

Festigkeit von Werkstoffen bei Aufprallbeanspruchungen

Einfluss von Projektilwerkstoff, -festigkeit und -form

Detlef Mewes, Olaf Mewes,
Sankt Augustin, und
Peter Herbst, Hannover

Bauteile können stoßartigen Beanspruchungen, z. B. durch den Aufprall von anderen Bauelementen und Bruchstücken, ausgesetzt sein. Ob die Bauteile solchen Aufprallbeanspruchungen standhalten können, ohne dass Schäden auftreten, die die Funktionsfähigkeit und Sicherheit beeinträchtigen, hängt einerseits von den mechanischen Eigenschaften der hierfür verwendeten Werkstoffe ab, andererseits aber auch von der Festigkeit und Geometrie der aufprallenden Teile. Beschussversuche mit zylindrischen Projektilen aus gebräuchlichen Schleifkörperkeramiken auf Stahlblech und Polycarbonat zeigen, dass die Aufprallfestigkeit von Werkstoffen mit steigender Scharfkantigkeit, abnehmendem Durchmesser und zunehmender Festigkeit der aufprallenden Teile abnimmt.

Während ihrer Nutzungsdauer sind Bauteile mitunter stoßartigen Beanspruchungen durch andere Bauteile oder durch Bruchstücke ausgesetzt. Typische Beispiele sind Container für den Transport und die Lagerung von Gefahrgut [1] und trennende Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen [2, 3].

Die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen gegen aufprallende Teile wird, insbesondere wenn es sich um zivile Anwendungen handelt, zumeist anhand von Beschussversuchen mit starren Stahlprojektilen ermittelt. Unter diesen Bedingungen hängt die Rückhaltefähigkeit der beschossenen Materialien erheblich von deren mechanischen Eigenschaften, wie der Zugfestigkeit und Bruchdehnung, aber auch von der Form und den Abmessungen der benutzten Projektilen ab [4–7].

Nicht bekannt ist hingegen, wie sich die Verwendung von Keramikprojektilen anstelle von Stahlprojektilen auf die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen auswirkt. Interessant sind solche Untersuchungen z. B. im Hinblick auf die Dimensionierung von trennenden Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen, die zurzeit noch anhand von Waddickentabellen [8] erfolgt, die größtenteils auf Er-

fahrungen und Einschätzungen, nicht aber auf systematischen Untersuchungen beruhen. Während des Schleifprozesses sind die Schleifscheiben komplexen Beanspruchungen durch Spankräfte, Schnittkräfte und Fliehkräfte ausgesetzt. Bei unzureichender Festigkeit oder Überbeanspruchungen können die rotierenden Werkzeuge brechen und so mitunter erhebliche Personen- und Sachschäden in der Maschinenumgebung verursachen. Bruchgefährdet sind vor allem Schleifscheiben mit Kunstharz- oder Keramikbindung. Aus diesem Grunde wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen mit

Projektilen aus handelsüblichen Schleifkörperkeramiken durchgeführt.

Prüfverfahren und untersuchte Werkstoffe

Um den Einfluss der Projektilbeschaffenheit auf die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen zu bestimmen, wurde eine pneumatisch betriebene Beschussanlage (Bild 1) [9] verwendet. Nach dem Einsetzen des Projektils in das Beschussrohr befüllt man den durch eine Kunststoffmembran verschlossenen Druckbehälter mit Luft, bis der für die gewünschte Projektilgeschwindigkeit

Bezeichnung nach DIN ISO 525	Härtegrad	Druckfestigkeit [N/mm ²]
21 A80 H 8 V 4001	H	70
21 A80 JOT 8 V 4001	JOT	80
21 A80 N 8 V 4001	N	142
21 A80 P 8 V 4001	P	165

Tabelle 1. Werkstoffe der Keramikprojektilen

Table 1. Materials of the ceramic projectiles

Werkstoff	Dicke [mm]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Bruchdehnung
DC 01 (St 12.03)	3	405	28
PC	8	68	80

Tabelle 2. Mechanische Eigenschaften der beschossenen Werkstoffe

Table 2. Mechanical properties of the cannonaded materials

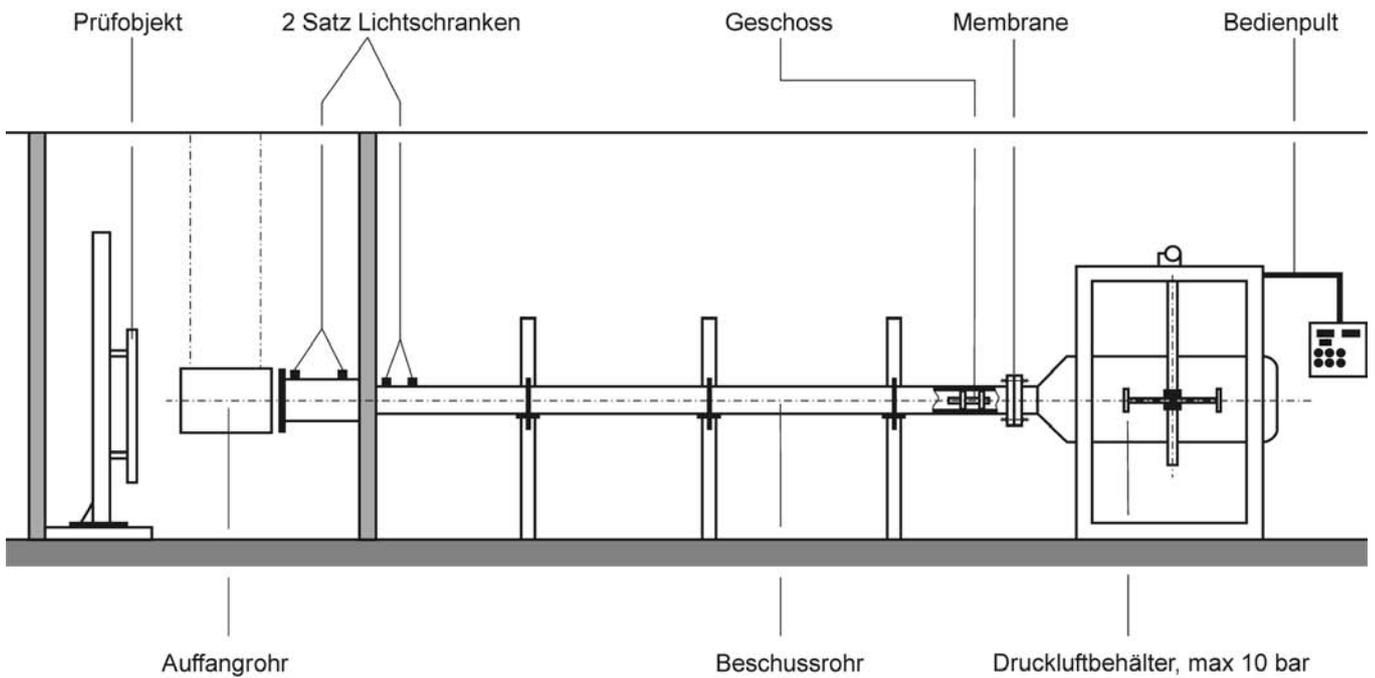


Bild 1. Besusseinrichtung

Figure 1. Impact test setup

erforderliche Arbeitsdruck erreicht ist. Hiernach wird die Membran durchstoßen. Dabei beschleunigt die sich entspannende Druckluft das Projektil in dem Beschussrohr. Die Projektilgeschwindigkeit lässt sich mittels zweier am Ende des Beschussrohres angeordneter Lichtschrankenpaare messen.

Die Beschussversuche erfolgten mit zylindrischen Projektilen aus handelsüblicher Schleifkörperkeramik nach DIN ISO 525 [10] (Tabelle 1). Der Här-

tegrad der Projektile variierte zwischen H und P entsprechend Druckfestigkeiten von 70 bis 165 MPa. Der Durchmesser dieser Projektile betrug 30 mm, 40 mm oder 50 mm bei einer Masse von jeweils 1250 g. Die Simulation verschiedener Aufprallsituationen erfolgte durch Variation der Projektilstirnfläche (Bild 2).

Als Versuchswerkstoffe dienten Bleche aus DC 01 (St 12.03) und Sichtscheiben aus Polycarbonat (Tabelle 2).

Dies sind Beispiele für Werkstoffe, die üblicherweise für trennende Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen verbaut werden. Prüfmuster aus diesen Werkstoffen mit den Abmessungen 500 mm × 500 mm wurden an allen Seiten mittels Spannpratzen so auf einen steifen Stahlrahmen gespannt, dass die Überdeckung zwischen Rahmen und Prüfmuster auf allen Seiten 25 mm betrug. Der Beschuss erfolgte jeweils senkrecht auf die Prüfmustermitte.

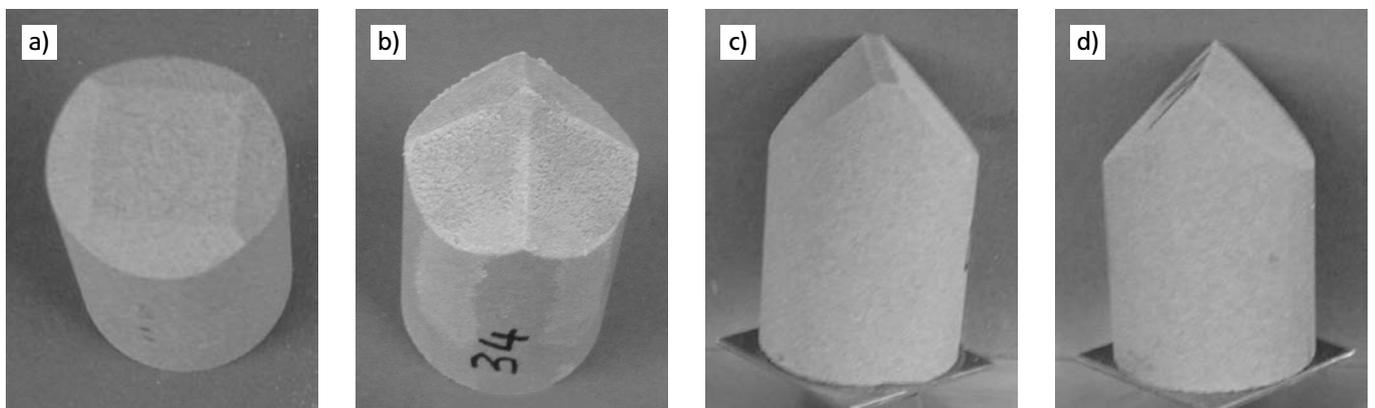


Bild 2. Keramikprojekte a) Stirnfläche: quadratisch (entsprechend DIN EN 12415 [11]), b) Stirnfläche: 90°-Pyramide mit 4 × 4 mm² Planfläche, c) Stirnfläche: 90°-Keil mit 4 mm breiter Planfläche, d) Stirnfläche: 90°-Keil

Figure 2. Ceramic projectiles a) front face: square (according to DIN EN 12415 [11]), b) front face: 90° pyramid with 4 × 4 mm² plane face, c) front face: 90° wedge with 4 mm wide plane face, d) front face: 90° wedge

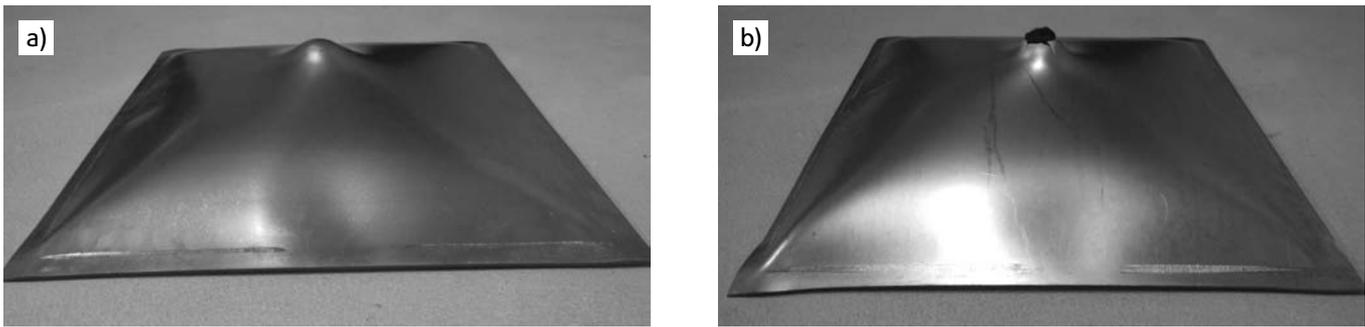


Bild 3. Beulung (a) und Durchschuss (b) bei Stahlblech

Figure 3. Bulging (a) and full penetration (b) at steel plate

Das Maß zur Beurteilung der Rückhaltefähigkeit war die kritische Geschossenergie. Das ist diejenige Energie, die gerade noch zu einer plastischen Verformung (Beulung) der Prüfmuster führt, ohne dass hiermit bereits ein Durchriss oder Durchschuss verbunden ist (Bild 3). Um die Rückhaltefähigkeit möglichst genau angeben zu können, wurde die Geschossenergie stufenweise durch Steigerung der Geschwindigkeit erhöht. Für jeden Beschussversuch wurde ein anderes Prüfmuster verwendet, d. h., alle Prüfmuster wurden nur einmal beschossen.

Variation der Projektilfestigkeit

Mit zunehmender Projektilfestigkeit nahm die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech wie auch Polycarbonat ab. Bild 4

zeigt hierzu Ergebnisse von Beschussversuchen mit spitzen keramischen Projektilen. Besonders ausgeprägt war der Festigkeitseinfluss bei Stahlblech. Eine Erhöhung der Projektilfestigkeit von 70 MPa auf 165 MPa hatte hier eine Reduzierung der Rückhaltefähigkeit von nahezu 12 000 J auf nur noch etwa 1400 J zur Folge. Während Projektile mit geringerer Druckfestigkeit beim Aufprall eine deutliche Spitzenabrundung erfuhren (Bild 5), behielten die Projektile aus den beiden festeren Schleifkörperwerkstoffen ihre Form beim Aufprall weitgehend bei und hatten so eine höhere Beanspruchung des Stahlbleches zur Folge.

Die Rückhaltefähigkeit von Polycarbonat hing in deutlich geringerem Maße von der Projektilfestigkeit ab. Eine geringfügige Abrundung der Projektilstirnfläche war hier nur bei dem Projek-

til festzustellen, dessen Festigkeit lediglich 70 MPa betrug.

Variation der Projektilstirnfläche

Inwieweit die Projektilstirnfläche die Rückhaltefähigkeit beeinflusst, wurde mit den verschiedenen Projektilen nach Bild 2 näher untersucht. Diese Projektile besaßen Festigkeiten von 80 MPa (Härtegrad: JOT) bzw. 142 MPa (Härtegrad: N). Der Durchmesser dieser Projektile betrug jeweils 40 mm, die Masse 1 250 g.

Die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech (Bild 6) war demnach nahezu unabhängig von der Form der Stirnfläche, wenn die Versuche mit den relativ weichen Keramikprojektile (Härtegrad: JOT, Festigkeit 80 MPa) durchgeführt wurden. Unter diesen Bedingungen ergaben

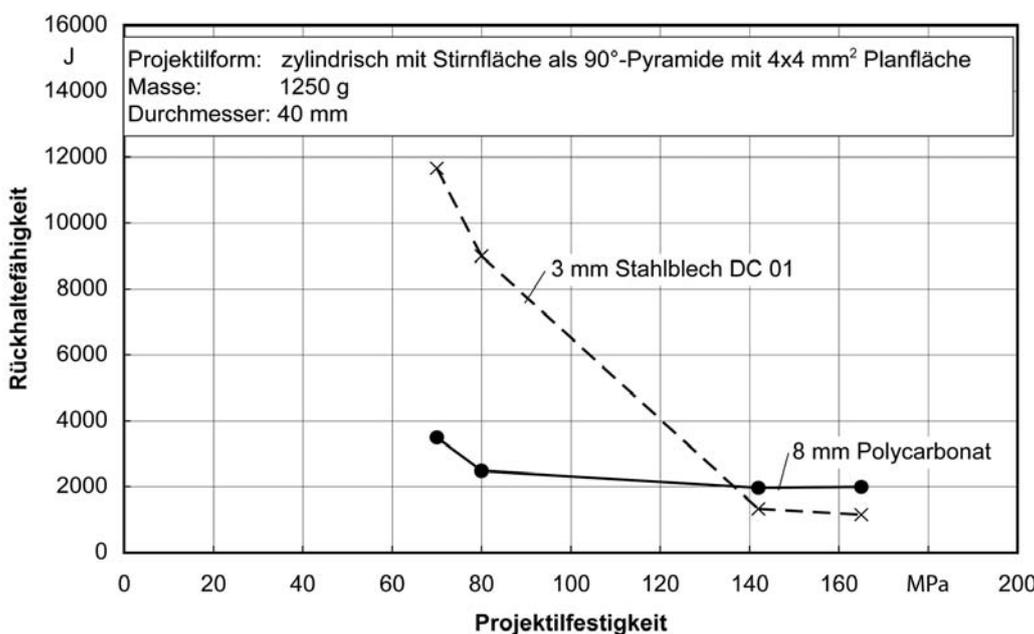


Bild 4. Rückhaltefähigkeit von Polycarbonat und Stahlblech bei Beschuss mit spitzen Projektilen unterschiedlicher Festigkeit

Figure 4. Impact resistance of polycarbonate and steel plate at bombardment with acute projectiles of various strength

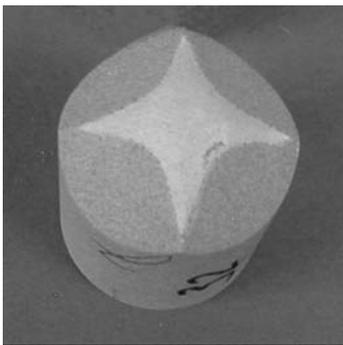


Bild 5. Keramikprojektil (Festigkeit: 80 MPa) mit Stirnfläche als 90°-Pyramide mit 4 x 4 mm² Planfläche nach dem Beschuss auf Stahlblech, Geschossenergie: 1381 J

Figure 5. Ceramic projectile (strength: 80 MPa) with front face as 90° pyramid with 4 x 4 mm² plane face after bombardment on steel plate, projectile energy: 1381 J

sich Rückhaltefähigkeiten zwischen etwa 8 400 J und 9 800 J. Dieses Verhalten kann mit der Abrundung und zum Teil auch Zerstörung der weichen Projektile beim Aufprall erklärt werden.

Bei Verwendung härterer Keramikprojektilen (Härtegrad: N, Festigkeit: 142 MPa) beeinflusste dagegen die Form der Geschossspitze die Rückhaltefähigkeit in hohem Maße. Es wurden Rückhaltefähigkeiten zwischen ca. 9 150 J und 1 300 J ermittelt. Je stumpfer die Projektilspitze war, desto höher war die Rückhaltefähigkeit. Die härteren Projektile wurden beim Aufprall nicht in dem Maße auf der Stirnfläche abgerundet wie

die weichener Projektile. Entsprechend wirkte sich die Form der Projektilspitze auf die Rückhaltefähigkeit aus.

An den Polycarbonatscheiben zeigte sich kein so ausgeprägter Einfluss der Form der Projektilstirnfläche auf die Rückhaltefähigkeit (Bild 7). Dies galt sowohl für den Beschuss mit den weichen wie auch den härteren Keramikprojektilen. Die Rückhaltefähigkeiten lagen zwischen 1440 J und 2 560 J. Im Auftreffbereich der Projektile trat bei den Polycarbonatscheiben eine hohe lokale Verformung auf. Dadurch scheint der Einfluss der Projektilstirnfläche gemildert zu werden.

Variation des Projektildurchmessers

Der Einfluss des Projektildurchmessers auf die Rückhaltefähigkeit wurde mit Projektilen untersucht, deren Stirnfläche entweder stumpf (quadratisch), keilförmig oder pyramidisch ausgebildet war. Die Ergebnisse für Stahlblech sind in Bild 8 wiedergegeben.

Bei den stumpfen und keilförmigen Projektilen war ein Anstieg der Rückhaltefähigkeit mit zunehmendem Durchmesser zu verzeichnen. Die Vergrößerung des Projektildurchmessers führt dazu, dass die Energie über eine größere Fläche eingeleitet wird, was letztlich einen Anstieg der Rückhaltefähigkeit bewirkt. Im vorliegenden Fall ergab eine Erhöhung des Projektildurchmessers von 30 mm auf 50 mm in etwa eine Ver-

dopplung der Rückhaltefähigkeit, wobei die absolute Höhe der Rückhaltefähigkeit beträchtlich von der Stirnflächenform und Festigkeit der Projektile abhing.

Die Benutzung sehr spitzer Projektile mit pyramidischer Stirnfläche (Festigkeit: 165 MPa) hatte dagegen ein völlig anderes Verhalten zur Folge. In diesem Fall war die Rückhaltefähigkeit, abgesehen von experimentell bedingten Streuungen, praktisch unabhängig vom Projektildurchmesser. Die Höhe der Rückhaltefähigkeit wurde hierbei offenbar allein von der Geometrie der Projektilspitze bestimmt. Wegen der vergleichsweise hohen Festigkeit von 165 MPa blieb die Projektilform auch bei hohen Aufprallenergien nahezu erhalten.

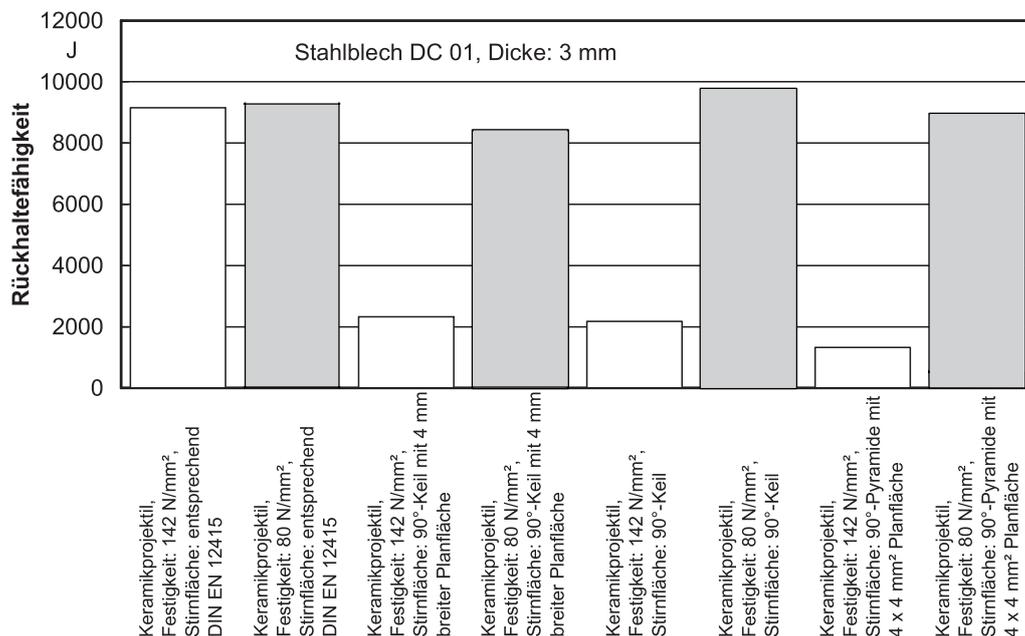
Die Polycarbonatscheiben verhielten sich ähnlich wie die Stahlbleche. Je nach Projektilbeschaffenheit nahm die Rückhaltefähigkeit auch bei diesem Werkstoff um etwa einen Faktor 1,5 bis 2 zu, wenn der Projektildurchmesser von 30 mm auf 50 mm erhöht wurde.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ob Bauteile Aufprallbeanspruchungen standhalten können, ohne dass es zu die Funktionsfähigkeit und die Sicherheit beeinträchtigenden Schäden kommt, hängt nicht allein von den mechanischen Eigenschaften der hierfür verwendeten Werkstoffe und der Energie der aufprallenden Teile ab. Von entscheidender Bedeutung für die Rückhaltefä-

Bild 6. Rückhaltefähigkeit von 3-mm-Stahlblech DC 01 bei Beschuss mit Keramikprojektilen unterschiedlicher Stirnfläche

Figure 6. Impact resistance of 3 mm steel plate DC 01 at bombardment with ceramic projectiles with different front face



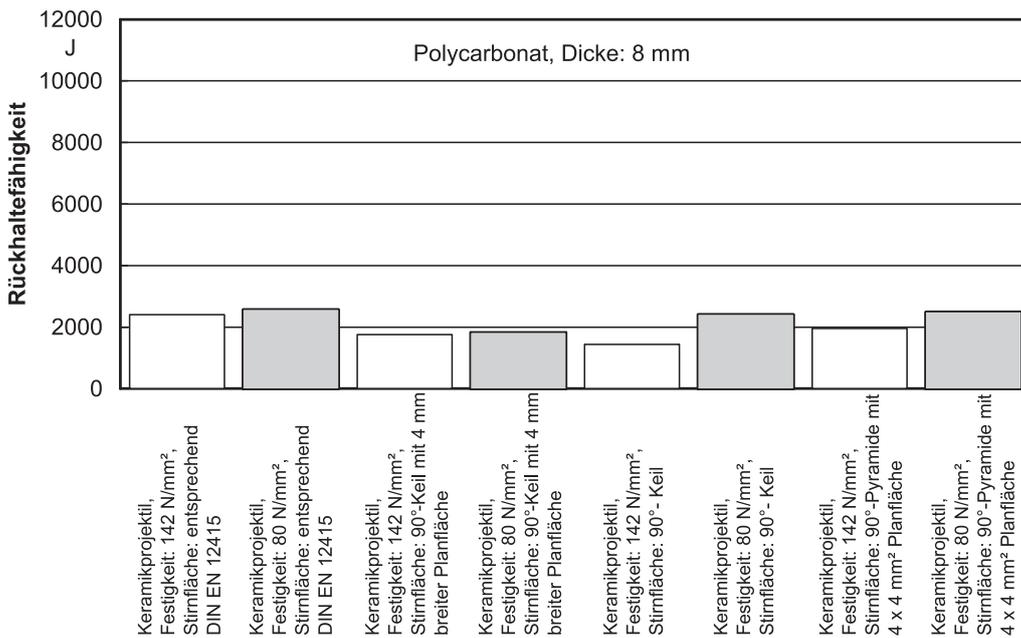


Bild 7. Rückhaltefähigkeit von 8-mm-Polycarbonat bei Beschuss mit Keramikprojektilen unterschiedlicher Stirnfläche

Figure 7. Impact resistance of 8 mm polycarbonate at bombardment with ceramic projectiles with different end face

higkeit sind auch die Geometrie und die Festigkeit der aufrallenden Teile. Um die Festigkeit von Werkstoffen bei Aufprallbeanspruchungen realitätsnah prüfen und beurteilen zu können, müssen die verschiedenen werkstoffspezifischen und beschussseitigen Einflussfaktoren und die zum Teil komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren berücksichtigt werden.

Die durchgeführten Versuche mit Projektilen aus gebräuchlichen Schleifkörperkeramiken zeigen, dass die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen mit steigender „Scharfkantigkeit“, abnehmendem Durchmesser und zunehmender Festigkeit der aufrallenden Teile mehr oder

weniger stark abnimmt. Wie groß der Einfluss dieser Parameter auf die Rückhaltefähigkeit letztlich ist, hängt dabei von der Art des beschossenen Materials ab. Beispielsweise reagierte Polycarbonat wesentlich unempfindlicher auf eine erhöhte „Scharfkantigkeit“ der Projektilen als Stahlblech. Auch der Einfluss der Projektilfestigkeit auf die Rückhaltefähigkeit war bei Polycarbonat geringer als bei Stahlblech.

Standardisierte Beschuss- und Fallprüfungen an sicherheitstechnisch relevanten Bauteilen und Arbeitsmitteln werden meistens mit starren Prüfkörpern aus gehärtetem Stahl durchgeführt [11–14]. Der Grund hierfür liegt in der

Mehrfachverwendbarkeit solcher Prüfkörper. Im Bild 9 sind die Ergebnisse aus Beschussversuchen mit stumpfen keramischen Projektilen denjenigen aus Versuchen mit stumpfen Projektilen aus gehärtetem Stahl gleicher Masse und Abmessungen gegenübergestellt. Die Stahlprojektilen entsprechen den Vorgaben der DIN EN 12415 für Beschussprüfungen trennender Schutzeinrichtungen an Drehmaschinen. Die Stahlprojektilen liefern für Stahlblech eine deutlich geringere Rückhaltefähigkeit als die entsprechenden Keramikprojektilen, deren Stirnflächen wegen der im Vergleich zu Stahlblech geringeren Festigkeit beim Aufprall teilweise abgerun-

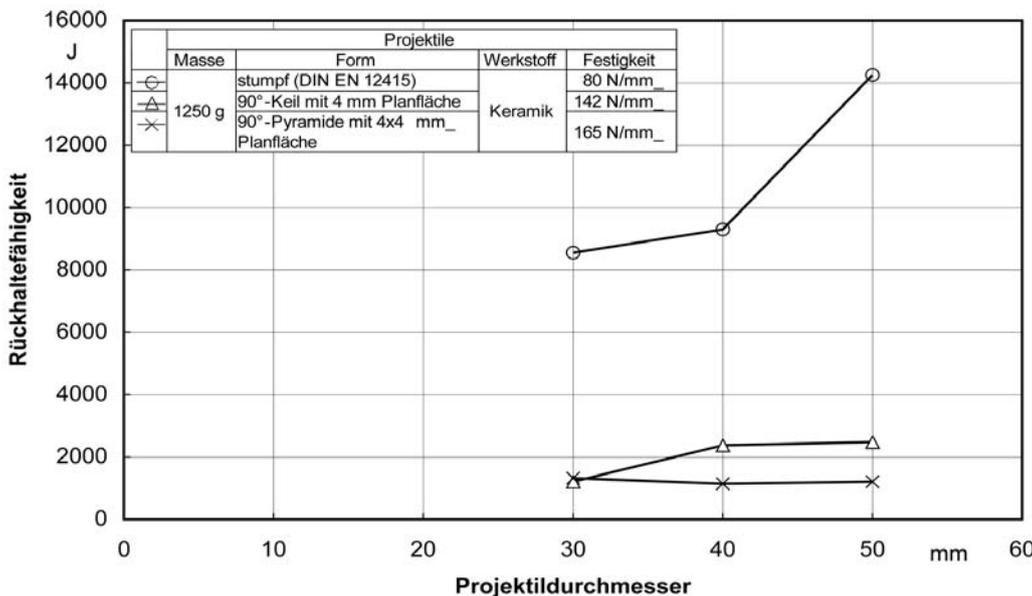
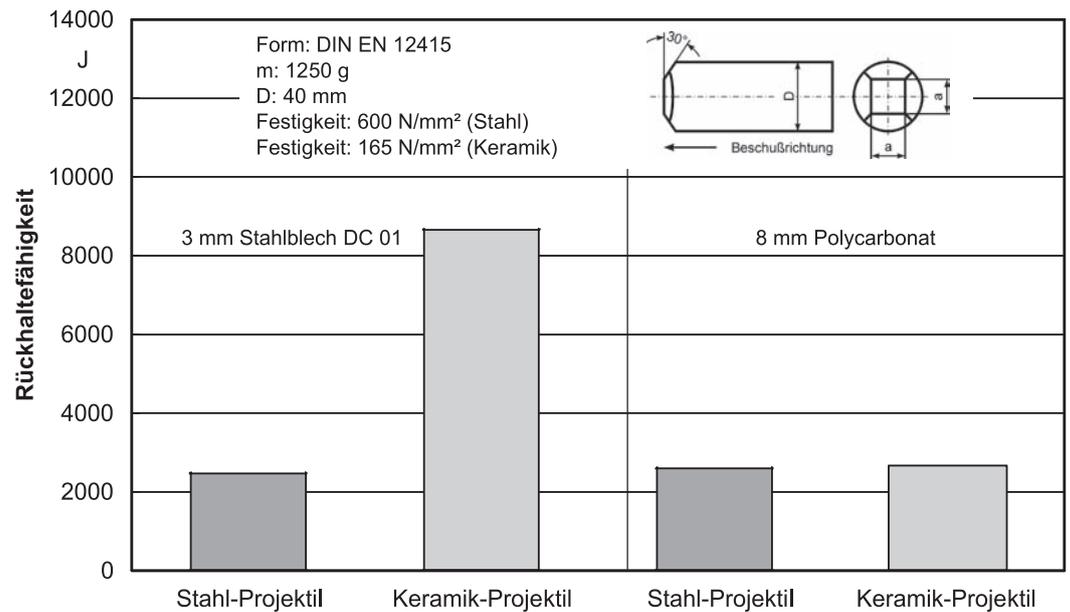


Bild 8. Einfluss des Projektildurchmessers auf die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech

Figure 8. Influence of the projectile diameter on the impact resistance of steel plate

Bild 9. Rückhaltefähigkeit von Stahlblech und Polycarbonat bei Beschuss mit Stahl- und Keramikprojektilen gleicher Geometrie und Masse

Figure 9. Impact resistance of steel plate and polycarbonate at bombardment with steel and ceramic projectiles with the same geometry and mass



det werden. Bei Polycarbonat spielen die unterschiedlichen Projektilwerkstoffe keine Rolle. Die Festigkeit der benutzten Stahl- wie auch der Keramikprojekteile ist jeweils höher als die Festigkeit von Polycarbonat. Folglich behält auch das Keramikprojektil seine Form beim Aufprall bei und kann so voll wirksam werden.

Nach den vorliegenden Ergebnissen sollte es grundsätzlich möglich sein, die Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen für Schleifmaschinen durch Beschussversuche mit Projektilen abzuschätzen, deren Form, Masse und Abmessungen den Bruchstücken zerplatzender Schleifscheiben entsprechen. Die kinetische Energie der Projektilen muss dabei gleich der als maßgeblich für die Beanspruchung der Schutzeinrichtungen erachteten translatorischen Bruchstückenergie [8] sein. Die Verwendung von Ergebnissen aus Beschussversuchen mit Stahlprojektilen anstelle von Keramikprojektilen führt dabei grundsätzlich zu Dimensionierungen auf der „sicheren Seite“.

Literatur

- H.-P. Berg, P. Brennecke, V. Friehmelt, R. Köster: Untersuchung von Stahlblech St 37.2 bei Aufprallbeanspruchung, Mat.-wiss. und Werkstofftech. 21 (1990), S. 321-326
- D. Mewes, R.-P. Trapp: Impact Resistance of Materials for Guards on Cutting Machine Tools - Requirements in Future European Safety Standards, JOSE 6 (2000), No. 4, S. 507-520

- D. Mewes, R.-P. Trapp, H.-J. Warlich: Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen, Werkstatttechnik 89 (1999), Nr. 10, S. 469-472
- A. J. Neilson: Empirical Equations for the Perforation of Mild Steel Plates, Int. J. Impact Engng. 3 (1985), No. 2, S. 137-142
- N. Jones: Low velocity perforation of metal plates, C. A. Brebbia, V. Sanchez-Galves (Eds.): Shock and impact on structures. Computational Mechanics Publications, Southampton (1995), S. 53-71
- D. Mewes, R.-P. Trapp, H.-J. Warlich: Festigkeit von Werkstoffen bei Aufprallbeanspruchungen, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 29 (1998), S. 258-262
- E. Uhlmann, M. Ising: Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen - Beurteilung von Werkstoffaufprallfestigkeit mit der Finite-Element-Methode, Materialprüfung 41 (1996), Nr. 6, S. 252-256

- DIN EN 13218: Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Ortsfeste Schleifmaschinen, Beuth Verlag, Berlin (2002)
- D. Mewes, R.-P. Trapp, H.-J. Warlich: Trennende Schutzeinrichtungen - Die Aufprallfestigkeit von Werkstoffen prüfen und beurteilen, Materialprüfung 38 (1996) Nr. 9, S. 368-372
- DIN ISO 525: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel - Allgemeine Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin (1999)
- DIN EN 12415: Sicherheit von Werkzeugmaschinen - kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren, Beuth Verlag, Berlin (2003)
- DIN EN 13128: Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Fräsmaschinen (einschließlich Bohrmaschinen), Beuth Verlag, Berlin (2001)
- DIN EN 12417: Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Bearbeitungszentren, Beuth Verlag, Berlin (2006)
- DIN EN 397: Industrieschutzhelme, Beuth Verlag, Berlin (2000)

Abstract

Impact Strength of Materials – Influence of Projectile Material, Shape and Strength. Components may be exposed to impact loading, e. g. when hit by other elements and fragments. The ability of the components to resist such impact loading without damages affecting functional capability and safety depends, on one hand, on the mechanical properties of the materials used, on the other hand, however, on strength and geometry of the impacting parts. Impact tests with cylindrical projectiles made from conventional ceramic abrasive products on steel sheet and polycarbonate show that the impact strength of materials decreases with increasing sharp-edgedness, decreasing diameter and increasing strength of the impacting parts.

Die Autoren dieses Beitrags

Dr.-Ing. Detlef Mewes, geboren 1956, studierte Maschinenbau an der Ruhr-Universität Bochum und promovierte 1985 an der Universität Siegen über ein Thema aus der Tribologie. Er leitet im Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (BGIA) in Sankt Augustin das Referat „Arbeitsmittel, Bauprodukte, Werkstoffe“.

Dipl.-Ing. (FH) Olaf Mewes, geboren 1966, studierte Laboratoriumstechnik für das Maschinen- und Elektroingenieurwesen an der Ingenieurschule Chemnitz. Nach Industrietätigkeit trat er 1992 als Prüflaborleiter in das

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (BGIA) in Sankt Augustin ein. Heute ist er Prüflaborleiter im Referat „Arbeitsmittel, Bauprodukte, Werkstoffe“.

Dr.-Ing. Peter Herbst, geboren 1950, studierte Hüttenwesen an der Technischen Universität Clausthal und promovierte 1983 an der Universität Hannover über den Einfluss

des Oberflächen- und Randzonenzustandes auf die Dauerfestigkeit von Schmiedeteilen aus Stahl. Nach einer mehrjährigen Industrietätigkeit ist er seit 1987 im Bereich Prävention der Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd in Hannover tätig. Er ist Obmann für das Sachgebiet „Schleifen und verwandte Verfahren“ im Fachausschuss Metall und Oberflächenbehandlung.

You will find the article and additional material by entering the document number MP110019 on our website at www.materialstesting.de