# Leichtbau im Maschinenschutz - Umsetzungsstrategien und Konzepte

von Diplom-Ingenieur Michael Wittner aus Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades

> Doktor der Ingenieurwissenschaften - Dr.-Ing. -

#### genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

| Vorsitzender: | Prof. Dr. rer. nat. Schindler     |
|---------------|-----------------------------------|
| Gutachter:    | Prof. Dr. h. c. DrIng. E. Uhlmann |
| Gutachter:    | Prof. DrIng. B. Viehweger         |

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11. September 2007

Berlin 2008 D83 Schleifscheibe durch die Primärschutzhaube aufgefangen [1]. Im Sonderfall der Fertigung ohne Primärschutzhaube werden einzelne Bruchstücke der Schleifscheibe translatorisch abgeschleudert. Die Energie dieser Bruchstücke beträgt nur einen Bruchteil der Rotationsenergie der Schleifscheibe. Die in der Norm DIN EN 13218 [N2] vorgeschriebene Berstprüfung, bei der der Schleifkörper bei vorgesehener Arbeitshöchstgeschwindigkeit innerhalb der Maschine dreimal hintereinander zum Bersten gebracht werden muss, stellt die Schadenskinematik beim Fertigen ohne Primärschutzhaube nur unbefriedigend dar.

Sinnvoll und auch kostengünstig erscheint daher die Durchführung translatorischer Aufprallprüfungen mit definierten Prüfkörpern in Anlehnung an die bestehenden Normen zur Sicherheit von Drehmaschinen und Bearbeitungszentren (DIN EN 12415 [N3] und DIN EN 12417 [N4]) [123].

#### 2.4.2 Gefahrenbereiche an Werkzeugmaschinen

Nach EN ISO 121001-1 [N1] wird jeder Bereich in oder um eine Werkzeugmaschine als Gefahrenbereich definiert, in dem eine Arbeitsperson dem Risiko einer Verletzung oder Gesundheitsschädigung ausgesetzt ist. Wird die Maschinenumhausung als Grenzlinie betrachtet, dann kann der Gefahrenbereich einer Werkzeugmaschine in einen primären und einen sekundären Gefahrenraum unterteilt werden. Der primäre Gefahrenbereich schließt den Arbeitsraum der Maschine ein und der sekundäre die Maschinenumgebung. Eine weitere Unterteilung des primären Gefahrenraumes erfolgt nach Lehmann [56] in die Gefahrenbereiche erster und zweiter Ordnung. Die Gefahrenbereiche erster Ordnung beschreiben dabei einen Bereich radial um das Spannfutter beim Drehen bzw. radial um die Werkzeugaufnahme beim Fräsen und kennzeichnen die Flugbahnen tangential zur Umlaufkreisbahn abgeschleuderter Elemente, **Bild 2-14**.



Bild 2-14: Primärer Gefahrenbereich erster Ordnung einer Drehmaschine [INDEX]

Alle weiteren Flugbahnen abgeschleuderter Elemente an Werkzeugmaschinen, die beispielsweise durch eine Reflexion am Maschinengrundkörper oder anderer im Arbeitsraum befindlicher Maschinenteile hervorgerufen werden, werden durch den Gefahrenbereich zweiter Ordnung beschreiben, **Bild 2-15**.



Bild 2-15: Primärer Gefahrenbereich zweiter Ordnung einer Drehmaschine [INDEX]

#### 2.4.3 Werkstoffprüfung durch Aufpralluntersuchungen

Die Hauptanforderung an Baugruppen trennender Schutzeinrichtungen ist eine hohe Rückhaltefähigkeit der eingesetzten Materialien beim Aufprall von abgeschleuderten Elementen. Zur Ermittlung der Rückhaltefähigkeit wird in den Normen DIN EN 12415 [N3] und DIN EN 12417 [N4] ein Prüfverfahren beschrieben, bei dem Baugruppen und Materialien trennender Schutzeinrichtungen mit zylindrischen Projektilen stoßartig beansprucht und in Abhängigkeit von dem Aufprallergebnis in Widerstandsklassen eingeteilt werden. Das Prüfverfahren basiert auf Untersuchungsergebnissen zur Arbeitssicherheit an Drehmaschinen von Lehmann [56], der feststellte, dass die Schädigungswirkung von abgeschleuderten Spannfutterelementen im Wesentlichen auf den translatorischen Energieanteil zurückzuführen ist.

Bei dem in DIN EN 12415 [N3] bzw. DIN EN 12417 [N4] beschriebenen Aufprallprüfverfahren werden die 0,1 kg bis 2,5 kg schweren zylindrischen Projektile mittels einer Beschusseinrichtung translatorisch auf Geschwindigkeiten zwischen 32 m/s und 250 m/s beschleunigt.

Der Aufprall der Projektile erfolgt dabei rechtwinklig zur Oberfläche. Zielpunkte der Projektile sind die schwächsten und ungünstigsten Stellen des Baumusters. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Schutzeinrichtungsbaugruppe dem Aufprall des Projektils widersteht, und im Material keine Schädigungen wie An- oder Durchrisse aufgetreten sind.

#### - DIN EN 12417 – Sicherheit: Bearbeitungszentren

In Anlehnung an den Normentwurf DIN EN 12415 [N3] wurde die Aufprallprüfung auch in den Anhang zum Normentwurf DIN EN 12417 [N4] "Sicherheit: Bearbeitungszentren" aufgenommen. Prüfkörper ist hier ein Stahlzylinder mit einer Masse von 100g, **Bild 2-17**, der mit einer der Schnittgeschwindigkeit entsprechenden Geschwindigkeit auf das Prüfmuster abzuschießen ist. Im Gegensatz zum Normentwurf für die Drehmaschinen umfasst dieser auch die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Mitte 2001 wurde die DIN EN 12417 [N4] als gültige Norm bestätigt.

Dieses Prüfprojektil simuliert das Abschleudern einer kompletten Fräskassette. Die Prüfungen werden nicht in Widerstandsklassen eingeteilt, sondern der Normentwurf nennt verschiedene Werkstoffbeispiele, **Tabelle 2-5**.



Bild 2-17: Projektil nach DIN EN 12417, Masse 100g [N4]

| Material  | Dicke<br>d [mm] | Zugfestigkeit<br>R <sub>m</sub> [N/mm2] | Bruchdehnung<br>A [%] | Geschwindigkeit<br>V <sub>max</sub> [m/s] | Energie<br>E [Nm] |
|---|-----------------|---|-----------------------|---|-------------------|
|   | 1,5             | 3N3                                     | 28                    | 80  | 320               |
| St 12.02  | 3,0             | 405                                     | 28                    | 115                                       | 661               |
| 51 12.05  | 1,5 + 3,0*      | 369 / 405                               | 28                    | 150                                       | 1125              |
|   | 3,0 + 1,5*      | 405 / 369                               | 28                    | 140                                       | 980               |
| AIMg 3  | 5,0             | 242                                     | 18                    | 120                                       | 720               |
|   | 4,0             |   |                       | 85  | 361               |
| Polycar-  | 6,0             |   |                       | 100                                       | 500               |
| bonat**   | 8,0             | 69                                      |                       | 120                                       | 720               |
|   | 12,0            | 00                                      | 00                    | 150                                       | 1125              |
|   | 2 x 6,0         |   |                       | 170                                       | 1445              |
|   | 2 x 12,0        |   |                       | 230                                       | 2645              |
| PMMA  | 12,0            | 74                                      | 4                     | 25  | 31                |
| <ul> <li>* Auf der Arbeitsraumseite</li> <li>** Prüfergebnisse gelten für neuen Werkstoff ohne Berücksichtigung von Alterung</li> </ul> |                 |   |                       |   |                   |

Tabelle 2-5: DIN EN 12417 – Beispiele von Werkstoffen [N4]

Die Norm für die Bearbeitungszentren enthält eine breite Datenbasis an Werkstoffbeispielen. Für das 100 g-Normprojektil kann bis zu einer Prüfgeschwindigkeit von 230 m/s, entsprechend einer Schnittgeschwindigkeit von 13.800 m/min, ein Dimensionierungshinweis für Sichtscheiben aus Polycarbonat geliefert werden.

#### - DIN EN 12415 – Sicherheit: kleine Drehmaschinen

Die Sicherheit gegen abgeschleuderte Bruchstücke ist im Maschinenschutz von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund wurde 1992 eine Aufprallprüfung für Materialien von Maschinenkapselungen in den Anhang des Normentwurfes pr EN 12415 "Sicherheit kleine Drehmaschinen" aufgenommen.

Anfang 2000 wurde die DIN EN 12415 [N3] als gültige Norm bestätigt. Innerhalb der Norm wird ein Prüfverfahren beschrieben, mit dem die Aufprallfestigkeit von Materialien und kompletten Baumustern für trennende Schutzeinrichtungen an NC-Drehmaschinen zu bestimmen ist. Der Geltungsbereich der Norm beschränkt sich nur auf harte Aufsatzbacken und Futterdurchmesser bis max. 500 mm. Anhand der Abmaße für Standard-Dreibackenfutter werden drei verschiedene Prüfkörper in Masse und Geometrie definiert, **Bild 2-16** und **Tabelle 2-2**.



Bild 2-16: Projektil nach DIN EN 12415 [N3]

| Projektil |               |                   |  |  |  |
|-----------|---------------|-------------------|--|--|--|
| Masse m   | Durchmesser D | Stirnfläche a x a |  |  |  |
| kg        | mm            | mm x mm           |  |  |  |
| 0,625     | 30            | 19 x 19           |  |  |  |
| 1,25      | 40            | 25 x 25           |  |  |  |
| 2,5       | 50            | 30 x 30           |  |  |  |

Tabelle 2-2: Masse und Maße nach DIN EN 12415 Aufprallprüfung [N3]

ð

Die drei Prüfkörper stehen für drei Widerstandsklassen, welche verschiedene Spannfutterdurchmesser repräsentieren. Jede Widerstandsklasse ist in drei Untergruppen eingeteilt, **Tabelle 2-3**.

Die höchste Widerstandsklasse C3 entspricht einer Energie von 8000 Nm bei einer Projektilmasse von 2,5 kg. Nach  $E = \frac{1}{2}mv^2$  ist der Sicherheitsbeiwert s und die Erhöhung der Geschwindigkeit somit  $\sqrt{1,6}$  und wird als Faktor zur Umfangsgeschwindigkeit gerechnet, um die Aufprallgeschwindigkeit zu ermitteln.

| Wider-<br>stands-<br>klasse | Spann<br>Durchr<br>Dy | nzeug-<br>nesser | Umfangs-<br>geschwin-<br>digkeit | zulässige<br>Energie | Projektil-<br>maße | Projektil-<br>masse | Aufprall-<br>geschwin-<br>digkeit | Auf-<br>prall-<br>energie |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------------|
|                             | [m<br>über<br>z       | m]<br>bis<br>u   | [m/s]                            | [Nm]                 | [mm x<br>mm]       | [kg]                | [m/s]                             | [Nm]                      |
| A1                          |                       |                  | 25                               | 194                  |                    |                     | 32                                | 310                       |
| A2                          |                       | 130              | 40                               | 488                  | 30 x 19            | 0,625               | 50                                | 781                       |
| A3                          |                       |                  | 63                               | 1250                 |                    |                     | 80                                | 2000                      |
| B1                          |                       |                  | 40                               | 976                  |                    |                     | 50                                | 1562                      |
| B2                          | 130                   | 250              | 50                               | 1550                 | 40 x 25            | 1,25                | 63                                | 2480                      |
| В3                          |                       |                  | 63                               | 2500                 |                    |                     | 80                                | 4000                      |
| C1                          |                       |                  | 40                               | 1952                 |                    |                     | 50                                | 3124                      |
| C2                          | 250                   |                  | 50                               | 3100                 | 50 x 30            | 2,5                 | 63                                | 4960                      |
| C3                          |                       |                  | 63                               | 5000                 |                    |                     | 80                                | 8000                      |
|                             |                       |                  |                                  |                      | — · √1,6           | —·1,6 —             |                                   | <b>↑</b>                  |

| Umfangsgeschwindigkeit • | 1.6  | = Aufprallo | beschwir  | ndiakeit  |
|--------------------------|------|-------------|-----------|-----------|
|                          | 11,0 | / tarprang  | 300011111 | iaigitoit |

Tabelle 2-3: Widerstandsklassen nach DIN EN 12415 [N3]

Im Anhang C der DIN EN 12415 [N3] werden Hinweise zu Werkstoffen und deren Dimensionierung für den Einsatz in trennenden Schutzeinrichtungen gegeben, **Tabelle 2-4.** 

| Dicke d Zugfestigkeit Bruchdehnung                       |                        | Bruchdehnung              |          | Aufp | orall | wide | ersta | ands | skla | sser | ı  |    |
|--|------------------------|---------------------------|----------|------|-------|------|-------|------|------|------|----|----|
| Werkstoff  | [mm]                   | R <sub>m</sub><br>[N/mm²] | A<br>[%] | A1   | A2    | A3   | B1    | B2   | В3   | C1   | C2 | C3 |
|  | 2                      | 370                       | 28       | +    | +     | -    | -     | -    | -    | -    | -  | -  |
|  | 2,5                    | 370                       | 28       | +    | +     | -    | +     | -    | -    | +    | -  | -  |
| Otabliblash  | 3                      | 400                       | 28       | +    | +     | -    | +     | +    | -    | +    | -  | -  |
| Staniblech   | 4                      | 340                       | 25       | +    | +     | +    | +     | +    | +    | +    | +  | -  |
|  | 5                      | 300                       | 40       | +    | +     | +    | +     | +    | +    | +    | +  | -  |
|  | 6                      | 340                       | 25       | +    | +     | +    | +     | +    | +    | +    | +  | +  |
| AIMg3  | 5                      | 240                       | 18       | +    | +     | -    | +     | -    | -    | +    | -  | -  |
|  | 6                      | 68                        | 80       | +    | +     | -    | +     | -    | -    | -    | -  | -  |
|  | 8                      | 68                        | 80       | +    | +     | -    | +     | +    | -    | +    | -  | -  |
| Polycarbonat   | 10                     | 68                        | 80       | +    | +     | +    | +     | +    | -    | +    | +  | -  |
|  | 12                     | 68                        | 80       | +    | +     | +    | +     | +    | -    | +    | +  | -  |
|  | 2x8                    | 68                        | 80       | +    | +     | +    | +     | +    | +    | +    | +  | -  |
| Polycarbonat-<br>Verbund                                 | 2x12                   | 68                        | 80       | +    | +     | +    | +     | +    | +    | +    | +  | +  |
|  | 19                     | 68                        | 80       | +    | +     | +    | +     | +    | +    | +    | +  | +  |
| Sicherheitsglas<br>+ Polycarbonat-<br>Verbund            | Glas +<br>PC<br>6 + 18 |                           |          | +    | +     | +    | +     | +    | +    | +    | +  | +  |
| + Anforderungen erfüllt<br>- Anforderungen nicht erfüllt |                        |                           |          |      |       |      |       |      |      |      |    |    |

 

 Tabelle 2-4: Normative Hinweise zur Dimensionierung von Werkstoffen an trennenden Schutzeinrichtungen [N3]

# 2.5 Herkömmliche Materialien für den Einsatz in trennenden Schutzeinrichtungen

### 2.5.1 Allgemeines

In trennenden Schutzeinrichtungen werden zur Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit Wand- und Sichtscheibenmaterialien eingesetzt, die die kinetische Energie von abgeschleuderten Elementen an Werkzeugmaschinen beim Aufprall in elastische und plastische Verformungsenergie umwandeln.

#### 2.5.2 Materialien für den Einsatz in Maschinenschutzwänden

Gängige Wandmaterialien für Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen sind unlegierte und niedriglegierte Stähle, wie z. B. St12.03. Mit diesen Werkstoffen wurden am IWF Berlin zahlreiche Prüfungen durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Aufprallprüfergebnisse nach DIN EN 12415 [N3] auf die genannten Materialien bei Variation von Materialdicke, Projektilmasse und Projektilgeschwindigkeit zeigt **Tabelle 2-6**.



 Tabelle
 2-6:
 Widerstandsklassen
 verschiedener
 Schutzwandmaterialien
 nach

 DIN EN 12415 [N3]
 Image: Schutzwandmaterialien
 Schutzwandmateri
 Schutzwandmaterialien
 <t

Ein Beispiel aus der industriellen Praxis zeigt **Bild 2-18**. Dargestellt ist die Teilumhausung einer Hochgeschwindigkeitsdrehmaschine der Fa. INDEX. Die Maschinenverkleidung ist für die Widerstandsklasse C3 nach DIN EN 12415 [N3] ausgelegt und aus einem 6 mm dicken Stahlblech aufgebaut. In der dargestellten Aufspannung wurden die Rückhaltefähigkeit der Maschinenwand, der Schutzfenster sowie der Widerstand gegen schräge Treffer, wie sie im Falle eines Abprallers auftreten, untersucht.



Bild 2-18: Maschinenverkleidung einer Drehmaschine der Fa. INDEX

#### 2.5.3 Materialien für den Einsatz in Maschinenschutzfenstern

Als geeigneter Sichtscheibenwerkstoff für Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen hat sich Polycarbonat bewährt [76, 77]. Ergebnisse von Aufprallprüfungen auf Polycarbonat-Sichtscheiben zeigen, dass die Aufprallfestigkeit erwartungsgemäß mit zunehmender Materialdicke und Geschossmasse ansteigt.

Bei den durchgeführten Untersuchungen nach DIN EN 12415 [N3] konnte keine der

analysierten Polycarbonat-Sichtscheiben die Widerstandsklasse C3 erfüllen. Höhere Durchdringungswiderstände wurden nur durch die Kombination von mehreren Polycarbonat-Platten und einer damit verbundenen Gewichtserhöhung erzielt, **Tabelle 2-7**.



DIN EN 12415 [N3]

Ein Beispiel aus der industriellen Praxis zeigt **Bild 2-19**. Dargestellt ist der Zusammenbau und der konstruktive Aufbau eines Maschinenschutzfensters der Fa. SEGE. Das dargestellte Maschinenschutzfenster ist sowohl für den Einsatz in Drehmaschinen als auch in Bearbeitungszentren geeignet.



Bild 2-19: Maschinenschutzfenster der SEGE – Sicherheitsfenster GmbH

## 2.6 Zusammenfassung

In den Bildern 2-12 und 2-13 wird deutlich gezeigt, dass die tatsächlichen Gefährdungspotenziale sowohl bei der Fräsbearbeitung als auch bei der Drehbearbeitung weit über die in den Normen DIN EN 12415 [N3] bzw. DIN EN 12417 [N4] genannten Gefährdungen hinausgehen. Die in trennenden Schutzeinrichtungen üblicherweise eingesetzten Wandmaterialien sind demzufolge nur noch teilweise in der Lage diesen Energien sicher zu widerstehen. Es ist daher dringend erforderlich neue Materialien bzw. Materialverbünde und Konstruktionsprinzipien zu untersuchen, um rückhaltesichere und gewichtsoptimierte Konzepte für den Einsatz in der Werkzeugmaschine zu entwickeln.

Wie aus den Tabellen 2-6 und 2-7 deutlich wird, können die herkömmlich verwendeten Materialien die gestiegenen Sicherheitsanforderungen nicht mehr erfüllen. Auch eine Erhöhung der Wanddicken und damit der Masse kann dabei nicht unbedingt helfen, da die Schutzeinrichtungen zum Teil beweglich zu gestalten sind. Diese Erkenntnisse legen eine Untersuchung der Einsatzfähigkeit von neuen Werkstoffen bzw. Werkstoffverbünden aus dem Bereich des Leichtbaus, die neben einer hohen Steifigkeit auch dünne Wandstrukturen bzw. geringe Massen ermöglichen können, nahe.

#### 6.4 Sonderfälle

#### 6.4.1 Einleitung

Bei der Durchführung von Aufpralluntersuchungen liegt oft die Vermutung nahe, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Dicke der Werkstoffprobe und seinem Rückhaltevermögen existiert. Weiter wird davon ausgegangen, dass derselbe Werkstoff, in Abhängigkeit der Prüfbedingungen, immer die gleichen kritischen Durchdringungswiderstände aufweist. Durchgeführte Aufpralluntersuchungen haben beide Thesen widerlegt. Zum Einen weisen zahlreiche, hauptsächlich duktile Werkstoffe einen Bereich auf in welchem der Durchdringungswiderstand mit zunehmender Werkstoffdicke nicht linear ansteigt. Zum Anderen wird gezeigt, dass Werkstoffe mit der gleichen Werkstoffnummer aufgrund von im Rahmen der normativen Vorgaben schwankenden Anteilen von Legierungszusätzen und Herstellungsparametern stark unterschiedliche Durchdringungswiderstände aufweisen. Im Folgenden werden beide Verhaltensweisen anhand von Versuchsreihen verifiziert und diskutiert.

#### 6.4.2 Kink-Effekt

#### 6.4.2.1 Allgemeines

Für zahlreiche Werkstoffe gibt es einen Bereich, in welchem die Dicke der Werkstoffprobe weiter zunehmen kann, die Rückhaltefähigkeit aber konstant bleibt oder sogar abnimmt. Dieses Phänomen wird Kink-Effekt oder Knickstellen-Effekt genannt.

Das beschriebene Materialverhalten ist auch in früheren Beschussprüfungen aufgefallen. In der Arbeit von Corran, Shadbolt, Ruiz (1982) [15] wird ein ähnliches Verhalten beschrieben; die Autoren sprechen dort ebenfalls vom "Kink-Effekt".

In der Arbeit von Corran, Shadbolt, Ruiz wird mit einem Projektil gearbeitet, das in einem druckbeaufschlagten Lauf und einer Masse von beispielsweise 35 g bis zu einer Geschwindigkeit von v = 250 m/s beschleunigt werden kann. Die Form des Projektils ist grundsätzlich mit der in der DIN EN 12417 [N4] vorgesehenen Form vergleichbar – jedoch wurden zusätzlich Untersuchungen hinsichtlich unterschiedlicher Projektilstirnflächen und -formen gemacht.



#### Bild 6-11 zeigt den Versuchsstand und die vorhandenen Einrichtungen [15]

Bild 6-11: Versuchsstand nach Corran, Shadbolt, Ruiz [15]

Es konnten bei den Versuchen verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Form des Projektils (generelle Form, Kantenschärfe,...), dessen Materialeigenschaften und -härte, sowie die Belastbarkeit der Haltevorrichtung. Haupteinflusskriterium der Untersuchung ist jedoch die Dicke der Materialprobe. Getestet wurden die folgenden drei Materialien, **Bild 6-12**:

- unlegierter Stahl,
- Aluminiumlegierung und
- Edelstahl.

200 krit. m/s Aufprallgeschwindigkeit 160 V krit. 140 krit. Aufprallgeschwindigkeit v<sub>kit.</sub> Edelstahl 120 - unleg. Stahl – Aluminium 100 80 Projektil: 60 Masse: 34,6 g Durchmesser: 12,5 mm 40 spezifische Materialkennwerte 20 unbekannt 0 2 3 5 4 mm 7 Plattendicke t

Bild 6-12: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für Edelstahl, unlegierter Stahl und Aluminium [15]

Sehr deutlich ausgeprägt ist hier die nicht-lineare Verhaltensweise: Platten einer Dicke von 5 mm haben in etwa die gleiche Rückhaltefähigkeit wie Platten mit einer Dicke von 6,5 mm, bei einer Prüfung mit dem Projektil des Durchmessers 12,5 mm und einer Masse von 34,6 g. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Untersuchungen verschiedener Aluminiumlegierungen sowie die verschiedener austenitischer Edelstähle.

#### 6.4.2.2 Bestimmung geeigneter Werkstoffe zur Verifizierung des Kink-Effektes

Für die Verifizierung des Kink-Effektes und die Beurteilung der Auswirkung auf die konstruktive Gestaltung trennender Schutzeinrichtungen wurden exemplarisch die Werkstoffe Polycarbonat und Aluminium (AlMg3) ausgewählt. Beide Werkstoffe werden bereits als Materialien für Schutzumhausungen verwendet. Der Aluminiumwerkstoff bis zu einer Dicke von 6 mm, der Werkstoff Polycarbonat bis zu einer Dicke von 12 mm. Die Möglichkeit monolithische Polycarbonatplatten in einer Dicke von 15 mm herzustellen, ist erst seit 2005 möglich und daher noch nicht vollständig durch Aufprallprüfungen untersucht. Der Werkstoff Aluminium wurde bisher vornehmlich im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren eingesetzt und noch nicht in Dicken über 6 mm geprüft. Da beide Werkstoffe ein hohes Potenzial als Leichtbauwerkstoff für trennende Schutzeinrichtung besitzen, sind die Ziele dieser Versuchsreihe zum Einen die kritischen Durchdringungswiderstände der Werkstoffe zu bestimmen und zum Anderen den Einfluss des Kink-Effektes zu verifizieren

#### 6.4.2.3 Einfluss des Kink-Effektes auf den kritischen Durchdringungswiderstand

Für die Bestimmung der kritischen Durchdringungswiderstände werden die Prüfmuster wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben in die Versuchsmusteraufnahme eingespannt. Anschließend werden die Prüfmuster nach DIN EN 12417 [N4] geprüft und ihre Rückhaltefähigkeit bestimmt. Obwohl bereits eine Reihe von Ergebnissen für die Werkstoffe Aluminium (AIMg3) und Polycarbonat vorlagen wurden alle in der Versuchsreihe vorgesehenen Dicken noch einmal geprüft um Chargenschwankungen bzw. alterungsbedingte Veränderungen auszuschließen. Bei den Polycarbonatprüfmustern in den Dicken 14 mm, 24 mm und 26 mm handelt es sich um Verbundaufbauten, welche aus jeweils zwei Platten hergestellt wurden. Die Ergebnisse der Aufpralluntersuchungen der Verbundaufbauten sind nicht direkt mit den Ergebnissen der monolithischen Aufbauten zu vergleichen da hier die möglichen Verbindungstechniken (loser Verbund, fester Verbund) einen wesentlichen Einfluss haben. Zur quantitativen Darstellung des Kurvenverlaufs wurden sie dennoch mit herangezogen.

Die bereits zum Stand der Technik gehörenden Ergebnisse und die weiterführenden Erkenntnisse der Aufpralluntersuchungen an AIMg3 sind in **Tabelle 6-8** dargestellt.

| Materialdicke<br>d<br>[mm]    | kritische<br>Geschwindigkeit<br><sub>V<sub>krit</sub><br/>[m/s]</sub> | Energie<br>E<br>[Nm] |  |  |  |
|-------------------------------|---|----------------------|--|--|--|
|                               | Stand der Technik   |                      |  |  |  |
| 2                             | 25  | 31                   |  |  |  |
| 3                             | 45  | 101                  |  |  |  |
| 4                             | 55  | 151                  |  |  |  |
| 5                             | 60  | 180                  |  |  |  |
| 6                             | 103   | 530                  |  |  |  |
| weiterführende Untersuchungen |   |                      |  |  |  |
| 8                             | 175   | 1531                 |  |  |  |
| 10                            | 150   | 1125                 |  |  |  |

Tabelle 6-8: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für die Prüfung nach DIN EN 12417[N4] – AIMg3

In **Bild 6-13** sind die Ergebnisse zur Verdeutlichung eines möglichen Kink-Effektes noch einmal grafisch dargestellt.



Bild 6-13: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für die Prüfung nach DIN EN 12417 [N4] – AIMg3

Die bereits zum Stand der Technik gehörenden Ergebnisse und die weiterführenden Erkenntnisse der Aufpralluntersuchungen an Polycarbonat sind in **Tabelle 6-9** dargestellt.

| Materialdicke<br>d<br>[mm] | kritische<br>Geschwindigkeit<br><sub>Vkrit</sub><br>[m/s] | Energie<br>E<br>[Nm] |
|----------------------------|---|----------------------|
|                            | Stand der Technik   |                      |
| 4                          | 70  | 245                  |
| 6                          | 101   | 510                  |
| 8                          | 120   | 720                  |
| 10                         | 145   | 1051                 |
| 12                         | 150   | 1125                 |
| weiten                     | führende Untersuchu                                       | ngen                 |
| 14 (8+6)                   | 166   | 1377                 |
| 15                         | 149   | 1110                 |
| 24 (12+12)                 | 230   | 2645                 |
| 26 (8+10+8)                | 233   | 2714                 |

 Tabelle 6-9: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten f
 ür die Pr
 üfung nach DIN EN 12417
 [N4] – Polycarbonat

In **Bild 6-14** sind die Ergebnisse zur Verdeutlichung eines möglichen Kink-Effektes noch einmal grafisch dargestellt.



Bild 6-14: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für die Prüfung nach DIN EN 12417 [N4] – Polycarbonat