

Trennende Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen ohne Primärschutzhaube

Detlef Mewes, Sankt Augustin, und 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. Für ortsfeste Schleifmaschinen schreibt die DIN EN 13218 Mindestwanddicken für Schutzeinrichtungen vor. Diese Werte sind in vielen Fällen nicht praktikabel. Eine praxisgerechtere Dimensionierung ist jedoch auf der Grundlage von Berstversuchen mit realen Schleifkörpern möglich.

Trennende Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen müssen den Schutz von Personen wie auch der Maschinenumgebung vor wegfliegenden Schleifkörperbruchstücken gewährleisten. Werden Schleifkörperschutzhauben eingesetzt, erfolgt deren Dimensionierung anhand von Wanddickentabellen nach der Norm DIN EN 13218 [1]. Bei vielen Bearbeitungsaufgaben, wie dem Schleifen von Verzahnungen, macht die komplizierte Werkstückgeometrie den Einsatz einer Schleifkörperschutzhaube unmöglich. In solchen Fällen muss die großräumige Verkleidung des Bearbeitungsbereichs bzw. der Gesamtmaschine die Funktion der Schleifkörperschutzhaube übernehmen. Die Werte der Wanddickentabellen lassen sich auf solche Verkleidungen nicht übertragen, weil deren konstruktive Gestaltung und die daraus resultierende Beanspruchung nicht mit denen der relativ starren und den Schleifkörper eng umschließenden Schutzhauben vergleichbar sind.

Anhand von Berstversuchen mit handelsüblichen Schleifscheiben sollten praxisgerechtere Kriterien für die Auslegung trennender Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen, die ohne Schleifkörperschutzhaube betrieben werden müssen, entwickelt werden. Die Arbeiten hatten ferner zum Ziel, zu klären, inwieweit Ergebnisse aus einfach durchführbaren Beschussversuchen mit Projektilen definierter Geometrie auf das Verhalten bei realen Schleifkörperbrüchen übertragbar sind. Solche Beschussprüfungen werden für die Beurteilung der Rückhaltefähigkeit von trennenden Schutzeinrichtungen an anderen Werkzeugmaschinenarten herangezogen [2 bis 4].

Experimentelle Methoden und Versuchsmaterial

Um die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen gegenüber aufprallenden Schleifkörperbruchstücken möglichst realitäts-

nah ermitteln zu können, wurde ein spezieller Prüfstand entwickelt und gebaut (Bild 1). Im Wesentlichen bestand er aus einer motorisch angetriebenen Spindel mit der Schleifscheibenaufnahme und drei Aufnahmen für Prüfmuster. Die zu beurteilenden Werkstoffe wurden dabei so in die Aufnahmen eingesetzt, dass sich allrandig eine Überdeckung von jeweils 25 mm ergab. Die Fixierung erfolgte mittels Klemmleisten und Spannpratzen. Der Abstand zwischen den Prüfmustern und der Drehachse der Schleifspindel betrug 500 mm.

Nach Einsetzen der Prüfmuster wurde eine Schleifscheibe aufgespannt und anschließend bei einer bestimmten Drehzahl über einen im Bohrungsbereich der Schleifscheibe wirkenden Keilmechanismus zum Bersten gebracht. Dieser Keilmechanismus wurde durch den in Bild 1 zu erkennenden Fallhammer beim Aufschlag auf den Zentralbolzen ausgelöst. Um in Verbindung

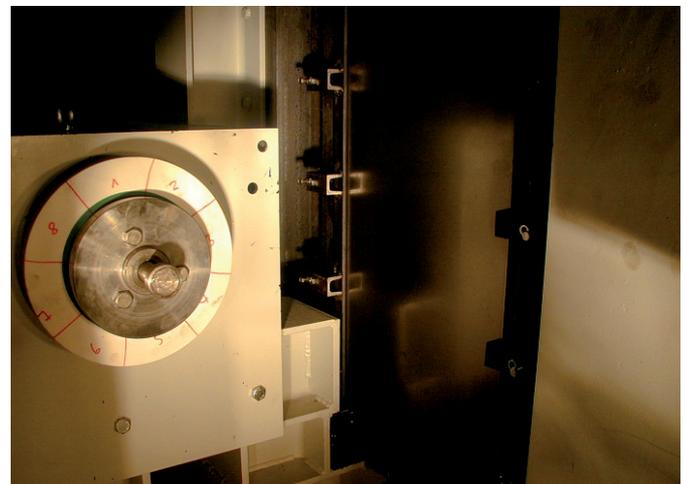
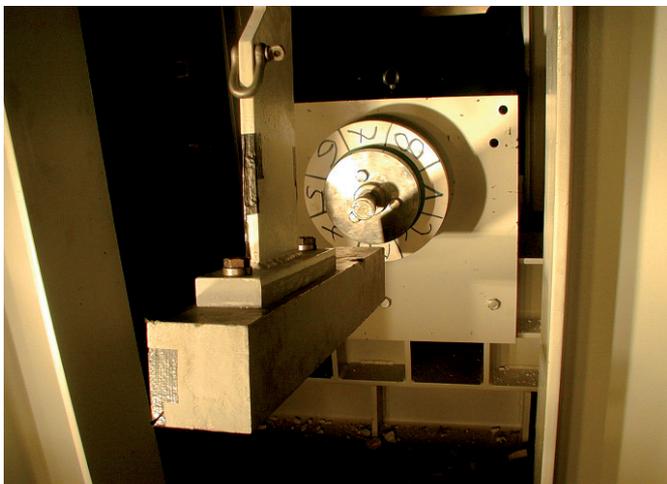


Bild 1 Prüfstand mit aufgespannter Schleifscheibe.



Bild 2 Schäden an den Prüfmustern; a) Beulung, b) Anriss, c) Durchschuss.

mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu ermitteln, welches Bruchstück an welcher Stelle auf die Prüfmuster geprallt war, wurden auf der Schleifscheibe acht Segmente eingezeichnet und entsprechend nummeriert.

Tabelle 1 Verwendete Schleifscheiben.

Abmessungen (D x T x H) in mm	Werkstoff nach Herstellerangabe	Härtegrad	Druckfestigkeit in N/mm ²
300 x 25 x 127	35 A80 K3 V19	K	146
300 x 25 x 127	35 A120 H6 V84	H6	117
250 x 50 x 127	35 A80 K3 V19	K	146
230 x 50 x 127	Ek1 120 P7 VB	P	186
300 x 25 x 127	Ek1 120 P7 VB	P	186
300 x 25 x 127	35 A120 H10 V84	H10	80

(D: Außendurchmesser, T: Breite, H: Bohrungsdurchmesser)

Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe.

Werkstoff	Dicke in mm	Zugfestigkeit in N/mm ²	Bruchdehnung in %
DC01	1,5	294	45
DC01	3,0	350	37
Polycarbonat	8,0	68	80

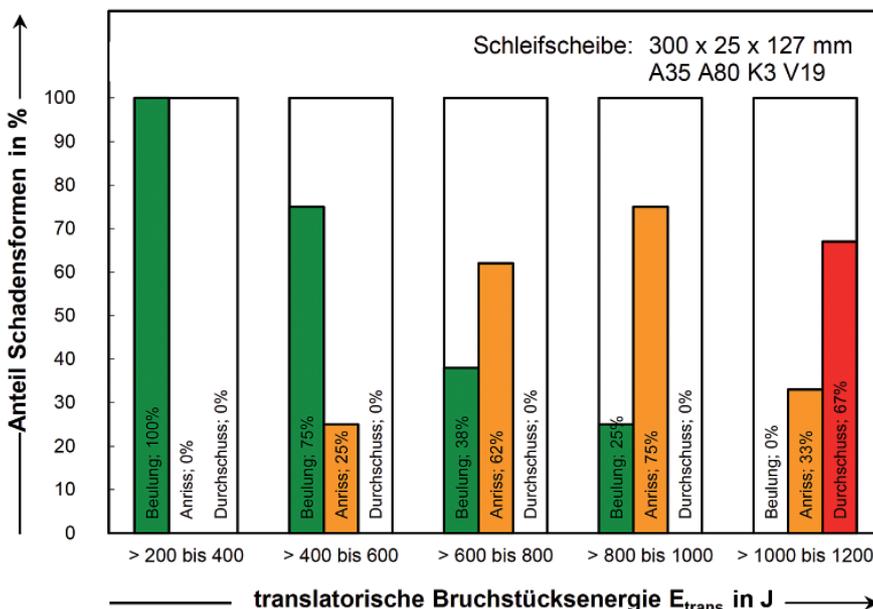


Bild 3 Verteilung der Schadensformen in Abhängigkeit der Bruchstücksenergie für 1,5-mm-Stahlblech DC01.

Nach einem Versuch wurden die aufgetretenen Schäden (Bild 2) an den Prüfmustern dokumentiert und den vorgefundenen Bruchstücken zugeordnet. Zusätzlich wurde die translatorische Energie der jeweiligen Bruchstücke berechnet, die als maßgeblich für die Beanspruchung der Werkstoffe und der hieraus gefertigten Schutzeinrichtungen anzusehen ist [1; 5; 6]. Die translatorische Bruchstücksenergie errechnet sich nach folgender Beziehung:

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

m : Masse der Schleifscheibe

Q : Durchmesser Verhältnis

α : halber Bruchstückswinkel in °

$\hat{\alpha}$: halber Bruchstückswinkel im Bogenmaß

$$\left(\hat{\alpha} = \frac{\alpha \cdot \pi}{180^\circ} \right)$$

v_{br} : Umfangsgeschwindigkeit beim Bruch
 α wurde rechnerisch aus der Bruchstücksmasse m_{br} und der Schleifscheibenmasse m abgeschätzt:

$$\alpha = \frac{m_{\text{br}}}{m} \cdot 180^\circ \quad (2)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit beim Bruch der Schleifscheibe ergab sich aus dem Außendurchmesser D der Schleifscheibe und deren Drehzahl n_{br} :

$$v_{\text{br}} = D \cdot \pi \cdot n_{\text{br}} \quad (3)$$

Q bezeichnet das Verhältnis von Bohrungsdurchmesser H zu Außendurchmesser D der Schleifscheibe:

$$Q = \frac{H}{D} \quad (4)$$

Die Berstversuche wurden mit keramisch gebundenen geraden Schleifschei-



Bild 4 Aufprallsituationen; Auftreffen mit der a) Umfangsfläche, b) Querschnittsfläche, c) Bohrungsseite.

ben der Form 1 nach DIN ISO 525 [7] durchgeführt (Tabelle 1). Die Schleifscheiben hatten je nach Spezifikation eine Masse zwischen 2,6 und 3,9 kg.

Im Hinblick auf ihre Rückhaltefähigkeit wurden Bleche aus DC01 (St 12.03) und Sichtscheiben aus Polycarbonat untersucht (Tabelle 2). Dies sind Beispiele für Werkstoffe, die üblicherweise für trennende Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen verbaut werden. Die Abmessungen der Prüfmuster betragen jeweils 500 mm x 1000 mm.

Ergebnisse

Bild 3 gibt beispielhaft die Ergebnisse von Berstversuchen mit Schleifscheiben 300 x 25 x 127 mm auf 1,5 mm Stahl-

blech DC01 wieder. Die Druckfestigkeit der verwendeten Schleifscheibenspezifikation betrug dabei 146 N/mm².

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die translatorische Bruchstückenergie in Klassen (Klassenbreite = 200 J) eingeteilt. Für jede Klasse wurde der prozentuale Anteil der verschiedenen Schadensformen an der Gesamtzahl der (auswertbaren) Treffer in der jeweiligen Klasse ermittelt.

Bei Bruchstückenergien zwischen 200 und 400 J traten nur Beulungen im Stahlblech auf. Im Energiebereich zwischen 400 und 600 J waren bereits in 25 % aller Treffer Anrisse zu verzeichnen, wobei der erste Anriss bei einer Energie von 447 J beobachtet wurde. Mit zuneh-

mender Bruchstückenergie kam es vermehrt zu Anrissen. Im Energiebereich von 1 000 bis 1 200 J hatten zwei Drittel aller Treffer den Durchschuss zur Folge. Die Bruchstücke wurden dann nicht mehr zurückgehalten. In den übrigen Versuchen waren Anrisse zu beobachten.

Bei der Darstellung in Bild 3 wurde nicht danach differenziert, ob die Bruchstücke z. B. mit ihrer Umfangsfläche, Querschnittsfläche oder Bohrungsseite aufprallen (Bild 4). Ein mehr oder weniger punktueller Aufprall, etwa mit einer Kante, ist dabei kritischer zu bewerten als ein flächiger Aufprall, weil unter diesen Bedingungen die Rückhaltefähigkeit wegen der hohen lokalen Beanspruchung geringer ist. Bild 5 zeigt Sequenzen aus

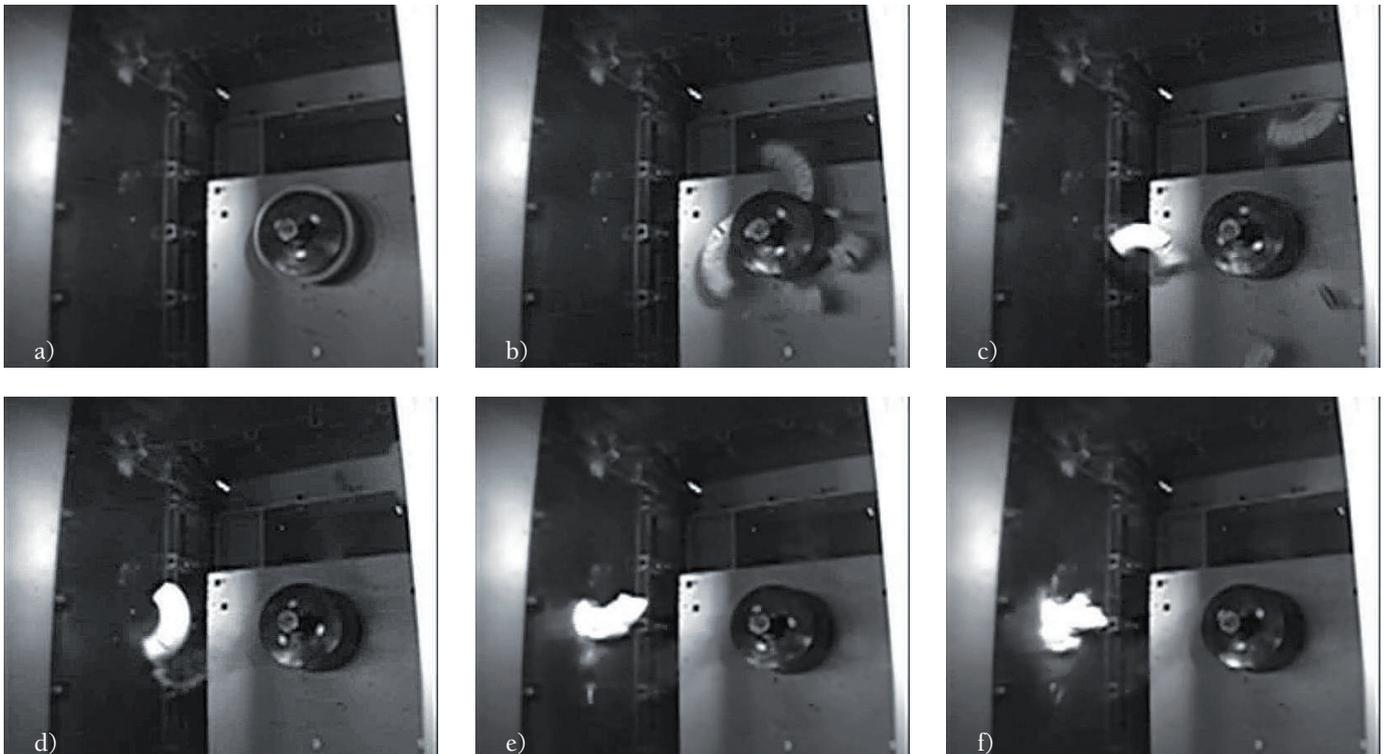


Bild 5 Flugverhalten eines Bruchstücks (Schleifscheibe 300 x 25 x 127 mm).

a) $t = 0$ ms, b) $t = 2$ ms, c) $t = 4$ ms, d) $t = 6$ ms, e) $t = 8$ ms, f) $t = 10$ ms

einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme, die die erhebliche Eigenrotation der Bruchstücke verdeutlichen und die daraus resultierenden unterschiedlichen Aufprallsituationen erklären.

Wenn man die spezifischen Aufprallsituationen außer Acht lässt und als Kriterium für die Rückhaltefähigkeit das erstmalige Auftreten eines Anrisses wählt, so erhält man die in **Tabelle 3** angegebenen Rückhaltefähigkeiten. Den ersten Anriss zuzulassen, ist aus sicherheitstechnischer Sicht insofern gerechtfertigt, da hierbei noch eine genügende Energiereserve besteht, bevor es zum Durchschuss kommt. **Tabelle 3** zufolge nimmt die Rückhaltefähigkeit sowohl mit steigender Dicke der Prüfmuster als auch mit zunehmender Breite und abnehmender Festigkeit der Schleifscheiben zu. Eine Verdoppelung der Schleifscheibenbreite hatte dabei in etwa auch eine doppelt so hohe Rückhaltefähigkeit zur Folge.

Diskussion

Wie Bruchstücke auf eine trennende Schutzeinrichtung prallen, hängt u. a. von der Masse, den Abmessungen und der Drehzahl der rotierenden Schleifscheibe, der sich hieraus ergebenden Bruchstücksgeometrie und dem Verhältnis von translatorischer zu rotatorischer Bruchstücksenergie sowie dem Abstand der Spindelachse zur trennenden Schutzeinrichtung ab. Eine statistisch abgesicherte Ermittlung der Rückhaltefähigkeit erfordert deshalb für jede Schleifscheibenspezifikation eine Vielzahl von Versuchen, was den zeitlichen und finanziellen Rahmen dieser Arbeit überstiegen hätte. Ungeachtet der beschriebenen Problematik ergeben die durchgeführten Versuche zumindest orientierende Hinweise im Hinblick auf die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech und Polycarbonat gegenüber berstenden Schleifscheiben.

Die ermittelten Rückhaltefähigkeiten (**Tabelle 3**) lassen deutlich geringere Wandstärken bei der Konstruktion trennender Schutzeinrichtungen zu als bei Verwendung der Wanddickentabellen und Formeln nach DIN EN 13218 [1]. Nach dieser Norm lässt sich die Wanddicke einer Schutzeinrichtung aus Stahlblech nach folgender Beziehung ermitteln:

$$t_p = 0,4 \cdot E_{trans}^{0,37} \quad (E_{trans} < 100\,000 \text{ Nm}) \quad (5)$$

t_p bezeichnet dabei die Wanddicke, E_{trans}

Tabelle 3 Rückhaltefähigkeit von Stahlblech DC01 und Polycarbonat bei verschiedenen Schleifscheibenspezifikationen.

Werkstoff	Schleifscheibe		Rückhaltefähigkeit E in J
	D x T x H in mm	Druckfestigkeit in N/mm ²	
DC01; 1,5 mm	300 x 25 x 127	146	447
	300 x 25 x 127	80	627
DC01; 3,0 mm	300 x 25 x 127	186	829
	230 x 50 x 127	186	1 704
	250 x 50 x 127	146	2 659
PC; 8,0 mm	300 x 25 x 127	186	894
	230 x 50 x 127	186	1 674
	300 x 25 x 127	117	1 358

die translatorische Energie eines Schleifkörperbruchstücks. Aus Gl. (5) ergibt sich bereits bei einer Bruchstücksenergie von 400 Nm eine erforderliche Wanddicke von 3,7 mm. Beträgt die Bruchstücksenergie 2 600 Nm, wäre bereits eine Wanddicke von 7,3 mm erforderlich. Nach den vorliegenden Ergebnissen aus den Berstversuchen reichen bei den genannten Energien aber bereits Blechdicken von 1,5 mm bzw. 3 mm aus, um Bruchstücke zurückzuhalten. Die Ergebnisse bestätigen also die Einschätzung, wonach die Dimensionierung nach DIN EN 13218 nicht praxisgerecht ist und zu beträchtlich überdimensionierten Verkleidungen führt, mit allen daraus resultierenden Nachteilen, etwa im Hinblick auf Gewicht, Kosten, Bearbeit- und Handhabbarkeit.

Die Berstversuche mit realen Schleifscheiben bestätigen ferner zumindest von der Tendenz her die pauschalen Aussagen von Beschussversuchen mit zylindrischen Projektilen definierter Geometrie aus unterschiedlichen Schleifscheibenkeramiken [8; 9]. In diesen Versuchen, die ebenfalls mit 3-mm-Stahlblech DC01 und 8-mm-Polycarbonat durchgeführt wurden, zeigte sich eine Zunahme der Rückhaltefähigkeit mit abnehmender Projektilfestigkeit und steigendem Projektildurchmesser. Ähnlich wie in den Berstversuchen hatte in den Beschussversuchen eine zunehmende Scharfkantigkeit der Projektilstirnfläche eine Verringerung der Rückhaltefähigkeit zur Folge. Eine unmittelbare Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen aus Berstversuchen und denen aus Beschussversuchen besteht aber nicht. Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen kinematischen und energetischen Verhältnissen. Die im Berstversuch entstehenden Bruchstücke besitzen sowohl einen translatorischen als auch einen

rotatorischen Energieanteil, während die Projektile im Beschussversuch nur Translationsenergie besitzen.

Nachfolgendes Beispiel verdeutlicht, dass eine unmittelbare Vergleichbarkeit zwischen dem Berstversuch und dem Beschussversuch nicht besteht. Der Literatur [8; 9] zufolge liegt die Rückhaltefähigkeit von 3-mm-Stahlblech DC01 zwischen etwa 1 100 und 9 000 Nm, wenn der Beschuss mit 1,25 kg schweren Keramikprojektilen (Projektildurchmesser 40 mm) einer Druckfestigkeit von 142 N/mm² erfolgt. Die geringeren Werte gelten für den Beschuss mit scharfkantigen, die höheren Werte für den Beschuss mit stumpfen Projektilen. Im Berstversuch mit Schleifscheiben, deren Druckfestigkeit in etwa mit derjenigen der Projektilen vergleichbar ist, ergab sich bei annähernd vergleichbarer Masse der aufprallenden Bruchstücke eine Rückhaltefähigkeit von rd. 2 600 Nm (**Tabelle 3**). Der Beschussversuch kann bei nicht für das tatsächliche Schadensereignis repräsentativer Projektilstirnfläche mitunter also deutlich zu hohe Werte für die Rückhaltefähigkeit liefern.

Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen

Es wurden Berstversuche mit handelsüblichen keramisch gebundenen Schleifscheiben durchgeführt. Diesen Versuchen zufolge führt die Dimensionierung nach DIN EN 13218 [1] zu einer beträchtlichen Überdimensionierung der als trennende Schutzeinrichtungen dienenden Verkleidungen an ortsfesten Schleifmaschinen, bei denen keine Schleifkörperschutzhauben zum Einsatz kommen.

Berstversuche mit realen Schleifscheiben und Beschussversuche mit idealisierten Projektilen aus entsprechender Schleifscheibenkeramik lassen

zwar die gleichen Einflussgrößen und deren Wirkrichtung auf die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen, wie sie für trennende Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen Verwendung finden, erkennen, eine direkte Korrelation zwischen beiden Verfahren ist nach den vorliegenden Ergebnissen aber nicht gegeben. Die Werte für die Rückhaltefähigkeit liegen im Berstversuch mitunter deutlich niedriger als im Beschussversuch. Für die Auslegung trennender Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen ergibt sich hieraus die Konsequenz, dass der Berstversuch dem Beschussversuch als Nachweisverfahren für eine ausreichende Dimensionierung vorzuziehen ist. Demzufolge wäre nach derzeitigem Kenntnisstand bei der anstehenden Überarbeitung der EN 13218 der Berstversuch gegenüber dem Beschussversuch zu favorisieren. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dabei nicht allein die größte Translationsenergie der Bruchstücke maßgebend ist, sondern das Verhältnis der Translationsenergie zur Auftrefffläche. Schmalere Schleifscheiben können im Hinblick auf die

Rückhaltefähigkeit kritischer zu bewerten sein als breitere.

In weiteren Untersuchungen sollte der Einfluss verschiedener schleifscheiben- und maschinenspezifischer Parameter auf die Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen noch detaillierter bestimmt werden. TS 185

Autoren



Dr. **Detlef Mewes**, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin,
Dr.-Ing. **Peter Herbst**, Berufsgenossenschaft Holz und Metall, Hannover.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 13218: Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Ortsfeste Schleifmaschinen. Berlin: Beuth Verlag 2008.
- [2] DIN EN ISO 23125: Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Drehmaschinen. Berlin: Beuth Verlag 2010.
- [3] DIN EN 13128: Sicherheit von Werkzeugmaschinen – Fräsmaschinen (einschließlich Bohrmaschinen). Berlin: Beuth Verlag 2007.
- [4] DIN EN 12417: Sicherheit von Werkzeugmaschinen – Bearbeitungszentren. Berlin: Beuth Verlag 2007.
- [5] *Münnich, H.*: Beitrag zur Sicherheit von umlaufenden Schleifkörpern. Dissertation TH Hannover. Hötter: Kommissionsverlag H. E. Ummen 1956.
- [6] *Langbein, R.*: Maßnahmen zur Steigerung der Sicherheit an Hochgeschwindigkeitsschleifmaschinen. Dissertation RWTH Aachen 1976.
- [7] DIN ISO 525: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel – Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag 2000.
- [8] *Mewes, D.; Mewes, O.; Herbst, P.*: Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen. TÜ 49 (2008) Nr. 10, S. 48- 53.
- [9] *Mewes, D.; Mewes, O.; Herbst, P.*: Festigkeit von Werkstoffen bei Aufprallbeanspruchungen. MP Materials Testing 51 (2009) Nr. 4, S. 227-233.