

Gestalten mit hybriden Materialien – Additive Fertigung für neuartige, kundenindividuelle Stichschutzbekleidung

Dustin Ahrendt, Sybille Krzywinski, Enric Justo i Massot und Jens Krzywinski

Einleitung

Beschäftigte im öffentlichen Dienst sind einer steigenden Zahl von Übergriffen und Bedrohungen ausgesetzt. Auch in den Statistiken der Unfallversicherungsträger und der Polizei findet sich das Phänomen Gewalt verstärkt wieder. Die Wahrscheinlichkeit einer Verletzung durch eine Stichwaffe ist in Deutschland deutlich höher einzustufen als die mittels einer Schusswaffe bzw. einem Projektil. Zudem werden stichhemmende und Stichschutzwesten nicht nur für den Einsatz im behördlichen, militärischen und Sicherheitsbereich angeboten, sondern auch für Privat- und Geschäftsleute. Die Westen sollen die Träger vor Angriffen mit Messern, Nadeln und spitzen Gegenständen schützen, sind jedoch in ihrem Tragekomfort verbesserungswürdig. Derzeit erfolgt die Abschwächung von Angriffen mit Stichwaffen durch integrierte Schutzplatten aus Aluminium, Edelstahl, Kunststoff, Keramik und/oder Metall-Ringgewebe.

Die Stichschutzwesten besitzen zum einen ein beträchtliches Gewicht (je nach Modell und Größe 1,5 bis 5 kg). Zum anderen weisen sie bei langer Tragedauer und hohen Außentemperaturen (z. B. während der Sommermonate) ein schlechtes thermophysiologisches Verhalten auf. Üblicherweise nimmt die Schutzwirkung mit steigendem Gewicht zu. Eine Gewichtserhöhung vermindert jedoch den Tragekomfort, wodurch auch die Trageakzeptanz, d. h. die Bereitschaft einer Person zum Tragen der Schutzkleidung, verringert wird. Diese Trageakzeptanz stellt ein entscheidendes Kriterium für den erfolgreichen Personenschutz dar.

Einen möglichen Lösungsansatz bietet die Realisierung von Leichtbaupotenzialen mittels neuer Technologien und hybriden Materialien. Durch eine Überarbeitung des bisherigen Designs der Schutzkleidung soll der Tragekomfort unter Beibehaltung der Funktionalität deutlich verbessert werden. Statt der bisher angewandten Schutzplatten wird eine körperformabhängige Segmentierung von bioinspirierten Interlocking-Strukturen aus Hochleistungsfaserstoffen entwickelt. Die Verstärkungskomponente mit hoher Schlagzähigkeit, Bruchdehnung und Zugfestigkeit besteht aus Aramidfasern. Zudem werden die Stichschutzelemente mittels additiver Fertigung auf biegeweiche Maschenwaren appliziert. Die Schutzkleidung lässt sich an die jeweilige Körperform anpassen und bietet neben dem Stichschutz einen verbesserten ergonomischen, thermophysiologicalen sowie hautsensorischen Komfort.

Ausgangssituation/Zielstellung

Die Forderung der Kunden an die Funktionstüchtigkeit und den Komfort persönlicher Schutzausrüstung (PSA) sind umfangreich und beinhalten ebenso Aspekte der Ressourcenschonung, individuellen Gestaltung und Effizienz der Produktherstellung. Dieser Trend erfordert digitale Entwicklungs- und Fertigungskonzepte unter Verwendung von Hochleistungsfaserstoffen und neuen Fertigungsmethoden. Bisher werden Stichschutzwesten in einer stark limitierten Anzahl von Standardgrößen (unisex) hergestellt und sind somit nicht individualisiert. Außerdem werden nur die Körperzonen mit lebenswichtigen Organen gesichert.



Abbildung 1: Stichschutzweste Enforcer Pülz GmbH (Enforcer Pülz 2019)

Oberarm, Schulter- und Halsbereich, bei denen durch Stichwaffen langwierige Muskel- und Gelenkverletzungen hervorgerufen werden können, bleiben, wie in Abbildung 1 ersichtlich, ungeschützt. Die bisher übliche Verwendung von Schutzplatten begrenzt den Einsatz für stark gekrümmt bzw. bewegliche Körperpartien.

Durch die vorgesehene Segmentierung und die Verringerung der Dicke der Schutzschicht bzw. des Gewichts der Schutzelemente unter Einsatz der additiven Fertigung (Kombination von Matrixpolymer und Aramidfasern) lassen sich neuartige Stichschutztextilien für den gesamten Oberkörper herstellen. Diese Stichschutzbekleidung kann unauffällig unter der Tagesbekleidung und/oder Arbeitsbekleidung getragen werden.

Der Bedarf an derartiger Kleidung ist hoch. Durch den zunehmenden Trend zur Produktion von Schutzkleidung in kleinen Losgrößen und individueller Produktgestaltung ist ein Höchstmaß an Flexibilität hinsichtlich der einzusetzenden Maschinenteknik gefragt.

Stand der Forschung und Entwicklung

Flexible natürliche „Rüstungen“ von Fischen, Alligatoren, Gürteltieren oder Schlangen (Abbildung 2) ziehen aufgrund ihrer einzigartigen Kombination aus Härte, Flexibilität und geringem Gewicht immer mehr die Aufmerksamkeit von Ingenieuren auf sich (Martini, Barthelat 2016), (Porter, Ravikumar, Barthelat, Martini 2017). Im Rahmen der Untersuchungen werden die Mechanismen natürlicher Hautpanzerungen genutzt, um neue Gestaltungsmöglichkeiten für persönliche Schutzsysteme vorzuschlagen.



Abbildung 2: Natürliche Schuppenpanzerung nach (Martini, Barthelat 2016)

Bisher gibt es nur wenig Forschungsarbeiten, die der geometrischen Form, der Anordnung der Verstärkungselemente in Interlocking-Strukturen, der Größe und Dicke sowie dem Materialeinsatz gewidmet sind, um die Durchstichfestigkeit und das Deformationsverhalten (Biege- und Torsionsverhalten) gezielt zu beeinflussen. Durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren, die den Druck auf ein individuell konfektioniertes biegeweiches Grundmaterial ermöglichen, kann neben der geometrischen Gestaltung der Interlocking-Strukturen auch die Materialdehnung zur Erzielung von Überlappungseffekten genutzt werden. Um die geforderte Durchstichfestigkeit zu erzielen, werden thermoplastische Matrixmaterialien und Aramidendlosfasern gemeinsam verarbeitet. Der Faservolumengehalt der Verstärkungselemente sowie die Verstärkungsmuster in Form der definierten Faserablagewinkel sind zu erforschen. Für eine wirtschaftlich effiziente Umsetzung der bioinspirierten, personenindividuellen Stichschutzausrüstungen werden die an den Professore Konfektionstechnik und Technisches Design vorliegenden Erfahrungen zum Aufbau digitaler Entwicklungs- und Fertigungsketten angewandt.

Lösungsweg und bisherige Ergebnisse

Die Anwendung bionischer Betrachtungsweisen in Kombination mit neuen Materialien und Fertigungstechniken bietet ein erhebliches Verbesserungspotential für Stichschutzwesten. Dies betrifft sowohl die Erweiterung der Schutzmöglichkeiten auf den gesamten Oberkörper durch eine erhöhte Flexibilität bei Beibehaltung der Schutzwirkung als auch die Erhöhung des Tragekomforts (thermophysologisch, hautsensorisch, ergonomisch) durch personenindividuelle Gestaltung und Gewichtsminimierung. Für die Entwicklung bioinspirierter Stichschutzwesten sind folgende Arbeitsschritte vorgesehen:

- Festlegung der Zielkenngrößen/Parameter für Stichschutzwesten,
- Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien,
- Erfassung der individuellen Körperdaten (3D-Scan des Trägers der Schutzausrüstung),
- Ermittlung der Materialkonfiguration (Faserstoff, Flächenbildung, Verstärkungsstruktur),
- computergestützte Generierung der Schnittkontur- und Maschinendaten zur Herstellung der textilen Fläche (Gestrick) anhand der 3D-Körperdaten,

- Erarbeitung der Konstruktionsdaten für das Interlocking der Verstärkungselemente unter Berücksichtigung der Möglichkeiten der additiven Fertigungstechnik unter Einsatz von Hochleistungsfaserstoffen (Aramidfasern),
- Festlegung krümmungs- bzw. körperformabhängiger Skalierungen und Interlocking-Muster für die stichfesten Strukturen,
- Generierung der 3D-Druckdaten zur Herstellung der Verstärkungselemente,
- experimentelle Untersuchung der Flexibilität, der Schutzwirkung (Durchstichprüfung) sowie der thermophysiologicalen Eigenschaften und
- Erarbeitung einer effizienten digitalen Entwicklungs- und Fertigungsstrategie.

Für die neuartigen Stichschutzwesten gelten die in der Prüfrichtlinie „Stich- und Schlagschutz“ (VPAM 2008) hinterlegten Kennwerte. Die Prüfrichtlinie wurde für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen für den Körperschutz erarbeitet. Als Prüfwerkzeuge zur Testung der Stichhemmung kommen Messer (Klinge), Nägel (Dorn) bzw. Nadeln (Injektionskanüle) zur Anwendung. Im Untersuchungsfall wurde eine Prüfklinge (Abbildung 4) entsprechend den Vorgaben der Prüfrichtlinie eingesetzt. Als Bewertungskriterium dient die Durchstichtiefe (Tiefe des Eindringens der Spitze eines Prüfwerkzeugs durch die Rückseite des Prüfmusters in das Hintergrundmaterial). Je nach Schutzklasse (K1 bis K4) variieren die einzustellende Auftreffenergie und die zulässige mittlere bzw. größte einzelne Durchstichtiefe. Um die Schutzklasse K2 zu erreichen, muss die mittlere Durchstichtiefe bei einer Energie von 25 Joule kleiner als 5 mm sein. Zur Prüfung der Stichhemmung von Prüfmustern wird ein nach Vorschrift ausgeführtes Fallprüfgerät, wie in Abbildung 3 dargestellt, verwendet.

Zur Erfassung der individuellen Körperdaten werden optische Scanverfahren eingesetzt. Der Proband wird in enganliegender Kleidung gescannt. Im Untersuchungsfall wurde der *zSnapper*® der Firma *ViALUX GmbH* eingesetzt (ViALUX 2019) (Abbildung 5). Die implementierte Messmethodik kombiniert *DLP*® Mikrospiegelprojektion mit phasenkodierter Photogrammetrie. Die

Sensoreinheit ist im Gerätewagen untergebracht. Der Proband steht während des Messzyklus (360°) auf einem Drehteller. Im Ergebnis der Messung liegt ein Polygonmodell vor, das zur weiteren Verwendung im 3D-CAD-System mittels Flächenrückführung in ein NURBS-Modell überführt wird. Hierzu wurde die Software *Geomagic Studio* (3D Systems 2019) angewandt.



Abbildung 3: Fallprüfstand am ITM

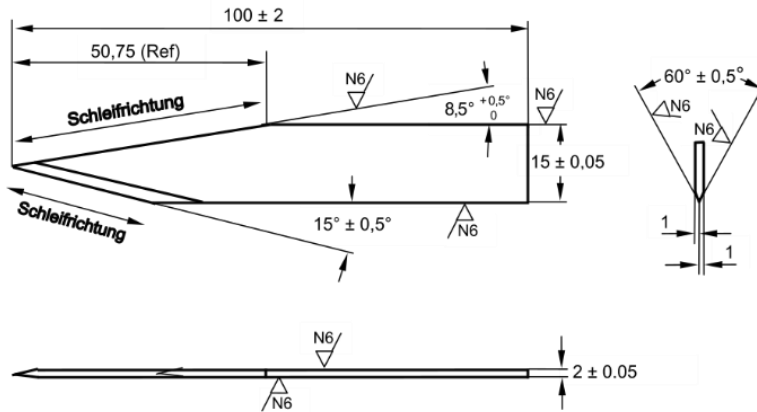


Abbildung 4: Prüfklinge P1/B (VPAM 2008), Maße in mm



Abbildung 5: zSnapper® der Firma ViALUX GmbH (schematisch)

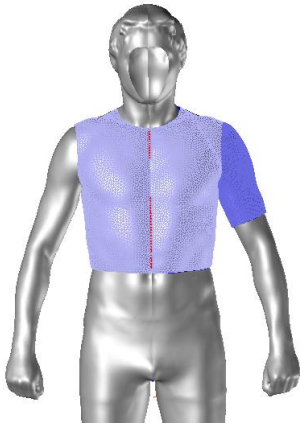


Abbildung 6: Modellentwurf der Schutzbekleidung in 3D

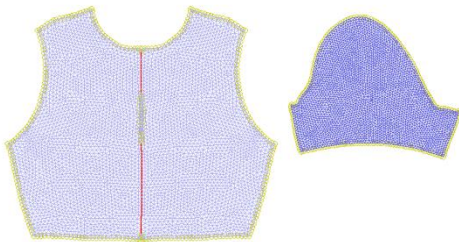


Abbildung 7: 2D-Schnittteile

Auf der Oberfläche des 3D-Modells des Probanden kann das Design der Schutzbekleidung entworfen werden. Dazu eignet sich die Software *Design Concept 3D* der Firma *Lectra* (Lectra 2019). Mit Hilfe von Zeichenwerkzeugen generiert der Modellmacher die gewünschten Konturlinien der Schutzkleidung interaktiv in 3D (Abbildung 6). Eine Modifizierung dieser Linien zur Veränderung des Designs ist jederzeit möglich. Zur Ableitung der zugehörigen 2D-Schnittteile wird ein kinematischer Algorithmus angewandt (Van der Weeën 1991), (Ermanni, Endruweit 2007). Dazu werden die Schnittteilgrenzen aktiviert und die Oberfläche durch ein Netz (sog. Region) approximiert. Dies ist erforderlich, um die zur Abwicklung der einzelnen Bereiche der Körperoberfläche notwendigen Verzerrungen zuzulassen (Problem: Freiformflächen) (Abbildung 7). Soll ein Abstand zum Körper berücksichtigt werden, muss ein Offset der vernetzten Bereiche generiert werden. Dies kann lokal unterschiedlich sein. Die resultierenden Schnittteile können über neutrale Schnittstellenformate geplottet, zugeschnitten oder direkt zur Programmierung der Flachstrickmaschine (z. B. Flachstrickmaschine der Firma *Stoll*, Software *M1plus®*, *GKS*) (Stoll 2019) eingesetzt werden. Die zu verarbeitenden Garne werden so ausgewählt, dass ein guter thermophysiologicaler und hautsensorischer Komfort gewährleistet wird. Dazu werden Wasserdampf- und Luftdurchlässigkeit sowie thermodynamische Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit, thermischer Diffusionskoeffizient, thermische Absorptionsfähigkeit, spezifische Wärme, Wärmewiderstand), unterschiedlicher Strickstrukturen (Faserstoff, Garnart, Bindung) überprüft. Ebenso sind Reibung und Rauheit zur Gewährleistung des hautsensorischen Komforts von Interesse. Außerdem muss das Spannung-Dehnungsverhalten der Flachgestricke so abgestimmt sein, dass eine ungewünschte Dehnung vermieden oder eine definiert einzustellende Dehnung zur Erzielung von Überlappungseffekten der Verstärkungselemente, die drucktechnisch direkt auf das Textil appliziert werden, genutzt werden kann.

Aus den 3D-Körperdaten lassen sich Informationen zu den zu berücksichtigenden Krümmungen am Körper in Körperlängsrichtung (vorrangig Schulterbereich) und in Körperumfangsrichtung ableiten. Diese werden zur krümmungsbasierten Skalierung der Verstärkungselemente benötigt (siehe auch Abbildung 14).

Der Designansatz für die Verstärkungselemente orientiert sich an Lösungen aus der Natur, da Organismen (z. B. Fische, Schlangen, Gürteltiere) den Designwiderspruch zwischen Schutz vor mechanischen Einflüssen und Mobilität (Flexibilität) bereits hocheffizient durch die Segmentierung der Schutzschicht in Platten kleinerer Größe lösen.

Insgesamt wurden vier grundlegende Varianten untersucht, die alle bionisch inspiriert sind (Massot 2018):

1. Peg and Socket (Stift- und Pfanne), (Song et al. 2010) und (Reichert 2010),
2. überlappende Verstärkungselemente (Martini, Barthelat 2016),
3. topologisch ineinandergreifende Verstärkungselemente (Porter et al. 2017) und
4. Nahtschnittstellen (Lin et al. 2014).

Im Ergebnis der drucktechnischen Voruntersuchungen erwiesen sich die Ansätze topologisch ineinandergreifender Verstärkungselemente und überlappender Verstärkungselemente als zielführend. In den Abbildungen 8 bis 10 sind mögliche geometrische Varianten topologisch ineinandergreifender Verstärkungselemente dargestellt. Unter Berücksichtigung aller Pro und Kontra hinsichtlich der erreichbaren Flexibilität und der Sicherheit an den Ecken und Kanten der Elemente wird ein quadratisches Design favorisiert.

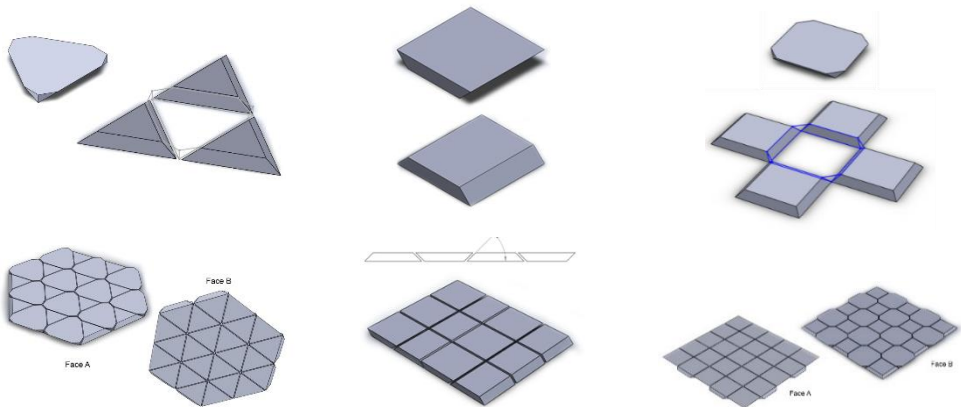


Abbildung 8: Dreieckiges Design

Abbildung 9: Rechteckiges Design

Abbildung 10: Quadratisches Design

Wird die Konstruktion parametrisch ausgeführt, lassen sich Elementgrößen und Schrägen sehr schnell variieren und anwendungsspezifisch anpassen. Die ausreichende Flexibilität bei gleichzeitig gewährleister Sicherheit auf Körperoberflächen mit großen Krümmungsradien ist in Abbildung 11 dargestellt. Mit dem 3D-Druck überlappender Verstärkungselemente auf das Textil sind ebenfalls gute Ergebnisse erzielbar. Hiermit kann auch bei kleinen Krümmungsradien am Körper die erforderliche Sicherheit infolge der Überlappungen gewährleistet werden. Die Umsetzung solcher Überlappungen setzt drucktechnisch jedoch die Anwendung einer Supportstruktur voraus, die im Nachhinein (mechanisch oder chemisch) entfernt werden muss (Abbildung 12). Eine weitere Möglichkeit ist das direkte Applizieren der Schutzelemente auf ein vorgedehntes Textil, so dass die Überlappung entsteht, wenn das Textil danach wieder in seinen Ausgangszustand übergeht. Hierbei werden keine Supportstrukturen benötigt. In einem ersten Design-Vorschlag für die Schutzkleidung werden die Vorteile der beiden Varianten miteinander kombiniert (Abbildung 13 und 14).

Für die beschriebenen Produktanforderungen von Stichschutz und Flexibilität sowie zur Realisierung von Leichtbaupotentialen kann das additive Fertigungsverfahren Composite Filament Fabrication (CFF) angewandt werden. Faserkunststoffverbunde werden schichtweise aus einer thermoplastischen Matrix und Endlosfasern aus Aramid generiert. Das CFF-Verfahren stellt eine Weiterentwicklung des bekannten und weitverbreiteten Fused Deposition Modeling-Verfahrens (FDM) dar. Das zeitgleiche Aufbringen und das additive Fertigen dreidimensionaler Objekte (z. B. Verstärkungselemente) auf textile Flächen ermöglicht die Kombination von endlosfaserverstärkten additiven Fertigungs- und konfektionstechnischen Fügeprozessen. In der Folge einer solchen direkten Applikation ist ein Verzicht auf klassische Fügeverfahren wie Nähen, Schweißen oder Kleben möglich. Um reproduzierbare Prozesse für eine industrielle Fertigung gewährleisten zu können, waren umfangreiche Untersuchungen über die Haftungseigenschaften zwischen textilen und thermoplastischen Materialien notwendig, auf die in diesem Artikel allerdings nicht näher eingegangen wird.

Um die lastangepasste Auslegung der Verstärkungselemente hinsichtlich der erforderlichen Duchstichfestigkeit zu erreichen (vgl. VPAM 2008), sowie neue Möglichkeiten der geometrischen Gestaltung der Verstärkungselemente zu

betrachten, wurden erste Probekörper mit Hilfe des *MarkOne Composite* 3D-Druckers der Firma *Markforged Inc.* hergestellt (Markforged 2019) und mittels eines Fallprüfstandes getestet.

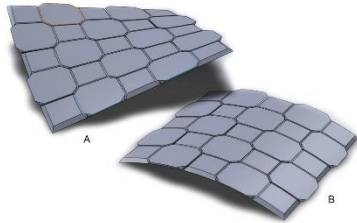


Abbildung 11: Verdrehung 30°, Ansicht Face A; Biegung 45°, Ansicht Face B



Abbildung 12: Rendering von drei unterschiedlichen Schuppenelementen (überlappende Geometrie)

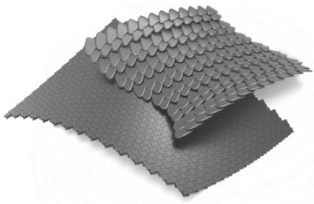


Abbildung 13: Rendering quadratischer und schuppenartiger Verstärkungselemente



Abbildung 14: Design der Schutzkleidung mit quadratischen und schuppenartigen Verstärkungselementen

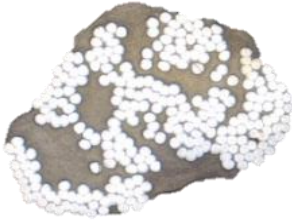


Abbildung 15: Querschnitt Hybrid-Filament (Aramid-Endlosfasern, PA-Matrix)

Durch die Anzahl der Verstärkungsschichten und den damit einstellbaren Faservolumengehalt sowie die Faserorientierung werden die Probekörper gezielt variiert (Abbildung 15). Tabelle 1 zeigt die Codierung der Verstärkungslagen von Mehrschichtverbunden für die Probekörper entsprechend der klassischen Laminattheorie von oben nach unten. Das Untersuchungsziel besteht darin, die erforderliche minimale Dicke der Verstärkungselemente zu ermitteln, um durch das Ausschöpfen des Leichtbaupotentials den Tragekomfort der Stichschutzkleidung maßgeblich zu verbessern.

Der Durchmesser des verarbeiteten Aramid-Endlosybridgarns (Abbildung 17) beträgt ca. 0,375 mm. Das für die Grund- und Deckschicht verwendete PA-Matrixmaterial liegt als Filament mit dem für den 3D-Druck gebräuchlichen Durchmesser von 1,75 mm in Spulenform vor.

Nr.	Probendicke [mm]	Anzahl Aramid-Schichten von Gesamt-schichtanzahl	Codierung Aramid-Faserverstärkung [°]
1	2	18 von 20	$[(+45/0/-45/90)_4/+45/0]$
2	2	18 von 20	$[(160/140/120/100/80/60/40/20/0)_2]$
3	4	38 von 40	$[(+45/0/-45/90)_9/+45/0]$
4	4	38 von 40	$[10/(0/170/160/150/.../30/20/10)_2/0]$
5	6	58 von 60	$[(+45/0/-45/90)_{14}/+45/0]$

Tabelle 1: Variation der Aramid-Faserverstärkung der Probekörper

Von jeder Probenvariante werden mindestens drei kreisförmige Probekörper (Durchmesser 50 mm) geprüft. Um eine realitätsnahe Prüfung durchzuführen, wird der Probekörper gemäß der Prüfnorm (VPAM 2008) auf Plastilin befestigt. Dadurch wird die nachgiebige Körperoberfläche abgebildet. Zur Veränderung des Einstichwinkels kann der Probekörper auf einem definiert gedrehten Plastilin befestigt werden (Abbildung 17).

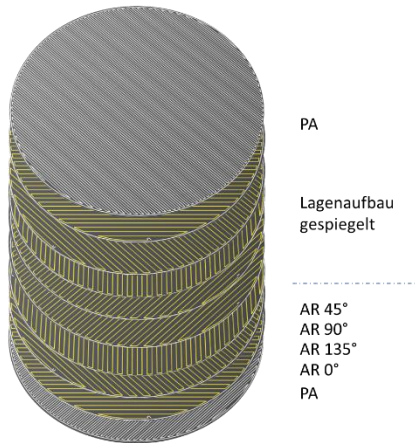


Abbildung 16: Probekörper, Dicke 1 mm, 8 Lagen Aramid [0/+45/90/-45]_s

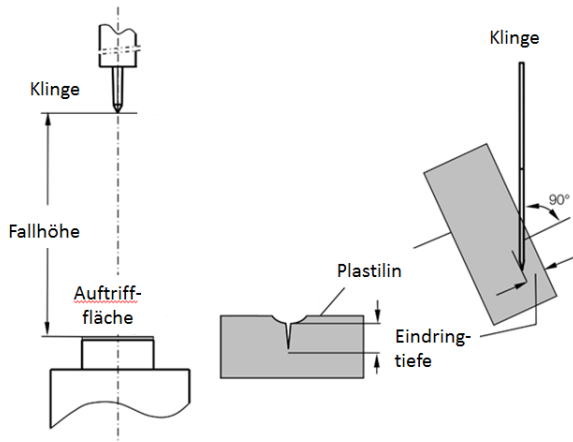


Abbildung 17: Schematische Testapparatur (nach VPAM 2008)

Die bisher getesteten Dicken der Probekörper von 2 mm reichen noch nicht aus, um die Forderungen der Prüfvorschrift, d. h. die Stichschutzklasse K2, zu erfüllen. Gegenwärtig werden die Probekörper weiter systematisch variiert (Dicke, Faservolumengehalt, Faserorientierung der Aramid-Endlosfaserverstärkung). Die Prüfergebnisse stehen noch aus.

Zusammenfassung

Stichschutzkleidung wird bereits seit Jahrhunderten hergestellt. Während frühzeitliche Lösungen in Form von Ritterrüstungen zwar dem Tierreich entlehnte Schuppenstrukturen nutzten, aber durch den Materialeinsatz (u. a. Eisen) schwere und damit wenig komfortable Lösungen boten, wird derzeit durch eine plattenförmige Panzerung, die in textile Materialien eingebettet ist, der Schutz gesichert. Die verwendeten Materialien (u. a. Edelstahl, Keramik) tragen zwar zu einer Gewichtsreduzierung bei, lassen aber die gewünschte Flexibilität vermissen. Deshalb werden bioinspirierte Lösungen betrachtet, um den vermeintlichen Designwiderspruch zwischen Schutz vor mechanischen Einflüssen und Mobilität hocheffizient zu lösen. Als Vorbild dienen natürliche Rüstungen mit ihrer Segmentierung der Schutzschicht in Platten kleiner Größe. Somit werden Betrachtungen zum Interlocking und zur körperperformabhängigen Segmentierung durchgeführt. Um neben der Funktionalität des Stichschutzes auch den Tragekomfort zu sichern, werden Multimaterialkombinationen eingesetzt und u. a. mittels additiver Fertigung realisiert. Für die zukünftige Berücksichtigung der Individualisierung (Verbesserung von Passform und Schutzwirkung), werden zudem digitale Entwicklungs- und Fertigungsketten aufgebaut.

Literaturangaben

- Enforcer Pülz 2019: Stichschutzweste. *www.enforcer.de*, abgerufen am 28.02.2019
- Ermanni, P., Endruweit, A. 2007: Composites Technologien. In: Kapitel Textile Halbzeuge, Vorlesungsskript, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1–45
- Lectra 2019: *www.lectra.com*, abgerufen am 28.02.2019
- Lin, E., Li, Y., Ortiz, C. und Boyce, M. C. 2014: 3D printed, bio-inspired prototypes and analytical models for structured suture interfaces with geometrically-tuned deformation and failure behavior. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 73, 166–182
- Markforged 2019: *www.markforged.com*, abgerufen am 28.02.2019

- Martini, R., Barthelat, F. 2016: Stability of hard plates on soft substrates and application to the design of bioinspired segmented armor. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 92, 195–209
- Massot, E. 2018: Development of methods for 3D printing aramid fiber-reinforced elements on textile fabrics for the production of novel protective clothing. Bachelor Thesis, Fakultät Maschinenwesen, Dresden: Technische Universität Dresden
- Porter, M., Ravikumar, N., Barthelat, F. und Martini, R. 2017: 3D-printing and mechanics of bio-inspired articulated and multi-material structures. In: *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 73, 114–126
- Reichert, S. 2010: Reverse Engineering Nature: Design Principles for Flexible Protection. Inspired by Ancient Fish Armor of Polypteridae, Massachusetts Institute of Technology
- Song, J., Reichert, S., Kallai, I., Gazit, D., Wund, M., Boyce, M., und Ortiz, C. 2010: Quantitative microstructural studies of the armor of the marine threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*). In: *Journal of structural biology*, 171 (3), 318–331
- Stoll 2019: www.stoll.com, abgerufen am 28.02.2019
- Studio 3D Systems 2019: www.de.3dsystems.com, abgerufen am 28.02.2019
- Vialux 2019: www.vialux.de, abgerufen am 28.02.2019
- Van der Weeën, F. 1991: Algorithms for draping fabrics on doubly-curved surfaces. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 31, 1415–1426
- Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen (VPAM) (Hrsg) 2008: Schutzausstattungen: Stich- und Schlagschutz, Anforderungen, Klassifizierung und Prüfverfahren. VPAM KDIW 2004

Kontakt

Dustin Ahrendt, M. Sc.
Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski
Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
Professur Konfektionstechnik
01062 Dresden
www.tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itm

Prof. Dr.-Ing. Jens Krzywinski
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
Professur für Technisches Design
01062 Dresden
www.tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm/td