

24.03.2011-Mew/st-

ABSCHLUSSBERICHT NR. 201120107

zum Forschungsvorhaben FP 304

(Laufzeit: 01.12.2009 bis 31.01.2011)

„Untersuchungen zur Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen
an ortsfesten Schleifmaschinen gegenüber wegfliegenden Schleifkörperbruchstücken“

gefördert aus Mitteln des Forschungsfonds
der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Spitzenverband der gewerblichen
Berufsgenossenschaften und der
Unfallversicherungsträger der
öffentlichen Hand

Institut für Arbeitsschutz der DGUV
Alte Heerstraße 111
53757 Sankt Augustin
Telefon +49 2241 231-02
Telefax +49 2241 231-2234
E-Mail ifa@dguv.de

SEB AG · BLZ 370 101 11
Konto-Nr. 1967403701

IBAN: DE81370101111967403701
BIC: ESSEDE5F370

Zuschriften bitte an das Institut
richten, nicht an Einzelpersonen

USt-ID-Nr. DE 123 382 489
Steuer-Nr. 222/5751/0325
Internet www.dguv.de/ifa

1. EINLEITUNG

1.1 Berufsgenossenschaftliche Relevanz und Problemstellung

Schleifmaschinen sind in vielen Branchen eingesetzte Werkzeugmaschinen. Durch nicht auf die tatsächlich auftretenden Bruchstückenergien ausgelegte trennende Schutzeinrichtungen kann es beim Bruch von kunstharz- oder keramisch gebundenen Schleifkörpern zu erheblichen Gefährdungen für den Maschinenbediener und die Maschinenumgebung kommen. Die Energie der Schleifkörperbruchstücke ist in vielen Fällen ausreichend, um schwerste und tödliche Verletzungen zu verursachen. Es ist im Interesse der gesetzlichen Unfallversicherung, dass nur sichere Maschinen für den Betreiber zur Verfügung gestellt werden.

Die Konstruktion und Gestaltung trennender Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen muss den Schutz der Bedienperson und der Maschinenumgebung vor wegfliegenden Schleifkörperbruchstücken gewährleisten. Werden Schleifkörperschutzhauben eingesetzt, kommen für deren Dimensionierung sogenannte Wanddickentabellen zur Anwendung. Kann aus technologischen Gründen eine Schleifkörperschutzhaube nicht verwendet werden, muss die Verkleidung des Bearbeitungsraumes die Schutzfunktion übernehmen. Die Werte der Wanddickentabellen lassen sich auf die Verkleidung aber nicht übertragen, da deren konstruktive Gestaltung und die resultierende Beanspruchung nicht mit denen der relativ starren Schutzhauben vergleichbar sind. Für die konstruktive Auslegung der Verkleidungen fehlen entsprechende Daten. Ein praxismgerechtes und standardisiertes Verfahren zum Nachweis einer ausreichenden Rückhaltefähigkeit dieser trennenden Schutzeinrichtungen steht ebenfalls nicht zur Verfügung.

1.2 Stand der Kenntnisse

Aufgrund umfangreicher früherer Untersuchungen über die Sicherheit von Schleifkörpern und Schleifmaschinen [1; 2] wird üblicherweise die translatorische Energie von Schleifkörperbruchstücken für die Dimensionierung der Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen zugrunde gelegt. Diese Energie erreicht ein Maximum für ein 134°-Bruchstück. Je nach Schleifkörperabmessungen und deren Arbeitshöchstgeschwindigkeit können Werte in der Größenordnung von mehreren 10.000 J erreicht werden.

Aus zahlreichen Untersuchungen [1; 3] ist bekannt, dass diese 134°-Bruchstücke in der Praxis auch tatsächlich auftreten. Dieses worst-case-Szenario wird für konventionelle Schleifkörper daher auch in den einschlägigen Sicherheitsbestimmungen zur Dimensionierung von Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen zugrunde gelegt.

Für Schleifkörperschutzhauben, die den Schleifkörper unmittelbar umgeben, sind auf dieser Grundlage bereits in der alten Unfallverhütungsvorschrift VBG 7n2 [4] und den Zulassungsgrundsätzen des Deutschen Schleifscheiben-Ausschusses (DSA) [5] sogenannte Wanddickentabellen entwickelt worden, die dann auch in modifizierter Form in die EN 13218 [6] übernommen worden sind. Sie geben in Abhängigkeit von den Schleifkörperabmessungen und der Arbeitshöchstgeschwindigkeit für den jeweiligen Schutzhaubenwerkstoff die erforderliche Mindestwanddicke an. Diese Werte beruhen zum großen Teil auf Erfahrungen und sind nur in geringen Umfang durch experimentelle Untersuchungen abgesichert worden. Der Vorteil solcher Tabellenwerke ist deren einfache Anwendung sowohl für den Konstrukteur als auch für Prüfstellen und Aufsichtspersonen.

Bei vielen heutigen Schleifanwendungen, z. B. beim Schleifen von Verzahnungen oder Turbinenschaufeln, macht die komplizierte Werkstückgeometrie die Anwendung einer Schleifkörperschutzhaube unmöglich. Bei diesen Maschinen muss die großräumige Verkleidung des Bearbeitungsbereichs bzw. der Gesamtmaschine die Funktion der trennenden Schutzeinrichtung übernehmen. Eine Dimensionierung dieser Vollverkleidung auf der Basis der Wanddickentabelle ist aber nicht praxisgerecht. Sie würde in vielen Fällen zu panzerähnlichen Verkleidungen führen, mit allen daraus resultierenden Nachteilen z. B. hinsichtlich Gewicht, Kosten und Handhabbarkeit.

Die europäische Sicherheitsnorm für Schleifmaschinen EN 13218 [6] sieht für diese Fälle einen Einzelnachweis der Rückhaltefähigkeit der trennenden Schutzeinrichtung durch Fliehkraftversuche vor. Dabei werden Schleifkörper gezielt bei deren Arbeitshöchstgeschwindigkeit innerhalb der Schutzeinrichtung zerstört und anschließend das aufgetretene Schadensausmaß beurteilt. Es sind mindestens drei Versuche unter identischen Bedingungen innerhalb einer trennenden Schutzeinrichtung durchzuführen. Dieses Verfahren ist extrem aufwendig und kostenintensiv und wird von den Herstellern i. a. nicht akzeptiert. Da auch die Wanddickentabellen nicht praxisgerecht anwendbar sind, besteht daher die Gefahr von Dimensionierungen, die keine ausreichende Sicherheit bieten.

Bei anderen Arten von Werkzeugmaschinen, wie etwa Dreh- und Fräsmaschinen [7; 8] sowie Bearbeitungszentren [9] wird die erforderliche Rückhaltefähigkeit durch Beschussversuche mit standardisierten Stahlprojektilen ermittelt. Der Entwicklung der Stahlprojektilen und des endgültigen Nachweisverfahrens gingen umfangreiche Untersuchungen des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) voraus [10 bis 12], die durch Untersuchungen am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin - zum Teil im Auftrag des Vereins deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V., Frankfurt - ergänzt wurden [13 bis 16]. Dabei wurde u. a. der Einfluss von Masse, Durchmesser und Stirnfläche der Projektilen, des Auftreffortes und der Werkstoffe auf die Rückhaltefähigkeit der Schutzeinrichtungen untersucht. Zur Verifizierung der Anwendbarkeit des Projektilbeschusses waren Beschussversuche mit Backen der Spannfüter von Drehmaschinen und mit Werkzeugkassetten von Fräsmaschinen erforderlich.

Zur Übertragbarkeit eines analogen Verfahrens zur Ermittlung der Rückhaltefähigkeit der trennenden Schutzeinrichtung an Schleifmaschinen sind bereits ähnliche Untersuchungen durchgeführt worden [17 bis 20]. Auch ihnen liegt die Überlegung zugrunde, das Schleifkörperbruchstück durch ein Projektil zu simulieren. Dazu wurden zunächst Untersuchungen durchgeführt zur Ermittlung des Einflusses des Projektilwerkstoffes auf die Rückhaltefähigkeit von standardisierten Proben aus Stahlblech und Polycarbonat. Dabei wurden Projektile aus gebräuchlicher Schleifkeramik unterschiedlicher Härte verwendet. In der Versuchsserie wurde für diesen Projektilwerkstoff außerdem der Einfluss des Projektildurchmessers, der Projektilmasse und der Geometrie der Projektilstirnfläche auf die Rückhaltefähigkeit untersucht. Die Parameter wurden so ausgewählt, dass ein Vergleich mit den Ergebnissen aus den umfangreichen Versuchen mit Stahlprojektilen möglich war.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Rückhaltefähigkeit der beschossenen Werkstoffe mit steigender Scharfkantigkeit, abnehmendem Durchmesser und zunehmender Festigkeit der aufprallenden Keramikprojekte 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 reagiert Stahlblech wesentlich empfindlicher auf eine erhöhte Scharfkantigkeit der Projektile als Polycarbonat. Auch der Einfluss der Projektilfestigkeit auf die Rückhaltefähigkeit war bei Polycarbonat geringer als bei Stahlblech.

Eine Gegenüberstellung der Rückhaltefähigkeiten von Stahlblech und Polycarbonat bei Beschuss mit keramischen Projektilen und Projektilen aus gehärtetem Stahl gleicher Geometrie und Masse zeigt, dass die Stahlprojekte für Stahlblech eine deutlich geringere Rückhaltefähigkeit liefern als die entsprechenden Keramikprojekte, deren Stirnflächen wegen der im Vergleich zu Stahlblech geringeren Festigkeit beim Aufprall teilweise abgerundet werden. Bei Beschuss von Polycarbonat spielen die unterschiedlichen Projektilwerkstoffe eine untergeordnete Rolle. Die Festigkeit der benutzten Stahl- wie auch der Keramikprojekte 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 diesen Ergebnissen scheint es prinzipiell möglich zu sein, die Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen für Schleifmaschinen durch Beschussversuche mit Projektilen abzuschätzen, deren Form, Abmessungen, Masse und Energieinhalt den Bruchstücken zerplatzender Schleifkörper entsprechen [18].

Eine Verifizierung dieser Ergebnisse aus Beschussversuchen mit Projektilen anhand von Berstversuchen mit Schleifkörpern ist bisher aber nur ansatzweise erfolgt. In diesen Untersuchungen [17; 18] wurden in einem entsprechend präparierten Fliehkraftprüfstand Schleifkörper zum Bruch gebracht. Die entstehenden Bruchstücke trafen auf in den Prüfstand eingebaute Prüfmuster aus Stahlblech und Polycarbonat auf.

Aufgrund der Platzverhältnisse in dem Prüfstand waren die Abmessungen der Prüfmuster kleiner als bei dem Beschuss mit Projektilen. Die erzielbaren Bruchstückenergien lagen nur in der Größenordnung von ca. 2700 J. Aufgrund der begrenzten Möglichkeiten mit dem vorhandenen Prüfstand waren Untersuchungen in einem für eine Verifizierung erforderlichen Umfang nicht möglich.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht darin zu klären, inwieweit Ergebnisse zur Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen für trennende Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen, die man in Beschussversuchen mit Projektilen definierter Geometrie gewonnen hat, auf das Verhalten bei realen Schleifkörperbrüchen übertragen werden können. Die gewonnenen Ergebnisse sollen genutzt werden, um ein praxismgerechtes Verfahren zur Prüfung und Bewertung der Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen zu entwickeln.

2. EXPERIMENTELLE METHODEN UND VERSUCHSMATERIAL

2.1 Ermittlung der Rückhaltefähigkeit

Um die Rückhaltefähigkeit von Werkstoffen gegenüber aufprallenden Schleifkörperbruchstücken möglichst realitätsnah ermitteln zu können, wurde der in den Bildern 1 und 2 dargestellte Prüfstand von der Firma Vahldiek, Schöningen entwickelt und gebaut. Im Wesentlichen besteht dieser Prüfstand aus einer motorisch angetriebenen Spindel, der Schleifscheibenaufnahme und drei Aufnahmen für Prüfmuster (rechts, links und oben). Die zu beurteilenden Werkstoffe wurden dabei so in die Aufnahmen eingesetzt, das sich allrandig eine Überdeckung von jeweils 25 mm ergab. Die Fixierung erfolgte mittels Klemmleisten und Spannpratzen. Der Abstand zwischen den Prüfmustern und der Drehachse betrug immer 500 mm.

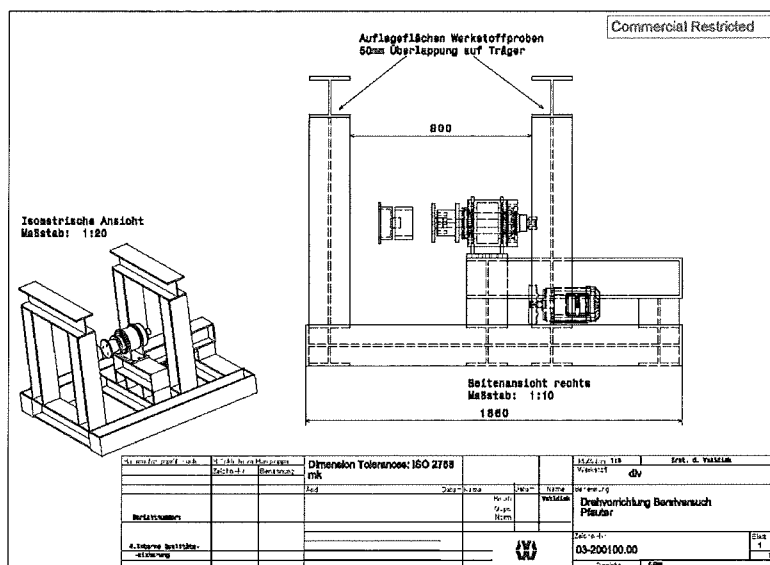


Bild 1: Zeichnerische Darstellung des Prüfstandes

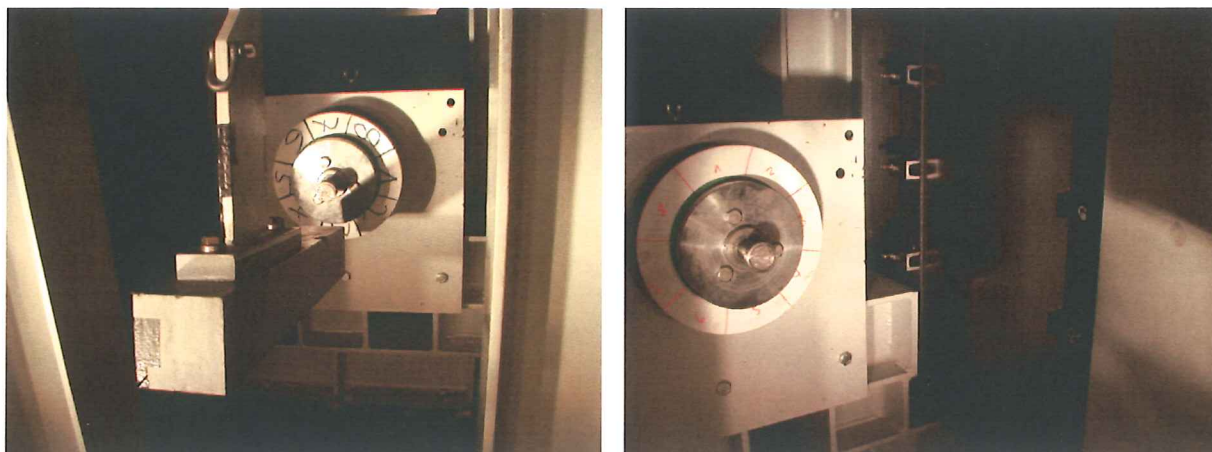


Bild 2: Ausgeführter Prüfstand mit aufgespannter Schleifscheibe

Nach dem Einsetzen der Prüfmuster wurde eine Schleifscheibe aufgespannt und anschließend bei einer bestimmten Drehzahl zum Bersten gebracht. Um im Verbindung mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu ermitteln, welches Bruchstück an welcher Stelle auf die Prüfmuster geprallt war, wurden auf der Schleifscheibe acht Segmente eingezeichnet und entsprechend nummeriert (Bild 2).

Als maßgeblich für die Beanspruchung der Werkstoffe und der hieraus gefertigten Schutzeinrichtungen wird die translatorische Bruchstückenergie angesehen [1; 2; 6]. Diese ist dann am größten, wenn die Masse des Bruchstückes rd. ein Drittel der Masse der Schleifscheibe entspricht. Um solche „Drittelbruchstücke“ zumindest annähernd zu erzeugen, mussten die Schleifscheiben durch drei definiert um Umfang im Abstand von 120° eingebrachte Sägeschnitte präpariert und über einen dreifach im Bohrungsbereich wirkenden Keilmechanismus gezielt zerstört werden. Dieser Keilmechanismus wurde durch den in Bild 2 zu erkennenden Fallhammer beim Aufschlag auf den Zentralbolzen ausgelöst.

Nach einem Versuch wurden die aufgetretenen Schäden an den Prüfmustern dokumentiert und den vorgefundenen Bruchstücken zugeordnet. Die translatorische Energie E_{trans} der Bruchstücke wurde dabei nach folgender Beziehung berechnet [6]:

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

m : Masse der Schleifscheibe

Q : Durchmesser Verhältnis

α : halber Bruchstückswinkel in °

$\hat{\alpha}$: halber Bruchstückswinkel in Bogenmaß $\left(\hat{\alpha} = \frac{\alpha^\circ \cdot \pi}{180^\circ} \right)$

v_{br} : Umfangsgeschwindigkeit beim Bruch

α wurde rechnerisch aus der Bruchstücksmasse m_{br} und der Schleifscheibenmasse m abgeschätzt:

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

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

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

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

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

Die Durchführung der Versuche und die Dokumentation der Ergebnisse erfolgte bei der Firma Vahldiek in Schöningen, die Auswertung der Versuche im Institut für Arbeitsschutz - IFA in Sankt Augustin.

2.2 Versuchsmaterialien

2.2.1 Schleifscheiben

Die Sprengversuche wurden mit keramisch gebundenen geraden Schleifscheiben der Form 1 nach DIN ISO 525 [21] durchgeführt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Verwendete Schleifscheiben

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

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

Die Schleifscheiben hatten je nach Spezifikation eine Masse zwischen 2,6 kg und 3,9 kg.

2.2.2 Untersuchte Werkstoffe

Im Hinblick auf ihr Rückhaltevermögen 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.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe

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

3. ERGEBNISSE

Die Versuchsergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen dokumentiert. Aufgeführt sind hierin die Bruchstücksmasse und der sich hieraus nach Gl. (2) ergebende halbe Bruchstückswinkel, die Bruchdrehzahl und die Bruchgeschwindigkeit nach Gl. (3) sowie die translatorische Bruchstücksenergie gemäß Gl. (1). Die Ergebnisse in den Tabellen wurden nach steigender Bruchstücksenergie geordnet. Daneben enthalten die Tabellen Angaben zum aufgetretenen Schaden an den Prüfmustern. Hierbei wurden zwischen einer bloßen Beulung (plastischen Verformung), einem Anriss, bei dem das Bruchstück aber noch zurückgehalten wurde, ohne den Arbeitsraum zu verlassen, und einem Durchschuss unterschieden (Bilder 3 bis 5).



Bild 3: Beulung



Bild 4: Anriss



Bild 5: Durchschuss

Weiterhin erwies es sich als zweckmäßig, zu vermerken, mit welcher Fläche die Bruchstücke auf die Prüfmuster auftrafen (Bilder 6 bis 8).



Bild 6: Auftreffen mit der Umfangsfläche



Bild 7: Auftreffen mit der Querschnittsfläche



Bild 8: Auftreffen mit der Bohrungsseite

Sequenzen aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme sind in dem Bild 9 zusammengestellt. Diese Aufnahmen verdeutlichen die erhebliche Eigenrotation der Bruchstücke, woraus sich die zuvor beschriebenen unterschiedlichen Aufprallsituationen ergeben.



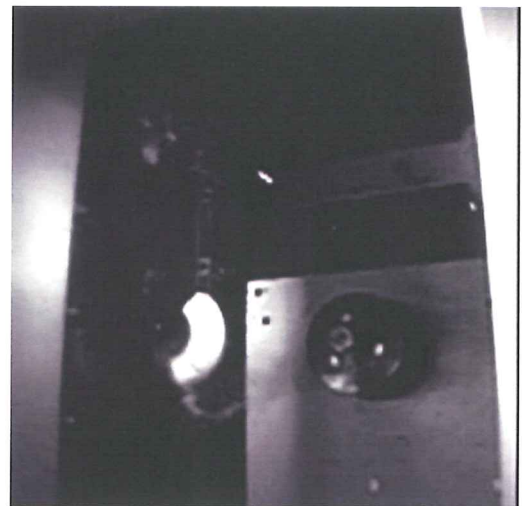
t = 0 ms



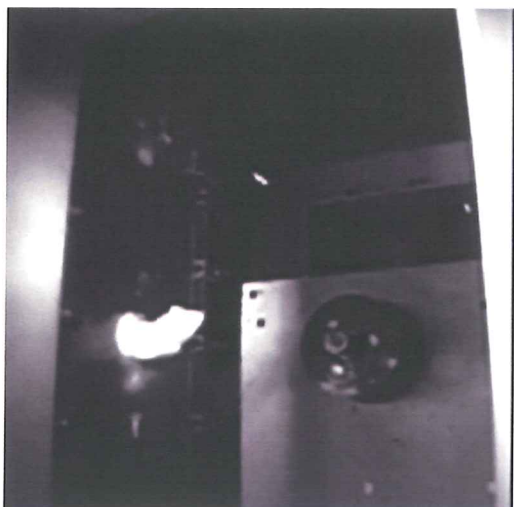
t = 2 ms



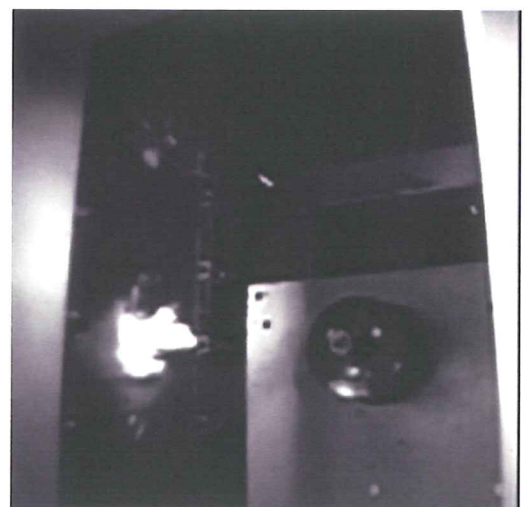
t = 4 ms



t = 6 ms



t = 8 ms



t = 10 ms

Bild 9: Flugverhalten eines Bruchstückes

Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Spitzenverband der gewerblichen
Berufsgenossenschaften und der
Unfallversicherungsträger der
öffentlichen Hand

Institut für Arbeitsschutz der DGUV
Alte Heerstraße 111
53757 Sankt Augustin
Telefon +49 2241 231-02
Telefax +49 2241 231-2234
E-Mail ifa@dguv.de

SEB AG · BLZ 370 101 11
Konto-Nr. 1967403701

IBAN: DE81370101111967403701
BIC: ESSEDE5F370

Zuschriften bitte an das Institut
richten, nicht an Einzelpersonen

UST-ID-Nr. DE 123 382 489
Steuer-Nr. 222/5751/0325
Internet www.dguv.de/ifa

3.1 Stahlblech DC01, 1,5 mm

Die Tabelle 3 enthält die Ergebnisse für 1,5 mm dickes Stahlblech DC01 bei Beanspruchung durch Bruchstücke härterer Schleifscheiben (Härtegrad: K, Druckfestigkeit: 146 N/mm²). Die Tabelle 4 gibt die Ergebnisse wieder, wenn die Beanspruchung durch weichere Bruchstücke (Härtegrad H10, Druckfestigkeit: 80 N/mm²) erfolgte. Die für diese Versuche verwendeten Schleifscheiben besaßen jeweils eine Breite von 25 mm.

Tabelle 3: Ergebnisse für Stahlblech DC01, 1,5 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 300 x 25 x 127; 35 A80 K3 V19)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min ⁻¹]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,40	23,2	0,405	3480	55,0	322	Beulung	Querschnittsfläche
0,40	23,2	0,405	3900	61,2	399	Beulung	Querschnittsfläche
0,55	31,4	0,548	3600	56,5	447	Anriss	Bohrungsseite
0,55	31,4	0,548	3600	56,5	447	Beulung	Umfangsfläche
0,60	34,8	0,608	3480	55,0	451	Beulung	Querschnittsfläche
0,60	34,8	0,608	3520	55,3	455	Beulung	Querschnittsfläche
0,70	40,6	0,709	3520	55,3	508	Beulung	Bohrungsseite
0,50	29,0	0,506	4080	64,0	529	Beulung	Bohrungsseite
0,50	29,0	0,506	4180	65,6	556	Anriss	Querschnittsfläche
1,00	58,1	1,013	3480	55,0	598	Beulung	Querschnittsfläche
1,30	75,5	1,317	3520	55,3	605	Beulung	Querschnittsfläche
0,70	40,6	0,709	3900	61,2	622	Anriss	Querschnittsfläche
0,60	34,8	0,607	4180	65,6	642	Beulung	Querschnittsfläche
0,40	23,2	0,405	5150	80,8	696	Anriss	Querschnittsfläche
0,70	40,6	0,708	4180	65,6	716	Anriss	Bohrungsseite
0,50	29,0	0,506	4830	75,8	742	Anriss	Querschnittsfläche/ Bohrungsseite
0,60	34,8	0,608	4640	72,8	789	Beulung	Umfangsfläche
0,55	31,9	0,557	4800	75,4	794	Anriss	Querschnittsfläche
0,85	49,3	0,860	4180	65,6	800	Anriss	Bohrungsseite
0,65	37,8	0,658	4640	72,8	841	Anriss	Querschnittsfläche/ Kante
0,60	34,8	0,608	4830	75,8	856	Anriss	Bohrungsseite

- Fortsetzung Tabelle 3 -

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,65	37,7	0,660	4830	75,8	905	Beulung	Querschnittsfläche
1,00	58,1	1,013	4800	75,4	1124	Durchschuss	Querschnittsfläche
0,80	46,5	0,810	5150	80,8	1179	Durchschuss	Querschnittsfläche
0,85	49,3	0,861	5150	80,8	1212	Anriss	Querschnittsfläche

Tabelle 4: Ergebnisse für Stahlblech DC01, 1,5 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 300 x 25 x 127; 35 A120 H10 V84)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,50	34,0	0,592	3620	56,8	405	Beulung	Querschnittsfläche
0,60	40,7	0,711	3620	56,8	459	Beulung	Querschnittsfläche
0,60	40,7	0,711	3620	56,8	459	Beulung	Umfangsfläche
0,65	44,1	0,789	4020	63,1	596	Beulung	Querschnittsfläche
0,25	16,7	0,291	6080	95,5	627	Anriss	Querschnittsfläche/ Kante
0,90	61,1	1,066	4020	63,1	680	Beulung	Querschnittsfläche
0,45	30,0	0,523	5200	81,6	771	Beulung	Querschnittsfläche
0,40	27,7	0,483	5850	91,8	879	Anriss	Querschnittsfläche
0,80	54,3	0,948	4650	73,0	881	Beulung	Umfangsfläche
0,90	61,1	1,066	4650	73,0	911	Beulung	Querschnittsfläche
0,55	37,4	0,652	5380	84,5	960	Beulung	Querschnittsfläche
0,55	37,4	0,652	5380	84,5	960	Beulung	Umfangsfläche
0,30	20,4	0,355	7000	109,9	983	Anriss	Querschnittsfläche
0,50	33,3	0,581	6080	95,5	1146	Beulung	Querschnittsfläche
0,50	33,3	0,581	6080	95,5	1146	Beulung	Umfangsfläche
0,90	60,0	1,047	5200	81,6	1155	Beulung	Querschnittsfläche
0,65	45,0	0,785	5850	91,8	1252	Anriss	Bohrungsseite
0,45	30,6	0,533	7000	109,9	1396	Beulung	Querschnittsfläche

- Fortsetzung Tabelle 4 -

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,90	62,3	1,087	5850	91,8	1417	Anriss	Querschnittsfläche
0,50	34,0	0,592	7000	109,9	1516	Durchschuss	Querschnittsfläche
0,60	40,0	0,698	6800	107,0	1641	Anriss	Bohrungsseite
0,60	40,0	0,698	6800	107,0	1641	Anriss	Querschnittsfläche
0,60	40,0	0,698	6800	107,0	1641	Beulung	Querschnittsfläche
0,60	40,7	0,711	7000	109,9	1717	Durchschuss	Querschnittsfläche

Beim Aufprall von Bruchstücken der härteren Schleifscheibe (Tabelle 3) kam es erstmals bei einer Bruchstücksenergie von 447 Nm zu Anrissen im Stahlblech. Das Bruchstück prallte hierbei mit seiner Bohrungsseite auf. Ein Durchschuss wurde erstmals bei einer Bruchstücksenergie von 1124 Nm beobachtet, wobei der Aufprall hier mit der Querschnittsfläche erfolgte. In dem Bereich zwischen diesen Energien kam es entweder lediglich zu plastischen Verformungen (Beulungen) oder aber zu Anrissen.

Der Aufprall mit der Querschnittsfläche oder der Bohrungsseite förderte tendenziell das Auftreten von Anrissen, während das Auftreffen mit der Umfangsfläche häufig lediglich Beulungen im Stahlblech bewirkte. Beispielsweise hinterließ ein Bruchstück mit einer Energie von 447 Nm lediglich eine Beulung, wenn es mit seiner Umfangsfläche aufprallte. Beim Aufprall mit der Querschnittsfläche traten dagegen schon Anrisse auf.

Im Falle der weicheren Schleifscheibe lag die Energie, bei der erstmalig ein Anriss beobachtet wurde, mit 627 Nm deutlich höher als bei der härteren Schleifscheibe, obwohl das Bruchstück das Stahlblech nicht vollflächig, sondern nur mit einer Kante seiner Querschnittsfläche traf. Ein Durchschuss war erstmalig bei einer Bruchstücksenergie von 1516 Nm festzustellen. Der Aufprall erfolgte dabei mit der Querschnittsfläche. Insgesamt gesehen, war auch in der Versuchsreihe mit den weicheren Scheiben der Bereich, in dem sowohl Beulungen als auch Anrisse auftraten, relativ groß.

3.2 Stahlblech DC01, 3 mm

Die Tabelle 5 gibt die Ergebnisse für 3 mm dickes Stahlblech DC01 wieder. Die Breite der gesprengten Schleifscheiben betrug hierbei 25 mm. Die Härte war herstellerseitig mit P angegeben, was einer Druckfestigkeit von 186 N/mm² entspricht.

Tabelle 5: Ergebnisse für Stahlblech DC01, 3 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 300 x 25 x 127; Ek1 120 P7 VB)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auffreißfläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,95	48,8	0,851	3000	47,1	463	Beulung	Querschnittsfläche
1,20	61,7	1,076	3000	47,1	502	Beulung	Querschnittsfläche
0,90	44,4	0,774	4030	63,3	829	Beulung	Umfangsfläche
1,15	58,3	1,017	4000	62,8	894	Beulung	Querschnittsfläche
1,15	58,3	1,017	4000	62,8	894	Durchschuss	Bohrungsseite/ Kante (extremer Kantenbeschuss)
1,10	54,2	0,946	4030	63,3	912	Beulung	Umfangsfläche
1,15	56,7	0,989	4030	63,3	927	Beulung	Bohrungsseite
1,20	60,0	1,047	4070	64,0	948	Beulung	Querschnittsfläche
0,65	32,5	0,567	4850	76,0	950	Beulung	Querschnittsfläche
0,85	42,5	0,741	4850	76,0	1149	Anriss	Querschnittsfläche/ Kante
0,95	47,5	0,829	4850	76,0	1223	Beulung	Bohrungsseite
1,15	59,1	1,031	5000	78,5	1382	Durchschuss	Querschnittsfläche
1,15	59,1	1,031	6000	94,2	1990	Durchschuss	Querschnittsfläche
1,15	59,1	1,031	6000	94,2	1990	Beulung	Umfangsfläche
0,60	30,0	0,523	7850	123,2	2343	Durchschuss	Bohrungsseite
0,70	35,0	0,610	7850	123,2	2641	Durchschuss	Bohrungsseite
0,70	35,0	0,610	7850	123,2	2641	Beulung	Bohrungsseite
0,75	38,0	0,663	8200	128,7	3016	Durchschuss	Bohrungsseite
0,85	43,1	0,752	8200	128,7	3275	Durchschuss	Bohrungsseite
1,15	59,1	1,031	7700	120,9	3277	Anriss	Umfangsfläche
0,90	45,6	0,795	8200	128,7	3385	Beulung (bei- nahe Anriss)	Umfangsfläche

Ein Durchschuss wurde erstmalig bereits bei einer Bruchstücksenergie von 894 Nm beobachtet, wobei das Bruchstück mit einer Kante der Bohrungsseite aufkam, wie entsprechende Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dokumentieren. Wenn das Bruchstück dagegen mit der Querschnittsfläche aufschlug, trat bei gleicher Bruchstücksenergie lediglich eine Beulung auf. Im Zuge der Versuche kam es bei 1149 Nm zu einem Anriss. Ein Durchschuss des Prüfmusters wurde erst wieder bei einer Energie von 1382 Nm ermittelt. Bei Energien zwischen rd. 3000 Nm und 3400 Nm traten alle drei Schadensformen auf.

Die Tabelle 6 gibt die Ergebnisse zur Rückhaltefähigkeit von 3 mm dickem Stahlblech DC01 wieder, wenn statt der 25 mm breiten Schleifscheiben solche mit einer Breite von 50 mm gesprengt wurden. Die Härte der Schleifscheiben entsprach derjenigen der schmalen Scheiben.

Tabelle 6: Ergebnisse für Stahlblech DC01, 3 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 230 x 50 x 127; Ek1 120 P7 VB)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
1,20	60,0	1,047	6500	78,3	1597	Beulung	Querschnittsfläche
0,45	22,5	0,392	9300	112,0	1704	Anriss	Querschnittsfläche (Kantenbeanspruchung)
0,50	25,0	0,436	9500	114,0	1936	Anriss (beinahe Durchschuss)	Querschnittsfläche (Kantenbeanspruchung)
0,65	27,5	0,480	9300	112,0	2026	Beulung	Umfangsfläche
0,65	32,5	0,567	9300	112,0	2322	Beulung	Querschnittsfläche
1,20	60,0	1,047	8300	99,9	2600	Beulung	Querschnittsfläche/ Umfangsfläche
1,20	60,0	1,047	8300	99,9	2600	Beulung	Querschnittsfläche
1,20	60,0	1,047	8300	99,9	2600	Beulung	Querschnittsfläche
0,90	45,0	0,785	9500	114,0	3010	Beulung	Querschnittsfläche
0,60	30,0	0,523	11000	132,0	3029	Anriss (beinahe Durchschuss)	Umfangsfläche
1,05	52,5	0,916	9300	112,0	3133	Beulung	Umfangsfläche
1,15	57,5	1,003	9300	112,0	3234	Anriss	Querschnittsfläche/ Umfangsfläche
0,70	35,0	0,611	11000	132,0	3411	Durchschuss	Querschnittsfläche
1,10	55,0	0,959	11000	132,0	4433	Durchschuss	Querschnittsfläche

In diesen Versuchen wurde ein Anriss erstmalig bei einer Energie von 1704 Nm beobachtet, wobei auch hier wieder eine extreme Kantenbeanspruchung vorlag. Darüber hinaus wurden Anrisse bei Energien von 1936 Nm, 3029 Nm und 3234 Nm festgestellt. Durchschüsse traten bei 3411 Nm und 4432 Nm auf.

Wie sich 3 mm Stahlblech DC01 beim Aufprall weicherer Schleifkörperbruchstücke (Härte H6, Druckfestigkeit 117 N/mm²) verhielt, gibt die Tabelle 7 wieder. Die Schleifscheibenbreite betrug hierbei 25 mm.

Tabelle 7: Ergebnisse für Stahlblech DC01, 3 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 300 x 25 x 127; 35 A120 H6 V84)

Bruchstück- masse m_{br} [kg]	halber Bruch- stückswinkel		Bruch- drehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruch- geschwindig- keit v_{br} [m/s]	transl. Bruch- stücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,80	49,6	0,865	3400	54,3	497	Beulung	Umfangsfläche
0,48	30,0	0,523	6000	94,2	1103	Beulung	Bohrungsseite
0,95	60,0	1,047	5000	78,5	1148	Beulung	Querschnittsfläche
0,95	60,0	1,047	5000	78,5	1148	Beulung	Umfangsfläche
0,95	60,0	1,047	5000	78,5	1148	Beulung	Bohrungsseite
0,70	43,0	0,750	6000	94,2	1432	Beulung	Querschnittsfläche
0,95	60,0	1,047	6000	94,2	1653	Beulung	Bohrungsseite
0,95	60,0	1,047	6800	107,0	2133	Beulung	Querschnittsfläche/ Bohrungsseite
0,60	37,2	0,649	8900	140,0	2872	Beulung	Querschnittsfläche
0,63	39,0	0,680	8900	140,0	2970	Beulung	Umfangsfläche
0,96	60,0	1,047	8100	127,0	3005	Beulung	Bohrungsseite
0,95	60,0	1,047	8900	140,0	3652	Anriss	Querschnittsfläche/ Bohrungsseite

Hiernach konnte im Falle der schmaleren Bruchstücke lediglich bei einer Energie von 3652 Nm ein Anriss erzielt werden. Eine Beanspruchung der Prüfmuster mit höheren Energien war wegen der zu geringen Bruchfestigkeit der Schleifscheiben nicht möglich. Drehzahlen über 8900 min^{-1} waren nicht zu realisieren.

Die Tabelle 8 enthält Ergebnisse für den Fall, dass die Stahlbleche mit Bruchstücken 50 mm breiter Scheiben beansprucht wurden, deren Festigkeit 146 N/mm^2 betrug. Ein Anriss trat danach erstmalig bei 2659 Nm auf, wobei das Bruchstück mit seiner Querschnittsfläche das Stahl-Prüfmuster traf. Bei 2910 Nm wurde wiederum nur eine Beulung beobachtet. Hierbei erfolgte der Aufprall mit der Umfangsfläche.

Tabelle 8: Ergebnisse für Stahlblech DC01, 3 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 250 x 50 x 127; 35 A80 K3 V19)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auffreißfläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
1,20	56,1	0,979	6000	78,5	1621	Beulung	Querschnittsfläche (Bruchstück „zerbröselt“)
1,20	56,1	0,979	6000	78,5	1621	Beulung	Umfangsfläche
1,20	56,1	0,979	6000	78,5	1621	Beulung	Bohrungsseite
1,30	60,0	1,047	7000	91,6	2275	Beulung	Umfangsfläche
1,30	60,0	1,047	7000	91,6	2275	Beulung	Umfangsfläche
1,30	60,0	1,047	7000	91,6	2275	Beulung	Umfangsfläche
0,70	32,3	0,563	9000	117,7	2659	Anriss	Querschnittsfläche
1,20	55,4	0,966	8000	104,7	2910	Beulung	Umfangsfläche

3.3 Polycarbonat, 8 mm

Die Ergebnisse für 8 mm dickes Polycarbonat sind in den Tabellen 9 bis 11 aufgelistet.

Tabelle 9: Ergebnisse für Polycarbonat, 8 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 300 x 25 x 127; Ek1 120 P7 VB)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auffreißfläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
1,15	58,3	1,017	3100	48,7	538	Beulung	Bohrungsseite
1,15	58,3	1,017	4000	62,8	894	Beulung	Querschnittsfläche
1,15	58,3	1,017	4000	62,8	894	Anriss	Bohrungsseite
0,40	20,6	0,359	6200	97,3	1025	Beulung	Bohrungsseite
1,05	54,0	0,942	6200	97,3	2065	Beulung	Umfangsfläche
1,10	56,6	0,987	6200	97,3	2099	Anriss (< 10 mm)	Querschnittsfläche
0,80	40,6	0,708	6800	106,8	2173	Beulung	Querschnittsfläche
1,10	55,8	0,973	6800	106,8	2552	Durchschuss	Querschnittsfläche

Tabelle 10: Ergebnisse für Polycarbonat, 8 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 230 x 50 x 127; Ek1 120 P7 VB)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
1,20	60,0	1,047	6000	72,0	1350	Beulung	Querschnittsfläche (rollt auf Umfang ab)
1,05	52,0	0,907	6800	82,0	1674	Anriss	Querschnittsfläche/ Kante
1,10	55,0	0,959	6800	82,0	1711	Beulung	Umfangsfläche
0,80	40,0	0,698	7500	90,0	1743	Beulung	Umfangsfläche
0,80	40,0	0,698	7500	90,0	1743	Beulung (beinahe Anriss)	Querschnittsfläche
1,20	60,0	1,047	7800	94,0	2300	Beulung	Umfangsfläche
1,30	65,0	1,134	8300	100,0	2634	Durchschuss	Querschnittsfläche/ Kante

Tabelle 11: Ergebnisse für Polycarbonat, 8 mm
(gesprengte Schleifscheiben: 300 x 25 x 127; 35 A120 H6 V84)

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,45	28,9	0,505	4500	71,0	587	Beulung	Bohrungsseite
0,45	28,9	0,505	4500	71,0	587	Beulung	Querschnittsfläche
0,50	32,1	0,561	4500	71,0	637	Beulung	Querschnittsfläche
0,80	51,4	0,897	4000	62,8	674	Beulung	Querschnittsfläche
0,85	54,6	0,950	4000	62,8	693	Beulung	Querschnittsfläche
0,35	21,7	0,379	5600	87,9	725	Beulung	Bohrungsseite
0,45	28,9	0,505	5200	81,6	773	Beulung	Bohrungsseite
0,45	28,9	0,505	5200	81,6	773	Beulung	Querschnittsfläche
0,80	49,6	0,866	4900	76,9	1030	Beulung	Umfangsfläche
0,80	49,6	0,866	4900	76,9	1030	Beulung	Umfangsfläche
0,80	49,6	0,866	4900	76,9	1030	Beulung	Umfangsfläche
0,60	37,2	0,649	5600	87,9	1132	Beulung	Querschnittsfläche
0,50	31,0	0,540	6000	94,2	1134	Beulung	Umfangsfläche
0,50	31,0	0,540	6000	94,2	1134	Beulung	Umfangsfläche

- Fortsetzung Tabelle 11 -

Bruchstücksmasse m_{br} [kg]	halber Bruchstückswinkel		Bruchdrehzahl n_{br} [min^{-1}]	Bruchgeschwindigkeit v_{br} [m/s]	transl. Bruchstücksenergie E_{trans} [Nm]	Schaden	Auftrefffläche des Bruchstücks
	α	$\hat{\alpha}$					
0,80	51,4	0,897	5200	81,6	1139	Beulung	Bohrungsseite
0,80	49,6	0,866	5600	87,9	1346	Beulung	Bohrungsseite
0,65	41,8	0,729	6000	94,2	1358	Beulung	Bohrungsseite/ Querschnittsfläche
0,65	41,8	0,729	6000	94,2	1358	Beulung	Bohrungsseite
0,80	51,4	0,897	6000	94,2	1517	Durchschuss	Querschnittsfläche/ Kante
0,95	59,0	1,030	6000	94,2	1647	Anriss	Umfangsfläche
0,60	38,6	0,673	8000	125,6	2291	Durchschuss	Querschnittsfläche/ Kante

Beim Aufprall von Bruchstücken einer härteren schmalen Schleifscheibe (Härtegrad: P, Druckfestigkeit: 186 N/mm², Breite: 25 mm) (Tabelle 9) wurde bereits bei einer Bruchstücksenergie von 894 Nm ein Anriss festgestellt. Das Bruchstück prallte hierbei mit seiner Bohrungsseite auf. Erfolgte der Aufprall dagegen mit der Querschnittsfläche, kam es nur zu einer Beulung der Polycarbonatscheibe. Eine Bruchstücksenergie von 2552 Nm führte zum Durchschuss, wobei das Bruchstück hierbei mit seiner Querschnittsfläche die Polycarbonatscheibe traf.

Wenn Bruchstücke einer breiteren Schleifscheibe (Breite: 50 mm) gleicher Festigkeit auf Polycarbonat prallten, wurde ein Anriss erst bei einer Energie von 1674 Nm beobachtet (Tabelle 10). Dabei traf das Bruchstück die Polycarbonatscheibe mit der Kante seiner Querschnittsfläche. Eine Energie von 2634 Nm führte zum Durchschuss, wobei das Bruchstück auch hier mit der Kante der Querschnittsfläche aufprallte.

Die Versuchsergebnisse für den Aufprall von Bruchstücken einer weicheren Scheibe (Härtegrad: H6, Druckfestigkeit: 117 N/mm²) sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Breite der gesprengten Schleifscheiben betrug hierbei 25 mm. Bruchstücksenergien zwischen 587 Nm und 1358 Nm bewirkten jeweils lediglich eine Beulung in den Polycarbonatscheiben. Dabei spielte es keine Rolle, ob die Bruchstücke mit der Bohrungsseite, der Umfangsfläche oder der Querschnittsfläche aufprallten.

Durchschüsse traten bei Energien vom 1517 Nm und 2291 Nm auf. Die Bruchstücke trafen die Polycarbonatscheiben dabei jeweils mit einer Kante der Querschnittsfläche. Zwischen den genannten Energien wurde bei einer Energie von 1647 Nm ein Anriss beobachtet. Der Aufprall des Bruchstückes erfolgte hierbei mit der Umfangsfläche.

4. DISKUSSION

4.1 Rückhaltefähigkeit von Stahlblech und Polycarbonat im Berstversuch

Im Zuge des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die Rückhaltefähigkeit von Stahlblech und Polycarbonat anhand von Berstversuchen mit realen Schleifkörpern ermittelt. Diese Versuche zeigten, dass die entstehenden Schleifscheibenbruchstücke in vielfältiger Weise mit ihrer Querschnittsfläche, Umfangsfläche oder Bohrungsseite auf trennende Schutzeinrichtungen prallen können. Ein mehr oder weniger punktueller Aufprall, z. B. 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.

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 dieses Forschungsvorhabens 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.

Wenn man die spezifischen Aufprallsituationen außer Acht lässt und, soweit aufgrund der vorliegenden experimentellen Daten möglich, als Kriterium für die Rückhaltefähigkeit das erstmalige Auftreten eines Anrisses wählt, so erhält man die in Tabelle 12 angegebenen Rückhaltefähigkeiten. Den ersten Anriss zuzulassen, ist aus sicherheitstechnischer Sicht insofern gerechtfertigt, als dass hierbei noch eine genügende Energiereserve besteht, bevor es zu Durchschüssen kommt.

Tabelle 12: Rückhaltefähigkeit von Stahlblech DC01 und Polycarbonat bei verschiedenen Schleifscheibenspezifikationen

Werkstoff	Schleifscheibe		Rückhaltefähigkeit E [J]
	D x T x H [mm]	Druckfestigkeit [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	1704
	300 x 25 x 127	117	3652
	250 x 50 x 127	146	2659
PC; 8,0 mm	300 x 25 x 127	186	894
	230 x 50 x 127	186	1674
	300 x 25 x 127	117	1358

Der Tabelle 12 entnimmt man, dass die Rückhaltefähigkeit auf der einen Seite mit steigender Materialdicke, auf der anderen Seite mit abnehmender Festigkeit und zunehmender Breite der aufprallenden Schleifscheibenbruchstücke größer wird. Beispielsweise hat bei gleicher Schleifscheibenfestigkeit eine Verdopplung der Schleifscheibenbreite in grober Näherung auch eine Verdopplung der Rückhaltefähigkeit zur Folge.

4.2 Vergleich der Rückhaltefähigkeit im Berstversuch und im Beschussversuch

Die Berstversuche mit realen Schleifscheiben bestätigen zumindest von der Tendenz her die pauschalen Aussagen von Beschussversuchen mit zylindrischen Projektilen definierter Geometrie aus unterschiedlichen Schleifscheibenkeramiken [18 bis 20]. 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 beim Kantenaufprall von Bruchstücken hatte in den Beschussversuchen eine zunehmende Scharfkantigkeit der Projektilstirnfläche eine Verringerung der Rückhaltefähigkeit zur Folge. Eine unmittelbare Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen aus Berstversuchen und denjenigen 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 [1; 2], während die Projektile im Beschussversuch nur Translationsenergie besitzen.

Das eine unmittelbare Vergleichbarkeit zwischen dem Berstversuch und dem Beschussversuch nicht besteht, verdeutlicht das nachfolgende Beispiel. Der Literatur [18 bis 20] zufolge liegt die Rückhaltefähigkeit von 3 mm Stahlblech DC01 bei rd. 9000 Nm, wenn der Beschuss mit 1,25 kg schweren Projektilen (Projektildurchmesser 40 mm) geringer Festigkeit (80 N/mm²) erfolgt. Die Form der Projektilspitze, stumpf oder scharfkantig, spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle, weil die Projektile im Moment des Aufpralls ohnehin völlig zerstört werden. Bei höherer Festigkeit (142 N/mm²) der Projektile liegen die Rückhaltefähigkeiten dagegen zwischen etwa 1100 Nm und 9000 Nm. Die geringeren Werte gelten für den Beschuss mit scharfkantigen, die höheren Werte für den Beschuss mit stumpfen Projektilen. Im Berstversuch mit Schleifscheiben, deren Festigkeit in etwa mit der Festigkeit der Projektile vergleichbar ist, ergaben sich bei annähernd vergleichbarer Masse der aufprallenden Bruchstücke Rückhaltefähigkeiten zwischen rd. 800 Nm und 3600 Nm (Tabelle 12). Gerade mit Blick auf weiche Schleifscheiben geringer Festigkeit liefert der Beschussversuch also deutlich zu hohe Werte für die Rückhaltefähigkeit.

4.3 Rückhaltefähigkeit im Berstversuch und nach DIN EN 13218

Die ermittelten Rückhaltefähigkeiten lassen deutlich geringere Wandstärken bei der Konstruktion trennender Schutzeinrichtungen zu als bei Verwendung der Wanddickentabellen und Formeln nach DIN EN 13218 [8]. Nach dieser Norm lässt sich die Wanddicke einer Schutzeinrichtung aus Stahlblech nach folgender Beziehung ermitteln:

$$t_p = 0,4 \cdot E_{\text{trans}}^{0,37} \quad (E_{\text{trans}} < 100000 \text{ Nm}) \quad (5)$$

t_p bezeichnet dabei die Wanddicke, E_{trans} die translatorische Energie eines 134°-Schleifkörperbruchstückes. Aus Gl. [5] ergibt sich bereits bei einer Bruchstücksenergie von 400 Nm eine erforderliche Wandstärke von 3,7 mm. Beträgt die Bruchstücksenergie 2600 Nm wäre bereits eine Wandstärke 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 und Handhabbarkeit.

4.4 Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen

Berstversuche mit realen Schleifscheiben und Beschussversuche mit idealisierten Projektilen aus entsprechender Schleifscheibenkeramik lassen zwar die gleichen Einflussgrößen und ihre 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 gerade bei Blechen deutlich niedriger als im Beschussversuch. Die Ursache hierfür dürfte in den unterschiedlichen Bewegungszuständen und energetischen Verhältnissen der aufprallenden Bruchstücke und Projektile liegen. Für die Auslegung trennender Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen ergibt sich hieraus die Konsequenz, dass der Berstversuch dem Beschussversuch vorzuziehen ist. Demzufolge wäre nach derzeitigem Kenntnisstand bei der anstehenden Überarbeitung der EN 13218 der Berstversuch gegenüber dem Beschussversuch zu favorisieren. Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass dabei nicht die größte Translationsenergie der Bruchstücke allein maßgebend ist, sondern das Verhältnis der Translationsenergie zur Auftrefffläche. Schmalere Schleifscheiben können im Hinblick auf die Rückhaltefähigkeit kritischer zu bewerten sein als breitere.

Die Rückhaltefähigkeit hängt von einer Vielzahl sich mitunter wechselseitig beeinflussender Parameter ab. Zu nennen sind hier z. B. die Festigkeit, Form und Masse der aufprallenden Schleifscheibenbruchstücke wie auch die kinematischen und energetischen Verhältnisse beim Aufprall auf die Schutzeinrichtung. Maschinenseitig spielt u. a. der Abstand der Drehachse zur Schutzeinrichtung eine wesentliche Rolle. In Verbindung mit der Eigenrotation der Bruchstücke bestimmt dieser Parameter, ob die Bruchstücke mit der Umfangsfläche, Querschnittsfläche oder Bohrungsseite auftreffen, woraus unterschiedliche Beanspruchungen der Schutzeinrichtung resultieren. Der Einfluss der genannten Parameter auf die Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen muss in weiteren Untersuchungen noch detaillierter bestimmt werden.

Angesichts der dargelegten Problematik sollte der Schleifmaschinenhersteller, sofern nach eingehender Prüfung möglich, immer eine Primärschutzhaube vorsehen, die die Schleifscheibe möglichst eng umschließt. Je enger die Schutzeinrichtung anliegt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Bruchstücke mit ihrer Umfangsfläche aufprallen. Solche Treffer sind wegen der großflächigen Energieeinleitung unkritischer als solche Aufprallsituationen, bei denen Bruchstücke punktuell oder linienförmig auftreffen.

5. SCHRIFTTUM

- [1] Münnich, H.: Beitrag zur Sicherheit von umlaufenden Schleifkörpern. Dissertation Kommissionsverlag H. E. Ummen, Höxter/Weser, 1956
- [2] Langbein, R.: Maßnahmen zur Steigerung der Sicherheit an Hochgeschwindigkeitsschleifmaschinen. Dissertation Aachen 1976
- [3] Siegmann, E.-O.: Das Bruchverhalten von Schleifkörperwerkstoffen bei wechselnden Belastungen. Dissertation Hannover 1975
- [4] Unfallverhütungsvorschrift „Metallbearbeitung; Schleifkörper, Pließt- und Polierscheiben; Schleif- und Poliermaschinen" (VBG 7n6) vom 1.Mai 1954 mit diversen Nachträgen, aufgehoben seit 01.01.2004
- [5] Sicherheitsregeln für fangende Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen. Unveröffentlichte Zulassungsgrundsätze des Deutschen Schleifscheiben-Ausschusses. Hannover 1988
- [6] DIN EN 13218: Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Ortsfeste Schleifmaschinen. Oktober 2008; Beuth Verlag, Berlin
- [7] DIN EN ISO 23125: Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Drehmaschinen. Oktober 2010; Beuth Verlag, Berlin
- [8] DIN EN 13128: Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Fräsmaschinen (einschließlich Bohrmaschinen). März 2007; Beuth Verlag, Berlin
- [9] DIN EN 12417: Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Bearbeitungszentren; März 2007. Beuth Verlag, Berlin
- [10] Mewes, D.; Trapp, R.-P.; Warlich, H.-J.: Trennende Schutzeinrichtungen - Die Aufprallfestigkeit von Werkstoffen prüfen und beurteilen. Materialprüfung 38 (1996) 9, S. 368 - 372
- [11] Mewes, D.; Trapp, R.-P.; Warlich, H.-J.: Festigkeit von Werkstoffen bei Aufprallbeanspruchungen. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 29 (1998), S. 258 - 262
- [12] Mewes, D.; Trapp, R.-P.; Warlich, H.-J.: Gestaltung und Dimensionierung von Sichtscheiben an Werkzeugmaschinen. Die BG (2001) 3, S. 128 -1 33
- [13] Forschungsbericht VDW 0209: Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen. Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V. (VDW), Frankfurt; 1997 und 1999
- [14] Forschungsbericht FWF 0211: Beurteilung der Eignung hochfester Werkstoffe bzw. Werkstoffverbunde für den Maschinenschutz unter den Gesichtspunkten des Leichtbaus und der Nachrüstung. Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e. V. (FWF), Frankfurt; 2004
- [15] Bold, J.: Trennende Schutzeinrichtungen für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Dissertation Berlin 2004 .
- [16] Uhlmann, E.; Ising, M.: Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen. Materialprüfung 41 (1999) Nr. 6, S. 252 - 257

- [17] BGIA-Abschlussbericht Nr. 2003 22097 mit Ergänzungen Nr. 2006 20969 zum Projekt 6061: Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen; 2006
- [18] Mewes, D.; Mewes, O.; Herbst, P.: Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen an ortsfesten Schleifmaschinen. Technische Überwachung TP Bd. 49 (2008) Nr. 10, S. 48 - 53
- [19] Mewes, D.; Mewes, O.; Herbst, P.: Festigkeit von Werkstoffen bei Aufprallbeanspruchungen. MP Materials Testing 51 (2009) Nr. 4, S. 227 - 233
- [20] Mewes, D.; Mewes, O.; Herbst, P.: Impact Resistance of Guards on Grinding Machines. JOSE (in press)
- [21] DIN ISO 525: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel – Allgemeine Anforderungen. Beuth, Berlin (1999)

Sankt Augustin, den 15.04.2011

Hannover, den 19.04.2011

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen
Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Im Auftrag

Berufsgenossenschaft
Holz und Metall
Im Auftrag


Dr.-Ing. Detlef Mewes


Dr.-Ing. Peter Herbst