

# Simulation der Schutzwirkung textilbasierter Splitterschutzvorhänge

Hermann Finckh, Hansjürgen Horter, Prof. H. Planck

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV)

der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF), Denkendorf, Deutschland

## **Abstract:**

Woodworking machine centers designed to cut wooden boards, solid wood, chip board, plywood and also these materials where these are covered with plastic laminate or edgings at highest flexibility and lowest costs are often equipped by partially encapsulated working tools. This results in hazardous risks to the operators in case of failure milling cutters by flying fragments at high speed up to 60 m/s. Therefore impact curtains of PVC-stripes to retain ejected parts of tools out of the working zone and minimize the risks were used. This curtain was tested by a test standard which reproduces the hazard of the ejection of tools parts. The testing equipment comprises a propulsion device, a standard projectile of 20 g, a support for the test object and a system that allows measuring or recording the impact speed of 70 m/s. The tendency to increase production velocity leads to higher rotational speeds of milling cutters. Now tightened test standards [1] specify 100 g projectile instead of 20 g at same test speed, with the result, that former PVC-curtains cannot achieve the retention effect without being too stiff for the application. The PCV stripes damage the sensible work pieces at their edges excessive. Because of this a new solution for encapsulating the working zone was developed using textile fabrics. Textiles do possess high strength and flexibility at same time. In a joint project of the Institute of Machine Tools, University of Stuttgart and the ITV Denkendorf [2], various textile materials and constructions of textile impact curtains were investigated and several textile solutions which fulfill the new test standard treating the work piece gently were developed. However a clear correlation between textile properties and the shooting results could not be found by comparison of experiment and test results, because textile fabrics are complex systems, where changing one parameter influence several others [9-12]. As the retention mechanism and also the textile parameters influencing the protective effect were not known, FE-simulation models of textile impact curtains were developed and ballistic impact according to the new test standard were successfully simulated by ITV, which is the subject matter of this paper.

## **Keywords:**

Holzbearbeitungsmaschinen, versagende Fräsköpfe, Splitter, textilbasierte Schutzvorhänge, Schutzwirkung, textiles Materialverhalten, Ballistik, Impakt, FEM, simulation model, woodworking machine, milling cutter, shatter protection, fabric behavior, impact curtain, textile stripes, protective fabrics.

## 1 Einführung

Bei der Konstruktion von Maschinen müssen in Deutschland bzw. Europa zahlreiche Gesetze, Verordnungen des staatlichen Arbeitsschutzes (besonders die Betriebssicherheitsverordnung), berufsgenossenschaftliche Vorschriften und internationale, europäische und nationale Normen berücksichtigt werden, um den Anforderungen an die Sicherheit technischer Erzeugnisse gerecht zu werden und die Marktfähigkeit zu erreichen [3]. Die Hochgeschwindigkeitstechnologie ist heute industrieller Stand der Technik und wird forschungsseitig von verschiedenen deutschen Werkzeugmaschinen- und Fertigungsinstituten betreut [4, 5]. Der Trend zu immer höheren Vorschubgeschwindigkeiten und kürzeren Bearbeitungszeiten führt im Bereich der Holzbearbeitungszentren zu größeren Werkzeugdrehzahlen und damit verbunden zu wachsenden Schnittgeschwindigkeiten. Damit erhöht sich das Gefahrenpotential im Falle eines Werkzeug- oder Schneidenbruchs (im Worst Case kann das Werkzeugbruchstück mit maximaler Schnittgeschwindigkeit weggeschleudert werden). Bei Fräs- und Drehmaschinen (Werkzeugmaschinen) und speziell Holzbearbeitungszentren werden oft mehrere verschiedene trennende Schutzeinrichtungen verwendet und kombiniert, so dass die Gefahrenstelle ausreichend gesichert ist. Holzbearbeitungszentren unterscheiden sich wenig von den üblichen Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung. Durch die relativ großen Werkstückabmessungen in der Holzbearbeitung von bis zu 5 m ist jedoch der Einsatz einer Vollkapselung, wie sie vorrangig in der Metallbearbeitung einsetzt wird, wirtschaftlich nicht möglich und technologisch nicht sinnvoll. Teilkapselungen umschließen nur das Bearbeitungsaggregat mit einer festen Konstruktion und decken den Zwischenraum zum Werkstück mit einem Sicherheitsvorhang ab.

Da die Werkstücke in ihren Abmessungen schwanken, müssen flexible Vorhänge eingesetzt werden, um zu jedem Zeitpunkt den offenen Raum zwischen fester Schutzeinrichtung (z.B. Absaughaube) und Werkstück oder Maschinentisch zu schließen. Dabei darf das Vorhangsystem die teilweise sehr empfindlichen Oberflächen der Werkstücke nicht beschädigen.

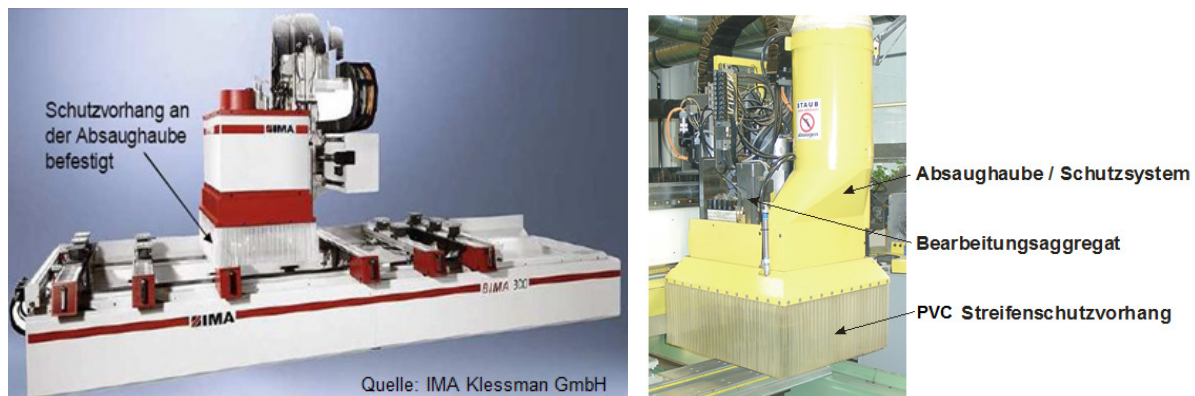


Abbildung 1: Teilkapselung eines Bearbeitungszentrums (BAZ) der Holzbearbeitung

Die wirtschaftliche Bedeutung der Schutzvorhänge erschließt sich aus deren verbreiteten Verwendung an Bearbeitungszentren in Auslegerbauweise. Schutzvorhänge sind dort die maßgebende trennende Sicherheitseinrichtung zwischen rotierendem Werkzeug und Maschinenbediener. Bearbeitungszentren in Auslegerbauweise zeichnen sich durch ihre hohe Flexibilität aus. Eine andere Konstruktion des BAZ ohne Schutzvorhänge mit anderweitigen trennenden Einrichtungen scheint für das Konzept „Ausleger“ nicht möglich. Auslegermaschinen nehmen aber mit 40% Anteil aller angebotenen Maschinenbaureihen in Europa den ersten Platz ein und bei den Maschinenherstellern einen großen Produktionsanteil ein. Neben der wirtschaftlichen Bedeutung muss der Schutz des Lebens des Bedienungspersonals an Bearbeitungszentren in der Holz- und Metallbearbeitung an erster Stelle stehen. Der Schutz vor Projektilen von abgebrochenen Werkzeugteilen der rotierenden Werkzeuge oder vom Bauteil selber ist eine dringende Notwendigkeit [6].

Das Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart (IfW) beschäftigt sich seit langem mit dem Thema Schutzvorhänge an Holzbearbeitungsmaschinen [7, 8]. Ein Ergebnis war, dass von 72 beobachteten Schadensereignissen 56 Fälle auf den Bruch einer Werkzeugschneide oder des Fräasers selbst zurückzuführen waren. Eine Auswertung der Vorkommnisse für Fräswerkzeuge ergab, dass die Masse der Bruchstücke mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% unter 9 g beträgt und diese Bruchstücke sich mit einer Geschwindigkeit von 56,6 m/s bewegen [8].

Auf Basis dieser Ergebnisse empfahl die Holzberufsgenossenschaft für die Normprüfung ein Projektil mit 20 g (Sicherheitsfaktor ca. 2) mit einer Projektilgeschwindigkeit von 70 m/s. Diese Normprüfung EN 848-3 wurden von Schutzvorhängen aus Weich-PVC-Lamellen erfüllt. Die Vorhangssysteme bestanden meistens aus 10 einzelnen, zwei Millimeter dicken PVC-P Vorhangslagen, wobei die Lamellen je nach Einsatzgebiet und Anforderung in ihrer Breite variieren.

Der Trend zu höheren Drehzahlen bzw. Schnittgeschwindigkeiten erhöht jedoch das Gefahrenpotential im Falle eines Werkzeug- oder Schneidenbruchs. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen wurde die Norm EN 848-3 überarbeitet und verschärft [1]. Während bisher Schutzvorhänge eine Beschussmasse von 20 g mit einer Geschwindigkeit von 70 m/s zurückhalten mussten, besteht nun die Forderung nationaler Arbeitsschutz- und Marktüberwachungsbehörden, bei gleicher Beschussgeschwindigkeit von 70 m/s nun eine Masse von 100 g zurückzuhalten. Prinzipiell kann durch die Erhöhung der Lagenanzahl oder Dicke des Vorhangs eine beliebige Masse aufgefangen werden. Die Tauglichkeit für den Einsatz im BAZ ist dann allerdings nicht ohne weiteres gegeben.

Mit den bislang eingesetzten Weich-PVC-Schutzvorhängen konnte diese neue geforderte Rückhaltewirkung nur durch sehr steife Vorhangssysteme erreicht werden, die jedoch die zu bearbeitenden, empfindlichen Werkstücke stark beschädigten und diese während der Bearbeitung verschieben. PVC-Vorhangssysteme können daher zukünftig nicht mehr eingesetzt werden. Voruntersuchungen hatten gezeigt, dass mit hochfesten und teureren textilen Materialien wie Aramide, die in der Ballistik eingesetzt werden, die gewünschten Anforderungen erfüllt werden können. Jedoch führten diese wegen dem hohen Preis und auch wegen der ausgeprägten Ausfrans- und Verhakungsproblematik mit den empfindlichen beschichteten Holzwerkstücken und der noch zu hohen Vorhangssteifigkeit zu keiner industrietauglichen Lösung. Daher wurde in einem AIF-Gemeinschaftsprojekt [2] zwischen dem IfW und dem ITV“ Entwicklung textilbasierter Splitterschutzvorhänge mit hohem ballistischem Rückhaltevermögen für die Verbesserung des Arbeitsschutzes bei schnelldrehenden Werkzeugen spanender Werkzeugmaschinen zahlreiche textilbasierte Schutzvorhangssysteme untersucht. Dabei hatte das ITV im Wesentlichen die Aufgaben der Beschaffung und Bewertung textiler Materialien, der Herstellung von Vorhangssystemen, der Lösungsfindung bzgl. der Ausfransproblematik (Kantenschutz) und die numerische Simulation des Beschusses des textilbasierten Schutzvorhanges. Hierdurch sollten phänomenologischen Vorgänge zwischen dem Projektil und den textilen Lamellen erkennbar werden und verschiedene Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Schutzwirkung untersucht werden, um bessere Vorhangssysteme vorschlagen zu können, die die neue Norm DIN EN 848-3:2007 + A2:2009 [1] erfüllen.

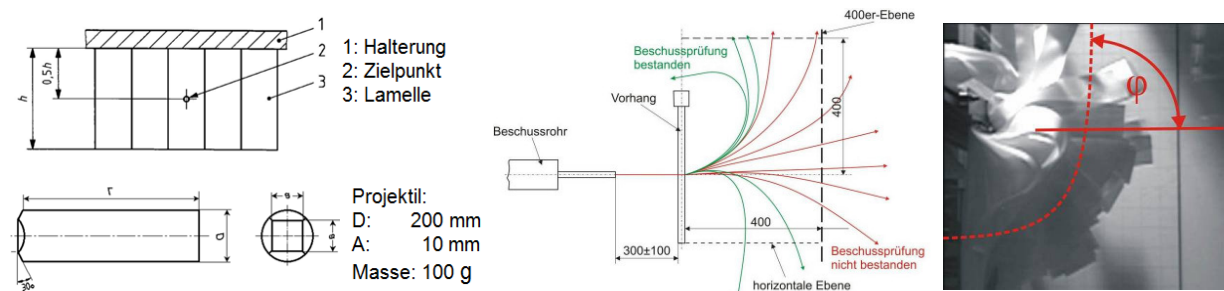
## 2 Beschusstest textilbasierter Splitterschutzvorhänge

Zur Untersuchung der Rückhaltefähigkeit von Schutzvorhängen wurde vom Institut für Werkzeugmaschinen ein Aufprallversuchstand entwickelt und realisiert (s. Abb. 2). Hiermit können Schutzvorhänge mit 100 g Projektile und 70 m/s geprüft werden. Die folgende Abbildung zeigt den IfW Beschussprüfstand mit Beschleunigungsrohr, Lichtschranken zur Messung der Projektilgeschwindigkeit und eingesetztem textilbasierten Lamellenvorhang.



Abbildung 2: Norm-Beschussprüfstand am Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart

Bei dem Testverfahren werden Projektile entsprechend der aktuell gültigen Norm [1] mit einer Masse von 100 g und einer Geschwindigkeit von 70 m/s mittig und senkrecht auf den Vorhang geschossen. Die Prüfung gilt dann als bestanden, wenn das Projektil eine parallele Ebene 400 mm hinter der Vorhangsebene nicht durchdringt. Diese Ebene ist zusätzlich durch eine untere horizontale Ebene, die die Vorhangkante umfasst, begrenzt. Um die Beschussprüfungen auszuwerten, wird jede einzelne Prüfung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Auf diese Weise kann man erkennen, ob die Rückhaltefähigkeit des Vorhangsystems noch so ausreichend hoch war, dass das Projektil die 400mm entfernte vertikale Ebene nicht verlässt (grüne Linien in Abb. 3b). Der optimale Schutzvorhang fängt das Projektil und gibt es nicht mehr frei, es fällt dann nach kurzer Zeit aus dem Vorhang nach unten raus. Schutzvorhänge können aber auch ihre Funktion erfüllen, indem Sie die Projektilgeschwindigkeit zwar reduzieren, das Projektil dann nach oben oder entgegen der Schussrichtung freigeben. D. h., Beschussprüfungen, in denen Projektile im Highspeed-Video den Vorhang unter einem Winkel  $\varphi > 90^\circ$  verlassen erfüllen auch die Normprüfung. Die Prüfung muss dabei fünfmal durchgeführt werden und bei keinem Versuch darf der Vorhang versagen.



a) Zielpunkt der Beschussprüfung

b) Projektilflugrichtung  $\varphi$  nach Verlassen des Vorhangs

Abbildung 3a, b: Norm-Beschussprüfstand am Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart

### 3 Eigenschaftscharakterisierung an Lamellenmaterialien

Es wurden 26 Textilien, die zur Lösung der Aufgabenstellung geeignet waren mit unterschiedlichen Prüfverfahren analysiert und bewertet (Dicke, Flächengewicht, E-Modul, Kraft/Dehnungs-Diagramme durch quasistatische Zugprüfungen, Reibungsprüfungen, Biegesteifigkeitsmessungen, Dauerbelastung und Verschleißprüfungen, elektrostatische Aufladung). Eine eindeutige Korrelation der ermittelten Lamelleneigenschaften mit den Beschussergebnissen konnte jedoch nicht gefunden werden, da Textilien komplexe Systeme sind und sich viele Parameter gegenseitig beeinflussen. Variiert man zum Beispiel die Kettfadendichte, so ändern sich zwangsläufig Flächengewicht, Rohdichte, Biegesteifigkeit usw. Aus diesem Grund ist es schwierig, nur die Eigenschaften einzugrenzen, die für das Bestehen der Beschussprüfung eine Rolle spielen. Es zeigten sich hier Tendenzen, dass die Lamellenreibung, Flächengewicht und auch die Biegesteifigkeit die Rückhaltewirkung beeinflussen. Die Bruchkraft- und Bruchdehnung sind nur dann von Bedeutung, wenn die Lamellen vom Projektil auf Zug bis zum Materialversagen beansprucht werden würden, was in den Beschussprüfungen jedoch bislang nicht vorkam. Textilien besitzen aufgrund ihres Aufbau, Struktur und Garnmaterials ein ausgeprägtes nichtlineares elasto-plastisches Materialverhalten. Der Elastizitätsmodul ist nur für einen sehr kleinen Bereich der textilen Belastung gültig. Welcher Dehnungsbereich letztendlich für die Schutzwirkung wichtig ist, ist nicht bekannt. Auch ist die Ableitung anderer Parameter wie die Biegesteifigkeit aus dem E-Modul nicht möglich. Mit dieser Problematik erhält die numerische Simulation des Splitterschutzvorhangs eine noch wichtigere Bedeutung.

### 4 Simulation des Beschusstests für textilbasierte Splitterschutzvorhänge

Mit Hilfe der numerischen Berechnung soll der Einfluss der Vorhangsparameter auf das Rückhaltevermögen des Schutzvorhangs systematisch untersucht werden. Hierzu wird die explizite Finite-Elemente-Methode eingesetzt, da der Beschussvorgang zu einer hochdynamischen Beanspruchung führt und dabei zahlreiche reibungsbehaftete Kontaktvorgänge zwischen den einzelnen Lamellen simuliert werden müssen. Bei der Simulation des Impaktvorgangs auf Lamellenschutzvorhänge wird anstatt der komplexen ITV-Einzelfadenmodellierung [9-12] die einfachere Modellierung mit Flächenelemente eingesetzt, da im Gegensatz zum ballistischen Beschuss einer Schutzweste mit mehreren 100 m/s die textilen Lamellen des Schutzvorhangs nicht penetriert werden und sich leicht gegeneinander bewegen können.

Um die Beschusssimulationen durchzuführen, sind folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Entwicklung eines Programms zur Generierung verschiedener Splitterschutzvorhänge nach Eingabe der Gestaltungsparameter (Vorhangsbreite, Lamellenbreite, Lamellendicke, etc. ).
- Definition der Randbedingungen wie Reibung, Fixierung und Projektil (Form, Masse, Geschwindigkeit, Auftreffort, Auftreffwinkel).
- Definition der Materialmodelle, der Kontakt- und der Berechnungsparameter.
- Ermittlung der für die numerische Simulation erforderlichen Materialkennwerte.
- Durchführung, Auswertung, Optimierung und Verifizierung der Impaktberechnungen.

Es wurden zunächst Programme entwickelt, mit denen Projektil-, Lamellen- und Vorhangsmodelle nach Parametereingabe automatisch generiert werden können.

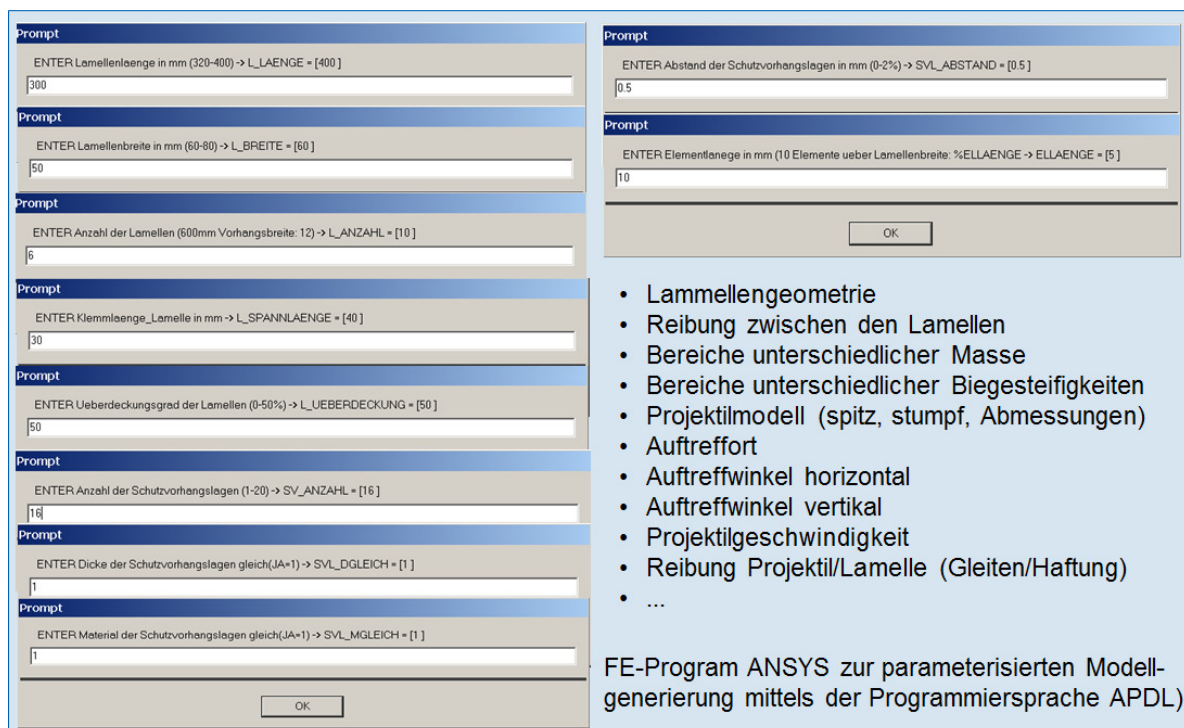


Abbildung 4: Eingabefelder des entwickelten Programms zur FE-Modellerstellung der Projektile und der Splitterschutzvorhänge

#### 4.1 FE-Modelle der „Normprojekte“

Da das Projektil beim Impaktvorgang mit den vergleichsweise biegeschlaffen Lamellen nur geringste vernachlässigbare elastische Verformung erfährt, kann das Projektil in der Simulation als Festkörper (Rigid Body) modelliert werden. In einem ersten Schritt wurde daher nur die Hülle aus Flächenelementen mit einer geringen Dicken modelliert und die Dichte entsprechend der 100 g Masse angepasst. Da jedoch nicht bekannt ist, inwiefern der Schwerpunkt und die Trägheitsflächenmomente für das korrekte Flugverhalten des vom Vorhang abgelenkten Projektils von Bedeutung ist, wurde das Projektil durch Volumenelemente und mit korrekter Dichte für Stahl modelliert. Somit werden der Schwerpunkt und die Trägheitsflächenmomente infolge der Projektilform und -abmessungen durch die korrekte Massenverteilung in der Simulation exakt simuliert. Die Elementlänge bzw. die Elementanzahl hat durch die Festkörperdefinition nur einen geringen Einfluss auf den Berechnungsaufwand. Die Elemente wurden so klein gewählt, dass die Geometrie des Projektils genügend genau abgebildet wird.

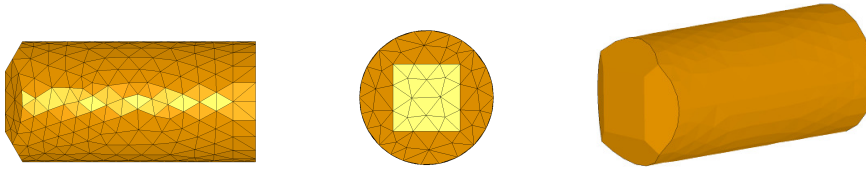
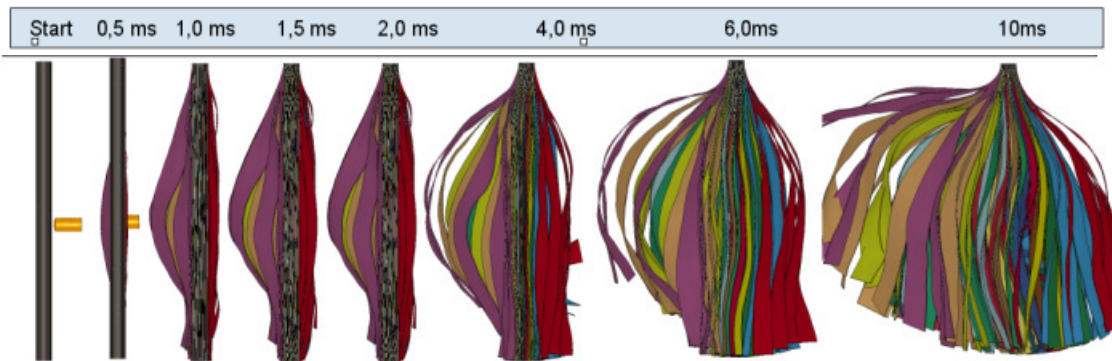
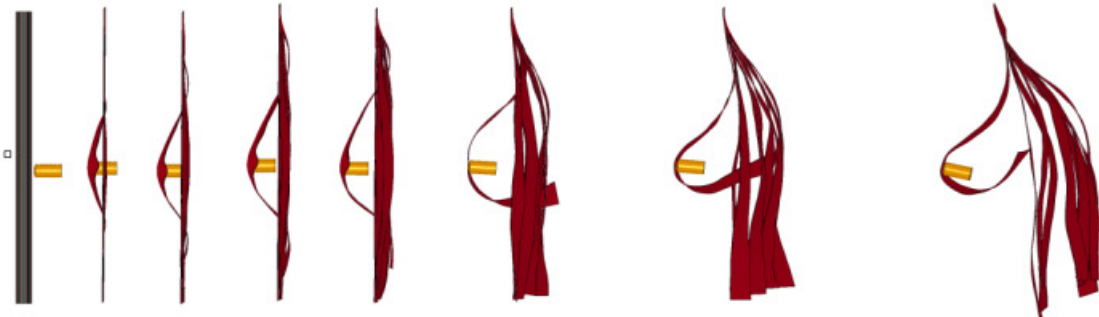


Abbildung 5: FE-Modell des 100 g Normprojektils

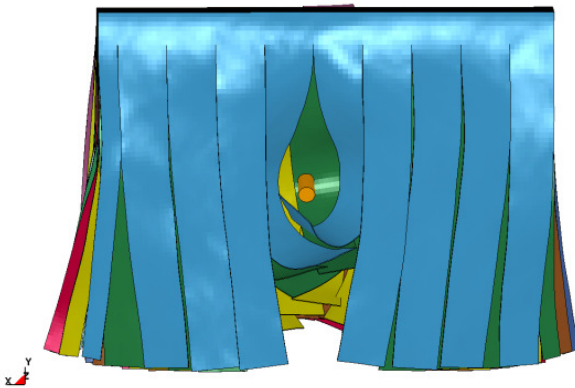
Die Lamellen werden durch Flächenelemente modelliert. Zunächst wurde die Materialbeschreibung von Membranelementen verwendet, die jedoch keine Biegeeigenschaften berücksichtigen. Die ersten Simulationsberechnungen zeigen, dass die geplanten FE-Berechnungen zwar prinzipiell funktionieren, jedoch noch Optimierungsarbeiten insbesondere zur Beschreibung des Lamellenmaterialverhaltens erfordern. Bereits die ersten Simulationsmodelle zeigen die auch in den Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen erkennbaren Vorgänge, dass die getroffene Lamelle das Projektil umschlingt und die daraus resultierende Wechselwirkung mit den anderen Vorhangslamellen zur Stoppwirkung führt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Impact mit dem 100 g-Normprojektil und dessen „Einfangvorgang“ durch die Lamellen und Lamellenwechselwirkung.



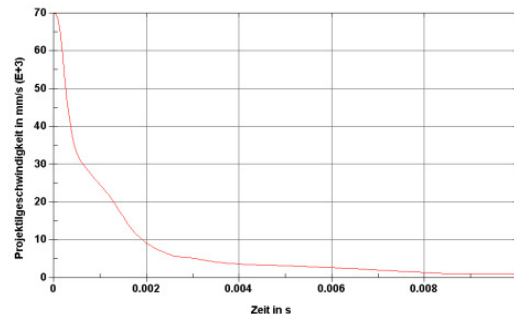
a) alle Lamellen dargestellt



b) nur 1. Vorhangslage dargestellt



c) Draufsicht



b) Simulierte Stoppwirkung

Abbildung 6: erste Simulationsergebnisse des Beschuss eines textlbasierten Schutzvorhangs mit idealisiertem Modell aus 16 Lagen, Lamellenbreite 80 mm mit 100 g Normprojektil und der Projektilgeschwindigkeit 70 m/s



Abbildung 7: Reale Beschussprüfung am textilbasierten Schutzvorhang (16 Lagen, 100 g Normprojektil, Projektilgeschwindigkeit  $v = 70 \text{ m/s}$ )

Die dargestellten ersten Simulationsergebnisse stimmen bereits qualitativ sehr gut mit den in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gezeigten Bewegungsvorgängen überein. Probleme gab es mit der Wahl des geeigneten Kontakts und der „richtigen“ Kontaktparameter und insbesondere der Materialbeschreibung der Lamellen, da die Lamellen zwar eine sehr hohe Zugsteifigkeit und -festigkeit aufweisen, es dann aber die vorhandene Materialbeschreibung nur eine viel zu hohe oder überhaupt keine Biegesteifigkeit ermöglichte. Da die Biegesteifigkeit und auch die Lamellenreibung wichtige Parameter für die Rückhaltewirkung sein könnten, erfolgte nun die Modelloptimierung bzgl. des Lamellenmaterials.

#### 4.2 Modelloptimierung

Im Vordergrund stand nun die Entwicklung eines Lamellenmodells, das die für die Schutzwirkung verantwortlich vermuteten Parameter auch genau simuliert. Dies wurde an dem bzgl. des Rückhaltevermögens sehr gut eingestuftem Lamellenmaterial Nr. 14 (silikonbeschichtetes PA-Gewebe), mit dem auch die Industrie bzgl. Einsatztauglichkeit und Werkstückschonung bereits gute Erfahrung gemacht hat, durchgeführt. Ein Problem stellt hier die um Größenordnungen verschiedenen Steifigkeiten zwischen Zug- und Biegeeigenschaften dar. Die Lösung war die Superposition verschiedener Elementbeschreibungen, die miteinander „harmonierten“ und kombinierbar waren. Das entwickelte Lamellenmodell gibt nun die experimentell ermittelten Eigenschaften für die Massenverteilung, die Biegesteifigkeit, das nichtlineare Materialverhalten bei Zugbelastung und für die Reibung in der Simulation genau wieder. Dies wurde mit der Simulation der

- realen Zugbelastung,
- der realen Biegeprüfung und
- der realen Reibungsprüfung zwischen 2 Lamellen

verifiziert.

##### 4.2.1 Prüfung und Simulation der Zugprüfung

Die Zugprüfungen wurden mit einer Das ausgeprägte nichtlineare Materialverhalten unter Zugbelastung stellt bereits eine hohe Anforderung an das Lamellenmodell. Im Gegensatz zu Stahl besitzen Textilien ein ausgeprägtes anisotropes Verhalten und die hohen Dehnungen führen zu einer multiaxialen Deformation, die mit der „normalen“ Materialbeschreibung nicht darstellbar sind. D.h., aus der experimentellen, uniaxialen Zugprüfung kann nur ein „verschmiertes“ Materialverhalten bestimmt werden. Das korrekte Zugverhalten konnte mit der Materialbeschreibung \*Mat\_Fabric realisiert werden.

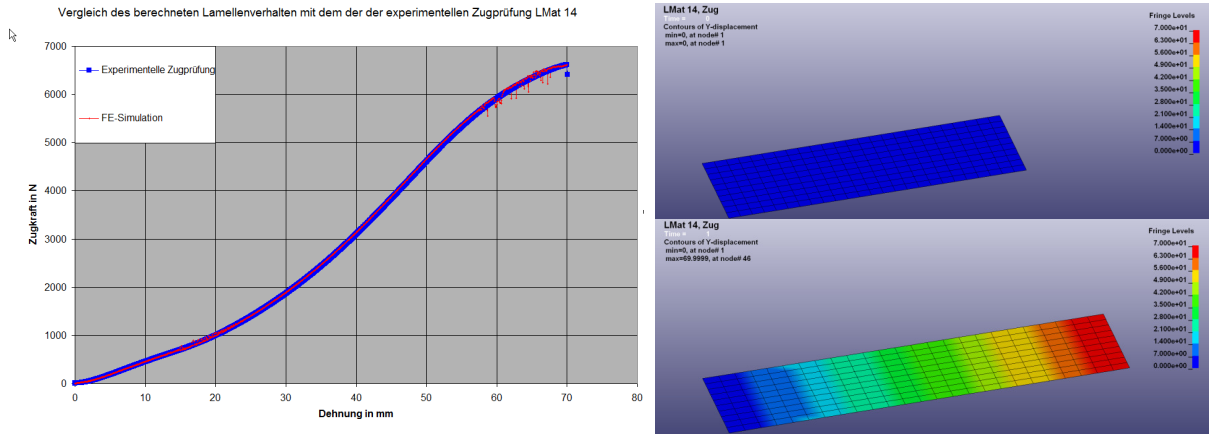


Abbildung 8: Vergleich der simulierten mit der realen Zugprüfung für das Material 14

#### 4.2.2 Prüfung und Simulation der Biegeprüfung

Da der Einfluss der Biegesteifigkeit der textilen Lamellen für die Rückhaltewirkung des Vorhangsystems nicht bekannt ist, ist die Biegesteifigkeit ein wichtiger Parameter, den das Lamellenmodell unbedingt richtig simulieren muss. Die Biegesteifigkeit einer einzelnen textilen Lamelle ist zwar relativ gering, durch das Zusammenwirken vieler Lamellen könnte diese jedoch einen wichtigen Einfluss auf den Fangprozess des Projektils haben. Daher war für das Lamellenmodell insbesondere das richtige Biegeverhalten von Bedeutung. Die Biegesteifigkeit von Textilien lässt sich nicht aus Materialkennwerten wie E-Modul, Dicke etc. ableiten, da sie von zahlreichen Faktoren wie Fasermaterial, Garnaufbau, Garn/Garn-Reibung, Garnfeinheit, Garndrehung, Flächenart wie Gewebe oder Vliesstoff, Flächenkonstruktion wie Bindungstyp und Fadendichte, Beschichtung, Veredlung beeinflusst wird. Daher muss die Biegeeigenschaft für jedes Material experimentell ermittelt werden.



Abbildung 9: Biegesteifigkeitstest (Prüfungen nach Norm DIN 53121)

Die Probenstreifen, mit den Abmessungen von 20 mm Breite und 100 mm Länge, werden horizontal in eine Klemme eingespannt. Der Abstand von der Klemmung bis zur Biegeschneide beträgt beim untersuchten Lamellenmaterial 15 mm. Bei der Drehung der Klemme von 0-60° wird die Probe gegen die Biegeschneide des hochempfindlichen Kraftsensors (max. 10 N) gedrückt, der dabei kontinuierlich die Biegekraft misst. Es wird hier mit der höchst möglichen Winkelgeschwindigkeit von 10°/s geprüft.

Die nachfolgende Tabelle gemessener Biegekräfte für die unterschiedlichen textilen Lamellenmaterialien zeigen große Unterschiede bzgl. der Biegesteifigkeit.



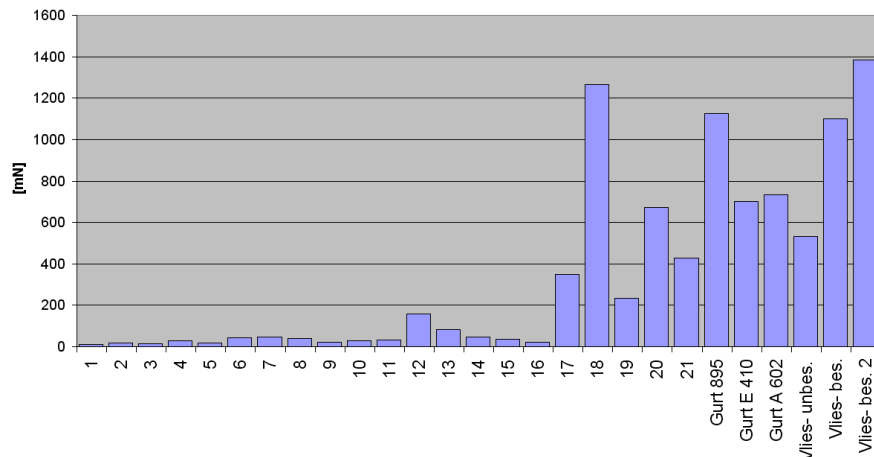


Abbildung 10: Biegekraft bei 60° Biegewinkel der untersuchten Lamellenmaterialien

Dem Lamellenmodell mit der nichtlinearen Materialbeschreibung für Zugbelastung wurde das Lamellenmodell für die Biegebelastung überlagert. Danach wurde das neue Lamellenmodell erneut für Zug und auch für Biegebelastung überprüft. Das folgende Diagramm zeigt die gute Übereinstimmung bei der Biegebelastung mit dem entwickelten Lamellenmodell.

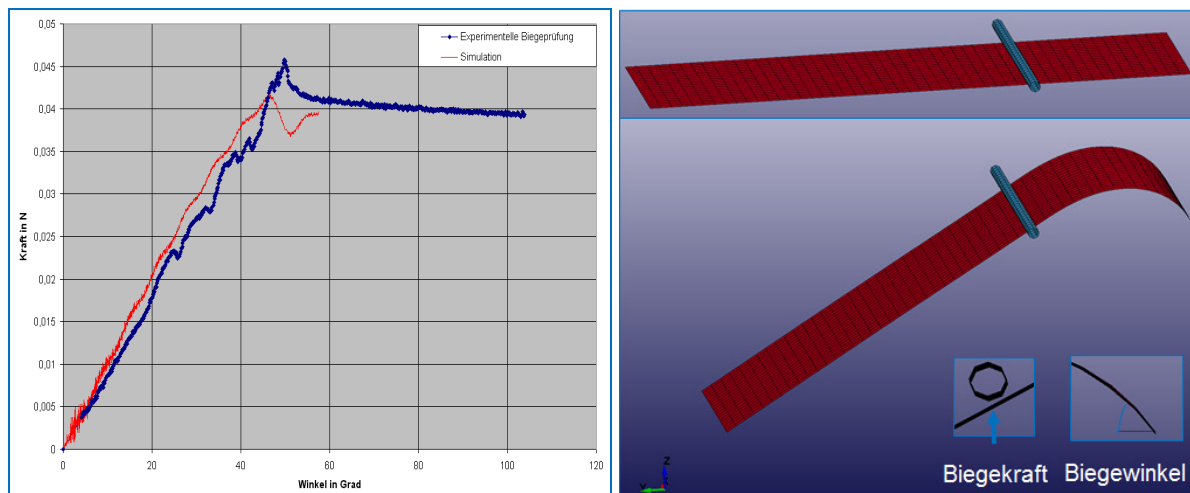


Abbildung 11: Vergleich des experimentellen und simulierten Biegeverhaltens von Material. 14

#### 4.2.3 Prüfung und Simulation der Gleit- und Haftreibung

Die Reibungsprüfung erfolgt in Anlehnung an die DIN EN ISO 8295. Pro Prüfung werden zwei Lamellen (80 mm Breite entsprechend des Vorhangs und 200 mm Länge) desselben Materials verwendet. Eine der zwei Proben wird auf den Prüftisch geklebt, um ein Ver- bzw. Nachrutschen dieser Probe während der Messung zu verhindern. Die zu ziehende Probe wird auf die festgeklebte Probe gelegt. Analog der späteren Anordnung der Lamellen beim Schutzvorhang werden die Proben so angeordnet, dass die Rückseite einer Lamelle auf der Vorderseite einer Lamelle desselben Materials aufliegt.

Auf die obere Probe wird ein 200 g schwerer quadratischer Körper (Kantenlänge 63 mm) und drückt so mit der Normalkraft von 1,96 N auf die textilen Lagen. Der Greifer zieht mittels eines hochfesten Fadens die obere Probe 100 mm mit 100 mm pro Minute und misst über einen sensiblen Kraftsensor die hierfür erforderliche Zugkraft wobei nur die Daten im Bereich von 20 mm bis 100 mm ausgewertet werden.

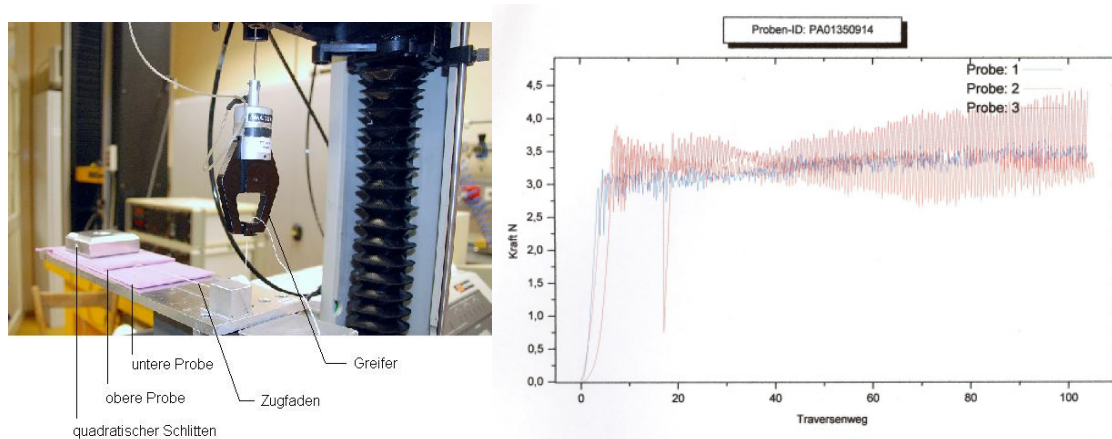


Abbildung 12: Reibungsmessung zwischen zwei textilen Lamellen von Material 14,  $\mu_{LL}=1,7$

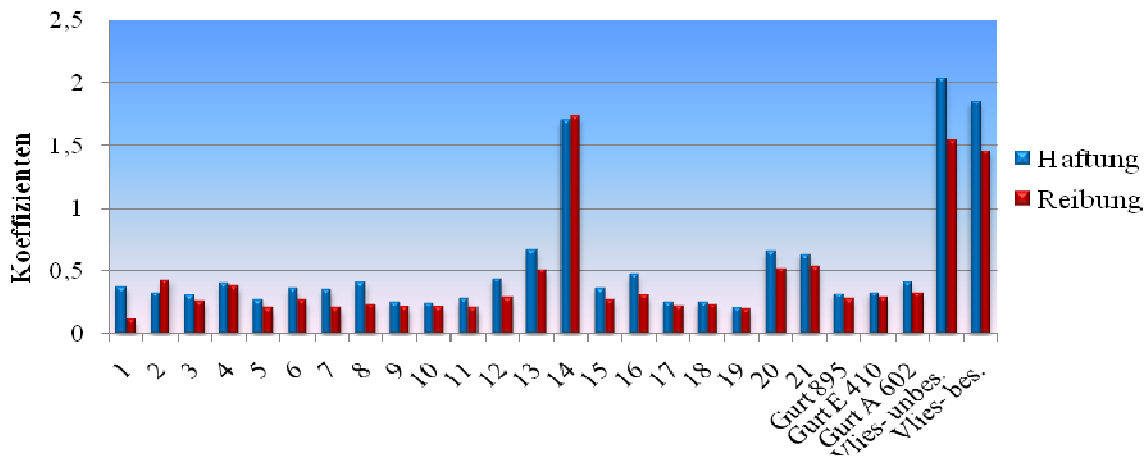


Abbildung 13: Reibungskoeffizienten für Haft-(blau) und Gleitreibung (rot) der untersuchten Lamellenmaterialien

Die o.g. Tabelle gemessener Reibungskräfte für Haft- und Gleitreibung zeigt die großen Unterschiede der textilen Lamellenmaterialien bzgl. der Reibung, wobei die Reibungskoeffizienten der untersuchten Materialien zwischen 0,1 bis 1,7 (Material 14) liegen. Das Material 14 wurde wegen seiner „Klebrigkeit“ als geeignetes Lamellenmaterial ausgewählt. Da bei der Holzverarbeitung diese Klebrigkeit wegen Staub und Holzspäne reduziert werden könnte, wurde auch eine Reibungsprüfung durchgeführt, bei der dieses Material mit Magnesiumcarbonat ( $MgCO_3$ ) intensiv bestäubt wurde.  $MgCO_3$  hat wegen derselben Partikelgröße (6-10  $\mu m$ ) ein vergleichbares Verhalten wie Holzstaub. Der Reibungskoeffizient wird mit Magnesiumcarbonat bei vielen Materialien verbessert, bei Material 14 hingegen wird die Reibung von 1,7 auf 0,6 reduziert, was immer noch ein recht hoher Wert ist.

Mit dem entwickelten Lamellenmodell für Zug- und Biegung wurde diese Simulation analog dem Experiment durchgeführt. Hier drückt der braune „Klotz“ über seine Gewichtskraft auf die grüne Lamelle, die mit 10 mm/s (6fach schneller) mittig gezogen wird. Im Diagramm wird die am Knoten ermittelte Zugkraft über der Zeit für den Kontaktparameter Reibung  $\mu_{LL}=0,5$  (bzw.  $\mu_{LL}=1,7$ ) aufgetragen. Die Simulation ergibt das korrekte Reibungsverhalten wieder.

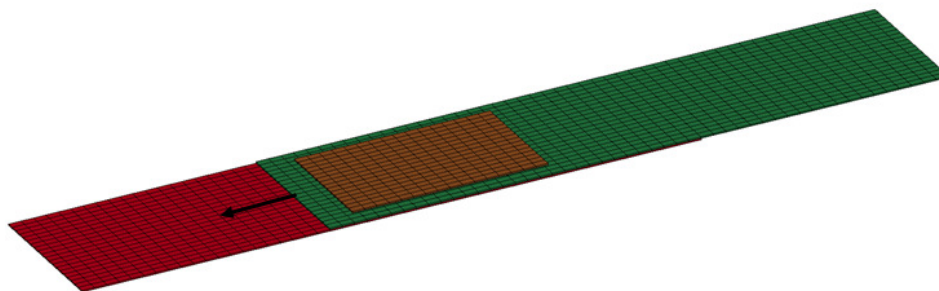
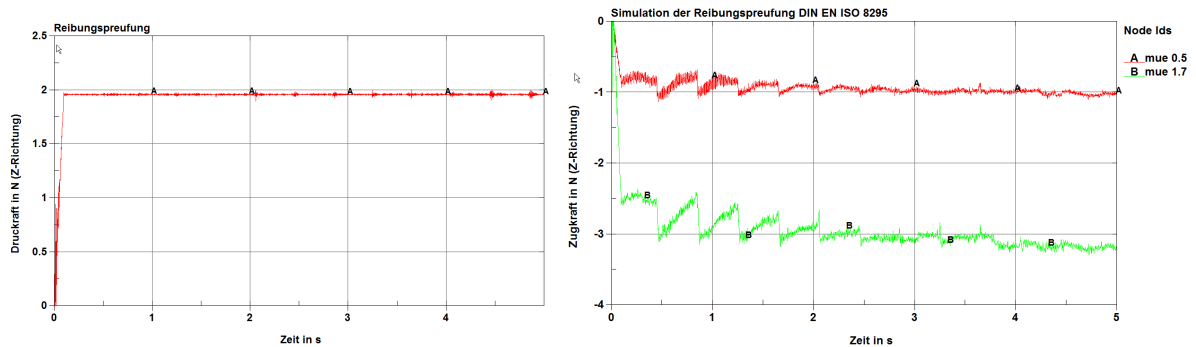


Abbildung 14: Reibungssimulation mit dem Lamellenmodell für Material 14 analog Experiment



a) auf obere Lamelle wirkende Normalkraft 1,96 N b) berechnete Zugkraft für  $\mu_{LL}=0,5$  und  $\mu_{LL}=1,7$   
Abbildung 15: Ergebnis der Reibungssimulation mit dem Lamellenmodell für Material 14

Im Anfangsbereich des Diagramms (Abb. 15b) sieht man, dass hier Schwingungserscheinungen beim Kontakt zwischen den Lamellen bzw. dem Klotz zu überhöhten Reibungskräften führen. Durch eine Kontaktdämpfung nimmt dieser Effekt jedoch ab.

#### 4.3 Simulation des Vorhangs-Beschusses mit dem optimierten Simulationsmodell

Das Vorhangssystem wurde mit dem überprüften Lamellenmodell für Material 14 aufgebaut. Für die Lamellen und dem Projektil wurde auch die Gravitationsbeschleunigung als weitere zusätzliche Belastung im Modell implementiert. Da nicht bekannt war, ob die gegen die Wand prallenden Lamellen zurückgeschleudert werden und dabei die Lamellen mit eingefangenen Projektil beeinflussen, wurde auch die Wand entsprechend der experimentellen Prüfung modelliert. Noch nicht berücksichtigt wurde der Luftwiderstand, der während der schnellen Lamellendrehbewegung auf die vordersten Lamellen einwirkt. Eine Möglichkeit wäre für diese Lamellen eine Dämpfung zu definieren. Da sich der Luftwiderstand in Realität positiv bzgl. der Schutzwirkung des textilbasierten Schutzvorhanges auswirkt, ist dieser „Modellfehler“ tolerierbar und es wurde auf jegliche Lamellendämpfung verzichtet. Die Reibungsberücksichtigung wurde mit der Reibungsprüfung verifiziert, dennoch kann es infolge ausgeprägte Kontakt- und Schwingungsvorgängen ev. zu einer verschmierten und zu hohen Reibungsberücksichtigung kommen. Hierzu sind weitere Untersuchungen geplant. Die Projektil/Lamellenreibung wurde mit  $\mu_{PL}=0,1$  sehr niedrig gewählt, da dies eine Verschärfung der Prüfbedingung darstellt. Die Simulationsergebnisse stimmen (ohne jegliche Parameteranpassung) bereits jedoch sehr gut mit den experimentell durchgeführten Beschussprüfungen überein und betätigen somit das Simulationsmodell im Wesentlichen.

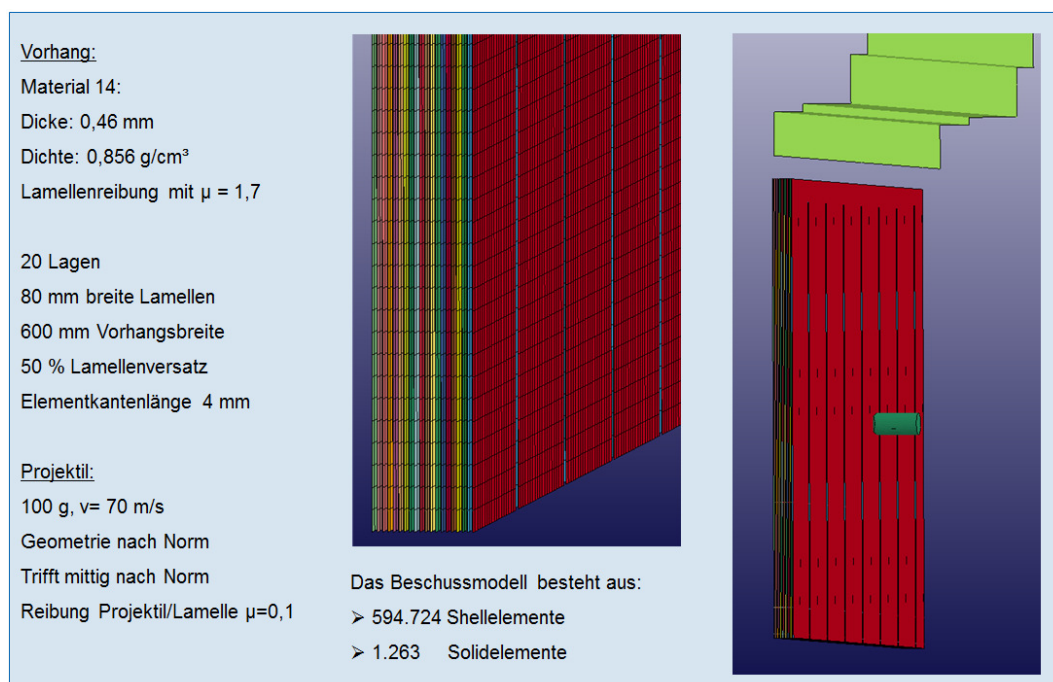


Abbildung 16: Simulationsmodell des Vorhangssystems aus Material 14 (Polyamidgewebe)

Die FE-Berechnungen wurde mit LS-DYNA (explizit) auf einem Rechner mit zwei Xeon Nehalem 6 Kernprozessoren, 3,3 GHz) durchgeführt. Die durchschnittliche Berechnungsdauer bis zum gewählten Belastungsende bei  $t = 120$  ms beträgt, unter Nutzung aller 24 Prozessorkerne ca. 6 Stunden und führt bei der gewählten häufigen Ergebnisausgabe zu einer Datenmenge über 100 GB.

#### 4.4. Verifizierung der Beschusssimulation mittels Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen

Die Bewertung und Verifizierung von Simulationen, bei denen die Projektilflugrichtung  $\phi$  nach Verlassen des Vorhangs zwischen 0 und 90° mit relevanter Geschwindigkeit das Vorhangssystem verlassen, ist eindeutig. Schwierig wird es hingegen bei guten Vorhangssystemen mit sehr hohem Rückhaltevermögen. Das Projektil wird hier sehr schnell auf geringe Geschwindigkeiten abgebremst und es dauert sehr lange, bis sie – wenn überhaupt - das Vorhangssystem verlassen. Da das eingefangene Projektil durch die Bewegungen der umschlingenden Lamellen ständig abgebremst und beschleunigt wird, kann vor Verlassen des Schutzvorhanges bzgl. der Normbedingungen keine eindeutige Aussage gemacht werden, ob das Projektil ev. doch die 400mm Ebene wenn auch mit minimaler Restgeschwindigkeit erreicht. Für die Simulation wäre die Kriterien max. Gesamtrestgeschwindigkeit und/oder eine Restgeschwindigkeit in Schussrichtung bzw. kinetische Energien einfacher.

In der folgenden Bilderserie werden verschiedenen Zeitpunkte der experimentell durchgeführten Beschussprüfung für das Material 14 (20 Lagen, Lamellenbreite 80 mm, ... s. Abb. 16) aus dem High-Speed-Video entnommen und denselben Zeitpunkten der Beschusssimulation gegenübergestellt. Da die vorderen Vorhangslamellen aufgrund der fehlenden Luftwiderstandes im Simulationsmodell durch den Impakt und dem Fehlen jeglicher Lamellendämpfung im Gegensatz zur realen Prüfung nach vorne geschleudert werden und den Blick auf die relevanten Vorgänge verwehren, sind die erste Lage mit Projektil und die ersten 4 Vorhangslagen dargestellt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität.

Das Projektil trifft mittig, wird von den Lamellen eingefangen, rotiert und wird mitbewegt. Das simulierte Vorhangssystem stoppt das Projektil bereits nach kurzer Belastungsdauer. Das Projektil wird durch das sich noch drehende Lamellensystem zunächst in negativer Richtung beschleunigt, um dann wieder mit sehr geringer Geschwindigkeit in positiver z-Richtung zu bewegen. Würde man hier noch sehr viel länger rechnen, dann würde das Projektil nach unten herausfallen. Die Filme der simulierten Beschussvorgänge verdeutlichen die Schutzwirkung der textilbasierten Vorhangssysteme und zeigen die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Projektil/Lamellen und den Lamellen untereinander, die beim Impakt des Projektils auftreten (Aufschlag, Einfangen, Projektilrotationen, Umlenkvorgänge, Stoppwirkung, Mitreißen und erneute Projektilbeschleunigungen durch schnell drehende Lamellen, Umlenkvorgänge und das Verlassen des Vorhanges

High-Speed-Video des Vorhangs-Beschusses

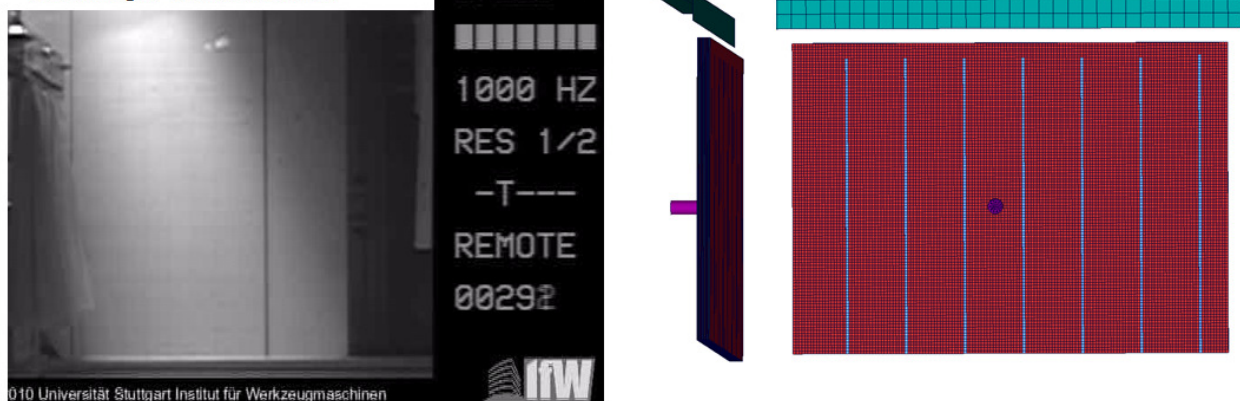


Abbildung 17: Vergleich des experimentellen Beschussprüfung mit der Simulation für Material 14, 20 Lagen, 80 mm breite Lamellen, 50 % Lamellenüberdeckung von Lage zu Lage, 600 mm Vorhangsbreite

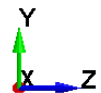




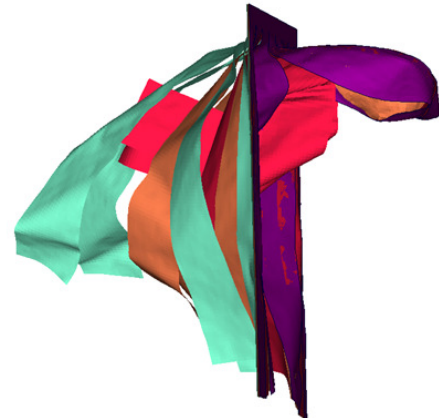
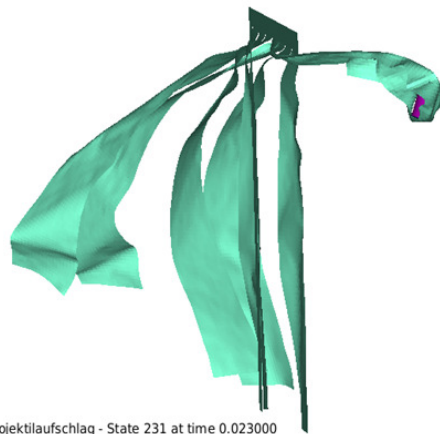
Bild 303 (0,303 s):  
Zeitpunkt t = 11 ms



State 111 at time 0.010999



Zeitpunkt t = 23 ms  
(Bild 315: 0,315 s)

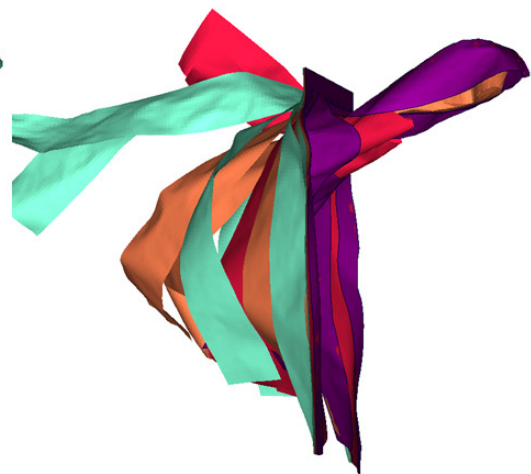


Projektilaufschlag - State 231 at time 0.023000

TF,ITV Denkendorf, Projektilaufschlag - State 231 at time 0.023000



Zeitpunkt t = 36 ms  
(Bild 328: 0.328 s)



State 361 at time 0.035999

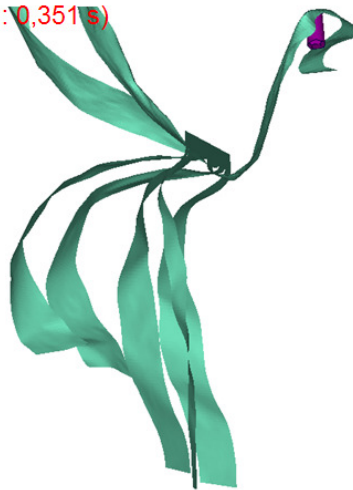
DIFF,ITV Denkendorf, Projektilaufschlag - State 361 at time 0.035999



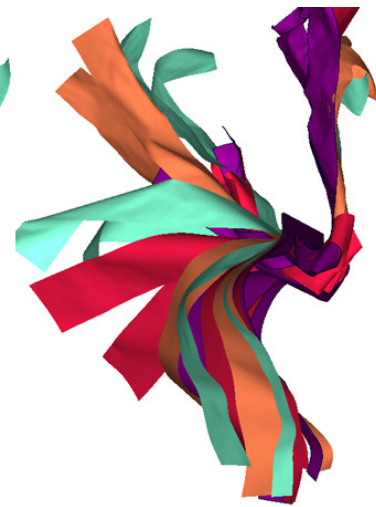
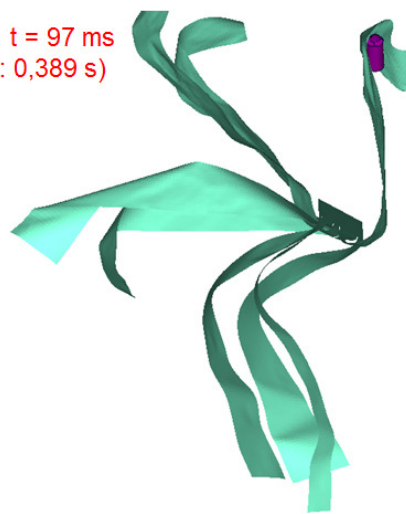
Zeitpunkt  $t = 46 \text{ ms}$   
(Bild 338: 0,338 s)



Zeitpunkt  $t = 59 \text{ ms}$   
(Bild 351: 0,351 s)

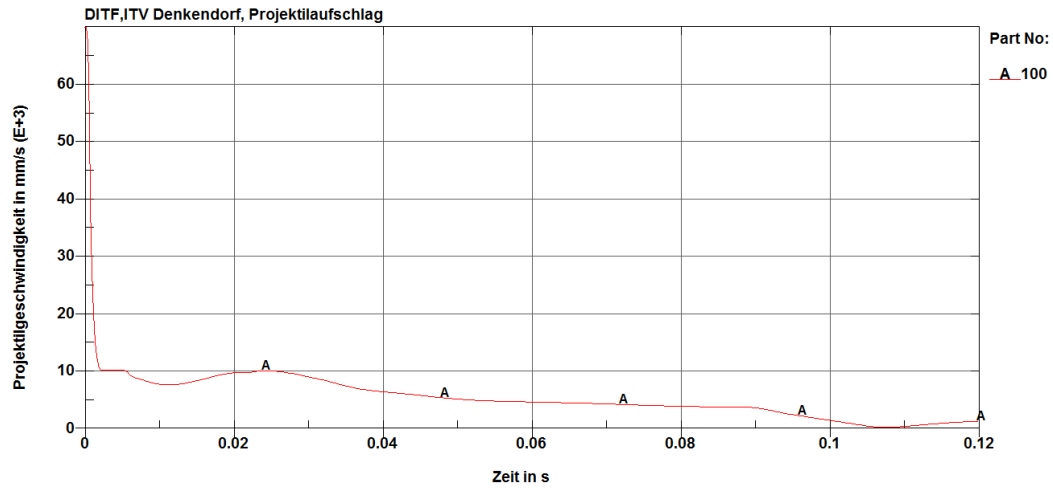


Zeitpunkt  $t = 97 \text{ ms}$   
(Bild 389: 0,389 s)

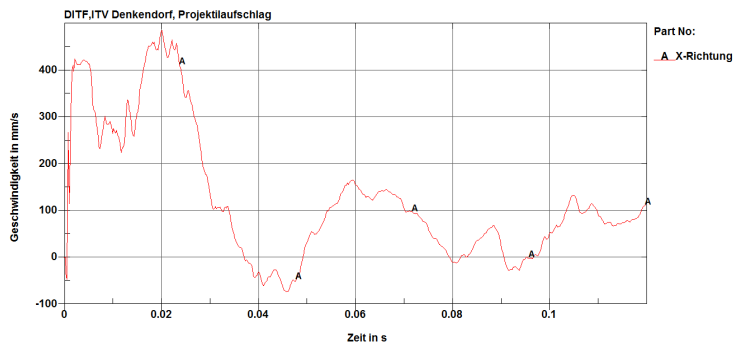


Die folgenden Diagramme zeigen die :

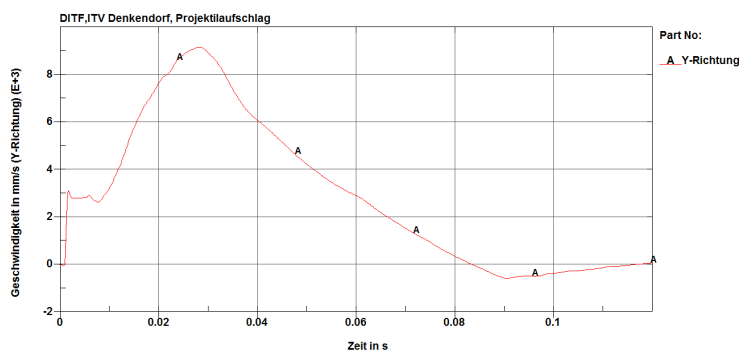
- Projektil-Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit (Resultierende, X-, Y- und Z-Richtung),
- Projektilweg über der Zeit (X-, Y- und Z-Richtung) und
- Projektil-Geschwindigkeitsverlauf über den Projektilweg,



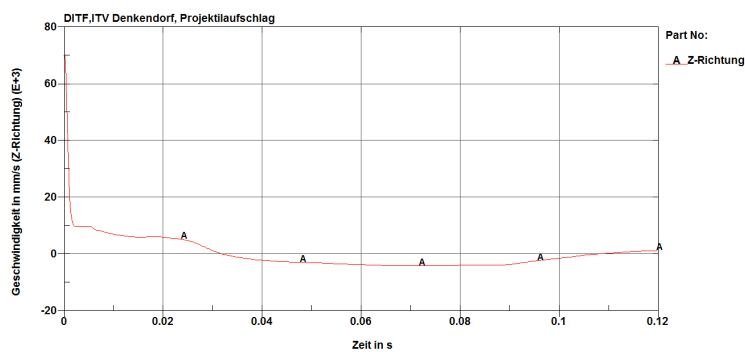
a)



b)



c)



d)

Abbildung 18a-d: Projektilgeschwindigkeit in mm/s über der Zeit in s

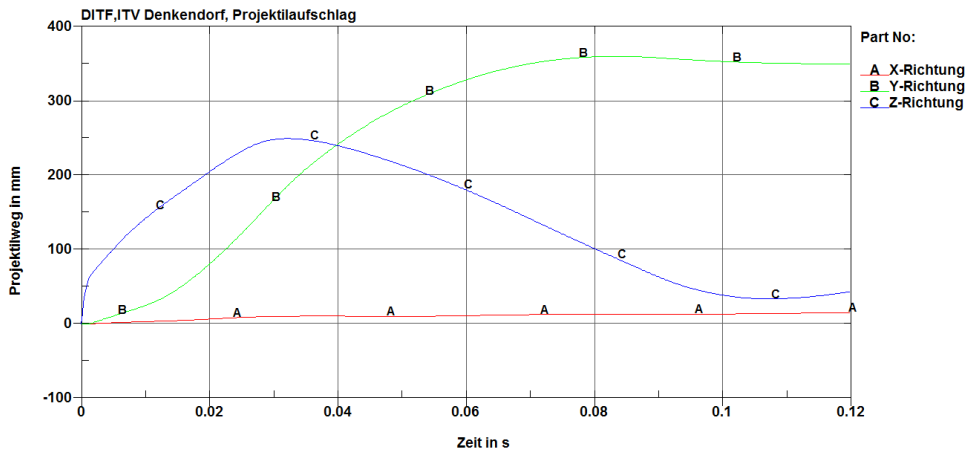


Abbildung 19: Projektilweg in mm über der Zeit in s für x-, y-, und z-Richtung

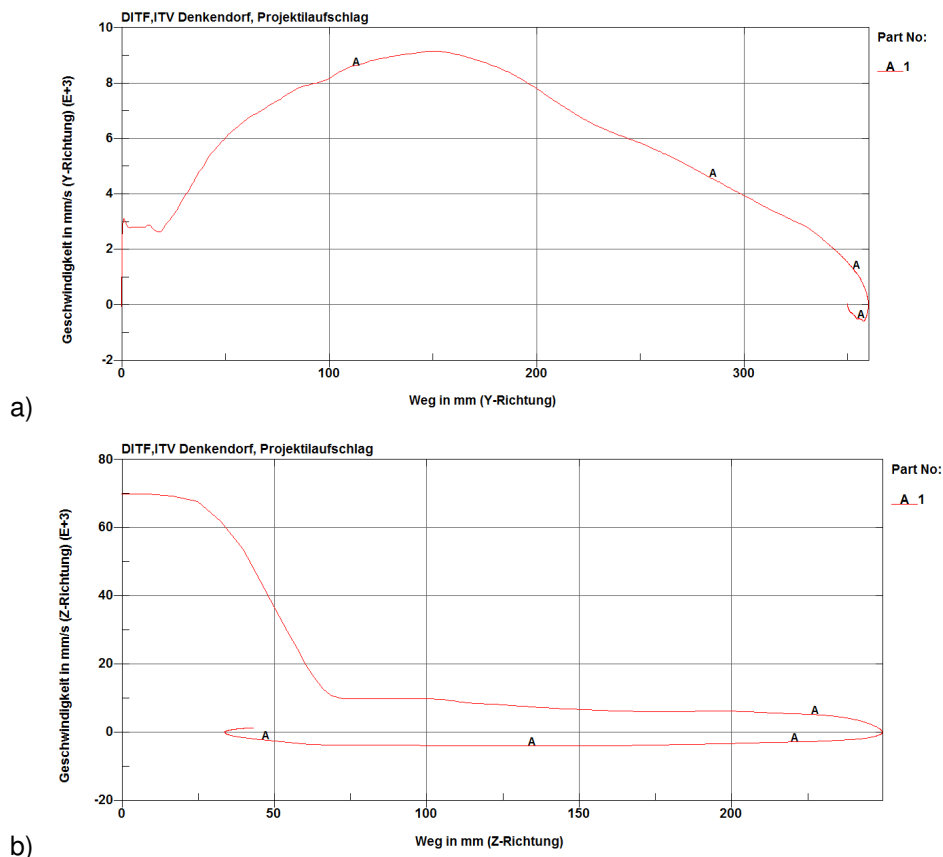
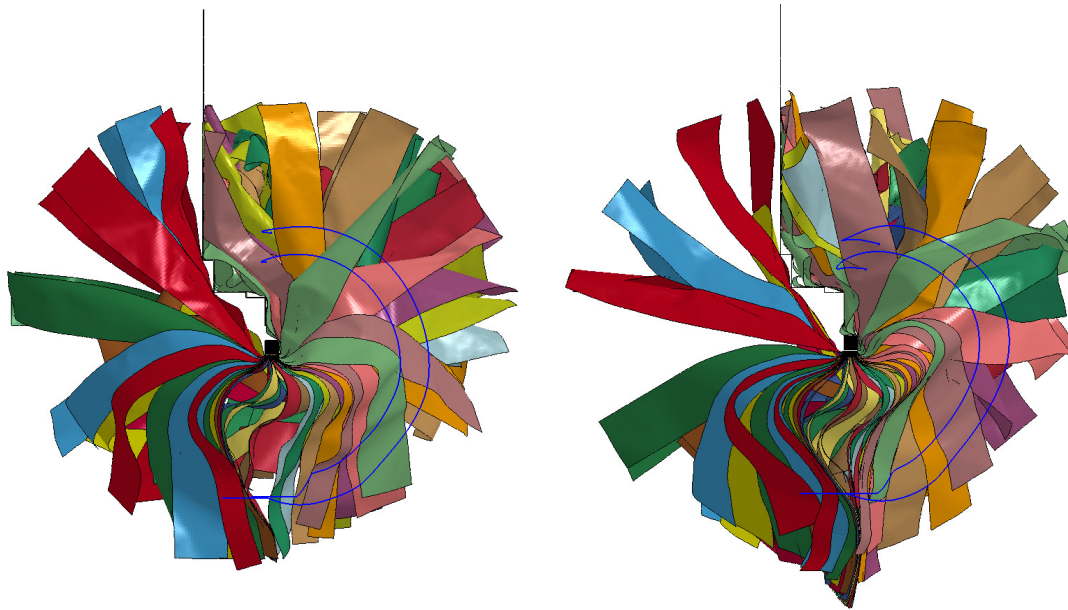


Abbildung 20: Projektilgeschwindigkeit in mm/s über dem Projektilweg in mm (y- und z-Richtung)

Die folgenden Abbildungen zeigen den Zustand der 20 lagigen Vorhangssystems zum Zeitpunkt  $t = 120 \text{ ms}$ , zum einen für die Lamellen/Lamellenreibung  $\mu_{LL}=1,7$  und zum anderen für  $\mu_{LL}=0,6$  (entspricht Reibungsreduzierung durch Holzstaub, Späne). Zu diesem Zeitpunkt liegt das Projektil immer noch vollständig und sicher eingefangen zwischen den Lamellen. Die an der Wand abgeprallten und zurückgeworfenen Lamellen beschleunigen gerade das Projektil wieder etwas in Z-Richtung. Bei  $t=110 \text{ ms}$  (vgl.18a) war das Projektil in Ruhe. Würde man hier noch sehr viel länger rechnen, dann fiel das Projektil nach unten heraus. Dazu wären aber mehrere Rechentage nötig, die aber keine neuen Informationen bringen. Es ist klar, dass dieser Vorhang mit 20 Lagen eine sehr gute Rückhaltewirkung besitzt und die Prüfung besteht.



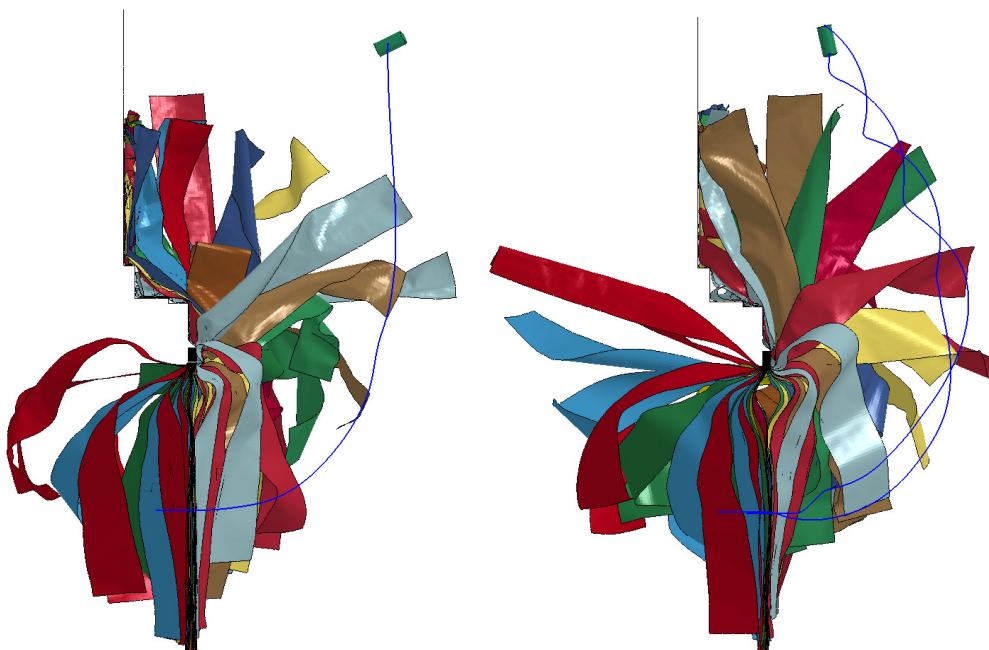


a) 20 Lagen, Lamellenreibung  $\mu_{LL}=1,7$   
( $t = 0,12$  s,  $v=1,25$  m/s,  $v_z=1,2$  m/s)

b) 20 Lagen, Lamellenreibung  $\mu_{LL}=0,6$   
( $t = 0,12$  s,  $v = 2,2$  m/s,  $v_z = 2,1$  m/s)

Abbildung 21: Vorhangsbeschuss mit 20 Lagen, Material 14 mit unterschiedlicher Lamellenreibung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Auswirkungen, wenn dieselben Berechnungen mit einer reduzierten Lagenanzahl durchgeführt werden. Mit 12 Lagen besteht das Vorhangssystem auch mit auf  $\mu_{LL} = 0,6$  reduzierten Lamellenreibung, indem das Projektil entgegen der Schussrichtung bzw. mit  $\mu_{LL} = 1,7$  senkrecht nach oben freigegeben wird. Die Projektil-Restgeschwindigkeit liegt hier bei 10 bzw. 13 m/s. Eine weitere Lagenreduktion auf 10 Lagen führt nur noch bei der hohen Lamellenreibung  $\mu_{LL}=1,7$  zum Bestehen der Normprüfung. Mit  $\mu_{LL}=0,6$  fliegt das Projektil mit 16 m/s und 2,5 m/s in Z-Richtung und wird die 400 mm Ebene durchfliegen und fällt entsprechend der Normprüfbedingungen durch.



a)  $\mu_{LL} = 0,6$  ( $t = 0,05$  s,  $v = 12,7$  m/s,  $v_z=0,2$  m/s)    b)  $\mu_{LL} = 1,7$  ( $t = 0,065$  s,  $v = 10$  m/s,  $v_z = - 4,9$  m/s)

Abbildung 22a ,b: Vorhangsbeschuss mit 12 Lagen, Material 14 mit unterschiedlicher Lamellenreibung



a)  $\mu_{LL} = 0,6$  ( $t = 0,04$  s,  $v = 16,0$  m/s,  $v_z = 2,5$  m/s) b)  $\mu_{LL} = 1,7$  ( $t = 0,04$  s,  $v = 13,6$  m/s,  $v_z = -3,38$  m/s)  
 Abbildung 23a,b: Vorhangsbeschuss mit 10 Lagen, Material 14 mit unterschiedlicher Lamellenreibung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Auswirkung der weiteren Reduzierung der Lamellenreibung von  $\mu_{LL} = 0,4$  auf  $\mu_{LL} = 0,1$  für das Vorhangsystem mit 20 Lagen. Mit bis  $\mu_{LL} = 0,1$  versagt das textile Vorhangsystem, jedoch bereits mit  $\mu_{LL} = 0,2$  gilt die Prüfung nach Normbedingungen als erfüllt, da das Projektil senkrecht nach oben fliegt. Bei  $\mu_{LL} = 0,3$  wird das Projektil bereits sicher von den Lamellen eingefangen.



a)  $\mu_{LL} = 0,4$  ( $t = 0,12$  s,  $v = 2,1$  m/s,  $v_z = 2$  m/s) b)  $\mu_{LL} = 0,3$  ( $t = 0,12$  s,  $v = 2,3$  m/s,  $v_z = 2,0$  m/s)



c)  $\mu_{LL} = 0,2$  ( $t = 0,06$  s,  $v = 7,7$  m/s,  $v_z = 0,01$  m/s)    d)  $\mu_{LL} = 0,1$  ( $t = 0,10$  s,  $v = 15$  m/s,  $v_z = 9,9$  m/s)  
 Abbildung 24a -d: Vorhangsbeschuss mit 20 Lagen, Reduzierung der Lamellenreibung von 0,4 auf 0,1

#### 4.5 Direkte und abgeleitete Ergebnisse der Beschusssimulation

- 1) Trifft das Projektil auf die erste Lamelle, so wird innerhalb kürzester Zeit der größte Teil der kinetischen Bewegungsenergie in das Vorhangssystem eingebracht. Das Projektil wird dabei extrem abgebremst und die textilen Lamellen stark beschleunigt. Dabei kommt es zu dem für die Schutzwirkung textiler Schutzvorhängen zentralen Einfangvorgang des Projektils.
- 2) Beim Einfangvorgang bleibt das Ende des getroffenen Lamellenendes aufgrund seiner Massenträgheit zunächst zurück und es erfolgt eine Drehbewegung mit dem momentanen Projektilort als Drehpunkt. Das Lamellenende umschließt dann das Projektil. Dieser Vorgang setzt sich für alle Lamellen fort, die voll überlappend angeordnet sind (1, 3, 5 ... bzw. 2, 4, 6 ... Lage). Die Lamellen mit dem eingefangenen Projektil beschleunigen anschließend während der Drehbewegung um die Vorhangsfixierung das Projektil wieder.
- 3) Wird das Projektil sicher eingefangen, dann führt es eine Kreisbewegung um die Position der Lamelleneinspannung aus und wird dann senkrecht nach oben oder in den meisten Fällen entgegen der Schussrichtung vom Schutzvorhangssystem wieder freigegeben.
- 4) Variationsberechnungen zeigten, dass in der Simulation die Projektilgeschwindigkeit im Vorhang, ob bzw. unter welchem Winkel das Vorhangssystem das Projektil freigibt, analog der realen Beschussprüfung von den gewählten Vorhangsparametern wie Lagenanzahl, Lamellenbreite, Lamellenmasse, Lamellenreibung beeinflusst wird. Wird die Lamellenreibung von  $\mu_{LL} = 1,7$  auf 0,1 reduziert, dann verlässt das Projektil den Vorhang mit  $v = 15$  m/s unter  $\varphi = 50^\circ$ . Mit  $\mu_{LL} = 0,2$  fliegt das Projektil bereits nur noch mit 7,7 m/s senkrecht nach oben und besteht hiermit gerade die Normprüfung. Ferner besteht das simulierte Vorhangssystem sicher bis 12 Lagen, wobei sich dann das Projektil mit einer Endgeschwindigkeit von 10 m/s mit der Geschwindigkeitskomponente von 5 m/s entgegen der Schussrichtung bewegt. Eine Reduzierung der Lamellenreibung auf  $\mu_{LL} = 0,6$  bei 12 Vorhangslagen lässt das Projektil nahezu senkrecht nach oben mit einer Geschwindigkeit von 12,7 m/s fliegen ( $\mu_{LL} = 0,6$  entspricht den Reibungsverhältnissen des mit  $MgCO_3$  vollständig eingestaubten Material 14, die eine extreme Verschmutzung durch Holzstaub bzw. Späne simuliert). Eine Reduzierung auf 10 Lagen führt jedoch nur mit  $\mu_{LL} = 1,7$  gerade noch zum Bestehen der Prüfung. Dies deckt sich sehr gut mit den Ergebnissen der vom IfW durchgeführten realen Beschussprüfungen mit dem Material 14.

- 5) Die 50 % zur getroffenen Lamelle überlappend angeordneten Lamellen tragen nur dann wesentlich zur einer Energieaufnahme und Rückhaltewirkung bei, wenn zwischen diesen ausreichend hohe Reibungskräfte wirken. So zeigen die Simulationen mit fehlender Lamellenreibung, dass diese versetzten Lamellen dann keinen nennenswerten Beitrag zur Schutzwirkung liefern.
- 6) Eine hohe Projektil-Lamellenreibung verbessert die Bedingungen für die Schutzwirkung, da hierdurch das Freigeben des eingefangenen Projektils später erfolgt. Daher führen Beschussprüfungen mit Spitzprojektilen, die sich im Extremfall in die ersten Lamellen bohren, sogar zu einem verbesserten Vorhangsverhalten. Die getroffene Lamelle wird dabei sehr viel stärker auf Zug belastet und es darf dann nicht zu einem Abreißen der Lamelle an der Einspannung kommen. Dies deckt sich sehr gut mit den vom IfW mit Spitzprojektilen durchgeführten Beschussresultaten an textilbasierte Splitterschutzvorhänge, bei denen - im Gegensatz zu den früheren PVC-Schutzvorhängen - das Rückhaltevermögen hierbei nicht negativ beeinträchtigt wurde. Aus diesem Grund werden textilbasierte Schutzvorhänge nicht mit einem Spitz- sondern mit dem „stumpfen“ 100g Normprojektil geprüft.

## 5 Ausblick

Diese erste Auswertung der zahlreichen Berechnungsergebnisse zeigt das riesige Anwendungspotential der am ITV entwickelten Simulationsmodelle zur Untersuchung unterschiedlichster Parameter auf die Schutzwirkung textilbasierter Splitterschutzvorhänge. Weitere Simulationen werden noch ausgewertet, deren Ergebnisse zu einem späteren Zeitpunkt auch im Rahmen einer Promotionsarbeit veröffentlicht werden.

Zur Vereinfachung der Verifizierung von Vorhangsmodellen ist eine dynamische Impaktprüfung mit einem kugelförmigen Impaktor auf eine Anzahl hintereinander angeordneten Lamellen geplant. Wählbare Parameter wären hier die Lamellenanzahl, die Impakthöhe und die Impaktgeschwindigkeit. Hierdurch erhält man eine einfachere und schnellere Prüfmethode zur Gewinnung noch genauerer Vorhangsmodelle für unterschiedlichste textile Lamellenmaterialien. Die Industrie der Holzbearbeitungsmaschinen wünschen vom ITV und dem IfW weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um wichtige weitere Problemstellungen zu bearbeiten, damit anwendungsgerechte, praktikable und preisgünstige textilbasierte Splitterschutzvorhangssysteme verfügbar werden. Bei diesen Aufgaben sollen die entwickelten Simulationsmodelle eingesetzt werden.

## 6 Zusammenfassung

Der Trend zu höheren Drehzahlen bzw. Schnittgeschwindigkeiten erhöht das Gefahrenpotential im Falle eines Werkzeug- oder Schneidenbruchs. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen wurde die Norm EN 848-3 überarbeitet und verschärft, die durch die bislang eingesetzten PVC Schutzvorhänge jedoch nicht mehr erfüllt werden können ohne das zu bearbeitende Holzwerkstück zu beschädigen. Um neue Lösungen für die Industrie verfügbar zu machen, wurden Vorhangssysteme mit textilen Materialien untersucht, die einerseits die erforderliche Schutzwirkung besitzen und dabei gleichzeitig so flexibel sind, dass sie die empfindlichen Werkstücke beim Bearbeitungsprozess nicht beschädigen. Dabei wurden einige Lösungen erarbeitet. Eine eindeutige Korrelation der ermittelten Lamelleneigenschaften (Dicke, Flächengewicht, Spannungs/Dehnungs-Diagramme, Reibungsprüfungen, etc.) mit den Beschussresultaten konnte jedoch nicht gefunden werden, da Textilien komplexe Systeme sind und sich viele Parameter gegenseitig beeinflussen [9-12]. Damit kommt der numerischen Simulation der Schutzwirkung textilbasierter Splitterschutzvorhänge eine wichtige Bedeutung zu. Es wurden Simulationsmodelle der Beschussprüfung entsprechend der Norm mit Vorhangssysteme für textile Lamellen entwickelt, wobei alle relevanten Parameter berücksichtigt werden. Dabei kam dem Lamellenmodell, das das nichtlineare Materialverhalten bei Zugbelastung, die Biegesteifigkeit und die Reibung richtig darstellen muss, eine besondere Bedeutung zu. Die Simulationsergebnisse stimmten sehr gut mit den real durchgeführten Beschussprüfungen überein und die Schutzwirkungsmechanismen konnten eindeutig aufgezeigt werden. Auf diese Weise und mit durchgeführten Parametervariationen konnten wichtige Erkenntnisse zur Optimierung textilbasierter Splitterschutzvorhänge gewonnen werden. Neue Gestaltungsvorschläge können nun zunächst durch die Simulation bzgl. ihres Potentials untersucht und bewertet werden. Diese Simulationsmodelle stehen nun für ein Folgeprojekt zur Verfügung

## Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts „Entwicklung textilbasierter Splitterschutzvorhänge mit hohem ballistischem Rückhaltevermögen für die Verbesserung des Arbeitsschutzes bei schnelldrehenden Werkzeugen spanender Werkzeugmaschinen“ erarbeitet. Dieses IGF-Vorhaben 15738 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) e.V., Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Ferner danken wir sehr der Textilindustrie und der Fa. DYNAmore für ihre intensive Unterstützung und Mitarbeit.

## 7 Literatur

- [1] DIN EN 848-3:2007+A2:2009 Sicherheit von Holzbearbeitungsmaschinen – Fräsmaschinen für einseitige Bearbeitung mit drehendem Werkzeug – Teil 3: NC - Bohr- und Fräsmaschinen, Beuth Verlag Berlin, 2009.
- [2] IGF-Vorhaben 15738 N „Entwicklung textilbasierter Splitterschutzvorhänge mit hohem ballistischem Rückhaltevermögen für die Verbesserung des Arbeitsschutzes bei schnelldrehenden Werkzeugen spanender Werkzeugmaschinen“ Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart und dem Institut für Textil und Verfahrenstechnik der deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) Institute ITV Denkendorf, Laufzeit 01.10.2008 – 30.09.2010.
- [3] Neudörfer, A.: Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte. Berlin: Springer Verlag, 2005.
- [4] Heisel, U.; Tröger, J.; Knorr, W.: Unter Beschuss. Sicherheitsschutzvorhänge für Bearbeitungszentren im Visier. In: HK Holz- und Kunststoffverarbeitung, H. 10, 2006, S. 66 - 68.
- [5] Heisel, U.; Tröger, J.; Schneider, M.: Große Rückhaltefähigkeit: Neue Schutzvorhänge für NC-Bearbeitungszentren. In: HK Holz- und Kunststoffverarbeitung 05/2007, S. 86 - 88.
- [6] Martynenko, S.; Schneider, M.: CNC-Bearbeitungszentren 2005. In: HOB Die Holzbearbeitung, H. 10, 2005, S. 16 - 31.
- [7] Stiftung Industrieforschung geförderten Vorhaben S 677 (Laufzeit 01.11.2004 – 31.10.2006) mit dem Titel „Maschinensicherheit bei Bearbeitungszentren der Holzbearbeitung, Schutz gegen berstende Werkzeuge“ mittels Weich-PVC-Schutzvorhangsysteme
- [8] Holz-Berufsgenossenschaft: Statistisch kontrollierte Untersuchung zu Werkzeugschäden an CNC-Oberfräsmaschinen/Bearbeitungszentren. Stuttgart 2005.
- [9] Finckh, H.: Numerische Simulation der mechanischen Eigenschaften textiler Flächengebilde - Garnmodelle -, DYNAmore LS-DYNA Forum 2002, 19. – 20. September 2002, Bad Mergentheim
- [10] Prof. Schweizerhof, K., Blankenhorn, G., Finckh, H.: Numerical Investigations of a Projectile Impact on a Textile Structure, 4th European LS-DYNA CONFERENCE, 22-23.05.2003, Ulm
- [11] Finckh, H.: Numerische Simulation der mechanischen Eigenschaften textiler Flächengebilde – Gewebeherstellung -, LS-DYNA Forum 2004, 14. – 15. Oktober 2004, Bamberg
- [12] Finckh, H.: Virtuelles Prototyping – Numerische Herstellungssimulationen textiler Strukturen, Denkendorfer Innovationstag, 25. Februar 2010, Denkendorf

## Kontakt:

ITV Denkendorf  
 Körschtalstr. 26  
 73770 Denkendorf  
 hermann.finckh@itv-denkendorf.de

