Expertise basieren. Als Bewertungsgrundlage dienen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen einer aerosolangereicherten Hustenwolke, die sowohl von außen aus verschiedenen Richtungen als auch von innen auf das Schild appliziert wurde. Das Bildmaterial wurde von der Firma *iLA_5150 GmbH* erzeugt und dem *ISTM* als Bewertungsgrundlage zur Verfügung gestellt.

I. EINFÜHRUNG

Beim Vorgang des Hustens oder Niesens entstehen turbulente Wolken aus Tröpfchen und Aerosolen³ eines breiten Bereichs an Durchmessern d , die aufgrund des hohen Impulses beim Verlassen der Körperöffnung dem Charakter eines turbulenten Freistrahls ähneln. Im Falle des Coronavirus sind dabei sowohl die Tröpfchen als auch die Aerosole als potentiell infektiös einzustufen⁴. Jüngste Untersuchungen von van Dorremalen *et al.*⁵ haben die Bedeutung des Aerosols als potentieller Überträger herausgestellt, da die Halbwertszeit sowohl von SARS-CoV-1 als auch SARS-CoV-2 Viren in derartigen Partikeln bei über einer Stunde liegt. Diese beiden Studien^{4,5} in Kombination mit früheren Untersuchungen der Tröpfchengrößenverteilung des Ausstoßes beim Husten^{6,7} machen deutlich, dass es wichtig ist, die Bewegung der Aerosole $d < 5 \mu\text{m}$ bei der Bewertung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen.

Bei der Unterbindung des Ausbreitens des kontaminierten Strahls im Zusammenhang mit den zur Verfügung stehenden Schutzmechanismen (Maske/Visier) muss grundsätzlich zwischen zwei Schutzfunktionen unterschieden werden^{8,9}. Beim *Fremdschutz* möchte der Träger seine Umgebung vor der eigenen Tröpfchen- und Aerosolemission schützen, während er beim *Eigenschutz* seinen eigenen Körper vor Aerosolkontamination von außen schützen möchte (vgl. auch *persönliche Schutzausrüstung*, PSA).

Zur Wirksamkeit der typischen Maskenarten gibt es teils widersprüchliche Aussagen zur Ausbreitung und Beständigkeit von Aerosolen. Die vergleichende Studie von Kähler und Hain¹⁰ zur Wirksamkeit verschiedene Filtermaterialien zum Eigenbau vom sog. *Community Masken* haben gezeigt, dass die typischerweise zur Herstellung verwendeten Materialien größtenteils ungeeignet sind, um Aerosole aufzuhalten. Ihre ausdrückliche Empfehlung ist die Verwendung von FFP2 (oder besser FFP3) Masken.

Vergleichende Feldmessungen bei der Verwendung von OP-Masken und N95-Masken (US amerikanisches Equivalent zu FFP2-Masken) haben auf anschauliche Weise die übermäßigen Leakageströme nach oben und zur Seite gezeigt, falls der FFP2-Standard nicht eingehalten werden kann¹¹.

Im Gegensatz dazu steht eine Studie von Leung *et al.*¹², in der die Autoren auf Basis von Probandenversuchen schlussfolgern, dass OP-Masken einen Raum vor Aerosolausbreitung schützen können. Der unmittelbare Zusammenhang zwischen der Sorgfalt des richtigen Positionierens und Abdichtens der Maske und der Schutzwirkung wurde von Lai *et al.*¹³ quantifiziert, wobei sich herausstellte, dass ein normal getragene Maske gegenüber einer bewusst angedichteten Version nur noch etwa 40 % der Schutzwirkung zeigte.

In kürzlich veröffentlichten Visualisierungen des Hustens¹⁴ durch verschiedenartige Masken (FFP1, OP) und maskenartige Behelfslösungen (T-shirt, Schal, *Community Maske*, Skimaske) wurden die Defizite von OP-Masken gegenüber einer FFP-klassifizierten Maske als Maßnahme zum *Fremdschutz* jedoch sowohl hinsichtlich Leakage¹¹ als auch Durchdringung¹⁰ bestätigt. Die noch limitiertere Wirksamkeit sämtlicher getesteter Behelfslösungen zeigte sich darin, dass das Aerosol zum einen nach dem Passieren des Filtermaterials noch hinreichenden Restimpuls zur weiteren horizontalen Ausbreitung hatte und zum anderen auch der Leakageeffekt verstärkt an Nase, Kinn und Wangen auftrat.

Da zertifizierte Schutzmasken (OP, FFP) aktuell aufgrund der aktuellen Versorgungslage vorwiegend dem Gesundheitssektor zur Verfügung stehen, werden für den privaten Gebrauch aktuell die nicht-zertifizierten Behelfslösungen (*Community Masken* etc.) als adäquater Mund-Nase-Schutz empfohlen¹⁵. Der Umgang mit einer alternativen Behelfslösung zur *Community Maske* mit Hilfe von Visieren wird derzeit von den Bundesländern kontrovers behandelt, wo mit ähnlicher Argumentation hinsichtlich der limitierten Schutzfunktion die Visiere und Behelfsmasken entweder gleich behandelt^{16,17} oder die Visiere als nicht hinreichende Schutzmaßnahme deklariert werden^{18,19}.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieses Berichts, die strömungsmechanische Charakterisierung der *PlexyCap* im

^{a)}Electronic mail: kriegseis@kit.edu

Vergleich zu *Community Masken* auf der Basis von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen einer aerosolangereicherten Hustenwolke, die sowohl von außen (*Eigenschutz*) als auch von innen (*Fremdschutz*) auf das Visier appliziert wurde, zu beschreiben. Zusätzliches Bildmaterial für die vergleichende Bewertung des Fremdschutzes von *Community Masken* steht ebenfalls zur Verfügung. Für den Eigenschutz mit solchen Behelfslösungen wird der Kenntnisstand der Studie von Kähler und Hain¹⁰ zur Wirksamkeit verschiedener Filtermaterialien vorausgesetzt.

II. EXPERIMENTELLES VORGEHEN

Die Versuche wurden von der Firma *iLA_5150 GmbH* mit dem in Abbildung 1 gezeigten experimentelle Aufbau durchgeführt.

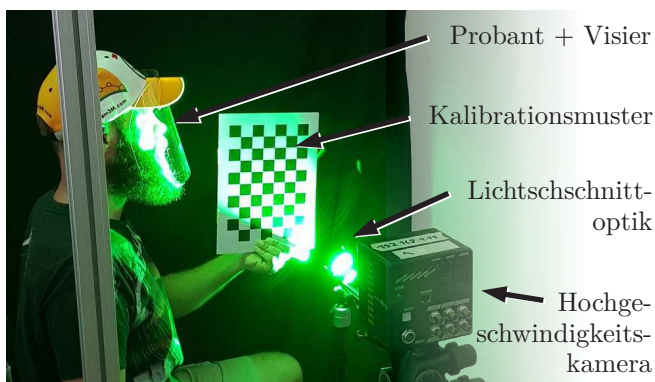


Abbildung 1. Versuchsaufbau zur Vermessung des Visiers bestehend aus dem Träger des Visiers (Puppe/Proband), Lichtschnittoptik, Kalibrationsplatte und Hochgeschwindigkeitskamera (Urheberrecht *iLA_5150 GmbH*¹⁴, reproduziert mit freundlicher Genehmigung).

Das warmgeformte Visier aus PETG Kunststoff wurde während der Untersuchungen zum *Fremdschutz* von einem Probanden getragen, der ein mit einer E-Zigarette verdampftes Glycerin/Propylenglykol Aerosol ($d \approx 0.5 - 0.9 \mu\text{m}$ ²⁰, mittlere Partikelreaktionszeit $\tau_p = 0.9 - 2.8 \mu\text{s}$ ²¹) aushustete. Im Falle der *Eigenschutz*-Untersuchungen wurde das Visier von einer Puppe getragen und der Proband hustete das Aerosol aus ca. 1 Meter Entfernung gegen das Visier, wobei die Beaufschlagungsrichtung systematisch variiert wurde (siehe Abbildung 2).

Eine Lichtschnittoptik mit CW LED ($\lambda = 525 \text{ nm}$) als Lichtquelle (*iLA_5150-LPS3* + Faseroptik) belichtete die exhalierte Wolke, sodass die Aerosolbewegung von zwei Highspeed-Kameras (*Photron WX100*, 2048×2048 px, 32 GB RAM, 1000 fps, *iLA_5150-SigMa* timing unit) aufgezeichnet werden konnte. Je nach Blickwinkel wurden *Nikon* Nikkor Objektive mit Brennweiten/Blendenzahlen von 50 mm/1.2 und 85 mm/1.4 verwendet, wodurch eine räumliche Auflösung von 4.9 px/mm und 8.4 px/mm erreicht wurde. Für den Fall des freien Hustenausstoßes wurden die resultierenden Geschwindigkeitsfelder aus der Partikelverschiebung zweier jeweils aufeinanderfolgender Bilder mit der Softwa-

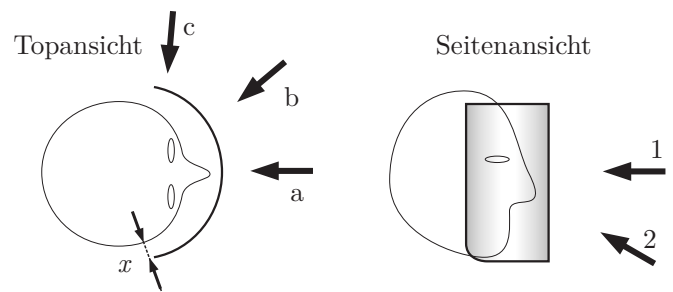


Abbildung 2. Skizze der untersuchten Beaufschlagungsrichtungen der Hustenwolke bei den Versuchen zum Eigenschutz durch das Visier und verwendete Nomenklatur zur Kennzeichnung der Parameterkombinationen - z.B. "Exp.1a" bezeichnet die horizontale Frontalbeaufschlagung; x kennzeichnet den Abstand zwischen Jochbein und Visier.

re PIVview 3.8 der Firma *PivTec GmbH* über ein iteratives Kreuzkorrelationsschema²² ermittelt.

III. ERGEBNISSE

Das freie Ausatmen und eine Hustenwolke ohne Schutzmaßnahmen sind in Abbildung 3 dargestellt. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Kähler und Hain¹⁰ wurden auch im vorliegenden Fall ca. $u_{max} = 3 \text{ m/s}$ maximale Freistrahlggeschwindigkeit der Hustenwolke ermittelt. Hieraus

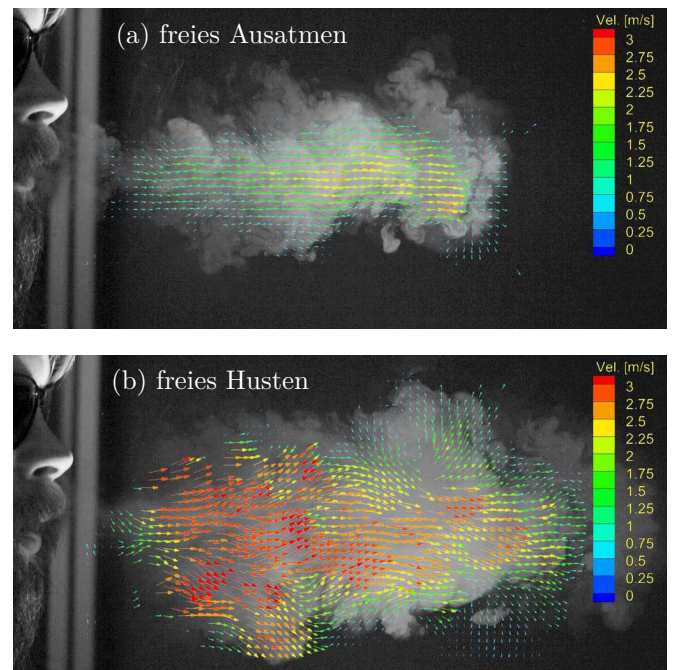
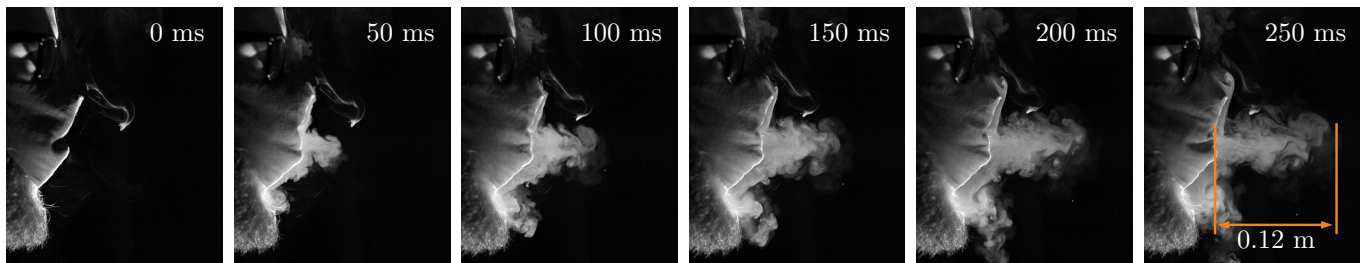
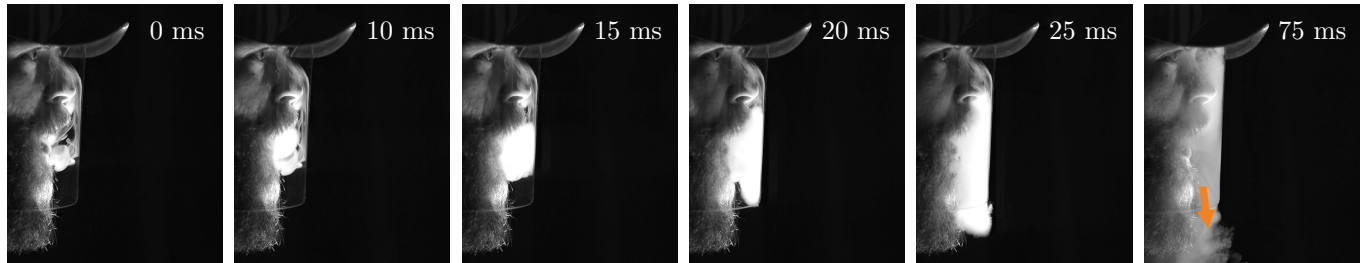


Abbildung 3. Freistrahlarartige Aerosolwolke und Geschwindigkeitsfelder beim Vorgang des (a) freien Ausatmens mit maximalen Geschwindigkeiten von $u_{max} \approx 2 \text{ m/s}$, (b) freien Hustens mit maximalen Geschwindigkeiten von $u_{max} \approx 3 \text{ m/s}$ (Urheberrecht *iLA_5150 GmbH*¹⁴, reproduziert mit freundlicher Genehmigung).



(a) *Community Maske* – die horizontale Reisegeschwindigkeit des Aerosols reduziert sich auf ca. 0.5 m/s.



(b) Visier – das Aerosol wird nach unten umgelenkt (siehe Pfeil).

Abbildung 4. Visualisierung des Aerosolaustritts nach dem Husten in (a) eine Maske und (b) ein Visier beim Test des Fremdschutzes. (Urheberrecht [iLA_5150 GmbH](#)¹⁴, reproduziert mit freundlicher Genehmigung).

ergibt sich für das Aerosol mit einem charakteristischen Abstand von $x = 3$ cm zwischen Visier und Jochbein des Trägers (vgl. Abbildung 2) eine Stokeszahl von $Stk = \tau_p x / u = 0.05 - 0.18$, was einem akzeptablen Partikelfolgevermögen in der Strömung entspricht.

A. Fremdschutz

Um die strömungsmechanische Wirksamkeit des Visiers als Maßnahme zum Fremdschutz im Vergleich zu *Community Masken* zu beurteilen, sind in Abbildung 4 Hustenvorgänge unter Verwendung beider Schutzmaßnahmen gegenübergestellt.

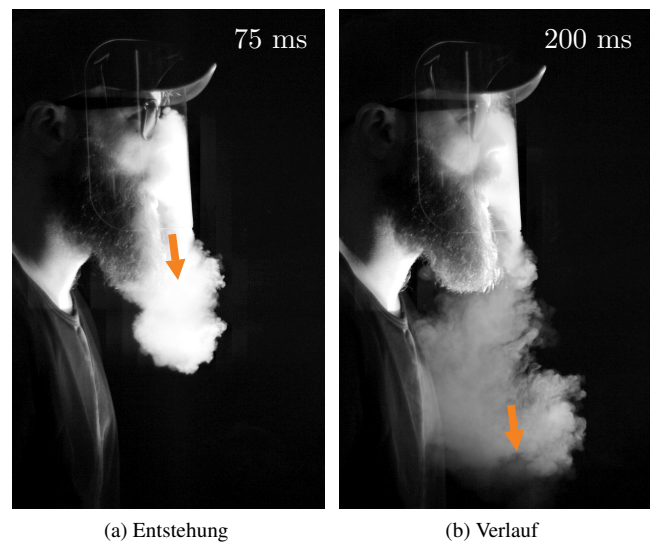
In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Kähler und Hain¹⁰ zu Behelfslösungen werden auch in der vorliegenden Studie die Aerosole vom verwendeten Filtermaterial nicht zurückgehalten, siehe Abbildung 4(a). Der verbleibende Restimpuls der Hustenwolke nach dem Durchdringen des Filtermaterials führt zu einer weiteren horizontalen Ausbreitung des Aerosols mit der reduzierten horizontalen Ausbreitungsgeschwindigkeit von $u_{max} \approx 0.5$ m/s.

Bei der Beaufschlagung des Visiers von der Innenseite (Abbildung 4(b)) wird aufgrund der Undurchlässigkeit des Plexiglasses der Impuls der Wolke vollständig umgelenkt. Hierbei begünstigt die Form des Visiers in Kombination mit der Schirmmütze einen Austritt des Aerosols nach unten, welches den Zwischenraum zwischen Gesicht und Visier im Kinnbereich verlässt (siehe Pfeil).

Um die Ausbreitungsrichtung der dabei entstehenden Wirbelstrukturen genauer beurteilen zu können, wurden zusätzliche Aufnahmen mit größerem Bildausschnitt durchgeführt,

wie in Abbildung 5 gezeigt.

Die entstandenen Strukturen sind in Abbildung 5(a) deutlich zu erkennen, lassen im weiteren Verlauf allerdings nicht darauf schließen, dass vom Oberkörper des Probanden eine signifikante Umlenkung der Strukturen in horizontale Richtung ausgeht (siehe Abbildung 5(b)).



(a) Entstehung

(b) Verlauf

Abbildung 5. Entstehung und räumlich/zeitlicher Verlauf der Strukturen in Pfeilrichtung entlang des Oberkörpers nach unten (Urheberrecht [iLA_5150 GmbH](#)¹⁴, reproduziert mit freundlicher Genehmigung).



(a) Frontale, horizontale Beaufschlagung der *PlexyCap* (Exp.1a); eine wirbelartige Struktur entsteht und wandert nach unten (siehe Pfeile); die nachgelagerte Hinterspülung der Maske im gekennzeichneten Bereich wird in Abbildung 7(b) gezeigt.



(b) Frontale, aufwärtsgerichtete Beaufschlagung der *PlexyCap* (Exp.2a); die Aerosolwolke tritt kinnseitig unmittelbar hinter das Visier (siehe Pfeil).

Abbildung 6. Visualisierung der Aerosolbeaufschlagung der *PlexyCap* durch eine Hustenwolke aus (a) frontal horizontaler und (b) frontal aufwärtsgerichteter Richtung zum Test des Eigenschutzes (Urheberrecht [iLA_5150 GmbH](#), reproduziert mit freundlicher Genehmigung).

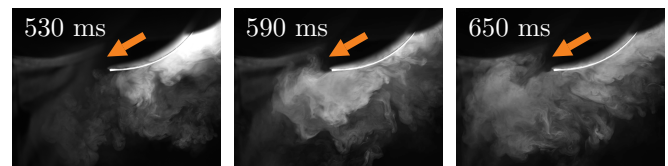
B. Eigenschutz

Da sich die optische Erfassung des Aerosols hinter einer Maske als sehr schwierig darstellt, sei an dieser Stelle nochmals auf die angesprochene Studie¹⁰ der Filtermaterialienwahl zur Anfertigung von Behelfslösungen und deren limitierte Wirksamkeit verwiesen. In Konsequenz sind in diesem Abschnitt nur Tests zum Eigenschutz mit einem Visier gezeigt. In Abbildung 6 ist die Beaufschlagung des Visiers aus zwei Richtungen dargestellt, wobei Abbildung 6(a) den Fall zweier gleichgroßer Menschen nachbildet (Exp.1a), während in Abbildung 6(b) ein Größenunterschied von 30 cm im Zusammenhang mit dem Ausstoß der Wolke nach schräg oben (Exp.2a) gezeigt ist (vgl. 2).

Beim Auftreffen der ausgestoßenen Hustenwolke im Fall der horizontalen Beaufschlagung entsteht eine Wirbelstruktur, die sich nach unten vom Visier ablöst (siehe Pfeile in Abbildung 6(a)). Der eingekreiste Kinnbereich wird im Zusammenhang mit auftretenden Hinterspülungen auf Basis von Abbildung 7(b) genauer besprochen. Zwar wird auch beim Auftreffen einer aufwärtsgerichteten Hustenwolke auf den unteren Bereich des Visiers der Hauptteil des Aerosols vom Schild aufgehalten, jedoch wird richtungsbedingt ein Teil des Aerosols auch unmittelbar hinter das Plexiglas geleitet (siehe Pfeil in Abbildung 6(b)).

Um derartige Hinterspülungen genauer und differenzierter zu beurteilen, sind in Abbildungen 7 und 8 weitere Experi-

mente mit Kameraperspektiven von unten und von vorne auf das Visier dargestellt. Abbildung 7(a) zeigt den Bereich der Schläfe bei horizontaler Frontalbeaufschlagung (Exp.1a). Die vorbeistreichende Aerosolwolke löst an der Hinterkante des



(a) Keine Hinterspülung des Bereichs zwischen Schläfe und Jochbein; Pfeile kennzeichnen die (ortsfeste) Abrisskante der Aerosolwolke



(b) Unterspülung des Kinnbereichs; die jeweilige Höhe der langsam aufsteigenden Aerosolwolke ist markiert

Abbildung 7. Untersuchung der Visierhinterspülung bei horizontaler Frontalbeaufschlagung (Exp.1a) auf (a) Rezirkulation an der Seite und (b) Unterspülung des Zwischenraums von unten zum Test des Eigenschutzes (Urheberrecht [iLA_5150 GmbH](#), reproduziert mit freundlicher Genehmigung).

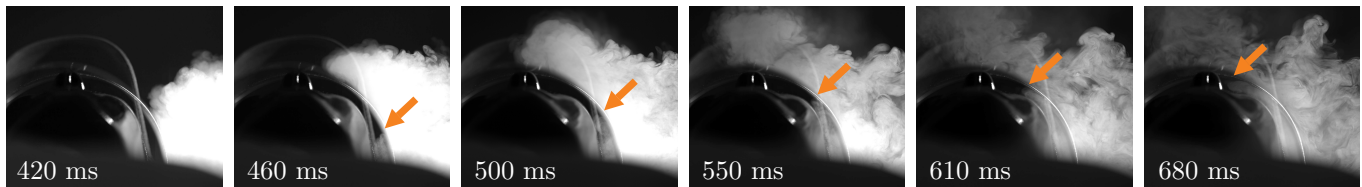


Abbildung 8. Untersuchung der Visierhinterspülung bei horizontaler Beaufschlagung von der Seite (Exp. 1c) zum Test des Eigenschutzes; Pfeile kennzeichnen die Ausbreitung des Aerosols zwischen Schläfe und Jochbein (Urheberrecht [iLA_5150 GmbH](#), reproduziert mit freundlicher Genehmigung).

Visiers ab (siehe Pfeile), was in diesem Fall allerdings zu keinerlei Hinterspülung führt.

Das bereits oben angesprochene Ablösen der Wolke an der Unterkante des Visiers bei horizontaler Frontalbeaufschlagung ist in [Abbildung 7\(b\)](#) nochmals aufgegriffen. Zwar wird die entstandene Wirbelstruktur gut nach unten abgeleitet, allerdings breitet sich im weiteren Verlauf die dann vor dem Brustkorb befindliche Aerosolwolke langsam wieder nach oben aus, wodurch es auch zur leichten Hinterspülung des Visiers von unten kommen kann (siehe Markierung).

Als kritischster Fall ist die Beaufschlagung des Visierträgers von der Seite untersucht, da – ähnlich der aufwärtsgerichteten Hustenwolke – auch hier direkt die Berandung des Visiers vom Freistrahlg getroffen wird. Das Ergebnis ist in [Abbildung 8](#) dargestellt, wobei die Pfeile die Ausbreitungsfront des Aerosol im Zwischenraum zwischen Plexiglas und Schläfe hin zum Jochbein kennzeichnen.

IV. ABSCHLUSSBEMERKUNGEN

Grundsätzlich hat die Untersuchung des Gesichtsschildes *PlexyCap* im Vergleich zu *Community Masken* gezeigt, dass ähnlich wie bei der Verwendung von Behelfsmasken auch durch ein Visier weder *Fremd-* noch *Eigenschutz* vor Aerosolen ($d < 5 \mu\text{m}$) gewährleistet werden kann. Als charakteristischer Unterschied zwischen Schild und Maske im Falle des *Fremdschutzes* lässt sich festhalten, dass das Aerosol mit reduzierter Geschwindigkeit horizontal durch das Filtermaterial der *Community Masken* hindurchtritt, während es vom Plexiglas der *PlexyCap* in Richtung Boden umgelenkt wird.

Ähnlich ist die Situation des *Eigenschutzes* zu bewerten. Im Falle der *Community Masken* muss davon ausgegangen werden, dass die fehlende Filterwirkung¹⁰ auch hier zur Anwesenheit von Aerosolen hinter der Maske führt. Analog zum *Fremdschutz* wird der Freistrahlg der Hustenwolke auch bei der Beaufschlagung des Visiers von außen gut umgelenkt, was allerdings dazu führt, dass die Wolke trotz allem im Bereich der zu schützenden Person bleibt und daher im späteren Verlauf das Visier noch hinterspülen kann. Hierbei lässt sich erwartungsgemäß eine Richtungsabhängigkeit der Beaufschlagung erkennen, wobei eine direkte Beaufschlagung des Visierandes eine unmittelbare Hinterspülung des Plexiglasses zur Folge hat.

Es sollte bei der Verwendung des Visiers auf jeden Fall darauf geachtet werden, dieses möglichst nah am Kinn zu tragen,

um Wahrscheinlichkeit und Intensität einer Hinterspülung des Schildes zu minimieren. Hier kann die *PlexyCap* nicht stellvertretend für Visiere im Allgemeinen angesehen werden, da die warmgeformte Version des Visiers den entscheidenden Vorteil hat, keinerlei Eigenspannungen im gebogenen Material aufzuweisen. Dies führt in Konsequenz dazu, dass das Visier im Kinnbereich keinerlei Entwölbung erfährt und somit enge Zwischenräume auch im unteren Gesichtsbereich ermöglicht werden können.

Da sich das Visier *PlexyCap* sowohl für *Fremd-* als auch für *Eigenschutz* sehr gut für die Reduktion des Impulses und eine effektive Umlenkung der ausgestoßenen Wolke eignet, sollten sich etwaige Optimierungsbemühungen hinsichtlich der Wirksamkeit zum Schutz vor Aerosolausbreitung auf zusätzliche Textilien im Randbereich des Visiers konzentrieren. Hierdurch scheinen sich die Vorteile beider Konzepte (Maske und Visier) effektiv kombinieren zu lassen.

Aufgrund der Tatsache, dass nennenswert größere Tröpfchen ($d > 5 \mu\text{m}$) ein entsprechend schlechteres Folgevermögen in der Strömung der freistrahlgartigen Hustenwolke haben, kann abschließend davon ausgegangen werden, dass das Visier die Funktion als *mobiler* Spuckschutz in beide Richtungen (*Eigenschutz* und *Fremdschutz*) sehr gut erfüllt. Der zusätzliche Schutz der Augen durch das Visier ohne weitere Ausrüstung wie z.B. Schutzbrillen erscheint hierbei als vorteilhaft.

LITERATUR

- ¹“[PlexyCap Gebrauchsanweisung](#),” Hans Keim Kunststoffe GmbH (2020), (abgerufen am 02.06.2020).
- ²“[PlexyCap Konformitätserklärung](#),” Hans Keim Kunststoffe GmbH (2020), (abgerufen am 02.06.2020).
- ³L. Bourouiba, “Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19,” [JAMA](#) **323**, 1837–1838 (2020).
- ⁴S. Asadi, N. Bouvier, A. S. Wexler, and W. D. Ristenpart, “The coronavirus pandemic and aerosols: Does covid-19 transmit via expiratory particles?” [Aerosol Science and Technology](#) **54**, 635–638 (2020).
- ⁵N. van Doremalen, T. Bushmaker, D. H. Morris, M. G. Holbrook, A. Gamble, B. N. Williamson, A. Tamin, J. L. Harcourt, N. J. Thornburg, S. I. Gerber, J. O. Lloyd-Smith, E. de Wit, and V. J. Munster, “Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1,” [New England Journal of Medicine](#) **382**, 1564–1567 (2020).
- ⁶J. Duguid, “The numbers and the sites of origin of the droplets expelled during expiratory activities,” [Edinburgh medical journal](#) **52**, 385–401 (1945).
- ⁷J. P. Duguid, “The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei,” [Epidemiology and Infection](#) **44**, 471–479 (1946).

- ⁸R. Mittal, R. Ni, and J.-H. Seo, “The flow physics of covid-19,” *Journal of Fluid Mechanics* **894**, F2 (2020).
- ⁹“Ist das Tragen einer Mund-Nasen-Bedeckung in der Öffentlichkeit zum Schutz vor SARS-CoV-2 sinnvoll?” Robert Koch Institut (2020), (abgerufen am 22.05.2020).
- ¹⁰C. Kähler and R. Hain, “Strömungsanalysen zur SARS-CoV-2 Schutzmaskendebatte,” Universität der Bundeswehr (LRT7), München (2020).
- ¹¹J. W. Tang, T. J. Liebner, B. A. Craven, and G. S. Settles, “A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control,” *Journal of The Royal Society Interface* **6**, S727–S736 (2009).
- ¹²N. Leung, D. Chu, E. Shiu, K.-H. Chan, J. Mcdevitt, B. Hau, H.-L. Yen, Y. Li, D. Ip, J. Peiris, W.-H. Seto, G. Leung, D. Milton, and B. Cowling, “Respiratory Virus Shedding in Exhaled Breath and Efficacy of Face Masks,” *Nature Medicine* (2020).
- ¹³A. Lai, C. Poon, and A. Cheung, “Effectiveness of facemasks to reduce exposure hazards for airborne infections among general populations,” *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society* **9**, 938–48 (2011).
- ¹⁴P. Mattern and W. Sykora, “CoVid-19: How well protects my mask?” iLA_5150 GmbH (2020).
- ¹⁵“Hinweise des BfArM zur Verwendung von selbst hergestellten Masken (sog. „Community-Masken“), medizinischen Gesichtsmasken, sowie filternden Halbmasken (FFP1, FFP2 und FFP3) im Zusammenhang mit dem Coronavirus (SARS-CoV-2 / Covid-19),” Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (2020), (abgerufen am 22.05.2020).
- ¹⁶“Fragen und Antworten zum Tragen von Mund- und Nasenbedeckungen,” Offizielles Stadtportal für Hamburg ((2020)), (abgerufen am 22.05.2020).
- ¹⁷“Maskenpflicht FAQ,” Hessisches Ministerium für Soziales und Integration (2020), (abgerufen am 22.05.2020).
- ¹⁸“Fragen und Antworten zur Corona-Verordnung,” Staatsministerium Baden-Württemberg (2020), (abgerufen am 22.05.2020).
- ¹⁹“Fragen zur Mund-Nasen-Bedeckung (sog. ”Maskenpflicht“),” Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Sport und Integration (2020), (abgerufen am 22.05.2020).
- ²⁰M. Sundahl, E. Berg, and M. Svensson, “Aerodynamic particle size distribution and dynamic properties in aerosols from electronic cigarettes,” *Journal of Aerosol Science* **103**, 141 – 150 (2017).
- ²¹R. J. Adrian and J. Westerweel, *Particle image velocimetry*, 30 (Cambridge university press, 2011).
- ²²M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*, 3rd ed. (Springer, Cham, 2018).