

Das vorliegende Dokument ist eine Übersetzung des Originalartikels "Experimental Investigation of the Kink Effect by Impact Tests on Polycarbonate Sheets" (DOI:10.3850/978-981-18-2016-8 389-cd). Das Original wurde im Rahmen der Proceedings of the 31th European Safety and Reliability Conference veröffentlicht. Es wurde größte Sorgfalt darauf gelegt, die Inhalte so genau wie möglich zu übersetzen, um die Integrität und Absicht des Originals beizubehalten. Dennoch können bei jeder Übersetzung Nuancen verloren gehen oder interpretiert werden. Bei Unklarheiten oder Fragen wird empfohlen, das Originaldokument zu konsultieren.

1. Einleitung

Internationale Vorschriften wie die Norm ISO 23125 (2015) [1] zur Sicherheit von Drehmaschinen bieten einen rechtlichen Rahmen für die Verwendung von Polycarbonat (PC)-Platten in Maschinenumhausungen, indem sie eine Konstruktionsgrundlage bieten und Testverfahren für eine experimentelle Überprüfung eines angemessenen Schutzes gegen ausgeworfene Späne, Werkzeug- oder Werkstückfragmente spezifizieren. Aktuelle Testverfahren unterziehen PC-Schutzfenster einem hochenergetischen Aufprall durch ein stumpfes Projektil. Die initiale kinetische Energie $E_{kin,i}$ des Projektils während des Aufpralltests, im Folgenden als initiale Projektilenergie $E_{pr,i}$ bezeichnet, hängt von der maximal vorhersehbaren Spindelgeschwindigkeit n der Maschine ab, für die das Schutzfenster verwendet wird. Das PC-Schutzfenster gilt als sicher, wenn es sich verformt, ohne dass ein durchgehender Riss von einer Oberfläche zur anderen sichtbar wird, wobei die aufprallende Seite und die gegenüberliegende Seite als Maschinenseite bzw. Bedienerseite bezeichnet werden. Die maximale initiale Projektilenergie $E_{pr,i}$, der eine PC-Sichtscheibe bei einem Aufprall standhält, wird als Rückhaltefähigkeit Y bezeichnet. Bei höheren initiale Projektilenergie $E_{pr,i}$ wird die Dicke d_{ts} des PC-Schutzfensters in der Regel erhöht, um ausreichende Sicherheit zu gewährleisten [1]. CORRAN ET AL. (1983) [3] beobachteten eine teilweise Reduzierung der Rückhaltefähigkeit Y , wenn die Prüfmusterdicke d_{ts} erhöht wurde, den sogenannten Kink-Effekt. Dieses Verhalten stellt ein potentiell Risiko für den Maschinenbediener dar, da das Design von Schutzvorrichtungen auf der Annahme basiert, dass eine größere Dicke d_{ts} des PC-Schutzfensters zu einer höheren Rückhaltefähigkeit Y führt. Es hat sich gezeigt, dass sowohl die Masse m_{pr} , sowie die Geometrie und Härte des Projektils als auch die Steifigkeit des Ziels und die Beschaffenheit der Auflage einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten beim Durchdringen haben. Die duktilen Werkstoffe Baustahl, Edelstahl und Aluminium, die von CORRAN ET AL. (1983) [3] untersucht wurden, zeigten einen klaren Kink-Effekt, der mit einer Änderung der Energieabsorption von ausgeprägter plastischer Verformung zu Durchdringung mit gut definierten Scherzonen und ohne signifikante Ausbuchtung verbunden war. Bei der Untersuchung des Materialverhaltens für verschiedene Prüfmusterdicken d_{ts} werden jedoch Projektilen für Handfeuerwaffen berücksichtigt, wodurch die

Studie auf eine Projektilmasse von $m_{pr} = 34,5$ g beschränkt ist.

WITTNER [5] ermittelte eine nichtlineare Beziehung zwischen der Rückhaltefähigkeit Y und der Prüfmusterdicke d_{ts} für eine Projektilmasse von $m_{pr} = 0,1$ kg, dem standardmäßigen Projektil für Aufpralluntersuchungen an Schutzeinrichtungen von Fräsmaschinen gemäß ISO 16090-1 [6]. Allerdings wurde nur bis zu einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 12$ mm monolithisches PC verwendet, während für eine Prüfmusterdicke von $d_{ts} > 12$ mm teilweise mehrschichtige Prüfmuster verwendet wurden. Bei einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 15$ mm wurde ein signifikanter Rückgang der Rückhaltefähigkeit Y beobachtet. Laut ISO 16090-1 [6] und ISO 23125 [1] übersteigt die maximale kinetische Energie E_{kin} von ausgeworfenen Teilen im Schadensfall bei Drehmaschinen die maximale kinetische Energie E_{kin} von Fräsmaschinen um das Vierfache. Da die Berücksichtigung höherer Projektilenergien E_{pr} ein Worst-Case-Szenario für Aufpralltests von Maschinenschutzfenstern darstellt, werden die Tests mit einem Standard-Drehmaschinenprojektil mit einer Masse von $m_{pr} = 2,5$ kg durchgeführt. Um die Rückhaltefähigkeit Y als Funktion der Prüfmusterdicke d_{ts} zu untersuchen, werden monolithische PC-Platten in einem Bereich der Prüfmusterdicke von $8 \text{ mm} < d_{ts} < 18 \text{ mm}$ untersucht.

Darüber hinaus wird ein Finite Elemente (FE)-Modell erstellt, das die Untersuchung weiterer Prüfmusterdimensionen für zukünftige Studien ermöglicht. ROTH (2017) [7] untersuchte verschiedene Materialmodelle hinsichtlich ihrer Eignung für Aufprallsimulationen von PC-Platten und fand ein hydrodynamisches Materialmodell als das geeignetste. STECCONI ET AL. (2020) [8] übernahmen den Ansatz von ROTH (2017) [7] und führten FE-Simulationen mit drei verschiedenen Arten von Projektilen durch, wobei die Ergebnisse dieser Simulationen eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen zeigten. Obwohl beide Studien tiefe Einblicke in die Mechanik von Aufpralltests bieten, untersuchten sie nicht die Rückhaltefähigkeit Y im Verhältnis zu verschiedenen Prüfmusterdicken d_{ts} .

Ein randnaher Aufprall führt zu einer reduzierten Verformung der Probe und einer signifikanten Abnahme der Rückhaltefähigkeit Y , was auch bei zunehmenden Prüfmusterdicke d_{ts} beobachtet wird. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit auch FE-Simulationen verwendet, um die Ergebnisse für verschiedene Prüfmusterdimensionen in Bezug auf randnahe Aufprallereignisse in der Nähe des Stützrahmens zu ermitteln. Die Simulationen von randnahen Aufprallereignissen unterstreichen das potenzielle Risiko einer abnehmenden Rückhaltefähigkeit Y , das dieses Phänomen darstellt.

2. Kink Effekt

Für duktile Materialien tritt ein Effekt auf, bei dem die Rückhaltefähigkeit Y bei zunehmender Prüfmusterdicke d_{ts} stagniert oder sogar abnimmt. Eine beispielhafte Darstellung des Phänomens für die minimale Perforationsenergie E_{pm} ist in Abb. 1 dargestellt.

Process parameter:

Test sample material: Stainless steel
 Projectile mass: $m_{pr} = 0.0345$ kg

--- Proximity function for E_{pm}
 ◆ Minimal perforation energy E_{pm}

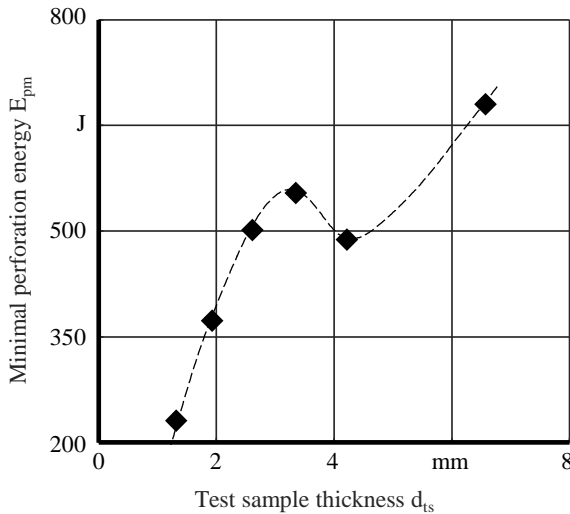


Abb. 1. Minimale Perforationsenergie E_{pm} für verschiedene Prüfmusterdicken d_{ts} für das Material Edelstahl [3].

Die minimale Perforationsenergie E_{pm} und die zugehörige minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} beschreiben den Fall einer vollständigen Durchdringung des Prüfmusters, bei dem die Projektilgeschwindigkeit v_{pr} nach der Durchdringung, die sogenannte Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r} = 0$ m/s beträgt. Dieses lastabhängige Verhalten wird als Kink-Effekt [3,5] bezeichnet.

Laut WITTNER [5] kann der Kink-Effekt durch Betrachtung der Energiebilanz von Aufpralltests erklärt werden. Drei Mechanismen sind von Bedeutung: elastische und plastische Verformung sowie Scherung.

Die Energiezufuhr in das Prüfmuster hängt ausschließlich von der initialen Projektilenergie $E_{pr,i}$ des Projektils ab und ist konstant für eine festgelegte Projektilmasse m_{pr} und initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i}$. Die Summe der genannten Mechanismen entspricht der initialen Projektilenergie $E_{pr,i}$ für $v_{pr,r} = 0$ oder ist kleiner als die initiale Projektilenergie $E_{pr,i}$ für $v_{pr,r} > 0$. Im Falle eines Aufpralls mit minimaler Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} kann die Energiebilanz wie in Gleichung (1) [5] dargestellt beschrieben werden.

$$E_{pr,i} = E_{pm} = E_e + E_p + E_s \quad (1)$$

Jedoch variiert die Energieverteilung mit zunehmender Prüfmusterdicke d_{ts} . WITTNER [5] führt den Kink-Effekt auf einen nichtlinearen Austausch der Energieformen untereinander zurück und leitet die Gleichung für jeden energetischen Begriff und ihre Abhängigkeit von der Prüfmusterdicke d_{ts} und dem Wölbungsradius r_c der PC-Platte ab. Gleichung (2) zeigt die Energie der elastischen Verformung E_e , wobei σ_r die Fließspannung und E das Elastizitätsmodul [3,5] ist.

$$E_e = \frac{3\pi r_c^2 d_{ts} (1 - v_{pr,i}^2) \sigma_r^2}{8 E} \quad (2)$$

Die elastische Energie E_e hängt linear von der Prüfmusterdicke d_{ts} und quadratisch vom Wölbungsradius r_c ab. Die Energie der plastischen Verformung ist in Gleichung (3) dargestellt, wobei r_p den Projektilradius, N_0 die Kraft der plastischen Membran, ϵ_r die radiale Dehnung, M_0 das plastische Ausbeutemoment, κ_r die radiale Krümmung und κ_θ die Umfangskrümmung [3,5] beschreibt.

$$E_p = \int_{r_p}^{r_c} (N_0 \epsilon_r + M_0 \kappa_r + M_0 \kappa_\theta) 2\pi r dr \quad (3)$$

Die Lösung des Integrals ergibt Gleichung (4):

$$E_p = \frac{1}{2} C (r_c^2 - r_p^2) \quad (4)$$

mit $C = (N_0 \epsilon_r + M_0 \kappa_r + M_0 \kappa_\theta) 2\pi$. Die plastische Energie E_p hängt quadratisch vom Wölbungsradius r_c ab und ist unabhängig von der Prüfmusterdicke d_{ts} . Gleichung (5) stellt die Scherenergie E_s dar, wobei e die Scherfläche, τ_y die Scherspannung und γ_f die kritische Scherspannung [3,5] beschreibt.

$$E_s = 2\pi \cdot r_p \cdot e \cdot d_{ts} \cdot \tau_y \cdot \gamma_f \quad (5)$$

Die Scherenergie E_s hängt linear von der Prüfmusterdicke d_{ts} ab und ist unabhängig vom Wölbungsradius r_c . Bei zunehmender Prüfmusterdicke d_{ts} nimmt der Wölbungsradius r_c ab, was zu einer quadratischen Abnahme der

elastischen und plastischen Verformung führt. Die Energie beider energetischen Begriffe wird daraufhin auf Scherung übertragen, was zum Materialversagen führt. Da die Abnahme des Wölbungsradius r_c durch den Projektilradius r_p begrenzt ist, ist auch die Energieübertragung von den elastischen und plastischen energetischen Begriffen begrenzt. Bei weiterer Zunahme der Prüfmusterdicke d_{ts} wird ein Punkt erreicht, an dem die Scherenergie E_s dominiert und zu einer linearen Zunahme der minimalen Perforationsenergie E_{pm} bei zunehmender Prüfmusterdicke d_{ts} führt.

3. Methoden

3.1. Experimentelle Methoden

Abb. 2 zeigt den experimentellen Aufbau, der verwendet wurde, um die Rückhaltefähigkeit Y des zu untersuchenden Prüfmusters zu bestimmen. Die initiale Projektilenergie $E_{pr,i}$ wird durch Druckluft geregelt, die in einem Druckbehälter aufgebaut wird. Die erforderliche initiale Projektilenergie $E_{pr,i}$ kann durch den Beschleunigungsdruck p_a und der Beschleunigungslänge l_a innerhalb des Beschleunigungsrohrs beeinflusst werden.

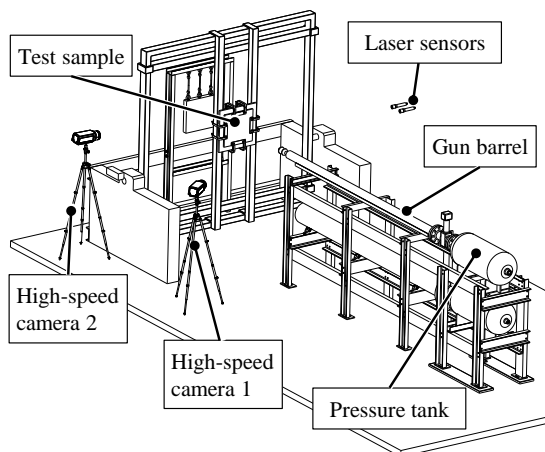


Abb. 2. Aufprallprüflabor des INSTITUTS FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB (IWF) der TU BERLIN.

Geometrien, Materialien und Masse m_{pr} des Projektils sind gemäß ISO 23125 (2015) [1] definiert und in Abb. 3 dargestellt. Der für das Projektil verwendete Stahl hat folgende mechanische Eigenschaften:

- Zugfestigkeit von $560 \text{ N/mm}^2 \leq R_m \leq 690 \text{ N/mm}^2$,
- Streckgrenze von $R_{p0.2} \geq 330 \text{ N/mm}^2$ und
- Bruchdehnung of $A = 20 \%$.

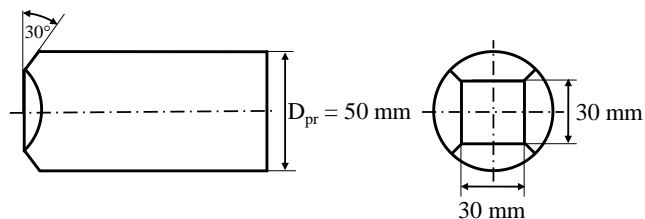


Abb. 3. Standardisierte Projektilform eines Projektils mit einer Masse von $m_{pr} = 2,5 \text{ kg}$ gemäß ISO 23125 (2015) [1].

Da der Außendurchmesser D_{pr} des Projektils kleiner ist als der Innendurchmesser des Beschleunigungsrohrs D_{gb} , wird das Projektil von zwei axial fixierten Polyamidplatten geführt. Vor jedem Test werden radiale Kerben in die Polyamidplatten geschnitten, um beim Durchdringen des Prüfmusters leichter zu brechen und somit den Einfluss auf die Aufpralltests zu minimieren.

Das Prüfmuster wird an einem Prüfmusterrahmen mit einer Auflagebreite von $w_c = 25 \text{ mm}$ befestigt, der wiederum mit Schraubzwingen am Prüfmusteraufnahme befestigt ist, wie in Abb. 4 gezeigt. Befestigungsprofile werden verwendet, um die durch die Schraubzwingen ausgeübte Kraft gleichmäßig über das PC-Prüfmuster zu verteilen. Die Prüfmuster werden gemäß ISO 23125 (2015) [1] einem zentralen Aufpralltest unterzogen. Quadratische PC-Platten mit unterschiedlicher Prüfmusterdicke d_{ts} , sowie Prüfmusterdimensionen Höhe h_{ts} und Breite w_{ts} werden getestet. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Prüfmuster finden Sie in Tabelle 4 (Anhang).

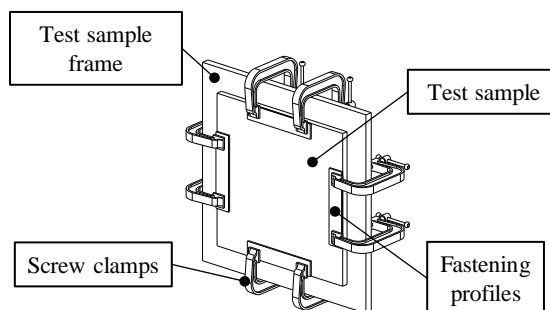


Abb. 4. Befestigung der Prüfmuster

Die verschiedenen Werte der Prüfmusterdicke d_{ts} repräsentieren in der Industrie häufig verwendete Werte, während die Prüfmusterdimensionen Höhe h_{ts} und Breite w_{ts} basierend auf ISO 23125 (2015) [1] gewählt wurden. Mit 12 verfügbaren Prüfmustern für jede Serie wurden folgende Parameter bestimmt:

- Rückhaltefähigkeit Y , d.h. die maximale initiale Projektilenergie $E_{pr,i}$, die ein Prüfmuster widersteht,
- Rückhaltegeschwindigkeit v_Y , d. h. die mit dem Rückhaltefähigkeit Y verbundene Projektilgeschwindigkeit v_{pr}
- Initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i}$,
- Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r}$, d. h. die Projektilgeschwindigkeit v_{pr} nach dem Durchdringen des Prüfmusters,

- minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} , d. h. die maximale Anfangsprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,i}$, die zu einem vollständigen Durchdringung des Prüfmusters führt und eine Restprojektilgeschwindigkeit von $v_{pr,r} = 0$ m/s ergibt.

Gemäß ISO 23125 (2015) [1] gilt ein Aufpralltest bestanden, wenn das Prüfmuster sich verformt, ohne dass ein durchgehender Riss von der Maschinenseite zur Bedienerseite sichtbar wird.

Process parameter:

Test sample material: Polycarbonate - Arla MAKROCLEAR

Projectile mass: $m_{pr} = 2.50$ kg
 Test sample height: $h_{ts} = 300.00$ mm
 Test sample width: $w_{ts} = 300.00$ mm
 Test sample thickness: $d_{ts} = 12.00$ mm

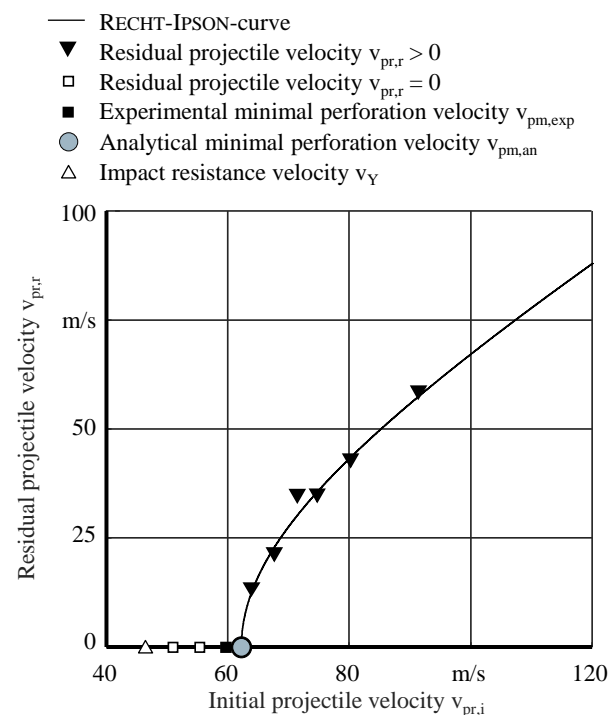


Abb. 5. Exemplarische Darstellung einer Aufpralltestserie und zugehörige RECHT-IPSON-Kurve.

Die Rückhaltefähigkeit Y wird im Allgemeinen durch die Halbierungsmethode bestimmt und die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} durch den Ansatz basierend auf einer Studie von RECHT&IPSON (1963) [4]. Die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} schließt jedoch ein Versagen des Prüfmusters gemäß ISO 23125 (2015) [1] nicht aus. Die Rückhaltegeschwindigkeit v_Y ist kleiner als die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} . Obwohl die Rückhaltefähigkeit Y von größerem praktischem Nutzen ist, bleibt die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} eine wichtige Größe, da sie als obere Grenze für die Rückhaltefähigkeit Y dient und eine grobe Schätzung der Rückhaltefähigkeit Y ermöglicht. Der Zusammenhang zwischen der minimalen Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} und der Rückhaltefähigkeit Y ist jedoch immer noch Gegenstand aktueller Forschung. Für die Halbierungsmethode wird ein begrenzender Bereich von

initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i}$ definiert, wobei die niedrigere initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i,low}$ unter und die obere initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i,up}$ größer als die Aufprallgeschwindigkeit v_Y ist. Anschließend werden zusätzliche Aufpralltests durchgeführt, um die Intervallgröße zu minimieren. Bei einem ausreichend kleinen Intervall wird die Rückhaltefähigkeit Y direkt aus den Tests abgeleitet. Obwohl das Konzept einfach ist, kann es zu einer großen Anzahl von Aufpralltests für ein ungeeignetes Intervall führen. Darüber hinaus kann die Halbierungsmethode zu unpräzisen Ergebnissen führen, da sie keine statistischen Ausreißer berücksichtigt.

RECHT & IPSON (1963) [4] bieten einen analytischen Ansatz, um die Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r}$ nach Durchdringen eines Materials als Funktion seiner initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i}$ zu beschreiben. LAMBERT & JONAS (1976) [9] erkannten, dass die RECHT-IPSON Gleichung als Spezialfall einer Wurzelfunktion eine erweiterte, generalisierte Form erfordert, indem sie die Anpassungsparameter a und p hinzufügen. Der Zusammenhang zwischen der initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i}$ und der Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r}$ ist in Gleichung (6) dargestellt.

$$v_{pr,r} = \begin{cases} 0, & 0 < v_{pr,i} < v_{pm} \\ a \cdot (v_{pr,i}^p - v_{pm}^p)^{\frac{1}{p}}, & v_{pr,i} > v_{pm} \end{cases} \quad (6)$$

Die von LAMBERT & JONAS (1976) [9] eingeführten Anpassungsparameter a und p ermöglichen die Annäherung an die in Gl. (6) definierte Funktion mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate. Im Folgenden werden Kurven, die auf Gl. (6) basieren, als RECHT IPSON Kurven bezeichnet. Abb. 5 zeigt ein Beispiel für die Ergebnisse eines Aufprallversuchs und die RECHT IPSON Kurve für PC-Prüfmuster mit einer Prüfmusterhöhe von $h_{ts} = 300$ mm, einer Prüfmusterbreite von $w_{ts} = 300$ mm und einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 12$ mm.

3.2 Numerische Methoden

Die experimentellen Untersuchungen werden von FE-Simulationen mit dem expliziten Solver der kommerziellen FE-Software ANSYS MECHANICAL 2020, CANONSBURG, USA, ergänzt. Abb. 6 zeigt das für die explizite dynamische Aufprallsimulation verwendete Modell.

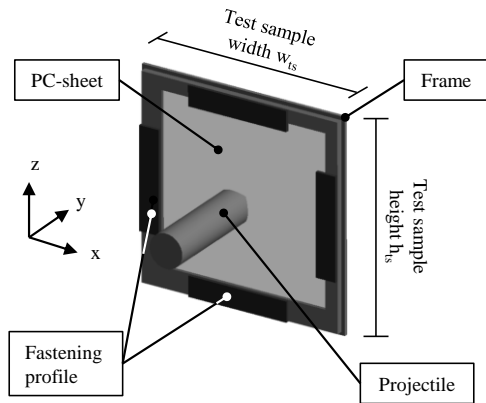


Abb. 6. Schematische Darstellung des FE-Modells.

Rahmen und Projektil werden als elastische Teile mit den Materialeigenschaften von Baustahl modelliert, d. h. mit einem Elastizitätsmodul von $E = 200 \text{ GPa}$, einer Dichte von $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$ und einer Poissonzahl $\nu = 0,3$. Für die Befestigungsprofile wird eine elastische Materialformulierung verwendet, die Hartholz mit einem E-Modul von $E = 11,3 \text{ GPa}$, einer Dichte $\rho = 607 \text{ kg/m}^3$ und einer Poissonzahl $\nu = 0,37$ modelliert.

Für die Vernetzung der PC-Platten wurden Tetraeder-Elemente verwendet, mit einem feineren Netz am Aufprallpunkt und einem größeren Netz zum Rahmen hin. Die durchschnittliche Mindestelementgröße $l_{FE,min}$ am Aufprallpunkt wurde auf $l_{FE,min} = 1,5 \text{ mm}$ festgelegt. Aufgrund der festen Mindestelementgröße $l_{FE,min}$ nimmt die Anzahl der Elemente in y-Richtung der PC-Platten mit der Prüfkörperdicke d_{ts} zu. Eine detaillierte Beschreibung der in den FE-Simulationen verwendeten Netzparameter findet sich in Tabelle 6 im Anhang. Um das Verhalten der PC-Platten korrekt zu beschreiben, wird der Ansatz von STECCONI ET AL. [8] angewandt, der ein hydrodynamisches Materialmodell auf der Grundlage der MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung in Verbindung mit einer multilinearen Verfestigungskurve verwendet. Dieses Materialmodell ermöglicht die Berechnung des Drucks wie in STECCONI ET AL. [8] dargestellt, und basiert auf einer Reihe von Parametern, die die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Stoßwelle U beschreiben.

Die Parameter für die MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung sind der Materialdatenbank von ANSYS 2020 entnommen. Die Parameter der Verfestigungskurve stammen aus einer Studie von WALLEY ET AL. [10]. Die nach außen weisenden Flächen des Rahmens und der Leisten sind sowohl translatorisch als auch rotatorisch durch Randbedingungen fixiert, während auf das Projektil eine initiale Geschwindigkeit $v_{pr,i}$ in y-Richtung angewendet wird. Ähnlich wie im Experiment wird in den Simulationen die RECHT IPSON-Methode verwendet, um die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} der PC-Platten abzuleiten. Dazu werden Simulationen mit unterschiedlichen initiale Projektilgeschwindigkeit $v_{pr,i}$ auf das Projektil durchgeführt. Die experimentellen Ergebnisse werden zur Validierung des FE-Modells verwendet.

4. Ergebnisse und Diskussion

Abb. 7 zeigt beispielhaft die Versuchsergebnisse mit einer Prüfmusterbreite von $w_{ts} = 500 \text{ mm}$, einer Höhe von $h_{ts} = 500 \text{ mm}$ und einer Dicke von $d_{ts} = 12 \text{ mm}$. Die entsprechende RECHT IPSON Kurve wurde aus Versuchsergebnissen mit einer Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r} > 0 \text{ m/s}$ berechnet. Auf der x-Achse sind Aufprallversuche zu finden, die zu einer Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r} = 0 \text{ m/s}$ führen. In diesen Fällen wurde das Prüfmuster nur teilweise durchdrungen oder plastisch verformt.

Process parameter:

Test sample material:	Polycarbonate - Arla MAKROCLEAR
Projectile mass:	$m_{pr} = 2.50 \text{ kg}$
Test sample height:	$h_{ts} = 500.00 \text{ mm}$
Test sample width:	$w_{ts} = 500.00 \text{ mm}$
Test sample thickness:	$d_{ts} = 12.00 \text{ mm}$

- RECHT-IPSON-curve
- ▼ Residual projectile velocity $v_{pr,r} > 0$
- Residual projectile velocity $v_{pr,r} = 0$
- Experimental minimal perforation velocity $v_{pm,exp}$
- Analytical minimal perforation velocity $v_{pm,an}$
- △ Impact resistance velocity v_Y

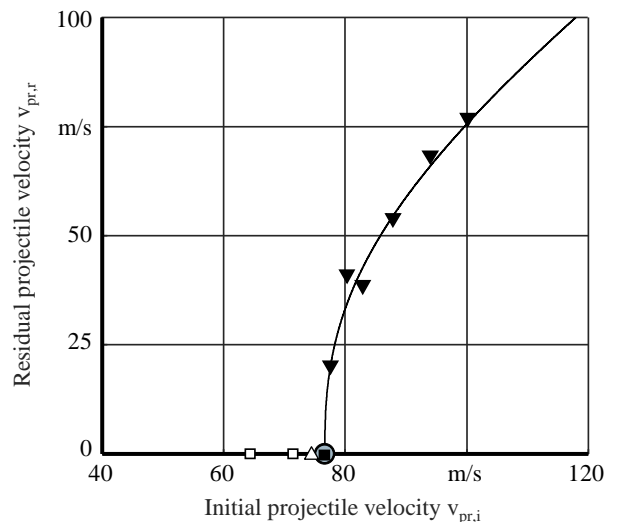


Abb. 7. Experimentelle Ergebnisse der Aufprallversuche und abgeleitete RECHT IPSON-Kurve für die Prüfmusterabmessungen $b_{ts} = h_{ts} = 500 \text{ mm}$.

Der Schnittpunkt der RECHT IPSON Kurve mit der x-Achse stellt die analytisch bestimmte minimale Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,an}$ dar. Die verwendeten Anpassungsparameter für die RECHT IPSON Kurve und die entsprechenden analytischen minimalen Perforationsgeschwindigkeiten $v_{pm,an}$ finden sich in Tabelle 5 im Anhang.

Abb. 8 und Tabelle 4 im Anhang zeigen die experimentell abgeleitete Rückhaltegeschwindigkeit v_Y in Abhängigkeit von der Prüfmusterdicke d_{ts} für Prüfmuster mit einer Breite von $w_{ts} = 300 \text{ mm}$ und einer Höhe von $h_{ts} = 300 \text{ mm}$ und Prüfmuster mit einer Breite von $w_{ts} = 500 \text{ mm}$ und einer Höhe von $h_{ts} = 500 \text{ mm}$. Die Kurven in Abb. 8 zeigen deutlich den signifikanten Einfluss der Breite w_{ts} und der Höhe h_{ts} auf die

Rückhaltegeschwindigkeit v_Y der Prüfmuster. Bei gleicher Dicke d_{ts} unterscheidet sich die Rückhaltegeschwindigkeit v_Y bei einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 8$ mm um 34 % und steigt bei einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 18$ mm auf bis zu 53 % an. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied ist das Verformungsverhalten der PC-Platten. Kleinere PC-Platten mit einer Breite von $w_{ts} = 300$ mm und einer Höhe von $h_{ts} = 300$ mm zeigen ein lokal begrenztes Verformungsverhalten als PC-Platten mit einer Breite von $w_{ts} = 500$ mm und einer Höhe von $h_{ts} = 500$ mm. Eine stärker lokal begrenzte Verformung führt zu einer geringeren globalen Ausbeulung des Prüfmusters und zu einer Energiekonzentration um den Aufprallpunkt herum, was zum Versagen des Prüfmusters führt und allgemein niedrigere Rückhaltegeschwindigkeit v_Y zur Folge hat als bei Prüfmustern mit einer Breite von $w_{ts} = 500$ mm und einer Höhe von $h_{ts} = 500$ mm. Außerdem ist ein allgemeiner Trend zu höheren Rückhaltegeschwindigkeit v_Y zu beobachten, wenn die Prüfmusterdicke d_{ts} vergrößert wird.

Process parameter:

Test sample material: Polycarbonate - Arla MAKROCLEAR

Projectile mass: $m_{pr} = 2.50$ kg

- Proximity function for $h_{ts} \times w_{ts} = 500$ mm x 500 mm
- Proximity function for $h_{ts} \times w_{ts} = 300$ mm x 300 mm
- △ Experimental data for $h_{ts} \times w_{ts} = 500$ mm x 500 mm
- △ Experimental data for $h_{ts} \times w_{ts} = 300$ mm x 300 mm

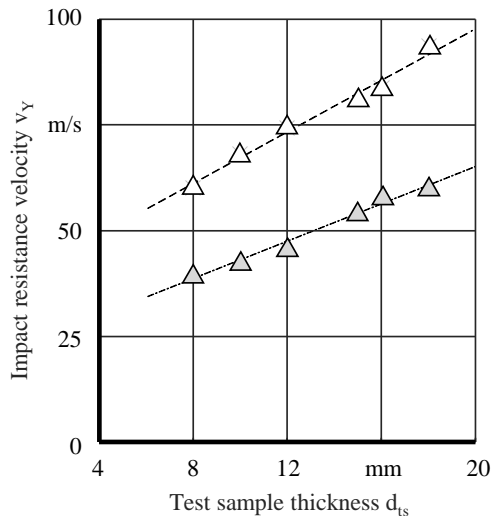


Abb. 8. Aufprallgeschwindigkeit v_Y als Funktion der Prüfkörperdicke d_{ts} für experimentelle Ergebnisse.

Im Gegensatz zu WITTNER [5] konnte keine ausgeprägte Stagnation oder gar Abnahme der Rückhaltefähigkeit Y bzw. der zugehörigen Rückhaltegeschwindigkeit v_Y festgestellt werden. Für beide betrachteten Prüfmusterabmessungen ist ein kontinuierlicher linearer Anstieg der Rückhaltegeschwindigkeit v_Y mit zunehmender Probekörperdicke d_{ts} zu beobachten, was durch die Näherungsfunktion angezeigt wird. Die experimentellen Daten wurden mit Hilfe eines linearen Ansatzes approximiert, wobei die entsprechende

Residuenquadratsumme als Maß für die Genauigkeit des Ansatzes in Tabelle 1 dargestellt ist.

Tabelle 1. Fehler der Näherungsfunktion für die Aufprallgeschwindigkeit v_Y .

Prüfmusterabmessung $h_{ts} \times w_{ts}$ (mm x mm)	300 x 300	500 x 500
Residuenquadratsumme (m^2/s^2)	2,71	4,07

Es ist jedoch zu beachten, dass WITTNER [5] Aufprallversuche nach ISO 16090-1 [6] durchführte und somit ein kleineres Projektil mit einer Masse von $m_{pr} = 0,1$ kg verwendete. Die kleinere Projektilmasse m_{pr} bewirkt eine andere mechanische Antwort der PC-Platte auf den Aufprall und eine andere Energieverteilung und damit das Auftreten eines ausgeprägten Kink-Effekts. Es wird daher vermutet, dass der Kink-Effekt bei kleineren Prüfmusterdicken von $d_{ts} < 8$ mm oder größeren Prüfmusterabmessungen bei Aufprallversuchen nach ISO 23125 [1] mit einer Projektilmasse von $m_{pr} = 2,5$ kg auftritt.

Abb. 9 und Abb. 10 zeigen einen Vergleich der analytischen minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,an}$, die mit der Methode der kleinsten Quadrate unter Verwendung von Gl. (6) berechnet wurde, die minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,exp}$, die aus experimentellen Aufprallversuchen gewonnen wurde, und die numerischen minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,num}$, die durch FE-Simulationen ermittelt wurde. Tabelle 7 im Anhang enthält die zugehörigen Daten. Experimentelle und analytische Daten zeigen für beide Fälle eine gute Übereinstimmung, was die Genauigkeit des analytischen Ansatzes bestätigt, wobei eine bessere Übereinstimmung für eine Prüfmusterabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm zu erkennen ist. Für Prüfmusterabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 300$ mm nimmt die Abweichung zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen mit zunehmender Prüfmusterdicke d_{ts} tendenziell ab, beginnend mit einer Abweichung von 32 % für eine Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 8$ mm und abnehmend auf 7 % für eine Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 16$ mm.

Process parameter:

Test sample material: Polycarbonate - Arla MAKROCLEAR

Projectile mass: $m_{pr} = 2.50 \text{ kg}$
 Test sample height: $h_{ts} = 300.00 \text{ mm}$
 Test sample width: $w_{ts} = 300.00 \text{ mm}$

- Proximity function for $v_{pm,exp}$
- Proximity function for $v_{pm,an}$
- Proximity function for $v_{pm,num}$
- Experimental minimal perforation velocity $v_{pm,exp}$
- Analytical minimal perforation velocity $v_{pm,an}$
- Numerical minimal perforation velocity $v_{pm,num}$

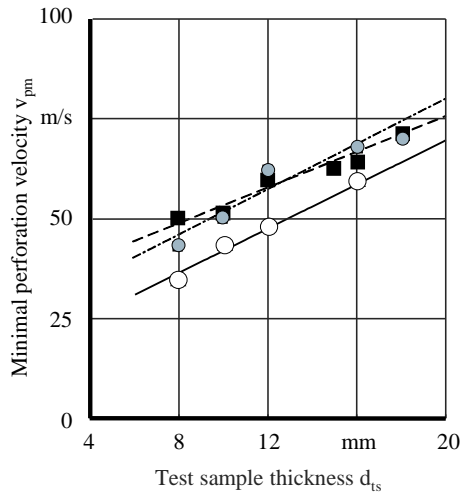


Abb. 9. Vergleich der Ergebnisse für die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} , Probekörperabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 300 \text{ mm}$.

Eine ähnliche Abweichung zwischen Experiment und Simulation ist für Prüfmusterabmessungen $w_{ts} = h_{ts} = 500 \text{ mm}$ zu beobachten, wobei die größte Abweichung von 17 % bei einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 8 \text{ mm}$ auftritt und bei einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 18 \text{ mm}$ stetig auf 6 % abnimmt. Die Diskrepanz zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen deutet auf Defizite des für die FE-Simulationen verwendeten Materialmodells hin.

Process parameter:

Test sample material: Polycarbonate - Arla MAKROCLEAR

Projectile mass: $m_{pr} = 2.50 \text{ kg}$
 Test sample height: $h_{ts} = 500.00 \text{ mm}$
 Test sample width: $w_{ts} = 500.00 \text{ mm}$

- Proximity function for $v_{pm,exp}$
- Proximity function for $v_{pm,an}$
- Proximity function for $v_{pm,num}$
- Experimental minimal perforation velocity $v_{pm,exp}$
- Analytical minimal perforation velocity $v_{pm,an}$
- Numerical minimal perforation velocity $v_{pm,num}$

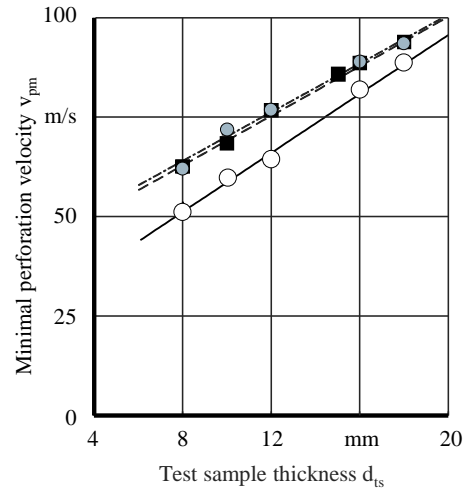


Abb. 10. Vergleich der Ergebnisse für die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} , Probekörperabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 500 \text{ mm}$.

Dennoch ermöglichen die FE-Simulationen eine Untersuchung des Einflusses des Wölbungsradius r_c , indem die Mechanismen, die den Kink-Effekt verursachen, mit den Abmessungen des Prüfmusters und einem randnahen Aufprall in der Nähe des Rahmens in Beziehung gesetzt werden. In erster Näherung können Aufprallversuche für eine Prüfmusterbreite von $w_{ts} = 300 \text{ mm}$ und eine Höhe von $h_{ts} = 300 \text{ mm}$ als randnaher Aufprall für eine Prüfmusterbreite von $w_{ts} = 500 \text{ mm}$ und eine Höhe von $h_{ts} = 500 \text{ mm}$ betrachtet werden, wie in Abb. 11 dargestellt.

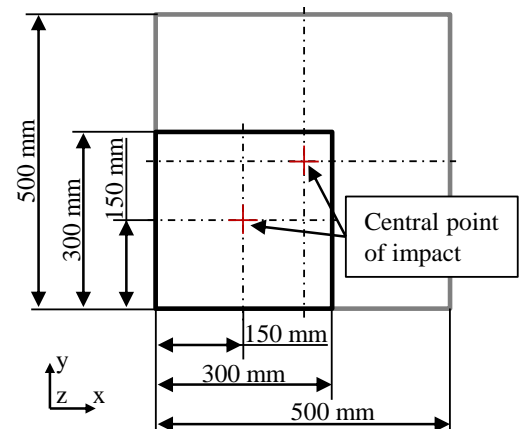


Abb. 11. Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen verschiedenen Prüfmusterabmessungen und einem randnahem Aufprall.

Für die Untersuchung eines randnahen Aufpralls werden drei Fälle betrachtet, die in Abb. 12 dargestellt sind:

- Fall 1: Zentraler Aufprall, Prüfmusterabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 300$ mm, Prüfmusterdicke $d_{ts} = 16$ mm,
- Fall 2: Zentraler Aufprall, Prüfmusterabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm, Prüfmusterdicke $d_{ts} = 16$ mm,
- Fall 3: Randnaher Aufprall mit einem Versatz von $dist_{off} = 100$ mm in z-Richtung und x-Richtung, Prüfmusterabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm, Prüfmusterdicke $d_{ts} = 16$ mm.

In allen drei Fällen wird das Prüfmuster der gleichen Aufprallgeschwindigkeit $v_{pr,i} = 80$ m/s ausgesetzt. Abb. 12 und Tabelle 2 zeigen die maximale Verformung y_{max} in y-Richtung und den Wölbungsradius r_c des Prüfmusters infolge des Aufpralls des Projektils für die verschiedenen Fälle. Für jede Simulation ist ein deutlicher Unterschied im Wölbungsradius r_c zu beobachten, wobei Fall 2 den größten Wölbungsradius r_c aufweist.

Die Ergebnisse der Simulationen stimmen mit den Vorhersagen von WITTNER [5] überein, wonach nach Gleichung (1) ein größerer Wölbungsradius r_c zu einem größeren Anteil an elastischer Verformung führt, was eine größere maximale Verformung y_{max} zur Folge hat.

Tabelle 2. Vergleich der maximalen Verformung y und Wölbungsradius r_c .

Fall	Prüfmuster- abmessung $w_{ts} \times h_{ts}$	Rest- projektil- geschwin- digkeit $v_{pr,r}$	Maximale Verformung y_{max}	Wölbungs- radius r_c
	(mm x mm)	(m/s)	(mm)	(J)
1	300 x 300	44	48	105
2	500 x 500	0	70	195
3	500 x 500	39	56	160

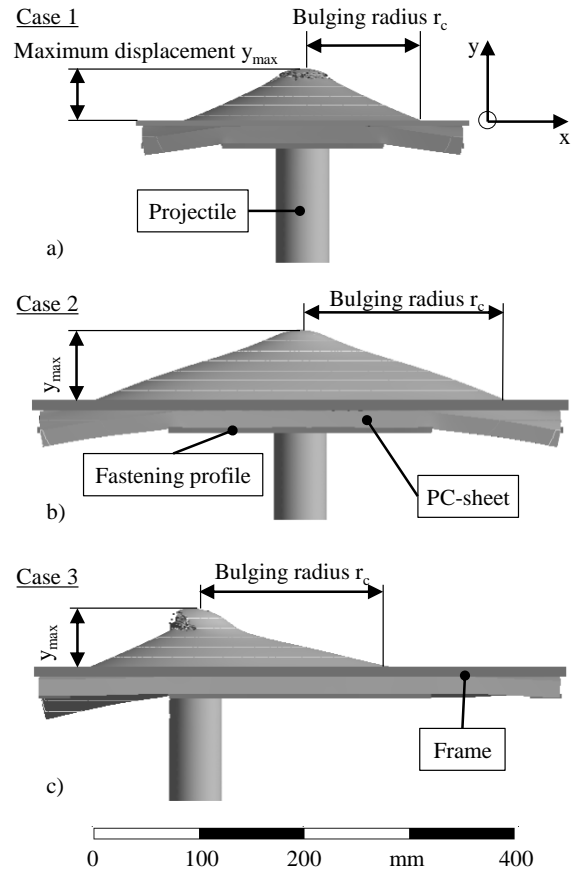


Abb. 12. Vergleich der verschiedenen Aufprallversuche; a) Zentraler Aufprall, Prüfmusterabmessungen $w_{ts} = h_{ts} = 300$ mm; b) Zentraler Aufprall, Prüfmusterabmessungen $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm; c) Prüfmusterabmessungen $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm;

Obwohl in Fall 3 die identische Prüfmusterabmessungen $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm der identischen Aufprallbelastung wie in Fall 2 ausgesetzt wurde, zeigt sich eine geringere elastische Verformung und damit ein größerer Scheranteil, der zu Materialversagen und einer Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r} > 0$ m/s führt. Ein ähnliches Verhalten kann für Fall 1 beobachtet werden, wo aufgrund der kleineren Prüfmusterabmessungen von $w_{ts} = h_{ts} = 300$ mm ein kleinerer Wölbungsradius r_c zu weniger elastischer Verformung und einem größeren Anteil an Scherung und Materialversagen führt. Da in Fall 1 der Wölbungsradius r_c kleiner ist als der Wölbungsradius r_c von Fall 3, tritt das Materialversagen zu einem früheren Zeitpunkt auf, was zu einer größeren Restprojektilgeschwindigkeit $v_{pr,r}$ führt als in Fall 3.

Die Möglichkeit, einen randnahen Aufprall für Prüfmuster mit einer Breite von $w_{ts} = 500$ mm und einer Höhe von $h_{ts} = 500$ mm mit einem Aufprall der Breite von $w_{ts} = 300$ mm und der Höhe von $h_{ts} = 300$ mm mit einem zentralen Einschlagpunkt zu verbinden, erlaubt eine kritische Diskussion der in ISO 23125 [1] angegebenen zulässigen Dicke d von trennenden Schutzvorrichtungen. Tabelle 3 zeigt einen Vergleich der nach ISO 23125 [1] zulässigen maximalen anfänglichen Projektilenergie $E_{pr,i}$ für verschiedene Dicken d . Weiterhin sind die Versuchsergebnisse für die Prüfmusterabmessungen Breite $w_{ts} = 300$ mm und Höhe $h_{ts} = 300$ mm dargestellt.

Die Rückhaltefähigkeit Y wurde aus den Ergebnissen der Aufprallgeschwindigkeit v_Y in Tabelle 4 abgeleitet, wobei die Projektilmasse von $m_{pr} = 2,5$ kg verwendet wurde.

Tabelle 3. Vergleich der Rückhaltefähigkeit Y nach ISO 23125 [1] und den experimentellen Ergebnissen für die Prüfmusterabmessungen Breite $w_{ts} = 300$ mm und Höhe $h_{ts} = 300$ mm.

Prüfmuster- dicke d_{ts} (mm)	Rückhaltefähigkeit Y gemäß ISO 23125 [1]. (J)	Rückhaltefähigkeit Y für die Prüfmusterabmes- sungen Breite $w_{ts} = 300$ mm, Höhe $h_{ts} = 300$ mm (J)
8	3.124	1.982
10	4.960	2.021
12	4.960	2.640
16	4.960*	4.224
18	-	4.543
19	8.000	-

Die mit einem Sternchen gekennzeichneten Werte für eine Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 16$ mm wurden mit einem Verbund aus zwei PC-Platten mit einer Prüfmusterdicke von $d_{ts} = 8$ mm ermittelt, was die Ergebnisse beeinflussen kann und daher keinen direkten Vergleich zulässt. Die Rückhaltefähigkeit Y für Prüfmuster mit einer Breite von $w_{ts} = 300$ mm und einer Höhe von $h_{ts} = 300$ mm liegt jedoch unter den in ISO 23125 [1] definierten Werten für jede sichere Dicke d . Obwohl es sich nur um eine Abschätzung der Rückhaltefähigkeit Y von PC-Platten mit einer Breite von $w_{ts} = 500$ mm und einer Höhe von $h_{ts} = 500$ mm für einen randnahen Aufprall handelt, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass ein zentraler Aufprallversuch die Rückhaltefähigkeit Y für PC-Platten deutlich überschätzen könnte. Das durch diese Ergebnisse aufgezeigte potenzielle Risiko exzentrischer Stöße wird in den heutigen Sicherheitsnormen völlig vernachlässigt.

5. Fazit & Ausblick

In dieser Untersuchung wurden die Rückhaltefähigkeit Y und die minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} durch experimentelle Aufprallversuche mit einem Projektil der Masse von $m_{pr} = 2,5$ kg ermittelt. Für die Auswertung der Versuchsreihen wurde der Ansatz von LAMBERT & JONAS (1976) [9] angewendet, der die Methode von RECHT & IPSON (1963) [4] verwendet. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Bestimmung des Einflusses der Prüfmusterdicke d_{ts} auf die Rückhaltefähigkeit Y . Experimentelle Aufprallversuche an PC-Platten wurden mit Prüfmusterabmessungen $w_{ts} = h_{ts} = 300$ mm, $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm und Prüfmusterdicken von $8 \text{ mm} \leq d_{ts} \leq 18$ mm durchgeführt. Die Ergebnisse der analytisch abgeleiteten minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,an}$ stehen in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

Ein linearer Anstieg der Rückhaltegeschwindigkeit v_Y mit zunehmender Prüfmusterdicke d_{ts} wurde für die Prüfmusterabmessungen $w_{ts} = h_{ts} = 300$ mm bzw. $w_{ts} = h_{ts} = 500$ mm festgestellt. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass für die untersuchten Parameter kein

Kink-Effekt vorhanden ist. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Kink-Effekt in einem Bereich der Prüfmusterdicke von $d_{ts} < 8$ mm auftrat. Somit war während der Aufprallversuche für den untersuchten Parameterbereich keine plastische Verformungsenergie E_p , sondern hauptsächlich Scherenergie E_s vorhanden. Bei Projektilen mit einer Masse von $m_{pr} = 0,625$ kg und einer kleineren Auftrefffläche oder größeren Probekörperabmessungen wie bspw. Mit einer Breite von $w_{ts} = 800$ mm und Höhe von $h_{ts} = 800$ mm könnte ein Kink-Effekt im Bereich der untersuchten Prüfmusterdicke d_{ts} aufgrund einer möglicherweise höheren plastischen Verformungsenergie E_p im untersuchten Parameterbereich auftreten.

Darüber hinaus wurde ein deutlicher Unterschied in der Rückhaltefähigkeit Y für die beiden untersuchten Prüfmusterabmessungen w_{ts} und h_{ts} festgestellt. Die Werte für Prüfmuster mit einer Breite $w_{ts} = 300$ mm und einer Höhe $h_{ts} = 300$ mm waren für alle Prüfmusterdicken d_{ts} deutlich niedriger als die Werte von Prüfmuster mit einer Breite $w_{ts} = 500$ mm und einer Höhe $h_{ts} = 500$ mm. Dies zeigt, dass eine Verkleinerung der Verformungsfläche am Prüfmustern, wie bei einem randnahen Aufprall, zu einer deutlichen Verringerung der Rückhaltefähigkeit Y führt.

Das in dieser Arbeit verwendete FE-Modell war nicht in der Lage, die experimentell ermittelte minimale Perforationsgeschwindigkeit v_{pm} adäquat darzustellen. Zukünftige Arbeiten zielen darauf ab, die Diskrepanzen zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen durch eine Verbesserung des FE-Materialmodells zu verringern und anschließend Untersuchungen für weitere Probekörperdimensionen wie z. B. Probekörper mit einer Breite von $w_{ts} = 800$ mm und einer Höhe von $h_{ts} = 800$ mm durchzuführen.

Die Ergebnisse können für die Konstruktion von PC-Sichtfenstern und für die Vorhersage ihres Verhaltens im Falle eines Projektilaufpralls verwendet werden, um die Sicherheit der Maschinenbediener zu gewährleisten. Außerdem geben die Ergebnisse Aufschluss über das Materialverhalten bei einem randnahem Aufprall.

Quellenangaben

1. DIN EN ISO 23125, Machine tools safety -turning machines, (2015).
2. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Schutzscheiben an Werkzeugmaschinen der Metallverarbeitung, DUGV-Information FB HM-040, (2018).
3. R.S.J. Corran, P.J. Shadbolt, C. Ruiz, Impact loading of plates - An experimental investigation, International journal of impact engineering 1, (1983).
4. R.F. Recht, T.W. Ipson, Ballistic perforation dynamics, Journal of applied mechanics, 384 – 390, (1963).
5. Wittner, M.: Leichtbau im Maschinenschutz - Umsetzungsstrategien und Konzepte. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, (2008).
6. DIN EN ISO 16090-1, Machine tools safety - machining centres, milling machines, transfer machines
7. M. Roth, Hybrid structures under ballistic loading, Springer Vieweg, (2017).
8. A. Stecconi, L. Landi, Finite element analysis for impact tests on polycarbonate safety guards: Comparison with experimental data and statistical dispersion of ballistic Limit,

Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, (2020).

9. J.P. Lambert, G.H. Jonas, Towards standardization in terminal ballistics testing, (1976).
10. S.M- Walley, J.E. Field, Strain Rate Sensitivity of Polymers in Compression from Low to High Rates, Dymat Journal, 221 – 227, (1994).

Anhang

Tabelle 4. Übersicht der Versuchsreihen und Ergebnisse für die Rückhaltefähigkeit Y .

Versuchsreihe	Prüfmusterdicke d_{ts} (mm)	Prüfmusterabmessungen $w_{ts} \times h_{ts}$ (mm x mm)	Rückhaltegeschwindigkeit v_Y (m/s)
1	8	300 x 300	39,82
2	10	300 x 300	42,59
3	12	300 x 300	45,96
4	15	300 x 300	54,30
5	16	300 x 300	58,13
6	18	300 x 300	60,29
7	8	500 x 500	60,39
8	10	500 x 500	68,42
9	12	500 x 500	74,58
10	15	500 x 500	80,13
11	16	500 x 500	83,98
12	18	500 x 500	93,89

Tabelle 5. Parameter der RECHT IPSON-Kurven und Ergebnisse der analytischen minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,an}$.

Versuchsreihe	Parameter a (-)	Parameter p (-)	Analytische minimale Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,an}$ (m/s)	Residuenquadratsumme (m ² /s ²)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

Tabelle 6. Netzparameter des FE-Modells.

Versuchsreihe	Anz. der Elemente (-)	Anz. der Knoten (-)	Durchschnittl. Min. Elementgröße $l_{FE,min}$ (mm)
1	345.586	71.766	1,5
2	419.735	83.981	1,5
3	503.226	98.177	1,5
4	-	-	-
5	647.978	122.805	1,5
6	732.892	137.079	1,5
7	400.264	84.075	1,5
8	491.829	99.395	1,5
9	577.180	113.778	1,5
10	-	-	-
11	736.536	140.307	1,5
12	815.465	153.457	1,5

Tabelle 7. Vergleich der experimentellen minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,exp}$, der analytischen minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,an}$ und der numerischen minimalen Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,num}$.

Versuchsreihe	Experimentelle minimale Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,exp}$ (m/s)	Analytische minimale Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,ana}$ (m/s)	Numerische minimale Perforationsgeschwindigkeit $v_{pm,num}$ (m/s)
1	50,66	43,74	33,51
2	51,28	50,55	39,59
3	60,08	62,86	46,11
4	62,47	71,96	-
5	64,48	67,88	55,69
6	74,46	70,21	-
7	62,61	62,19	51,96
8	68,42	71,62	59,86
9	76,75	76,62	64,93
10	85,52	87,78	-
11	88,63	89,13	81,78
12	93,89	93,55	88,79