

Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen

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

Trennende Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen sollen Personen vor Verletzungen durch Teile schützen, die mit hoher kinetischer Energie aus dem Arbeitsraum der Maschine herausgeschleudert werden. Mit Blick auf ortsfeste Schleifmaschinen schreibt deshalb die DIN EN 13218 Mindestwanddicken für die Schutzeinrichtungen vor. Diese Werte beruhen grobteils auf Einschätzungen und Erfahrungen, nicht aber auf systematischen experimentellen Untersuchungen. Der Beitrag zeigt, inwieweit einfache Beschussprüfungen mit standardisierbaren Projektilen als Beurteilungsgrundlage für die Rückhaltefähigkeit von trennenden Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen herangezogen werden können. Voraussetzung ist dabei, dass nicht nur die kinetische Energie der benutzten Projektilen, sondern u. a. auch deren Masse und Geometrie den zu erwartenden Schleifkörperbruchstücken angepasst sind.

Die Gestaltung und Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen ist von entscheidender Bedeutung für den Schutz der Person, die die Maschine bedient, wie auch der Maschinenumgebung gegen wegfliegende Schleifkörperbruchstücke. Die Norm DIN EN 13218 [1] schreibt deshalb Mindestwanddicken für trennende Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen vor. Diese Werte beruhen zu einem großen Teil auf Erfahrungen und Einschätzungen, nicht aber auf systematischen experimentellen Untersuchungen. Als Alternative zur Verwendung von Wanddickentabellen enthält die Norm ein Nachweisverfahren, bei dem man reale Schleifkörper bei Arbeitshöchstgeschwindigkeit innerhalb der Schutzeinrichtung zum Bruch bringt. Dieses zeitaufwendige und kostenintensive Verfahren führt jedoch zu wenig reproduzierbaren Ergebnissen. Deshalb sollte untersucht werden, ob man statt dessen ein einfaches Beschussprüfverfahren mit standardisierbaren Projektilen, wie es in ähnlicher Form bereits für andere Arten spanender Werkzeugmaschinen [2 bis 4] besteht, als Bewertungsgrundlage für das Rückhaltevermögen der Schutzeinrichtungen heranziehen kann.

Versuchsmaterial und experimentelle Methoden

Als Versuchswerkstoffe dienten Bleche aus St 12.03 (DC 01) und Sichtscheiben aus Polycarbonat (Tabelle). Das Rückhaltevermögen dieser Werkstoffe wurde in Be-

Dicke, Zugfestigkeit und Bruchdehnung der beschossenen Werkstoffe.

Werkstoff	Dicke in mm	Zugfestigkeit in N/mm ²	Bruchdehnung in %
St 12.03	3	405	28
PC	8	68	80

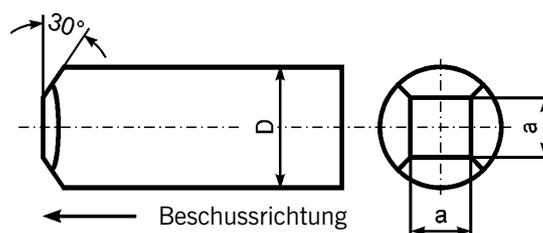
schussversuchen und vergleichend auch in Fliehkraftversuchen ermittelt.

Bei den Beschussversuchen, die in einer pneumatisch betriebenen Beschussanlage [5; 6] durchgeführt wurden, erfolgte die Beanspruchung translatorisch durch verschiedene zylindrische Projektilen aus gehärtetem Stahl (Bild 1) oder Schleifkörperkeramik (Bild 2). Die Keramikprojektilen wiesen dabei Druckfestigkeiten zwischen 70 und 165 N/mm² auf. Durchmesser und Massen entsprachen denen der Stahlprojektilen.

Für die Beschussversuche wurden die Prüfmuster mit den Abmessungen 500 mm x 500 mm aus Stahlblech St 12.03 oder Polycarbonat allrandig mittels Spannpratzen so eingespannt, dass die Über-

deckung zwischen Prüfmuster und Spannrahmen 25 mm betrug. Der Beschuss erfolgte jeweils auf die Prüfmustermitte.

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



Masse m in g	Durchmesser D in mm	Stirnfläche a x a in mm x mm
625	30	19 x 19
1250	30	19 x 19
1250	40	25 x 25
1250	50	30 x 30
2500	30	19 x 19
2500	50	30 x 30

Bild 1 Stahlprojektil (quadratische Stirnfläche).

Zur Validierung der Beschussergebnisse wurden Fliehkraftversuche mit Schleifscheiben durchgeführt. Für diese Versuche wurde in einem Schleuderstand eine Schutzhaube aus den in den Beschussversuchen verwendeten Materialien Polycarbonat (8 mm) und St 12.03 (3 mm) simuliert (**Bild 3**). Die Abmessungen der Prüfmuster betragen dabei jeweils 210 mm x 255 mm.

Die Anordnung erfolgte als Achteck mit einem senkrechten Abstand von 195 mm zum Umfang der aufgespannten Schleifscheibe.

Die Schleifscheiben bestanden aus dem härtesten auch für die Schleifkörperprojekte verwendeten Werkstoff und hatten die Abmessungen (D x T x H) 250 mm x 40 mm x 76,2 mm. Herstellerseitig waren die Scheiben für eine Arbeitshöchstgeschwindigkeit von 50 m/s ausgelegt. Die Fliehkraftversuche wurden mit geraden (Masse: $m = 4$ kg) und zweiseitig abgeschragten ($2 \times 45^\circ$) (Masse: $m = 3,4$ kg) Schleifscheiben durchgeführt. Die Bruchstücke der geraden Schleifscheiben simulierten dabei in etwa die stumpfe Geschossform entsprechend DIN EN 12415 [3] und die Bruchstücke der abgeschragten Schleifscheiben die spitzeren Projektil.

Die Schleifscheiben wurden möglichst auf eine solche Umfangsgeschwindigkeit beschleunigt, dass die hieraus resultierende translatorische Bruchstücksenergie der kritischen Geschossenergie der 1250-g-Projektile aus den Beschussversuchen entsprach. Danach wurden die Schleifscheiben mit einem Schuss aus einem Kleinkalibergewehr zerstört. Die Schleifscheiben zerbarsten dabei vom Einschuss ausgehend in vier und mehr Bruchstücke. Die Versuche wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt und anschließend ausgewertet.

Nach dem Versuch wurden die Schleifscheibenbruchstücke zusammengelegt und fotografiert. Aus der bekannten Lage des Einschusses ließ sich dann ermitteln, welches Bruchstück in welcher Platte wo aufgetroffen war. Die Bruchstücke wurden hinsichtlich ihres Bruchstückwinkels vermessen. Im Anschluss hieran wurde ihre translatorische Bruchstücksenergie E_{trans} aus der Beziehung (siehe [1]) berechnet.

$$E_{trans} = \frac{2}{9 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{(1-Q^3)^2}{(1-Q^2)^2} \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{\hat{\alpha}} \cdot v^2 \quad (1)$$

m : Masse der Schleifscheibe,
 α : Bruchstückswinkel in $^\circ$,
 $\hat{\alpha}$: Bruchstückswinkel in Bogenmaß

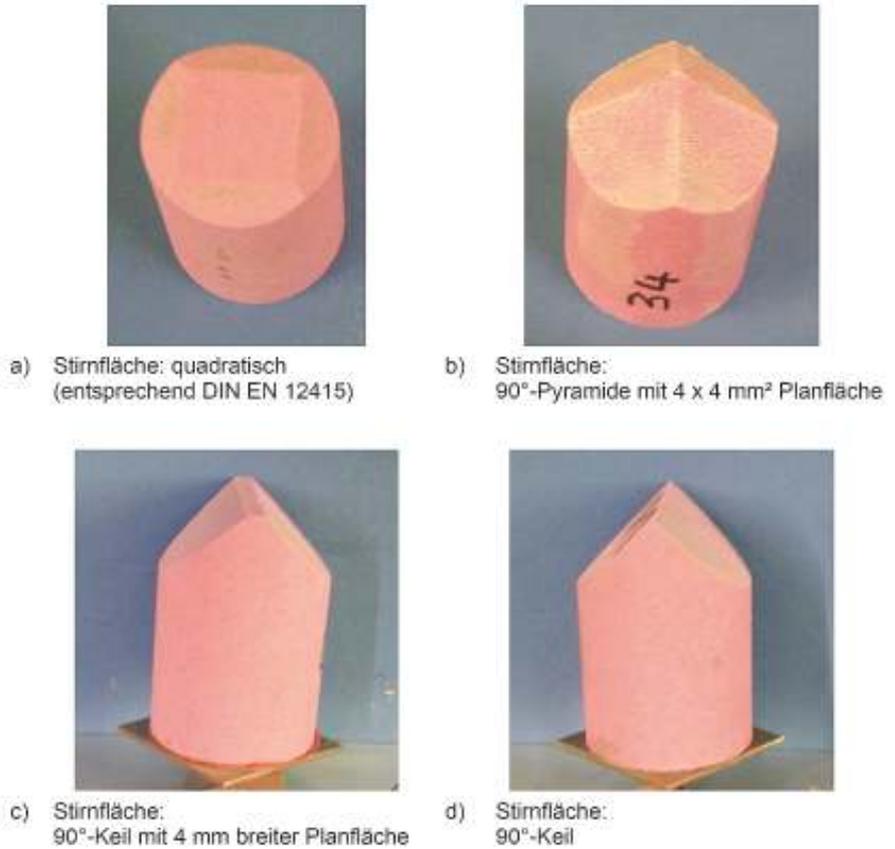


Bild 2 Keramikprojekte.



Bild 3 Versuchsaufbau für Fliehkraftversuche.

v : Umfangsgeschwindigkeit.
 Q : Verhältnis von Bohrungsdurchmesser H zu Außendurchmesser D der Schleifscheibe.

Anschließend wurden die an den Polycarbonat- oder Stahlplatten vorgefundenen Schädigungen mit denjenigen aus den Beschussversuchen mit Projektilen verglichen.

Ergebnisse

Beschussversuche

Die **Bilder 4** und **5** zeigen, wie sich im Beschussversuch die Festigkeit der Projek-

tile auf die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech und Polycarbonat auswirkt.

Insbesondere bei dem untersuchten Stahlblech war ein deutlicher Einfluss der Projektilfestigkeit auf das Rückhaltevermögen festzustellen. In den Beschussversuchen mit den stumpfen Projektilen, deren Stirnflächen den Vorgaben der DIN EN 12415 [2] entsprachen, bewirkte eine Erhöhung der Projektilfestigkeit von 70 auf 165 N/mm² bereits eine Verringerung des Rückhaltevermögens von rund 11 400 auf etwa 8 700 J (Bild 4). Mit einem Stahlprojektil gleicher Geometrie, dessen Festigkeit rund 600 N/mm² betrug, wurde

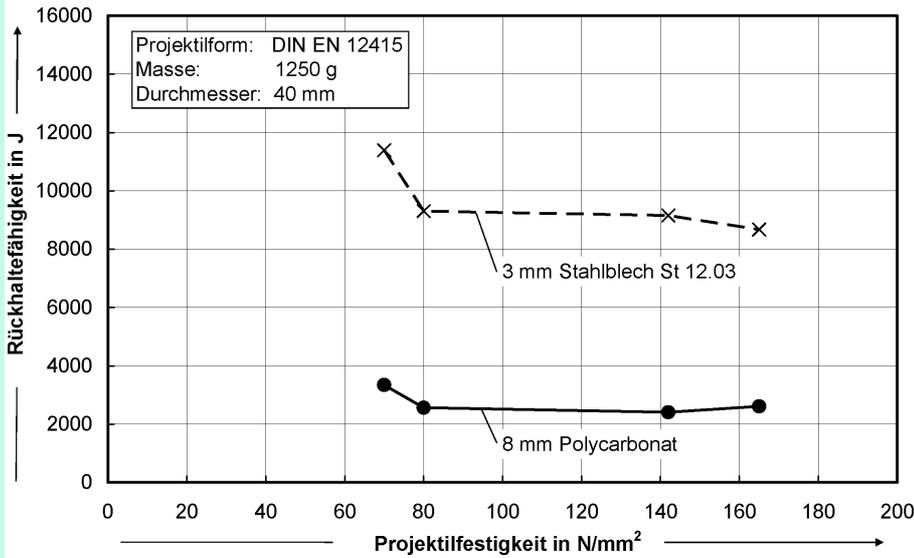


Bild 4 Rückhaltefähigkeit von Polycarbonat und Stahlblech bei Beschuss mit stumpfen Keramikprojektile unterschiedlicher Festigkeit.

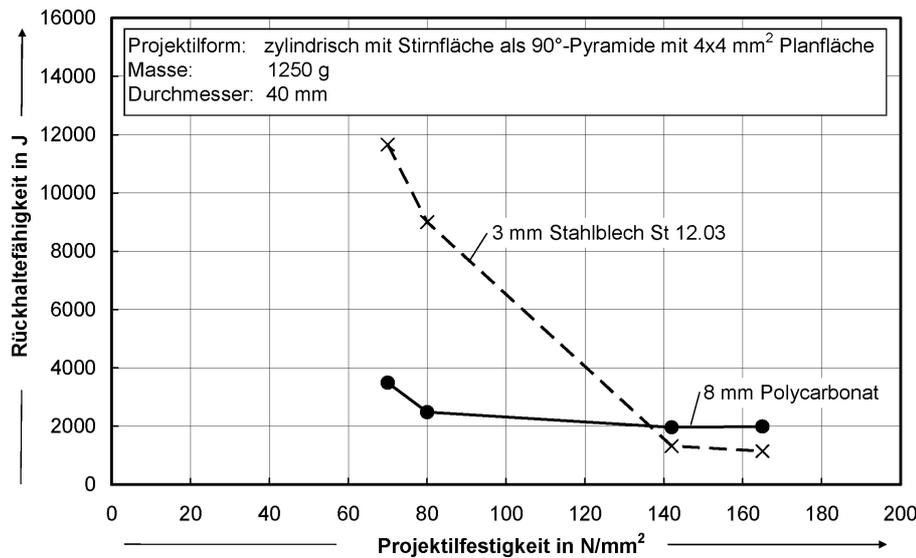


Bild 5 Rückhaltefähigkeit von Polycarbonat und Stahlblech bei Beschuss mit spitzen Keramikprojektile unterschiedlicher Festigkeit.

eine Rückhaltefähigkeit von nur noch 2 500 J ermittelt. Im Gegensatz zu den Keramikprojektile, die mit steigender Aufprallenergie zunehmend bis hin zur völligen Zerstörung geschädigt wurden, behielt das Stahlprojektil seine ursprüngliche Form der Geschossspitze bei, die somit voll wirksam werden konnte.

Noch ausgeprägter als in den Versuchen mit den relativ stumpfen Projektile war der Einfluss der Projektilfestigkeit bei Verwendung spitzer Projektile mit pyramidenförmiger Stirnfläche (Bild 5). Mit zunehmender Festigkeit der Keramikprojektile von 70 auf 165 N/mm² verringerte sich die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech um

etwa einen Faktor 10. Die Projektile aus den beiden härteren Schleifkörperwerkstoffen behielten ihre Form beim Aufprall im Wesentlichen bei und hatten so eine höhere Beanspruchung des Stahlblechs zur Folge. Bei den Projektile aus den weicheren Schleifkörperkeramiken wurde dagegen schon bei relativ niedrigen Energien eine beträchtliche Abrundung der Geschossspitze beobachtet (Bild 6). Diese Projektile verhielten sich im Beschussversuch daher annähernd wie stumpfe Projektile. Folglich ergaben sich hiermit auch ähnliche Rückhaltefähigkeiten wie beim Beschuss mit den stumpfen Projektile gleicher Festigkeit.



Bild 6 Keramikprojektil (Festigkeit: 80 N/mm²) mit Stirnfläche als 90°-Pyramide mit 4 x 4 mm² Planfläche nach dem Beschuss auf Stahlblech, Geschossenergie: 1 381 J.

Das Rückhaltevermögen der untersuchten 8 mm dicken Polycarbonatscheiben hing in nur geringem Maße von der Festigkeit der verwendeten Projektile ab. Die Festigkeit der Keramikprojektile war immer gleich oder höher als die Festigkeit der Polycarbonatscheiben. Die Projektile zeigten somit, wenn überhaupt, nur geringe Schäden und konnten damit voll wirksam werden.

Ebenfalls gering war der Einfluss der Form der Geschossspitze auf das Rückhaltevermögen von Polycarbonat. Durch die starke lokale Verformung der Polycarbonatscheiben im Auftreffbereich der Projektile scheint der Einfluss der Geschossspitze gemildert zu werden.

Inwieweit die Form der Projektilstirnfläche das Rückhaltevermögen beeinflusst, wurde näher untersucht, indem neben den zuvor benutzten stumpfen Projektile mit einer Stirnfläche entsprechend [2] und spitzer Projektile mit pyramidenförmiger Stirnfläche noch zwei weitere Projektilgeometrien mit keilförmiger Stirnfläche und 4 mm breiter Planfläche bzw. 90°-Keil ohne Planfläche in das Programm mit einbezogen wurden. Diese Projektile besaßen Festigkeiten von 80 bzw. 142 N/mm². Der Durchmesser dieser zylindrischen Projektile betrug jeweils 40 mm, die Masse 1 250 g.

Das Rückhaltevermögen von Stahlblech (Bild 7) war demnach nahezu unabhängig von der Form der Stirnfläche, wenn die Versuche mit den relativ weichen Keramikprojektile (Festigkeit: 80 N/mm²) durchgeführt wurden. Unter diesen Bedingungen ergaben sich Rückhaltefähigkeiten zwischen 8 410 und 9 766 J. Dieses Verhal-

ten kann mit der Abrundung bzw. Zerstörung der weichen Projektile beim Aufprall erklärt werden.

Bei Verwendung härterer Keramikprojektilen (Festigkeit: 142 N/mm²) beeinflusste dagegen die Form der Geschosspitze die Rückhaltefähigkeit in hohem Maße. Es wurden Rückhaltefähigkeiten zwischen 9 150 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 geschädigt wie die weicheren Projektile. Folglich wirkte sich die Form der Projektilspitze auf das Rückhaltevermögen aus.

Die Polycarbonatscheiben zeigten im Gegensatz zu Stahlblech auch bei diesen Versuchen keinen so ausgeprägten Einfluss der Stirnflächenform auf die Rückhaltefähigkeit. Dies galt sowohl für die Verwendung der weichen wie auch der härteren Keramikprojektilen. Die Rückhaltefähigkeiten lagen zwischen 1440 und 2560 J (Bild 8).

Weitere Versuche führten zu dem Ergebnis, dass auch der Projektildurchmesser das Rückhaltevermögen beeinflusst. Bild 9 verdeutlicht dies am Beispiel von Stahlblech St 12.03 für den Beschuss mit stumpfen und scharfkantigen Projektile aus Stahl oder Schleifkörperkeramik. Bis auf eine Ausnahme hatte hierbei eine Erhöhung des Projektildurchmessers einen deutlichen Anstieg des Rückhaltevermögens zur Folge. Die Vergrößerung des Projektildurchmessers führt dazu, dass die Energie über eine größere Fläche eingeleitet wird, was letztlich einen Anstieg des Rückhaltevermögens bewirkt. Im vorliegenden Fall bewirkte eine Erhöhung des Projektildurchmessers von 30 auf 50 mm in etwa eine Verdopplung des Rückhaltevermögens, wobei die absolute Höhe des Rückhaltevermögens beträchtlich von der Stirnflächenform und Festigkeit der Projektile abhing.

Die Benutzung sehr spitzer Projektile mit pyramidischer Stirnfläche (Festigkeit: 165 N/mm²) hatte ein völlig anderes Verhalten zur Folge. In diesem Falle war die Rückhaltefähigkeit, abgesehen von experimentell bedingten Streuungen, praktisch unabhängig vom Projektildurchmesser. Die Höhe des Rückhaltevermögens wurde hierbei offenbar allein von der Geometrie der Projektilspitze bestimmt. Wegen der vergleichsweise hohen Festigkeit von 165 N/mm² blieb die Projektilform auch bei hohen Aufprallenergien nahezu erhalten.

Die Polycarbonatscheiben verhielten sich ähnlich wie die Stahlbleche. Je nach

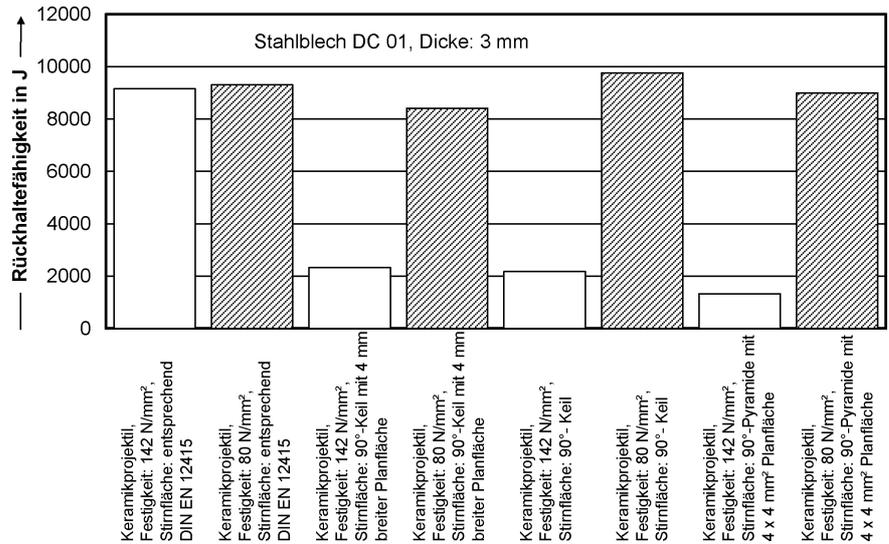


Bild 7 Rückhaltefähigkeit von 3 mm Stahlblech DC 01 bei Beschuss mit Keramikprojektilen (Durchmesser: 40 mm, Masse: 1 250 g) unterschiedlicher Stirnfläche.

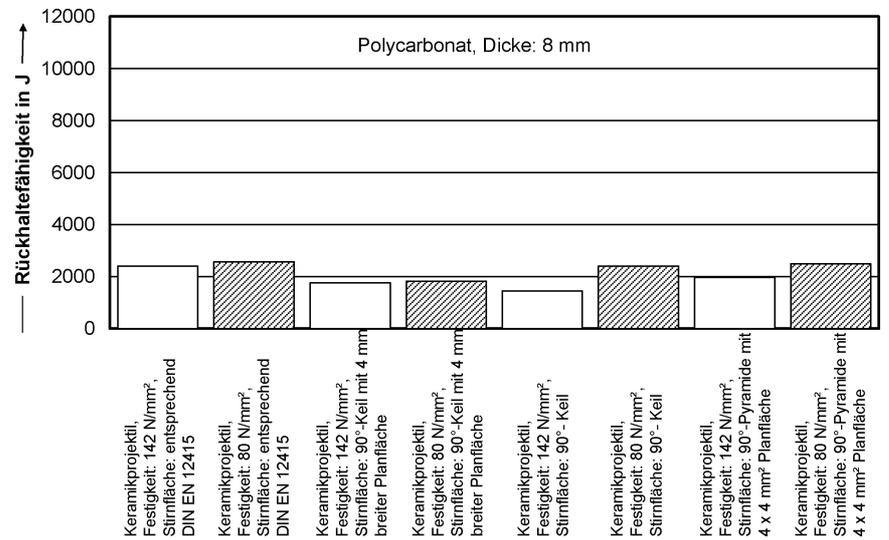


Bild 8 Rückhaltefähigkeit von 8 mm Polycarbonat bei Beschuss mit Keramikprojektilen (Durchmesser: 40 mm, Masse: 1 250 g) unterschiedlicher Stirnfläche.

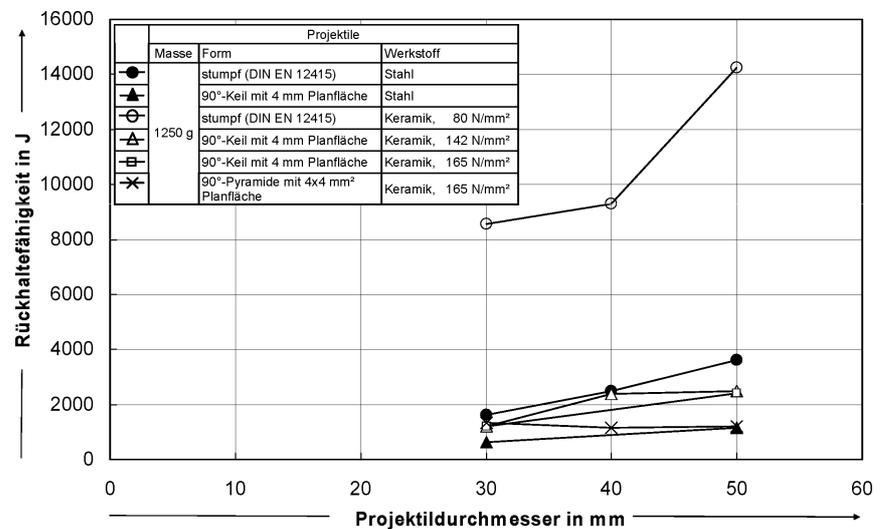


Bild 9 Einfluss des Projektildurchmessers auf die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech (Dicke: 3 mm).

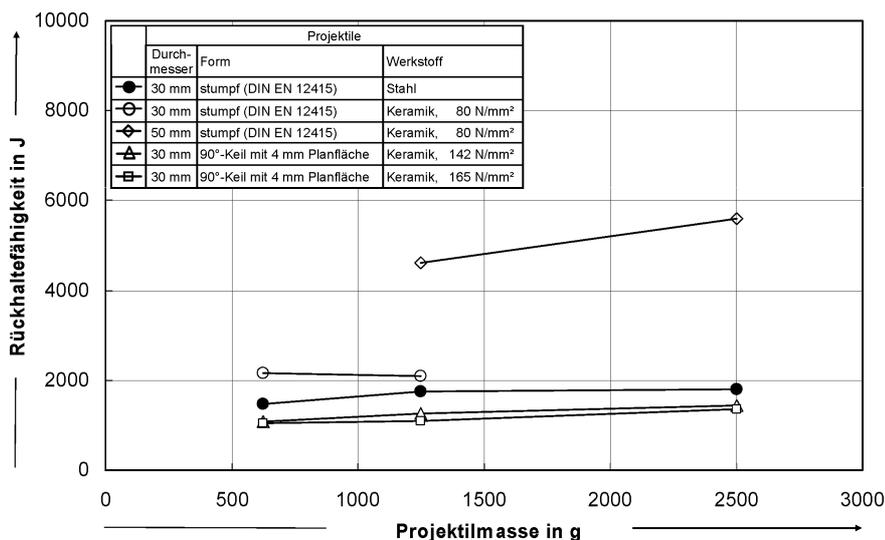


Bild 10 Einfluss der Projektillmasse auf die Rückhaltefähigkeit von Polycarbonat (Dicke: 8 mm).

Projektillbeschaffenheit nahm das Rückhaltevermögen um etwa einen Faktor 1,5 bis 2 zu, wenn der Projektilldurchmesser von 30 auf 50 mm erhöht wurde. Eine Ausnahme bildeten auch wieder die sehr spitzen Projektile mit pyramidischer Stirnfläche.

In geringem Umfang beeinflusste auch die Projektillmasse die Rückhaltefähigkeit. **Bild 10** verdeutlicht dies am Beispiel von Polycarbonat.

Fliehkraftversuche

In den Fliehkraftversuchen mit geraden und profilierten Schleifscheiben wurden für 8 mm dicke Polycarbonatscheiben Rückhaltefähigkeiten zwischen 2 000 und 2 400 Nm ermittelt. Die Masse der aufprallenden Bruchstücke lag zwischen 0,8 und 1,4 kg. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen belegten, dass die Bruchstücke mit ihrer Umfangsfläche entsprechend der Schleifscheibenbreite von 40 mm auf die Prüfmuster prallten (**Bild 11**). Damit waren die im Fliehkraftversuch beobachteten Bruchstücke grob mit den 1 250-g-Projektillen mit 40 mm Durchmesser vergleichbar.

Die Beschussversuche ergaben Rückhaltefähigkeiten zwischen rund 2 600 Nm bei Verwendung stumpfer Projektile und 1 440 bis 2 000 J bei Benutzung spitzer Projektile. Diese Ergebnisse stimmen recht gut mit denjenigen aus den Fliehkraftversuchen überein, insbesondere auch bei

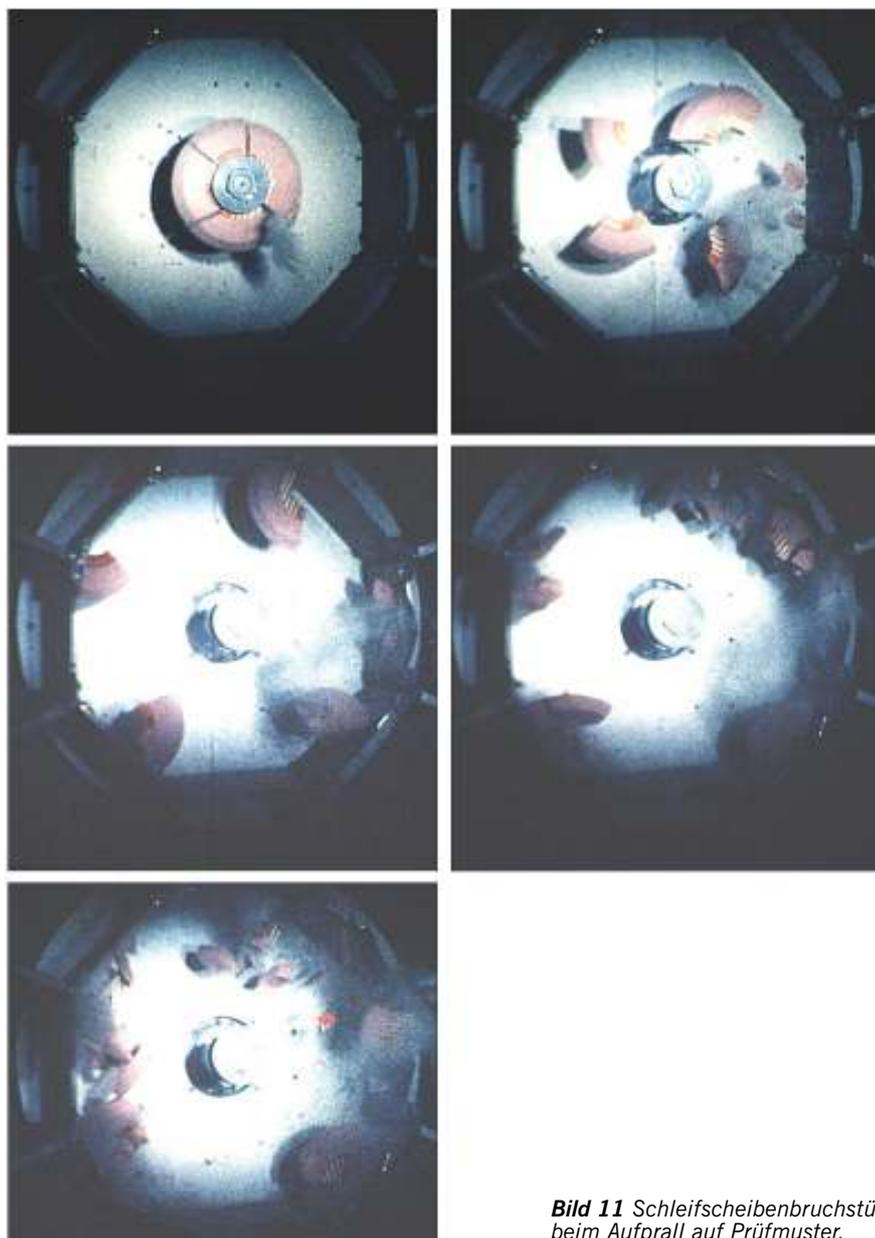


Bild 11 Schleifscheibenbruchstücke beim Aufprall auf Prüfmuster.

Literaturverzeichnis

[1] DIN EN 13218: Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Ortsfeste Schleifmaschinen. Berlin: Beuth-Verlag 2002.
 [2] DIN EN 12415: Sicherheit von Werkzeugmaschinen – Kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren. Berlin: Beuth-Verlag 2003.
 [3] DIN EN 12417: Sicherheit von Werkzeugmaschinen – Bearbeitungszentren. Berlin: Beuth-Verlag 2007.
 [4] DIN EN 13128: Sicherheit von Werkzeugmaschinen – Fräsmaschinen (einschließlich Bohrmaschinen). Berlin: Beuth-Verlag 2007.
 [5] Mewes, D.; Trapp, R.-P.; Warlich, H.-J.: Stoßfestigkeit von Werkstoffen für trennende Schutzeinrichtungen an Drehmaschinen. TÜ 37 (1996) Nr. 4, S. 54-57.
 [6] Mewes, D.; Trapp, R.-P.; Warlich, H.-J.: Trennende Schutzeinrichtungen – Die Aufprallfestigkeit von Werkstoffen prüfen und beurteilen. Materialprüfung 38 (1996) Nr. 9, S. 368-372.

Berücksichtigung der unterschiedlichen Abmessungen der Prüfmuster im Beschuss- und im Fliehkraftversuch.

Im Gegensatz zu den Polycarbonatscheiben ließen sich die Stahlbleche nicht bis zum Erreichen der Belastungsgrenze beanspruchen. Das Bersten der geraden wie auch der profilierten Schleifscheiben hatte translatorische Bruchstückenergien von rund 2 700 Nm zur Folge, die lediglich zu einer plastischen Verformung der Bleche führten.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Versuche mit Projektilen aus gebräuchlicher Schleifkörperkeramik zeigen, dass die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen mit steigender Scharfkantigkeit, abnehmendem Durchmesser und zunehmender Festigkeit aufprallender Bruchstücke mehr oder weniger abnimmt. Wie groß der Einfluss dieser Parameter auf die Rückhaltefähigkeit letztlich ist, hängt

von der Art bzw. den mechanischen Eigenschaften des beschossenen Materials ab. Beispielsweise reagierte Stahlblech wesentlich empfindlicher auf eine erhöhte Scharfkantigkeit der Projektile als Polycarbonat.

Nach den vorliegenden Ergebnissen scheint es prinzipiell möglich zu sein, die Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen anhand von Beschussversuchen mit standardisierbaren Projektilen zu beurteilen und damit auf das zeitaufwendige und kostenintensive Nachweisverfahren nach DIN EN 13218 zu verzichten, bei dem reale Schleifkörper bei Arbeitshöchstgeschwindigkeiten innerhalb der Schutzeinrichtung zum Bruch gebracht werden.

Form, Masse und Abmessungen der Projektile müssen dabei den Bruchstücken zerplatzender Schleifscheiben entsprechen. Ferner muss die kinetische Energie der Projektile gleich der als maßgeblich für die Beanspruchung der Schutzeinrichtungen erachteten translatorischen Bruchstücks-

energie [1] sein. Da die Festigkeit der auf einer Schleifmaschine eingesetzten Schleifkörper nicht von vorn herein bekannt zu sein braucht bzw. Schleifkörper unterschiedlicher Festigkeit zum Einsatz kommen können, muss man von den ungünstigsten Bedingungen ausgehen und eine entsprechend hohe Projektilfestigkeit zugrunde legen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich die Verwendung von Stahlprojektilen, die im Gegensatz zu Projektilen aus Schleifkörperkeramik zudem den Vorteil der Wiederverwendbarkeit bieten.

TÜ 769

Dr. **Detlef Mewes**, Dipl.-Ing. **Olaf Mewes**, BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin, Dr.-Ing. **Peter Herbst**, Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd, Hannover.