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. Dr.-Ing. E. Uhlmann
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. B. Viehweger

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11. September 2007

Berlin 2008
D83

Vorwort des Herausgebers

Eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung an Werkzeugmaschinen besitzt die trennende Schutzeinrichtung. Da ein Restrisiko infolge abgeschleuderter Werkstück-, Spannmittel- oder Werkzeugbruchstücke nicht vollständig verhindert werden kann, ist es deren Aufgabe, den Bediener vor freigesetzten Elementen zu schützen.
Zur Ermittlung der Aufprallfestigkeit von Baugruppen und Materialien trennender Schutzeinrichtungen wird in den Normen DIN EN 12415 „Kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren“ bzw. DIN EN 12417 „Bearbeitungszentren“ ein Prüfverfahren beschrieben, bei dem allseitig fest eingespannte Proben mit zylindrischen Körpern stoßartig beansprucht werden. Aufgrund der noch immer steigenden Arbeitsgeschwindigkeiten stoßen herkömmliche Werkstoffe bei der sicheren Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen an die Grenzen ihrer Belastbarkeit beziehungsweise ihrer massenbedingten Einsatzfähigkeit.
Das Ziel der am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin angefertigten Arbeit ist daher die Erweiterung der bestehenden Materialdatenbanken um alternative Leichtbauwerkstoffe sowie die Entwicklung von Umsetzungsstrategien und Konzepten.
Die Auswahl geeigneter Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde oder auch Konstruktionsprinzipien ist bisher nur mit entsprechendem Expertenwissen möglich und aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen sehr fehlerbehaftet. Neben der Auswahl geeigneter Werkstoffe und einer zweckmäßigen Leichtbaukonstruktion muss der Maschinenhersteller sowohl die Frage beantworten, ob durch den Einsatz kostenintensiver Leichtbaumaterialien ein wirtschaftlicher Vorteil zu erzielen ist als auch der Verpflichtung nachkommen, eine gleich bleibende oder sogar erhöhte Sicherheit der Maschinenumhausung zu gewährleisten.

Zur Minimierung des sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Risikos wird in der vorliegenden Arbeit ein Handlungsmodell für die Auswahl, die Entwicklung und die Einsatzgebiete von Leichtbaumaschinenumhausungen vorgestellt.

Berlin, den 13.03.2008 Eckart Uhlmann

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, dem Leiter des Fachgebietes Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, für die fachliche Unterstützung, die eingehende Durchsicht sowie die hilfreichen Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit. Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Viehweger, dem Leiter des Lehrstuhls Konstruktion und Fertigung an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, danke ich für das dieser Arbeit entgegengebrachte Interesse. Herrn Professor Dr. rer. nat. Schindler, dem Dekan der Fakultät V und Leiter des Fachgebietes Kraftfahrzeuge, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Ich danke dem Verein deutscher Werkzeugmaschinenhersteller (VDW), Frankfurt/Main für die Möglichkeit des fachlichen Austausches mit zahlreichen Industriepartnern, ohne deren Hinweise die große Praxisnähe nicht erreichbar gewesen wäre.

Ich danke allen Kollegen für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen. Besonders seien hier die Kollegen Dipl.-Ing. Christian Neumann, Dr.-Ing. Jörg Bold, Dipl.-Ing. Philipp Marcks und Dipl.-Ing. Bernd Duchstein genannt, denen ich mich mehr als nur fachlich verbunden fühle.

Für Ihre qualifizierte und engagierte Mitarbeit bin ich den zahlreichen Studien- und Diplomarbeitern sowie den studentischen Mitarbeitern zu Dank und Anerkennung verpflichtet. Mein besonderer Dank gilt hierbei den Herren Dipl.-Ing. Ulrich Bubolz sowie Dipl.-Ing. Chris Neumann, deren Engagement und hohe Motivation in besonderer Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern sowie meiner lieben Frau Sandra und unseren Kindern Lennart und Mattis für Liebe, Geborgenheit und Verständnis während der vielen Wochenenden und langen Abende, die für die Erstellung dieser Arbeit erforderlich waren.

Berlin, den 13.03.2008 Michael Wittner

0 Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen 1
1 Einleitung 5
2 Stand der Technik 7
2.1 Einleitung 7
2.2 Leichtbau 7
2.2.1 Entwicklung und Potenzial 8
2.2.2 Motivation und Ziel 9
2.2.3 Problemstruktur im Leichtbau 10
2.2.4 Berechnungsmethoden 14
2.3 Hochgeschwindigkeitsbearbeitung 20
2.3.1 Allgemeines 20
2.3.2 Hochgeschwindigkeitsmaschinen 23
2.3.3 Gefährdungen an Werkzeugmaschinen der HSC-Bearbeitung 24
2.4 Arbeitssicherheit an Werkzeugmaschinen 24
2.4.1 Allgemeines 24
2.4.2 Gefahrenbereiche an Werkzeugmaschinen 27
2.4.3 Werkstoffprüfung durch Aufpralluntersuchungen 28
2.5 Herkömmliche Materialien für den Einsatz in trennenden Schutzeinrichtungen 32
2.5.1 Allgemeines 32
2.5.2 Materialien für den Einsatz in Maschinenschutzwänden 33
2.5.3 Materialien für den Einsatz in Maschinenschutzfenstern 34
2.6 Zusammenfassung 36
3 Zielsetzung und Handlungsmodell für Auswahl und Entwicklung von Leichtbaumaschinenumhausungen 37
4 Leichtbaustrategien und Umsetzungsmöglichkeiten 41
4.1 Einleitung 41
4.2 Leichtbauweisen 41
4.2.1 Allgemeines 41
4.2.2 Differentialbauweise 42
4.2.3 Integralbauweise 43
4.2.4 Verbundbauweise 45
4.3 Zusammenfassung 46
5 Werkstoffauswahl 48
5.1 Einleitung 48
5.2 Neue Werkstoffe für den Maschinenschutz 48
5.2.1 Allgemeines 48

5.2.2 Werkstoffauswahl 49
5.2.3 Werkstoffeigenschaften 56
5.3 Zusammenfassung 62
6 Durchführung von Aufpralluntersuchungen zur Bestimmung des Durchdringungswiderstandes 63
6.1 Einleitung 63
6.2 Durchführung normativer Aufprallprüfungen 64
6.2.1 Allgemeines 64
6.2.2 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Ermittlung optimierter Prüfmusteraufbauten 66
6.2.3 Ermittlung des kritischen Durchdringungswiderstandes der optimierten Prüfmuster 66
6.2.4 Einfluss der Werkstoff- bzw. Verbundeigenschaften auf den Durchdringungswiderstand 72
6.2.5 Zusammenfassung 74
6.3 Entwicklung einer Prüfvorschrift für die Ermittlung des kritischen Durchdringungswiderstandes bei Mehrfachbeschuss 76
6.3.1 Allgemeines 76
6.3.2 Definition des Mehrfachbeschusses 76
6.3.3 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Bestimmung des kritischen Durchdringungswiderstandes bei Mehrfachbeschuss 77
6.3.4 Untersuchung der Werkstoff- bzw. Verbundeigenschaften bei Mehrfachbeschuss 78
6.3.5 Zusammenfassung 81
6.4 Sonderfälle 83
6.4.1 Einleitung 83
6.4.2 Kink-Effekt 83
6.4.2.1 Allgemeines 83
6.4.2.2 Bestimmung geeigneter Werkstoffe zur Verifizierung des Kink-Effektes 85
6.4.2.3 Einfluss des Kink-Effektes auf den kritischen Durchdringungswiderstand 85
6.4.2.4 Modellbildung und mathematische Herleitung des Kink-Effektes 88
6.4.2.5 Hinweise zur Konstruktion trennender Schutzeinrichtungen unter Berücksichtigung des Kink-Effektes 93
6.4.3 Einfluss der Legierungszusammensetzung auf das Aufprallverhalten austenitischer Edelstähle 94
6.4.3.1 Allgemeines 94

6.4.3.2 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Verifizierung des Einflusses verschiedener Legierungselemente auf den kritischen Durchdringungswiderstand 95

6.4.3.3 Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzung der Legierungselemente auf den kritischen Durchdringungswiderstand 97

6.4.3.4 Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Zusammensetzung der Legierungselemente und dem kritischen Durchdringungswiderstand 100

6.4.3.5 Empfehlungen für den Einsatz austenitischer Edelstähle in trennenden Schutzeinrichtungen 103

7 Entwicklung von Methoden zur Vorhersage der Leichtbaugüte 104

7.1 Einleitung 104

7.2 Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Bestimmung des kritischen Durchdringungswiderstandes 104

7.2.1 Allgemeines 104

7.2.2 Entwicklung einer Methodik zur Verifizierung und Modifizierung der gegebenen Formeln 106

7.2.3 Verifizierung und Modifizierung der gegebenen Formeln 107

7.2.4 Beurteilung der Anwendbarkeit der modifizierten Formel 115

7.2.5 Zusammenfassung 116

7.3 Entwicklung einer Leichtbaukennzahl für den Maschinenschutz 117

7.3.1 Allgemeines 117

7.3.2 Herleitung einer Leichtbaukennzahl für den Impactfall 117

7.3.3 Verifizierung der Leichtbaukennzahl 120

7.3.4 Beurteilung der Anwendbarkeit der entwickelten Leichtbaukennzahl für den Impact-Fall 121

7.3.5 Zusammenfassung 121

8 Untersuchungen der schalltechnischen Eigenschaften der für den Impact-Fall optimierten Prüfmuster 123

8.1 Einleitung 123

8.2 Referenzschallmessung an einem Bearbeitungszentrum 123

8.2.1 Allgemeines 123

8.2.2 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Durchführung von Referenzschallmessungen 124

8.2.3 Bestimmung der Schallleistung des untersuchten Bearbeitungszentrums 127

8.2.4 Zusammenfassung 129

8.3 Bestimmung des Schalldämmmaßes der optimierten Prüfmuster 129

8.3.1 Allgemeines 129

8.3.2 Entwicklung einer Prüfmethodik und Aufbau eines Prüfstandes zur Bestimmung des bewerteten Luftschalldämmmaßes der optimierten Prüfmuster 130
8.3.3 Bestimmung des bewerteten Luftschalldämmmaßes der optimierten Prüfmuster 133
8.3.4 Einfluss der Werkstoffe bzw. der Prüfmusteraufbauten auf die Luftschalldämmung 139
8.3.5 Empfehlungen zur Umsetzung schalldämmender Maschinenumhausungen 142
9 Umsetzung der Ergebnisse 144
9.1 Einleitung 144
9.2 Auswertung und Einsatzempfehlungen 145
9.2.1 Auswertung der Auswahlkriterien 145
9.2.2 Erstellen der Anforderungsliste 145
9.2.3 Erstellen der Auswahlliste 148
9.2.4 Zusammenfassung 151
9.3 Umsetzungsmöglichkeiten für die Praxis 152
9.3.1 Potenzial und Nachfrage 152
9.3.2 Praxisbeispiel Maschinentür 154
9.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse 157
9.4.1 Allgemeine Grundlagen zur Wirtschaftlichkeitsrechnung 157
9.4.2 Investitionsrechenverfahren 159
9.4.3 Kostenvergleichsrechnung 160
9.4.4 Gesamtkostenvergleich 161
9.4.5 Stückkostenvergleich 164
9.4.6 Amortisationsrechnung 165
9.4.7 Diskussion der Ergebnisse 167
10 Zusammenfassung und Ausblick 170
11 Literaturverzeichnis 180
12 Anhang 194

0 Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erläuterung
A	%	Bruchdehnung
a	mm	Trefferabstand
C		Proportionalitätsfaktor
c	Ohm	Wellenwiderstand
c_T	N/mm²	Torsionssteifigkeit
D	mm	Durchmesser
D_{Sp}	mm	Spannfutterdurchmesser
E	N/mm²	Elastizitätsmodul
E	Nm	Aufprallenergie
$E_{kin.}$	Nm	Kinetische Energie
e	mm	Weite der Scherzone
F_E	Kg	Eigenlast
F_G	Kg	Gesamtlast
FK	€	Fixkosten
f	Hz	Frequenz
f_g	Hz	Resonanzfrequenz
g	m/s²	Gravitationskonstante
G_{zus}	€	Gewinn der Zusatzproduktion
i	%	Kalkulationszinssatz
K	€	Kosten (allgemein)
K_A	€	Kalkulatorische Abschreibungen pro Jahr
K_{pr}	€	Produktionskostendifferenz
K_z	€	Kalkulatorische Zinsen pro Jahr
L	dB	Messflächen-Schalldruckpegel
L_T	€	Liquidationserlös
LBK		Leichtbaukennzahl
L´p	dB	Schalldruckpegel
L“p	dB	Fremdschallpegel
LS	dB	Messflächenmaß

M_0	Nm	Plastisches Verformungsnachgiebigkeitsmoment
m“	g/m²	Flächengewicht
N_0	N	Plastische Membrankraft
n	min^{-1}	Drehzahl
P_E	W	Empfangsseitig durchgelassene Leistung
P_S	W	Sendeseitig auftreffende Leistung
R	dB	Schalldämmaß
R_a	µm	Rauheitswert, arithmetischer Mittelwert der Profilordination
R_{eH}		Streckgrenze
R_m	N/mm²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm²	Dehngrenze
R_W	dB	Bewertetes Schalldämmmaß
R_z	mm	Rauheitswert, größte Höhe des Oberflächenprofils
T_A	a	Amortisationszeit
T_N	a	Nutzungsdauer
t	mm	Dicke
VK	€	Variable Kosten
v	m/s	Geschwindigkeit
$v_{max.}$	m/s	Max. Aufprallgeschwindigkeit
$v_{prüf.}$	m/s	Aufprallprüfgeschwindigkeit
t	s	Zeit
L	mm	Länge
W_D	Nm	Durchdringungswiderstand
$W_{D,krit.}$	Nm	Krit. Durchdringungswiderstand
x_S		Stückzahl

Griechische Buchstaben

Zeichen	**Einheit**	**Erläuterung**
α		Vergrößerungsfaktor
τ_y	N/mm²	Scherspannung
γ_f	N/mm²	Krit. Scherspannung

ε_θ	N/mm²	Umfangsdehnung
ε_r	N/mm²	Radiale Dehnung
κ_r		Radiale Krümmung
κ_θ		Umfangskrümmung
σ_y	N/mm²	Materialnachgiebigkeitsspannung bei 50 Hz

Abkürzungen

AFK	Aramidfaserverstärkte Kunststoffe
AlMg3	Aluminium
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BG	Berufsgenossenschaft
BGV	BG-Vorschrift
BIA	Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, Sankt Augustin
BK	Berufskrankheiten
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CF	Cash Flow
CFK	Kohlefaserverstärkte Kunststoffe
CMK	Ceramic Matrix Composites
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FEM	Finite-Elemente-Methode
FWF	Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V.
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
HSC	High Speed Cutting
HSM	High Speed Machining
HVM	High Velocity Machining
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Berlin
IWU	Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz

LCA	Life Cycle Assesssment
LSM	Luftschall-Schutz-Maß
MMK	Metal Matrix Composites
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
NC	Numerical Control
Ni	Nickel
PC	Polycarbonat
PMC	Polymer Matrix Composites
PMMA	Polymethylmethacrylat
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Darmstadt
PTZ	Produktionstechnisches Zentrum Berlin
PVC	Polyvinylchlorid
S	Schwefel
Si	Silizium
St	Stahl
UVV	Unfallverhütungsvorschrift
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V., Frankfurt am Main
VMBG	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften

1 Einleitung

Seit Beginn der 1980er Jahre steht das Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) im engen Dialog mit der nationalen und internationalen Werkzeugmaschinenindustrie, den Berufsgenossenschaften und dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW), um der ständig wachsenden Gefährdung durch abgeschleuderte Werkstück- oder Werkzeugbruchstücke aufgrund der steigenden Dynamik von Werkzeugmaschinen durch geeignete Schutzkonzepte zu begegnen.
Meilensteine dieser Zusammenarbeit sind erste Empfehlungen zum Einsatz von Polycarbonat in Maschinenschutzfenstern, die Klassifizierung der Gefährdungen durch abgeschleuderte Elemente bei der Dreh- und Fräsbearbeitung, die Entwicklung von Prüfvorschriften für Kapselungsmaterialien, erste Empfehlungen für eine Ersatzprüfung von Maschinenumhausungen im Bereich der Hochgeschwindigkeitsschleifbearbeitung sowie die Ableitung von Dimensionierungshinweisen anhand von Aufprallprüfungen und FEM-Berechnungen. Aufgrund dieser Untersuchungen sind die Werkzeugmaschinenhersteller heute in der Lage, den Maschinenbediener durch entsprechend dimensionierte Maschinenkapselungen vor den aus den Bearbeitungsprozessen resultierenden Gefährdungen weitestgehend zu schützen.
Die hohe Präventionssicherheit bedingt in der konventionellen Stahlblechbauweise spezifische Kapselungsmassen von durchschnittlich 40 kg/m² für die Dreh- und Schleifbearbeitung und bis zu 60 kg/m² für die Fräsbearbeitung. Hieraus wird deutlich, dass nicht nur die Verarbeitung der benötigten Blechdicken von bis zu 10 mm höchste Anforderungen an die Bearbeitungsmaschinen stellt, sondern auch die Handhabung bewegter Teile wie Maschinentüren aufwändige Automatisierungslösungen erfordert. Diese Problematik führt zu Überlegungen, potenzielle Leichtbaustrategien, wie sie in den Bereichen des Automobilbaus oder der Luftfahrt bereits eingesetzt werden, auch im Maschinenbau für die Gestaltung trennender Schutzeinrichtungen zu nutzen. Die Umsetzung innovativer Leichtbaustrategien erfordert allerdings die kritische Auseinandersetzung mit einer Vielzahl komplexer Problemstellungen.
Untersuchungen am IWF haben gezeigt, dass unterschiedliche Maschinen in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens auch den Einsatz unterschiedlicher Sicherheits- oder auch Materialkonzepte erfordern. So geht bei der Dreh- und Schleifbearbeitung das größte Gefährdungspotenzial von relativ großen Werkstück- bzw. Werkzeugbruchstücken mit vergleichsweise geringen Aufprallgeschwindigkeiten aus. In diesem

Fall besteht entweder die Möglichkeit die kinetische Aufprallenergie durch den Einsatz duktilerer Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde in Umformenergie umzuwandeln oder durch die Anwendung intelligenter Konstruktionsprinzipien sichere Leichtbaulösungen zu entwickeln. In der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung hingegen sind die Bruchstückmassen wesentlich geringer, erreichen aber aufgrund der hohen Dynamik des Bearbeitungsverfahrens Aufprallgeschwindigkeiten von weit über 200 m/s. Viele Werkstoffe sind nicht in der Lage sich derart hochdynamisch umzuformen, so dass sich hier der Einsatz hochfester Werkstoffe bzw. die Entwicklung von Werkstoffverbünden mit hochdynamischen Umformverhalten anbietet.

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach innovativen Leichtbaukonzepten aus allen Bereichen der Produktion wurden in den letzten Jahren zahlreiche Anstrengungen auf den Gebieten des Werkstoffdesigns und der Leichtbaukonstruktion unternommen. Daher sieht sich der Maschinenhersteller heute einer großen Anzahl von potenziellen Leichtbaukonstruktionswerkstoffen gegenüber. Die Auswahl geeigneter Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde oder auch Konstruktionsprinzipien ist bisher nur mit entsprechendem Expertenwissen möglich und aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen sehr fehlerbehaftet. Neben der Auswahl geeigneter Werkstoffe und einer zweckmäßigen Leichtbaukonstruktion muss der Maschinenhersteller sowohl die Frage beantworten, ob durch den Einsatz kostenintensiver Leichtbaumaterialien ein wirtschaftlicher Vorteil zu erzielen ist als auch der Verpflichtung nachkommen, eine gleich bleibende oder sogar erhöhte Sicherheit der Maschinenumhausung zu gewährleisten. Die normativen Grundlagen für die sicherheitsgerechte Konstruktion von Maschinenumhausungen wurden in zahlreichen Arbeiten ausführlich dargestellt [10, 39, 138], so dass im Rahmen dieser Arbeit nur die angewandten Sicherheitsproduktnormen beschrieben werden.

Aufgrund der Herabsetzung der im Rahmen der neuen EU-Lärmschutz-Richtlinie 2003/10/EG, die am 15.02.2003 in Kraft gesetzt wurde, zulässigen Immissionswerte für den Lärmschutz am Arbeitsplatz um 5 dB(A), liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Analyse und Bewertung der Schalldämmeigenschaften der untersuchten Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde.

Für die Bewältigung der aufgezeigten Problemfelder und zur Minimierung des sicherheitstechnischen- und des wirtschaftlichen Risikos wird in der vorliegenden Arbeit ein Handlungsmodell für die Auswahl, die Entwicklung und die Einsatzgebiete von Leichtbaumaschinenumhausungen erarbeitet und vorgestellt.

2 Stand der Technik

2.1 Einleitung

Im Werkzeugmaschinenbau steht die Thematik des Leichtbaus seit vielen Jahren im Fokus verschiedener Forschungsaktivitäten des IWF. Anwendung finden Leichtbauprinzipien bisher allerdings hauptsächlich bei den Maschinenkomponenten, die durch eine Gewichtsreduzierung zu einem günstigeren dynamischen Verhalten und damit zu einer höheren Produktivität führen. Hier seien exemplarisch die Beispiele Maschinentische, Vorschubschlitten und Spannsysteme für die Drehbearbeitung bei hohen Beschleunigungen oder Drehzahlen genannt [62, 63, 69, 108]. Als Konstruktionswerkstoff kommen hier vor allem Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz.
Vor dem Hintergrund der hohen und weiter steigenden Bearbeitungsgeschwindigkeiten stellt der Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken die Erforschung möglicher Leichtbaupotenziale für den Einsatz im Maschinenschutz seit dem Jahr 2002 in den Mittelpunkt zahlreicher Untersuchungen [134]. Die sinnvolle Kombination von Leichtbaustrategien mit den Erkenntnissen der Arbeitssicherheit und des Maschinenschutzes steht daher im Fokus dieser Arbeit.

2.2 Leichtbau

Aus dem Namen Leichtbau ist das Hauptziel des „leichten Bauens“ deutlich abzuleiten. Das Prinzip beinhaltet jedoch weit mehr als nur die reine Gewichtsreduktion. Eine einfache Erläuterung des Begriffs bietet Schubert [107], der den Leichtbau definiert als ein „Konstruktionsprinzip, das bei Erfüllung aller anderen Anforderungen ein Bauteil mit möglichst geringer Masse anstrebt“. Wesentlich umfangreicher sieht Wiedemann [131] den Leichtbau als „Absichtserklärung, aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern“, oder gleichbedeutend „die Tragfunktion ohne Gewichtszunahme zu verbessern“. Diese Definition impliziert bereits den komplexen Charakter, der sich aus unterschiedlichen Voraussetzungen und zu beachtenden Nebenbedingungen ergibt. Mehr ins Detail geht Knauer [48], der das Konstruktionsprinzip Leichtbau als eine Bauweise ansieht, die durch die Verwendung von Werkstoffen geringer Dichte, einer maximalen Querschnittsauflösung, einer materialsparenden Konstruktion sowie moderner Berechnungsverfahren gekennzeichnet ist, um „ausreichend feste, meist steife bzw. flexible,

sichere“ Anwendungen bei spezifisch geringer Masse zu schaffen. Damit wird die bereichsübergreifende Stellung des Leichtbaus als interdisziplinäre Ingenieurswissenschaft deutlich. Die Zusammenfassung dieser den Leichtbau beeinflussenden Disziplinen hat Schmidt [102] in seinen „wichtigsten Säulen des Leichtbaus“ dargestellt, **Bild 2-1**.

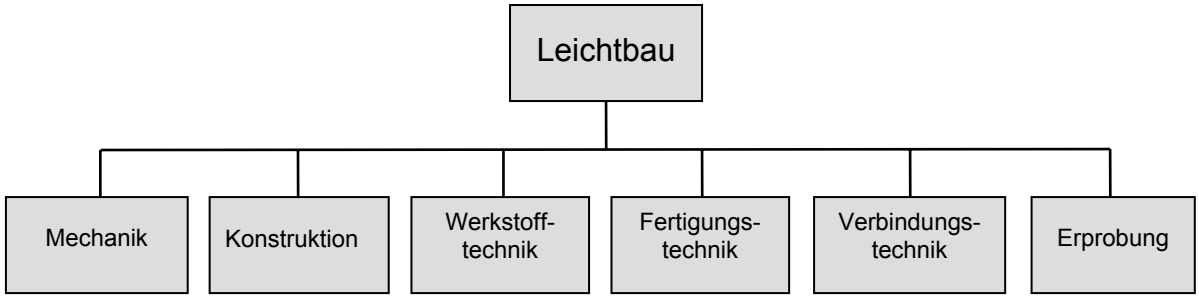


Bild 2-1: Säulen des Leichtbaus [102]

Neben den oben abgebildeten Themenbereichen sollte ergänzend die leistungsfähige Computertechnik [48, 47, 116] hervorgehoben werden, die Schmidt als Hilfsdisziplin in den Bereich Konstruktion integriert hat. Die modernen Datenverarbeitungssysteme wie CAD sowie rechnergestützten Berechnungsverfahren wie die Finite-Elemente-Methode haben sich in den letzten Jahren deutlich verbreitet und die Weiterentwicklung des Konstruktionsprozesses damit positiv beeinflusst.

2.2.1 Entwicklung und Potenzial

Der Leichtbau hat in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen und ist in seinen Anwendungsgebieten sehr vielseitig geworden. Hatten die frühen Standardwerke von Schapitz [100], Hertel [30] oder Czerwenka [17] noch die Luft- und Raumfahrt als Hauptgrundlage ihrer Betrachtungen, so sind inzwischen mit Straßen- und Schienenfahrzeugen, Werkzeugmaschinen, Apparaten und Industrierobotern noch viele weitere Einsatzfelder hinzugekommen.

Die Umsetzung von Leichtbau hat sich in der Vergangenheit stets als sehr aufwändig und daher kostenintensiv herausgestellt. Dies liegt an der anspruchsvollen Konzeption, einer oft schwierigen Herstellung und Erprobung sowie den meist recht teuren Werkstoffen. Daher schrecken mögliche Anwender einiger Branchen noch vor der Umsetzung zurück. Studien belegen jedoch, dass Leichtbau durchaus ein weit reichendes Potenzial besitzt, **Tabelle 2-1**.

Branche	Potenzial für Leicht-baumaßnahmen	Anwendungsstand	Kostendruck
Raumfahrt	sehr groß	etabliert	mittel
Luftfahrt	sehr groß	etabliert	mittel bis hoch
Automobil	sehr groß	teilweise etabliert	sehr hoch
Schienenfahrzeuge	groß	wenig etabliert	hoch
Maschinenbau	groß bis sehr groß	wenig etabliert	sehr hoch
Anlagenbau	mittel	teilweise etabliert	mittel bis hoch
Bauwesen	mittel	teilweise etabliert	sehr hoch

Tabelle 2-1: Potenzial von Leichtbaumaßnahmen nach Branchen [8]

Technische Fortschritte in Verbindungstechnik (Schweißen), Computertechnik (Hochleistungsrechner) sowie Werkstofftechnik (Hochleistungswerkstoffe) ermöglichen ständig neue Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten und begünstigen daher eine weitere Durchdringung des Leichtbaus in den jeweiligen Bereichen [47].

2.2.2 Motivation und Ziel

Die Motivation für die Anwendung von Leichtbaustrategien variiert in den einzelnen Bereichen und entzieht sich somit einer Generalisierung. In der Luftfahrt ist beispielsweise ein niedriges Strukturgewicht unerlässlich, weshalb Kostenaspekte nicht unbedingt im Vordergrund stehen und eine intensive Forschung und Weiterentwicklung stattgefunden hat. Revolutionäre Entwicklungen waren dabei insbesondere die Ablösung der Fachwerkbauweise durch freitragende Strukturen in Form von Vollwand- und Schalensystemen [47].

Im Automobilbau bewirken gesetzliche Auflagen (Abgasnormen), steigende Umweltbelastung und hohe Kraftstoffpreise bei gleichzeitig steigenden Kundenanforderungen an Komfort und Sicherheit den Trend nach geringerem Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch [102]. Dies kann speziell durch Gewichtsminimierung einzelner Komponenten oder großer Strukturen wie der Karosserie ermöglicht werden. Da im Automobilbau ein hoher Kostendruck herrscht, sind Kosten-Nutzen-Analysen von elementarer Bedeutung.

Auch im Maschinenbau besteht ein hoher Kostendruck, der das Streben nach einer Produktionskostensenkung fördert. Das Interesse am Leichtbau ist daher insbeson-

dere auf Möglichkeiten der Produktivitätssteigerung gerichtet. Die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HVM) bietet sich dazu an, da sie maschinenseitig bei den herkömmlichen Antrieben, Spannmitteln, Auswucht- sowie den Schutzeinrichtungen die Grenzen der Belastbarkeit erreicht hat. Um die hohen Anforderungen an einen stabilen HVM-Prozess zu erfüllen, müssen Leichtbaumaßnahmen in den genannten Einsatzbereichen hohe Steifigkeiten bei geringen Massen gewährleisten.
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die unterschiedlichen Beweggründe der einzelnen Branchen in der Zielsetzung ähnlich sind. Es wird stets eine Lösung angestrebt, die unter allen gegebenen bzw. geforderten Umständen eine maximale Funktionserfüllung bei optimaler Ausnutzung einer massereduzierten Struktur gewährleistet.

2.2.3 Problemstruktur im Leichtbau

Gewichtsproblematik

Die Bestrebungen im Leichtbau sind in erster Linie auf die Gewichtsminimierung einer Konstruktion ausgerichtet. Neben dem Gewichtsfaktor, der im Mittelpunkt des folgenden Kapitels steht, sind als weitere Einschränkungen die Funktionalität, die Sicherheit sowie die Langlebigkeit der Konstruktion im Rahmen der Gewichtsreduktion weiterhin in vollem Maße zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, werden heute eine Reihe von Maßnahmen ergriffen. Nach Klein [47] umfassen diese die Realisierung von fortschrittlichen Bauweisenlösungen, den Einsatz leichter und hochfester Werkstoffe, die Entwicklung und Anwendung neuer Herstelltechnologien sowie die analytische Durchdringung des Belastungs- und Beanspruchungsfalls.
Im Rahmen der Umsetzung dieser Maßnahmen haben sich drei Konstruktionsstrategien herausgebildet, die man anhand ihrer Merkmale einteilen kann in [47, 107]:

- den Formleichtbau, der durch eine bessere Kräfteverteilung und Formgebung den Stoffeinsatz minimiert,
- den Stoffleichtbau, der spezifisch schwere Werkstoffe durch leichtere und festere Werkstoffe ersetzt sowie
- den Bedingungsleichtbau, bei dem Sicherheitsforderungen überprüft und Leichtbauteile besser in ihre bestehende steife Umgebung integriert werden.

Der Umsetzung dieser Strategien sind jedoch in manchen Bereichen enge Grenzen gesetzt. Davon betroffen sind insbesondere der Fahrzeug- und Maschinenbau, die durch den herrschenden Kostendruck nur einen geringen Spielraum besitzen. ImGe-

gensatz dazu haben in der Luft- und Raumfahrt die Kosten nur eine geringere Priorität und die Gewichtsminimierung kann in größerem Maße umgesetzt werden. Man spricht in diesem Fall von extremen Leichtbau [47] (vgl. **Bild 4-1**).

Kostenproblematik

Die Umsetzung von Leichtbau hat oft den Nachteil, dass die Gewichtsreduktion mit einer teilweise deutlichen Gesamtkostenerhöhung verbunden ist. Diese Leichtbauzusatzkosten betreffen vor allem die Bereiche Konstruktion, Fertigung sowie insbesondere die Werkstoffe. **Bild 2-2** verdeutlicht die Beziehung von Gewicht und Kosten eines Systems sowie den realisierbaren Leichtbaugrad (1/Gewicht) unter Berücksichtigung der oben genannten Einflüsse.

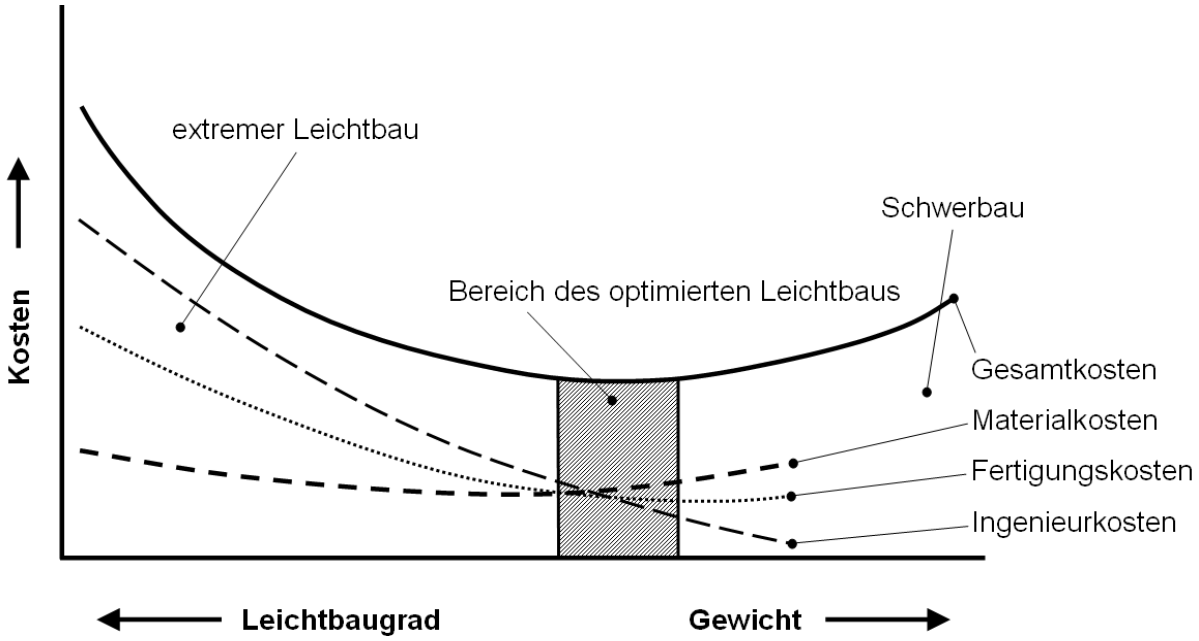


Bild 2-2: Zusammenhang zwischen Gewicht und Kosten eines Systems [47]

Die Ursache für den starken Anstieg der Gesamtkosten ab einer bestimmten Gewichtsreduktion ist bei den Ingenieurkosten zu finden. Eine Erhöhung der Ingenieurkosten um den Faktor fünf bis zehn ist bei Leichtbaukonstruktionen durchaus realistisch. Die verwendeten Werkstoffe erfahren mit sinkendem spezifischem Gewicht ebenfalls eine deutliche Kostenerhöhung. Die leichteren Werkstoffe sind bedingt durch höhere Festigkeiten gleichzeitig schwerer zu bearbeiten, weshalb sich die Fertigungskosten infolge von höheren Werkzeug- und Prozesskosten sogar verdreifachen können. Daher streben viele Industriezweige wie etwa der Maschinen- und Fahrzeugbau einen sinnvollen Kompromiss in Form des optimierten Leichtbaus an [47].

In den angesprochenen Bereichen wird daher gemeinhin die Maßgabe verfolgt, eine leichte Struktur oder ein leichtes Produkt zu erstellen, bei dem die Leichtbauzusatzkosten sinnvoll begrenzt werden können. Umzusetzen ist das im Falle einer Gewichtsreduktion durch eine bessere Ausdimensionierung oder eine Verringerung der Komplexität einer Struktur. Werden jedoch höherwertige Werkstoffe eingesetzt oder die Bauweise verfeinert, so steigen die Leichtbauzusatzkosten dagegen an [47]. In diesem Falle sollte der Gewinn des Leichtbaueinsatzes in Form von Energieeinsparung, Nutzlasterhöhung oder Produktivitätssteigerung groß genug sein, um die Mehrkosten möglichst schnell zu amortisieren.

Bei der Konstruktion von Verkehrsfahrzeugen ist das anvisierte Gesamtgewicht mitunter eine entscheidende Zielgröße. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einer Nichterreichung des fixierten Zielgewichts die gesamte Konstruktion angepasst werden muss, um dennoch die gleiche Nutzlast über eine vorgegebene Reichweite unter konstantem Energieeinsatz befördern zu können. Es wird daher ein Vergrößerungsfaktor α wirksam, der als das Verhältnis der Gesamtgewichtsänderung ΔG_{gesamt} zu den Folgemaßnahmen an der Struktur $\Delta G_{Struktur}$ definiert werden kann, **Formel 4-1** [47, 30]:

$$\alpha = \frac{\Delta G_{gesamt}}{\Delta G_{Struktur}} \qquad \text{Formel 4-1}$$

Aus der Literatur ergeben sich für die Vergrößerungsfaktoren der unterschiedlichen Verkehrsbereiche in der Praxis [47]:

- α ≈ 1,1-1,5 im Fahrzeugbau,
- α ≈ 2-3 im Flugzeugbau,
- α ≥ 5 in der Raumfahrt.

Es muss also stets abgewogen werden, ob es sinnvoll erscheint, das beabsichtigte Strukturgewicht zu erreichen und einen Mehraufwand für Folgemaßnahmen in Kauf zu nehmen, oder die Nutzlast zu reduzieren und damit eine schlechtere Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Ausschlaggebend für eine Entscheidung sind oftmals ökonomische Gründe [47].

Es sollte jedoch auch nicht übersehen werden, dass der Vergrößerungsfaktor ebenfalls in die andere Richtung gilt. Die Gewichtsreduktion einer wichtigen Komponente kann somit gegebenenfalls auch ein Abrüsten der kompletten Struktur ermöglichen [131].

Konstruktive Problematiken

Das Tätigkeitsfeld eines Leichtbaukonstrukteurs ist nach Wiedemann [131] das Entwerfen und optimale Ausgestalten der tragenden Struktur für vorgegebene Lasten, meist in ebenfalls vorgegebenen räumlichen Grenzen oder Konturen. Es ist daher notwendig, die Beanspruchung möglichst auf die gesamte Konstruktion zu verteilen und die zulässigen Spannungen weitestgehend und gleichmäßig auszunutzen. Die Hauptaufgabe einer Leichtbaustruktur besteht wie bei allen anderen technischen Konstruktionen in der Erfüllung einer vorgegebenen Funktion. Das Kriterium der Gewichtsminimierung ist demzufolge erst als stärkste Nebenbedingung anzusehen und wird dabei durch weitere Bedingungen wie Sicherheit, Zuverlässigkeit, Herstellbarkeit, Kontrollierbarkeit, Montierbarkeit, Handhabbarkeit, Inspizierbarkeit, Wartbarkeit, Instandsetzbarkeit, Umweltverträglichkeit, Recycelbarkeit usw. konkretisiert. Eine reine Eigengewichtsaufgabe ist in der Praxis äußerst selten [47].

Im Bereich der Leichtbaukonstruktionen existieren insbesondere bei den Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbedingungen verschiedene Problemfelder. Die reine Gewichtsreduktion stößt an Restriktionen, die in den nutzbaren Kennwerten des Werkstoffs und den zulässigen Spannungen bzw. Verformungen bestehen. Wiedemann [132] führt als Orientierungshilfe den Strukturkennwert (auch Beanspruchungsdichte) an, der das Verhältnis der Last zur geometrischen Vorgabe (z. B. Länge) darstellt. Demnach dominieren bei einer Leichtbaustruktur mit niedrigem Kennwert eher die Probleme der Steifigkeit, während bei einem hohen Wert vornehmlich Festigkeitsprobleme auftreten. Aus der Kennzahl lassen sich neben Angaben zu den wichtigsten Belastungsarten auch Folgerungen für die Bauweisengestaltung sowie für Schadenstoleranz und Ausfallsicherheit ableiten.

Speziell das Schädigungsverhalten stellt bei den generell sehr dünnwandigen Strukturen im Leichtbau eine sensible Größe dar. Um die Ausdimensionierung einer Leichtbaustruktur hinsichtlich ihrer Sicherheit zu überprüfen, sind üblicherweise Tragfähigkeits- sowie Restfestigkeitsnachweise ausreichend. Abhängig vom Einsatzort der Konstruktion können jedoch auch Schadenstoleranzen interessant werden, die über einen Nutzungsdauernachweis sowie die Analyse des Rissfortschrittsverhaltens ermittelt werden können. In diesem Zusammenhang haben sich die beiden Philosophien der absoluten lebenslangen Schadensfreiheit (Safe-Life-Quality) sowie der Schadenstoleranz und hinreichenden Resttragfähigkeit (Fail-Safe-Quality) herausgebildet [47]. Eine Festlegung auf eine der beiden Philosophien beeinflusst die weiteren

konstruktiven Kriterien für die Bewertung und Auswahl von Werkstoff, Bauweise oder Dimensionierung und kann ferner eine Überarbeitung der oben genannten Bedingungen für Inspektion, Wartung und Instandsetzung bewirken [131].
Der Konstruktionsvorgang wird aufgrund dieser vielseitigen Kriterien schnell komplex und erfordert daher eine sehr gute Durchstrukturierung. Als Unterstützung dienen neben Gütekennzahlen und Leichtbaukenngrößen insbesondere auch rechnerunterstützte Hilfsmittel, die den manuellen Aufwand deutlich einschränken können [47].

2.2.4 Berechnungsmethoden

Bei der Auslegung von Leichtbaulösungen bzw. -strukturen werden komplexe Berechnungsmethoden notwendig. In den Anfängen des Leichtbaus wurden bei der Dimensionierung vielfach überschlägige Berechnungen verwendet, die durch entsprechend hohe Sicherheitszahlen abgedeckt werden mussten. Durch den späteren Einsatz von Großrechenautomaten war es möglich die Verformungs- und Spannungszustände innerhalb einer Struktur genauer vorherzubestimmen, wodurch eine deutlich leichtere Bauweise ermöglicht werden konnte [17].
Die Basis moderner Berechnungen bilden Differentialgleichungen und lineare Gleichungssysteme zur Ermittlung der Schnittgrößen oder Verformungen. Bei Berücksichtigung realer Bedingungen mit komplexen Geometrien und mehreren Belastungsarten werden derartige Gleichungen jedoch schnell sehr umfangreich. Daher sind die in der Vergangenheit eingesetzten analytischen Lösungsverfahren durch die Entwicklung und Verbreitung leistungsfähiger Computer immer mehr von numerischen Verfahren abgelöst worden [47].
Zu den aktuell in der Praxis eingesetzten numerischen Verfahren zählen insbesondere die Finite-Elemente- und die Boundary-Elemente-Methode. Während letztere lediglich Aussagen über den Rand einer Struktur (Boundary: Rand, Grenze) zulässt, ermöglicht die Finite-Elemente-Methode (FEM) auch eine Analyse des Strukturinneren. Damit eröffnen sich für die Anwendung der FEM eine große Anzahl von Möglichkeiten [47]. Diese Vielseitigkeit hat zu einer weiten Verbreitung der Methode unter anderem bei Berechnungsaufgaben im Maschinen-, Apparate- und Fahrzeugbau geführt [46]. Aufgrund dieser Tatsache soll nachfolgend eine kurze Vorstellung der FEM erfolgen.
Basis der FEM ist die Zerlegung eines realen Bauteils in eine Vielzahl definierter mechanischer Grundelemente („finite Elemente“), die jeweils über ihre Steifigkeitsmatrix

charakterisiert werden. Über Knoten werden die Elemente zu einer Struktur verbunden und die reellen Kräfte eingeleitet. Ferner muss die Struktur statisch bestimmt gelagert sein. Aus diesen Informationen entsteht ein lineares Gleichungssystem, welches numerisch per Computer aufgelöst wird und die Verformungen der Knoten, die Spannungen sowie die Auflagerreaktionskräfte liefert [47].

In der Praxis werden häufig so genannte CAE-Systeme (CAE: Computer Aided Engineering) angewendet, die eine Kombination aus den Basisverfahren CAD und FEM enthalten. Vielfach liegt das Bauteil bereits in einem CAD-Programm vor und kann dann entweder per Direktkopplung übernommen oder über eine Schnittstelle in das FEM-System transportiert werden. Dort wird es durch einen Preprozessor für die Berechnung vorbereitet, während ein integrierter Postprozessor die Ergebnisse auswertet und darstellt. Entscheidend für die Berechnung ist die Aufbereitung der Zeichnung durch eine Bereinigung der Geometrie, um den Rechenaufwand in akzeptablen Grenzen zu halten. Komplexe Geometriedaten wie Freistiche, Nuten oder feinste Verrundungen an einem Bauteil führen zu einer starken Erhöhung der Anzahl der benötigten Elemente, wodurch der Berechnungsaufwand extrem erhöht wird.

Als Weiterentwicklung können MCAE-Systeme (Mechanical Computer-Aided Engineering) angesehen werden, die über den integrierten CAD- und FEM-Systemen noch übergelagerte Optimierungsschleifen besitzen [46].

Letztlich bleibt festzuhalten, dass mit Hilfe der FEM nur eine Annäherung an die Realität erfolgen kann. Der Grund liegt darin, dass durch „gewählte Verformungsansätze, eine meist nicht konturgetreue Approximation der Geometrie und der Numerik des Algorithmus [47]“ erfolgt. Die Anwendung bedarf somit einiger Erfahrung des Berechnungsingenieurs, um die Fehlerquellen zu erkennen und das Ergebnis richtig zu interpretieren. Trotz bietet die FEM, im Bereich der Rückhalteprüfung, bessere Aussagen als analytische Methoden und wird daher immer mehr als Werkzeug der Prävention von Fehlern im Rahmen der Produktentwicklung verwendet [47, 46].

Moderne Lösungen im Werkzeugmaschinenbau

Im Vorgriff auf die Ergebnisse dieser Arbeit wird an dieser Stelle beispielhaft die Umsetzung einer Leichtbauvariante unter Berücksichtigung der Problemfelder bei der Konstruktion und Entwicklung einer Maschinentür beschrieben.

Die Senkung der Nebenzeiten zur Erhöhung der Produktivität von Werkzeugmaschinen ist unter anderem über die Reduktion der Öffnungs- und Schließzeiten der Werkzeugmaschinentür zu erreichen. Hierfür ist es allerdings nicht ausreichend den Werkstoff der trennenden Schutzeinrichtung durch einen leichteren Hochleistungswerkstoff mit gleichen sicherheitstechnischen Eigenschaften zu substituieren, vielmehr ist ein ganzheitlicher Ansatz unter Berücksichtigung der konstruktiven Anforderungen, der Antriebstechnik, der Steuerungstechnik und dem Sicherheitskonzept notwendig, **Bild 2-3**.

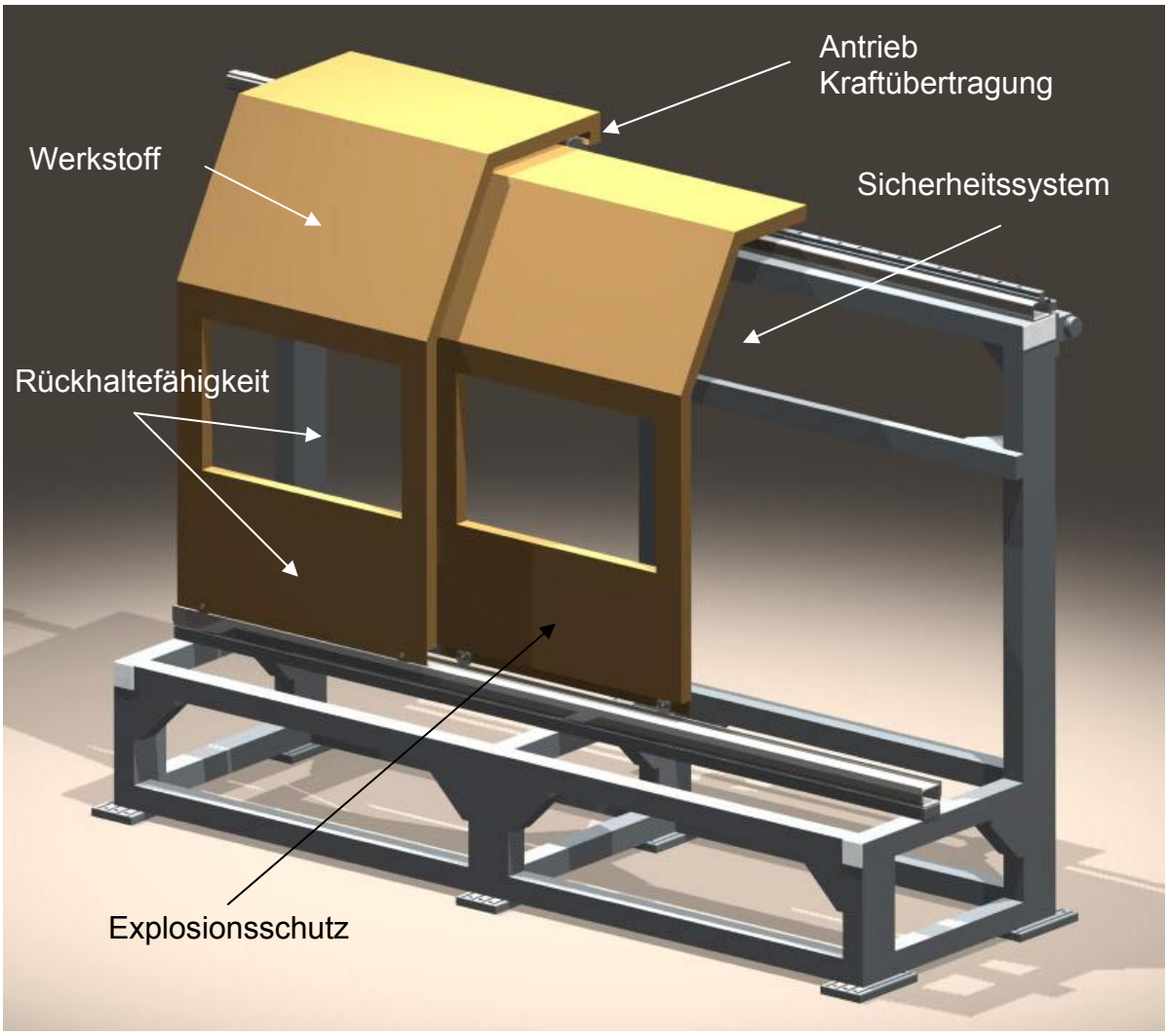


Bild 2-3: F&E-Felder einer Hochgeschwindigkeitsmaschinentür

Im Folgenden wird kurz auf die Umsetzung der identifizierten Problemfelder eingegangen:

- ***Aufbau der trennenden Schutzeinrichtung***

Auf Grund der in Kapitel 6 beschriebenen Ergebnisse wurde für die Leichtbaukonstruktion der Hochgeschwindigkeitsmaschinentür ein Aramidfasersandwich ausgewählt. Die sicherheitstechnischen Anforderung, die an den Aufbau gestellt wurden, waren der sichere Betrieb einer Drehmaschine der Widerstandsklasse C3 nach DIN EN 12415 [N3]. Hierfür wurde ein an den Belastungsfall angepasstes Stahlblech-Aramidfasersandwich hergestellt. Die Masse der Tür konnte somit um 25 % reduziert werden.

- ***Antrieb***

Das Antriebsmodul der Langer & Laumann Ingenieurbüro GmbH wurde in robuster Ausführung konstruiert, um den erhöhten Kräften, die durch die Steigerung der Geschwindigkeiten auftreten, standzuhalten. Hierzu wurde der Zahnriemen großzügig dimensioniert und es wurden stabile Führungen verwendet. Die Endlagendämpfung wurde durch hydraulische Stoßdämpfer realisiert, **Bild 2-4.**

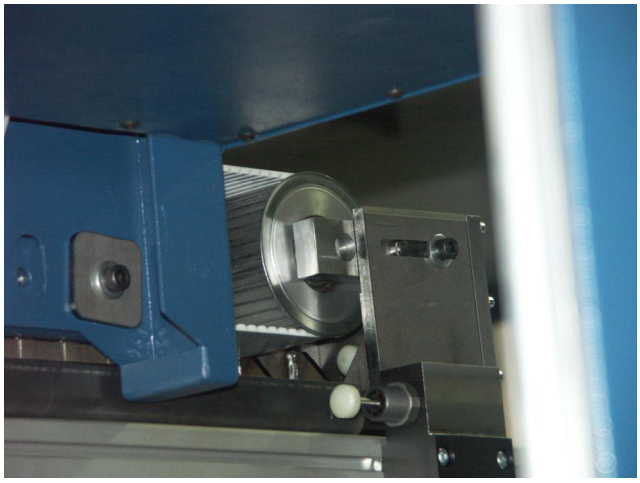


Bild 2-4: Antriebsmodul [Quelle: Langer & Laumann Ingenieurbüro GmbH]

Um die geforderten hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu erreichen, wurde ein Servomotor mit linearem Riementrieb gewählt. Der Servomotor ermöglicht hochdynamische Geschwindigkeiten bis zu 5 m/s und Beschleunigungen bis zu 20 m/s². Moderne Werkzeugmaschinenhersteller benötigen in der Regel Antriebe der Schutzklasse IP 54 oder IP 67. Diese Anforderung wurde bei der Auslegung des Ant-

riebs ebenso berücksichtigt wie die Ausführung nach Kategorie 3 nach DIN EN ISO13849-1.

- ***Führungen***

Die Führungen des Prototypen sind so ausgelegt worden, dass sie für Geschwindigkeiten bis zu 2,5 m/s und Beschleunigungen von bis zu 20 m/s² geeignet sind. Bei dem gewählten Typ handelt es sich um eine robuste Rollenführung der Schaeffler KG die nur geringe Ansprüche an die Geradheit der Unterkonstruktion stellt, **Bild 2-5**. Des Weiteren sind die Wälzkörper geschützt und die Führung arbeitet geräuscharm.

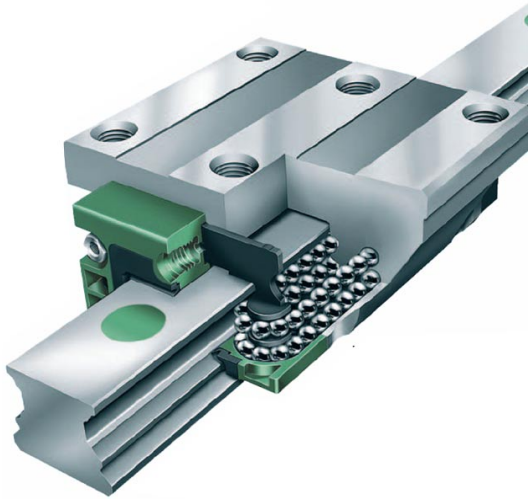


Bild 2-5: Kugelrollenführung [Quelle: Schaeffler KG]

- ***Sicherheitssysteme***

Die hohen realisierten Geschwindigkeiten der Maschinentür reduzieren nicht nur die Nebenzeiten, sondern stellen auch ein neues Gefahrenpotenzial für den Maschinenbediener dar. Aus diesem Grund wurde ein Sicherheitssystem entwickelt, welches durch die Kombination von Lichtgitter, Laserscanner und Klemmleiste, dem Maschinenbediener ein Höchstmass an Sicherheit bietet, **Bild 2-6**. Der Laserscanner detektiert bereits sich annährende Personen in seinem Warnfeld, d. h., vor dem eigentlichen Gefahrenbereich der Türöffnung. Der Laserscanner bietet die Möglichkeit eines abgestimmten Geschwindigkeitsprofils, so dass die Tür nicht sofort zum Stillstand kommt, wenn sich eine Person der Türöffnung nähert. Die Klemmleiste ist in die Flügel der Tür integriert und stoppt diese bereits bei leichter Berührung. So ist die Sicherheit des Bedieners vor Quetschungen oder Klemmungen auch bei einem Ausfall der optischen Schutzeinrichtungen gewährleistet.

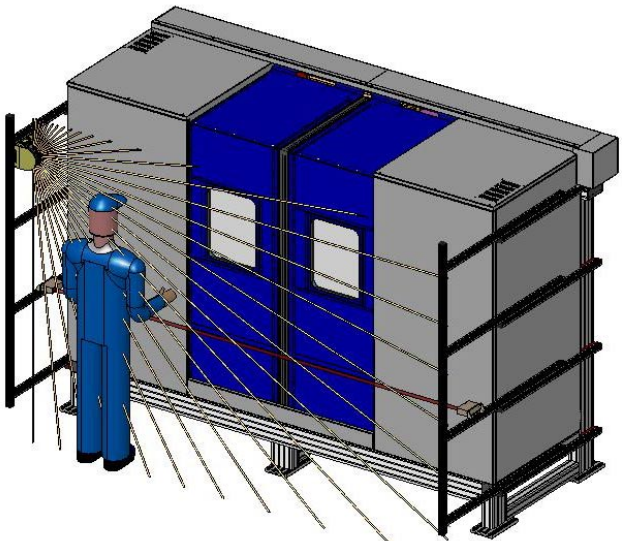


Bild 2-6: Sicherheitssystem einer Hochgeschwindigkeitsmaschinentür

Im Falle der automatisierten Bestückung der Werkzeugmaschine kann auf den kostenintensiven Laserscanner verzichtet werden da keine Gefahr für den Maschinenbediener besteht.

- ***Umsetzung***

Die dargestellten Erkenntnisse und Entwicklungen wurden in einem ersten Prototyp einer Hochgeschwindigkeitsmaschinentür integriert, **Bild 2-7**.

Bild 2-7: Prototyp der schnellöffnende Werkzeugmaschinentür

2.3 Hochgeschwindigkeitsbearbeitung

2.3.1 Allgemeines

Noch zu Beginn der 80er Jahre wurde dieser neuen Bearbeitungstechnologie keine Zukunftschance gegeben, da die Überzeugung bestand, dass der steigende Werkzeugverschleiß dem möglichen höheren Zeitspanvolumen die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens minimieren würde.

Das Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Hochschule Darmstadt beschäftigt sich seit Beginn der 80er Jahre intensiv mit der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Hierbei wurde der Begriff HSC (High Speed Cutting) maßgeblich geprägt, welcher aus Systemsicht auch das Synonym High Speed Machining (HSM) trägt. Dieser findet vorwiegend in der Fräsbearbeitung Verwendung, wo hohe Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten sowie die große Dynamik in den Antrieben die entscheidenden Faktoren sind, die nur hier zusammen auftreten. In der Drehbearbeitung wird aufgrund der maschinen- und verfahrensbedingten großen umlaufenden Futter- und Werkstückmassen nicht die Dynamik von Hochgeschwindigkeits-Fräsmaschinen erreicht.

Der Erfolg der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung liegt vor allem in der ganzheitlichen Entwicklung von Prozess und Maschine sowie der Sicherheit der Prozesse und der Verkürzung von Prozessketten [50, 92, 109, 121].

Die Charakteristika der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung sind in **Bild 2-8** zusammengefasst.

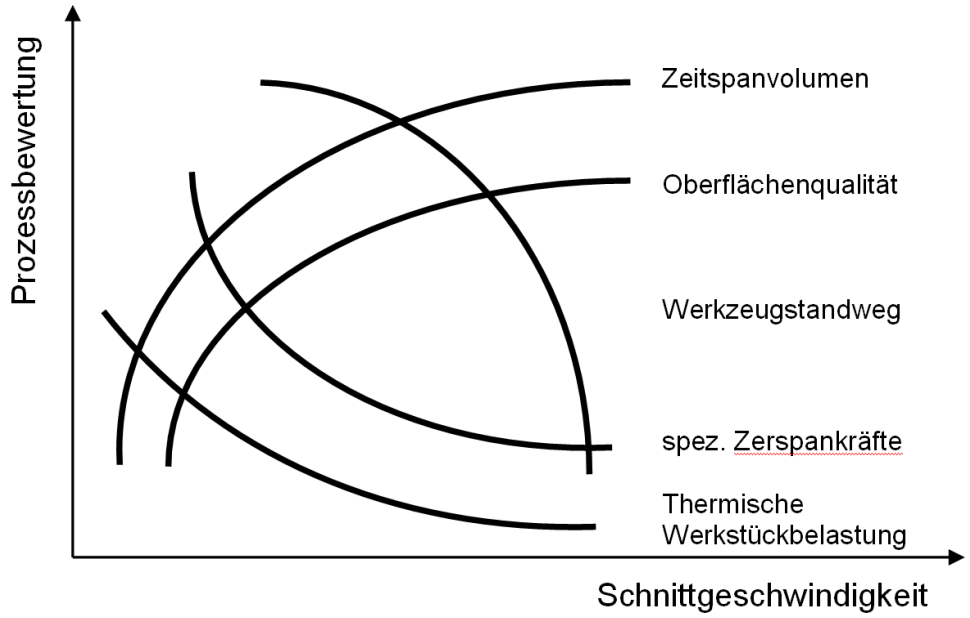


Bild 2-8: Charakteristika der HSC-Bearbeitung [110]

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass sich bei der HSC-Bearbeitung lediglich das Zeitspanvolumen erhöhen würde. Bei den Untersuchungen am PTW ergab sich mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit eine Erhöhung der Oberflächengüte (R_a-Werte von 0,2 µm und R_z-Werte von 0,3 mm können erreicht werden), die Abfuhr der Prozesswärme über den Span sowie die Möglichkeit der Bearbeitung im schwingungskritischen Bereich [109].

Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit lassen sich nach [109] und [110] folgende Vorteile nennen:

- Reduzierung der Hauptzeiten,
- Erhöhung des spezifischen Spanvolumen um etwa 30 % möglich,
- Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit um das 5- bis 10fache,
- Reduzierung der Zerspankraft um mehr als 30 % möglich,
- schwingungsarme Bearbeitung geometrisch komplizierter Bauteile möglich und
- spanende Endbearbeitung durch HSC möglich (Oberflächenqualität erreicht nahezu Schleifqualität, verzugsfreie Bearbeitung durch Abführung der Prozesswärme vorwiegend über die Späne).

Nachteile dagegen sind:

- Reduzierung der Werkzeugstandzeit mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit,
- Schneidstoffe und Beschichtungen sind den Gegebenheiten anzupassen,
- optimale Technologieparameter sind noch nicht umfassend bekannt und
- Bearbeitungsstrategien müssen gegenwärtig für jedes Bauteil neu erarbeitet werden [109, 110].

Obwohl sich eine Vielzahl von Forschungsprojekten in den letzten Jahren mit der HSC-Bearbeitung beschäftigten, konnte bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine physikalische Definition für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung gefunden werden. Es ist lediglich möglich, in Abhängigkeit des Werkstoffes einen Bereich der HSC-Bearbeitung festzulegen, wie es in **Bild 2-9** auf der linken Seite für die Fräsbearbeitung geschehen ist, während auf der rechten Seite ein allgemeiner Überblick gegeben ist.

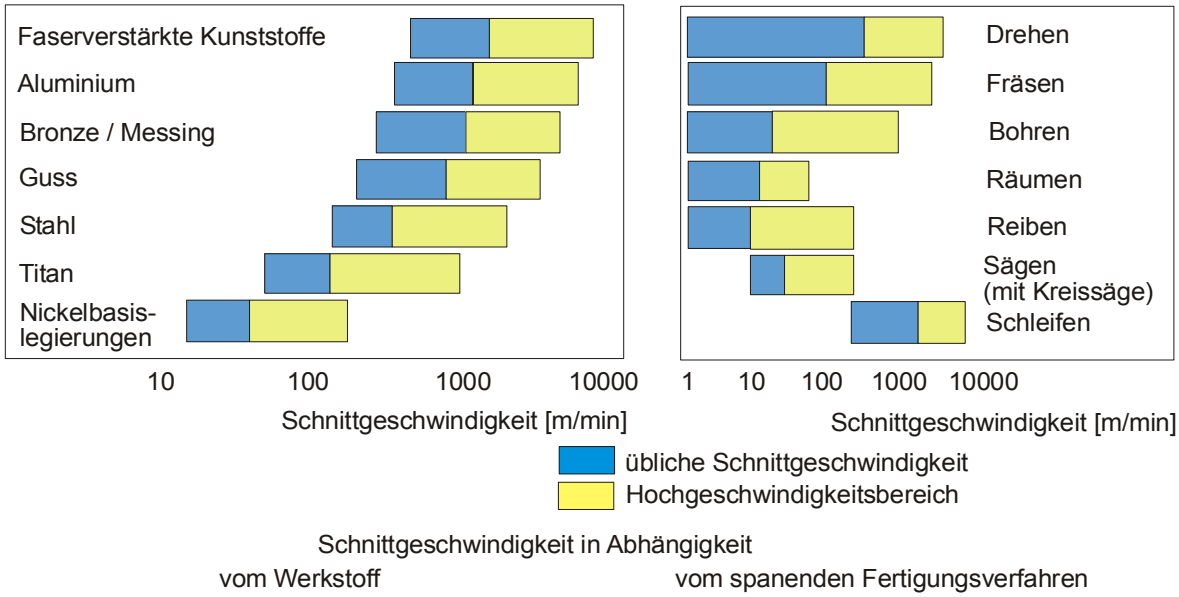


Bild 2-9: Werkstoffabhängige Schnittgeschwindigkeitsbereiche [109]

Eine Prognose, bis zu welchen Schnittgeschwindigkeiten sich die HSC-Bearbeitung in der Zukunft entwickeln wird, ist schwer abzugeben. Die Bearbeitung ist nicht nur von der Spindeldrehzahl, sondern auch von vielen anderen Aspekten abhängig. Nur bei der ganzheitlichen Betrachtung aller zugehörigen Faktoren, die in **Bild 2-10** dargestellt sind, ist eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bzw. der Drehzahl realisierbar.

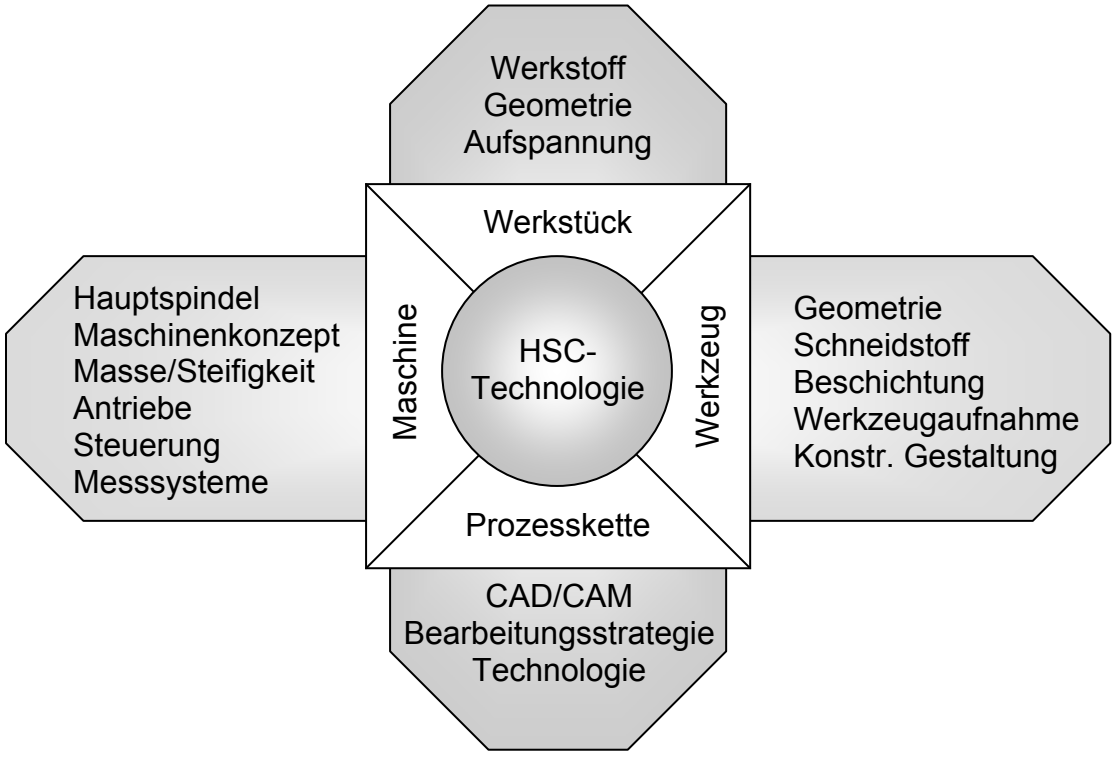


Bild 2-10: Ganzheitliche Entwicklung von Prozess und Maschine [109]

2.3.2 Hochgeschwindigkeitsmaschinen

Die höchsten angebotenen Drehzahlen bei HSC-Drehmaschinen liegen zurzeit bei 12.000 U/min (z. B. Gildemeister Speed 12-7 linear). Allgemein ist zu sagen, dass es notwendig ist, Maschinen mit hoher Leistung und Drehzahl zu entwickeln, um den Hochgeschwindigkeitsbereich für Standard-Werkstücke im Bereich der Schrupp- und Schlichtbearbeitung abzudecken. Es gibt einige spezielle konstruktive Anforderungen an HSC-Drehmaschinen wie eine hohe Steifigkeit des Maschinenbettes, eine hohe Steifigkeit und gute Dämpfung der Lagerung der Hauptspindel, damit die Eigenfrequenzen des Systems über der maximalen Drehfrequenz liegen sowie ausreichend dimensionierte trennende Schutzeinrichtungen [109].
HSC-Fräsmaschinen, welche heute am Markt bzw. in Forschungs- und Entwicklungslabors existieren, kann man vereinfacht nach den Merkmalen Spindeldrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit klassifizieren, **Bild 2-11**. Dadurch sind sie von der konventionellen Bearbeitung abgrenzbar.

lfd. Nr.	*Hersteller*	*Name*
1	Hermle	C1200
2	Waldrich Siegen	MultiTech
3	Hermle	C600
4	Waldrich Siegen	Multi Profiler
5	OPS Ingersoll	OPS 650
6	Mikron	HSM 700
7	Röders	RHP800
8	Mikron	HSM 400
9	Mikron	XSM400

Stand: Juni 2004

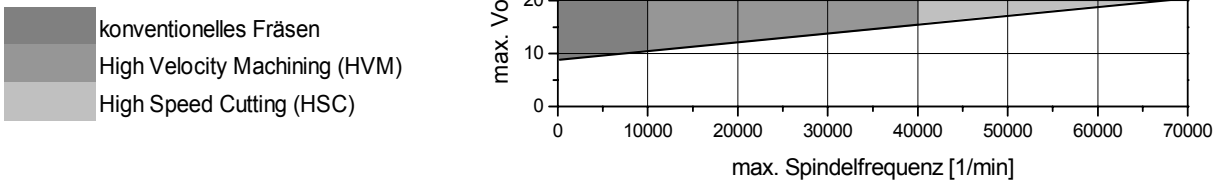


Bild 2-11: Klassifizierung von HSC-Fräsmaschinen (in Anlehnung an [109])

Kernelemente der HSC-Fräsmaschinen sind wälzgelagerte hochdrehende Motorspindeln und schnelle elektromagnetische oder lineardirektangetriebene Vorschubachsen, gepaart mit einer leistungsfähigen CNC-Steuerung [109].

2.3.3 Gefährdungen an Werkzeugmaschinen der HSC-Bearbeitung

Gemäß der DIN EN ISO 12100-1 [N1] unterteilt man Gefährdungen, die an Werkzeugmaschinen auftreten, in mechanische, thermische, elektrische, akustische sowie Gefährdungen durch Vibration, Strahlung, Stoffe und durch Vernachlässigung ergonomischer Prinzipien.
Aus diesen Gefährdungen lassen sich Anforderungen an Maschinenkapselungen ableiten. Die Hauptanforderung ist das Abfangen abgeschleuderter Bruchstücke, da diese eine direkte Gefahr für die Arbeitsperson darstellen. Des Weiteren muss die Kapselung folgende Aufgaben erfüllen:

- Temperaturschutz,
- Schallschutz,
- Partikelschutz sowie
- Spritzschutz.

Die von Vertretern der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie genannten Anforderungen an Maschinenkapseln gehen über die hier genannten weit hinaus. Anforderungen an den Leichtbau, die Recyclierbarkeit, die Emulsionsbeständigkeit, die Verarbeitungsmöglichkeiten, die Wirtschaftlichkeit und auch die Spänebeständigkeit sind neu, und erst durch ein verstärktes Umwelt, und Kostenbewusstsein sowie durch die hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten moderner Werkzeugmaschinen entstanden [124].

2.4 Arbeitssicherheit an Werkzeugmaschinen

2.4.1 Allgemeines

Der betriebliche Einsatz der HSC-Technologie bringt durch die deutlich höheren Vorschübe und Spindeldrehzahlen nicht nur die vorgenannten technologischen und wirtschaftlichen Vorteile mit sich, sondern stellt gegenüber herkömmlichen CNC-Maschinen ein erheblich höheres Gefährdungsrisiko dar. Mit den HSC-spezifischen hohen Spindeldrehzahlen ist eine quadratische Zunahme der Zentrifugalkräfte der rotierenden Komponenten verbunden, die zu drehzahlbedingtem Versagen von Werkzeugen wie dem Bersten von Werkzeuggrundkörpern oder aber zu Schnittstellenversagen wie dem Spannkraftverlust eines Hohlschaftkegels infolge von Grenzüberschreitungen der Materialbelastbarkeit führen können [103].

Das Ziel der Arbeitssicherheitsbetrachtungen an Werkzeugmaschinen ist es daher, den Menschen vor Unfällen und langfristig schädlichen Einwirkungen zu schützen [101]. Beispielhaft sind in **Bild 2-12** die maximalen kinetischen Energien geführt abgeschleuderter Backeneinheiten von Drehmaschinenspannfuttern bei konventioneller und Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung gegenübergestellt. Während in einer „worst case“ Betrachtung die maximale kinetische Energie abgeschleuderter Backeneinheiten konventioneller Spannfutter etwa bei 55000 Nm liegt, erreicht diese an Spannfuttern für Drehzahlen im Hochgeschwindigkeitsbereich unter gleichen Bedingungen Werte über 70000 Nm [115].

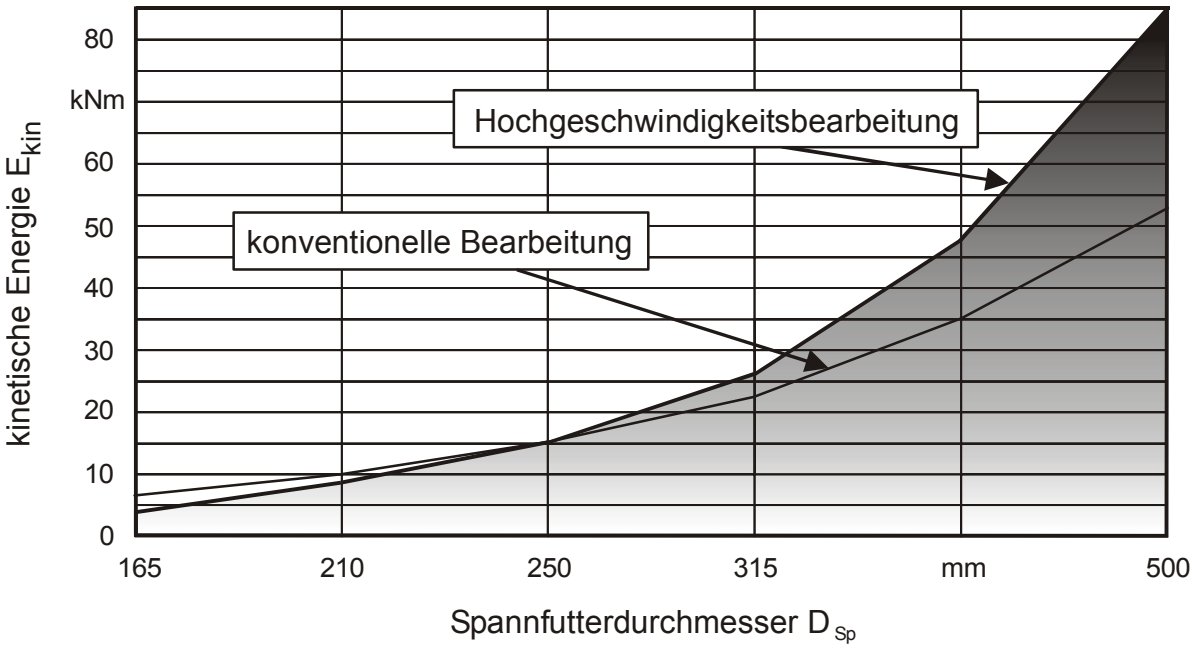


Bild 2-12: Maximale kinetische Energie geführt abgeschleuderter Spannfutter Backeneinheiten bei konventioneller und Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung [115]

Bei der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung wird das mit Abstand größte Schadensenergiepotenzial beim fliehkraftinitiierten Versagen des Messerkopfes freigesetzt. Aufgrund innerer Spannungsspitzen, hervorgerufen durch Volumenkräfte, kommt es insbesondere an den Lochrändern zu Anrissen, die im weiteren Verlauf zu einem Versagen des Bauteils führen [111]. **Bild 2-13** stellt die kinetische Energie eines Viertel-Messerkopfbruchstückes in Abhängigkeit von der Spindeldrehzahl dar. Dabei wird zwischen einem Grundkörper aus Stahl und einem Grundkörper aus Aluminium unterschieden. Es zeigt sich, dass bei der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung im ungünstigsten Fall mit maximalen kinetischen Energien von bis zu 200 kNm zu rechnen ist [4].

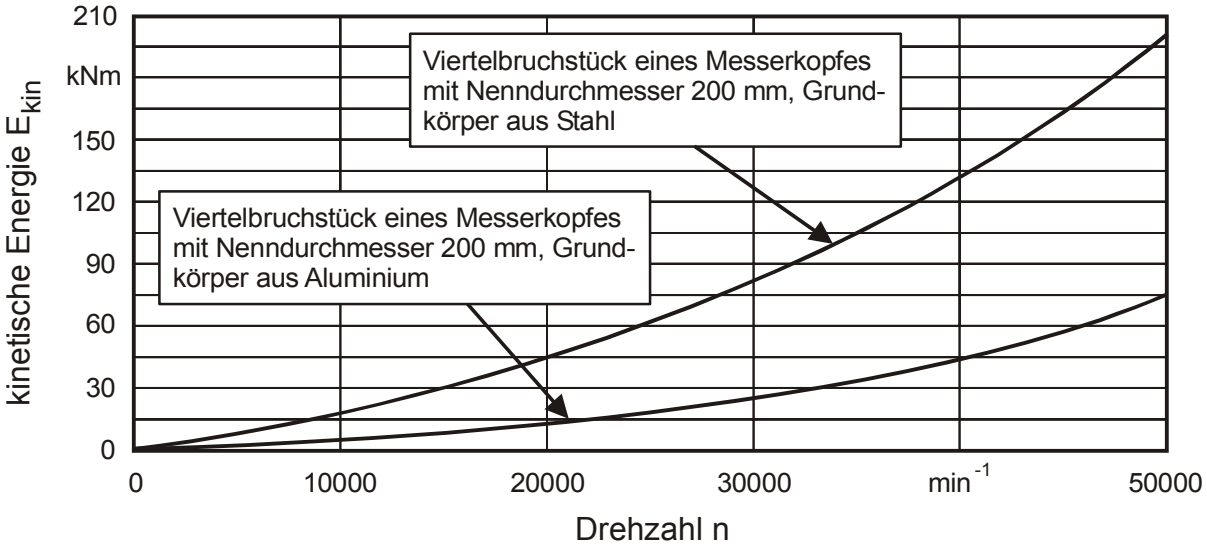


Bild 2-13: Kinetische Energie abgeschleuderter Viertelbruchstücke von Messerköpfen bei der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung [4].

Ende der Sechziger Jahre erwuchs auch im Bereich der Schleifbearbeitung die Forderung nach gesteigerter Produktivität und Qualität durch die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Hierauf wurden in der Folgezeit Schleifprozesse untersucht und industrielle Fertigungseinrichtungen und -verfahren realisiert, bei denen die Erhöhung der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit von 35 m/s auf über 100 m/s vorgenommen wurde. Die erzielten Vorteile in der Verbesserung der Oberflächenqualität, der Steigerung der Zerspanleistung sowie der besseren Bearbeitbarkeit schwer zerspanbarer Werkstoffe brachten aber auch eine erhöhte fliehkraftbedingte Bruchgefahr der Schleifscheiben mit sich [18, 93, 123, 128, 129].

Mit dem Erscheinen des Forschungsberichtes zum Projekt FWF 0210 „Entwicklung und Erprobung von Aufprallprüfkörpern zur Simulation von Schadensereignissen mit abgeschleuderten Belagsegmenten von Schleifscheiben“ [134] wurde ein Leitfaden präsentiert, der die Grundlagen für eine der Maschinenrichtlinie genügende Auslegung von trennenden Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen für die Bearbeitung mit Schleifscheiben mit dünnen Belägen ohne Primärschutzhaube darstellt.

Mit der DIN EN 13218 „Werkzeugmaschinen-Sicherheit: Ortsfeste Schleifmaschinen“ [N2] lassen sich die Anforderungen der europäischen Maschinenrichtlinie erfüllen. Die durch Berstversuche ermittelten Richtwerte für die Dimensionierung von Primärschutzhauben führen bei Maschinen ohne Primärschutzhaube zu überhöhten Wanddicken der trennenden Schutzeinrichtung. Begründet ist diese Überdimensionierung in der Kinematik des Schadensereignisses. Beim Bersten der Schleifscheibe innerhalb der Primärschutzhaube wird ein Großteil der sehr hohen Rotationsenergie der

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**.

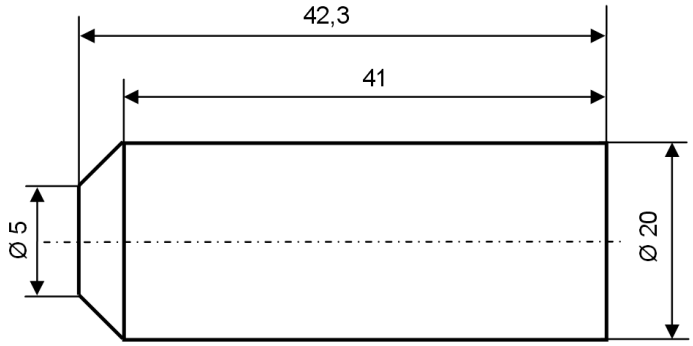


Bild 2-17: Projektil nach DIN EN 12417, Masse 100g [N4]

Material	Dicke d [mm]	Zugfestigkeit R_m [N/mm2]	Bruchdehnung A [%]	Geschwindigkeit V_{max} [m/s]	Energie E [Nm]
St 12.03	1,5	3N3	28	80	320
	3,0	405	28	115	661
	1,5 + 3,0*	369 / 405	28	150	1125
	3,0 + 1,5*	405 / 369	28	140	980
AlMg 3	5,0	242	18	120	720
Polycarbonat**	4,0	68	80	85	361
	6,0			100	500
	8,0			120	720
	12,0			150	1125
	2 x 6,0			170	1445
	2 x 12,0			230	2645
PMMA	12,0	74	4	25	31

* Auf der Arbeitsraumseite
** Prüfergebnisse gelten für neuen Werkstoff ohne Berücksichtigung von Alterung

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**.

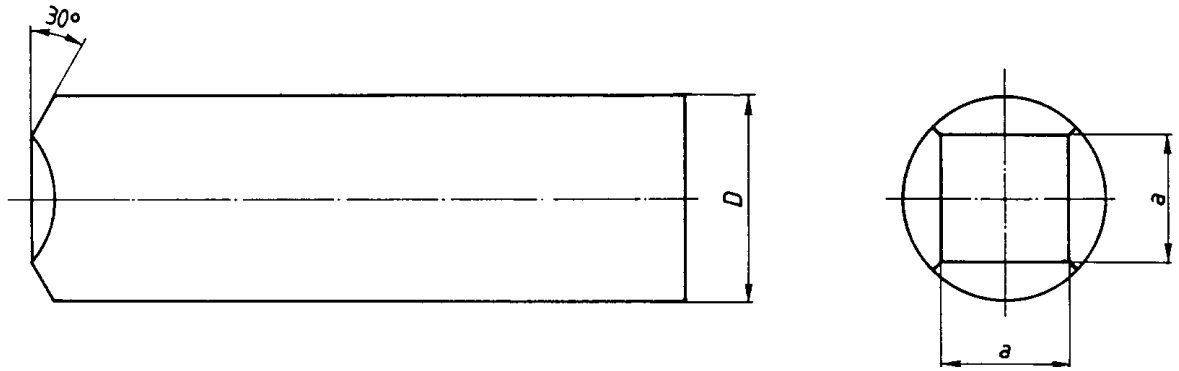


Bild 2-16: Projektil nach DIN EN 12415 [N3]

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

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

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.

Umfangsgeschwindigkeit • $\sqrt{1{,}6}$ = Aufprallgeschwindigkeit

Widerstandsklasse	Spannzeug-Durchmesser D_{Sp} [mm] über	bis zu	Umfangsgeschwindigkeit [m/s]	zulässige Energie [Nm]	Projektilmaße D x a [mm x mm]	Projektilmasse [kg]	Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	Aufprallenergie [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
B3			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

$\cdot 1{,}6$

$\cdot \sqrt{1{,}6}$

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.**

Werkstoff	Dicke d [mm]	Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	Bruchdehnung A [%]	Aufprallwiderstandsklassen								
				A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Stahlblech	2	370	28	+	+	-	-	-	-	-	-	-
	2,5	370	28	+	+	-	+	-	-	+	-	-
	3	400	28	+	+	-	+	+	-	+	-	-
	4	340	25	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	5	300	40	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	6	340	25	+	+	+	+	+	+	+	+	+
AlMg3	5	240	18	+	+	-	+	-	-	+	-	-
Polycarbonat	6	68	80	+	+	-	+	-	-	-	-	-
	8	68	80	+	+	-	+	+	-	+	-	-
	10	68	80	+	+	+	+	+	-	+	+	-
	12	68	80	+	+	+	+	+	-	+	+	-
	2x8	68	80	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Polycarbonat-Verbund	2x12	68	80	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	19	68	80	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Sicherheitsglas + Polycarbonat-Verbund	Glas + PC 6 + 18			+	+	+	+	+	+	+	+	+
+ Anforderungen erfüllt - 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**.

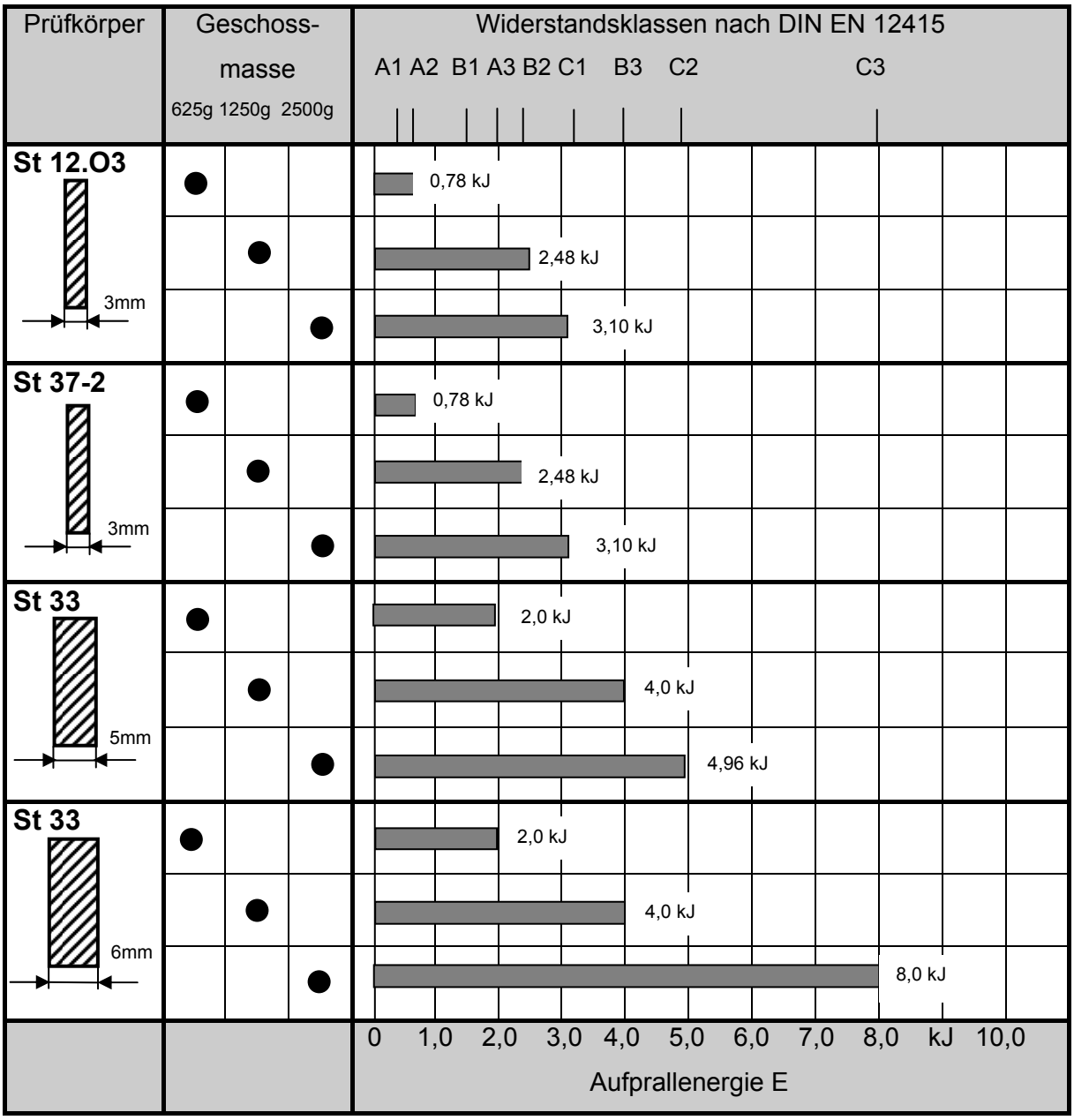


Tabelle 2-6: Widerstandsklassen verschiedener Schutzwandmaterialien nach DIN EN 12415 [N3]

Ein Beispiel aus der industriellen Praxis zeigt **Bild 2-18**. Dargestellt ist die Teilumhausung einer Hochgeschwindigkeitsdrehmaschine der Fa. INDEX. Die Maschinen-

verkleidung 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.

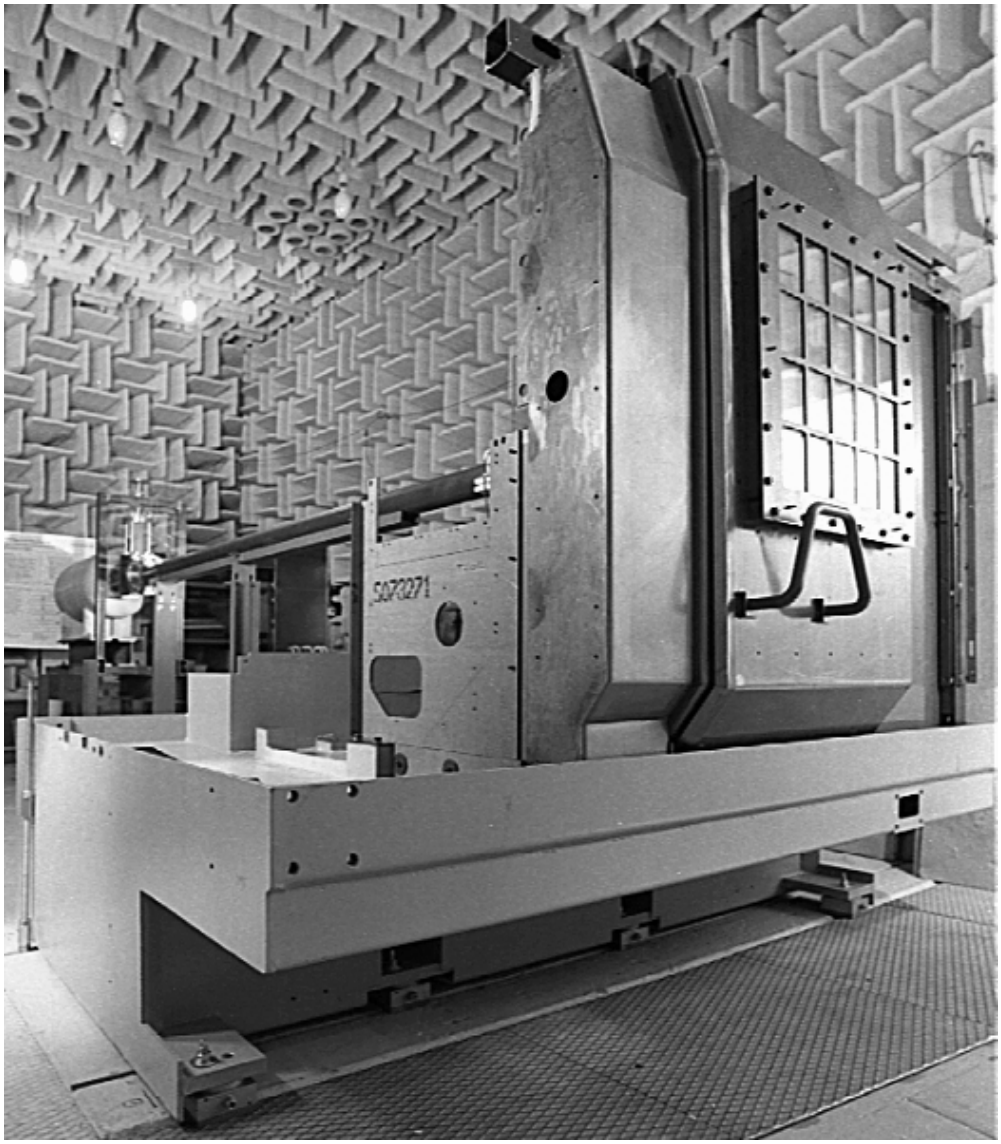


Bild 2-18: Maschinenverkleidung einer Drehmaschine der Fa. INDEX

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**.

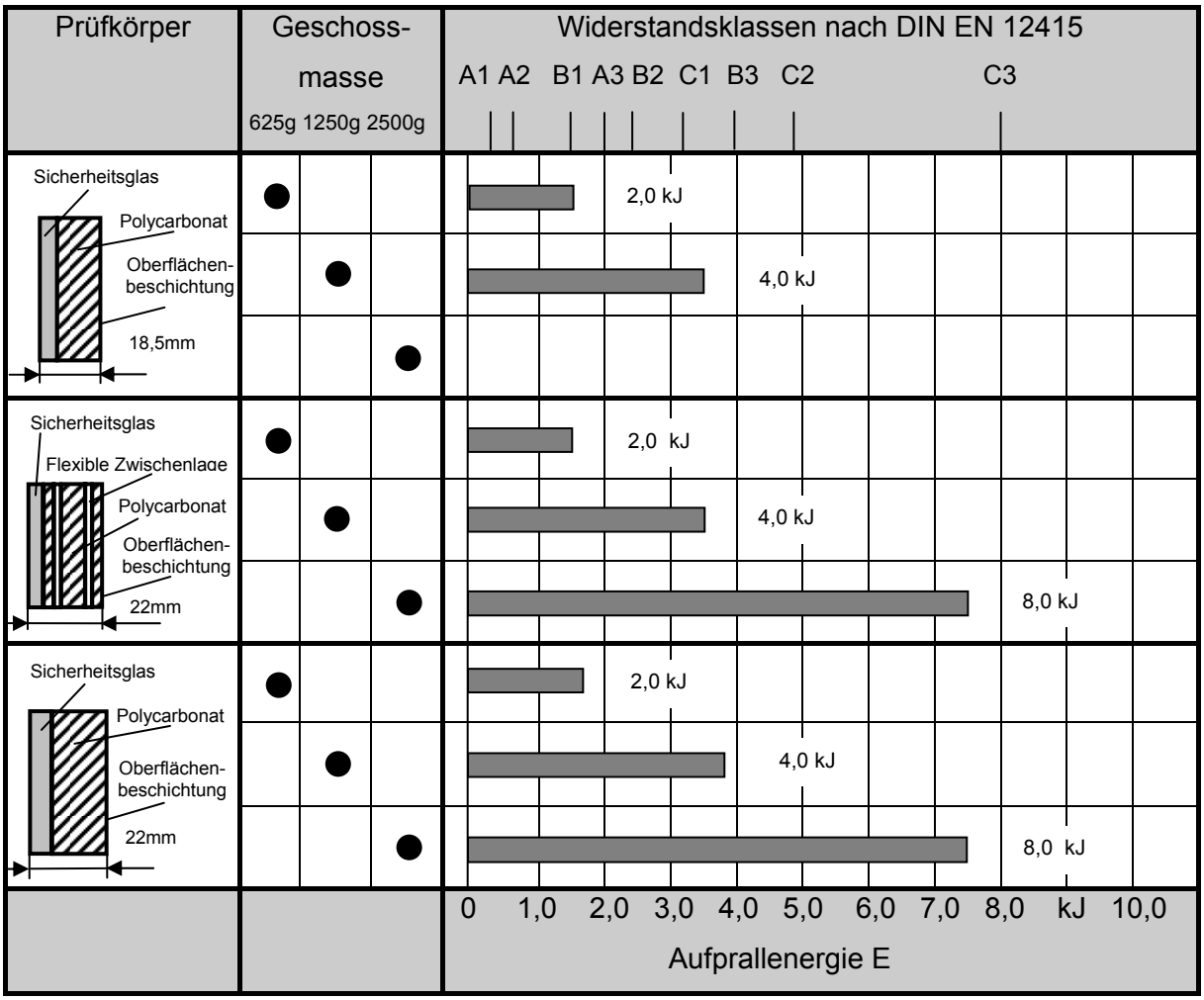


Tabelle 2-7: Widerstandsklassen verschiedener Sichtscheibenverbünde nach DIN EN 12415 [N3]

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.

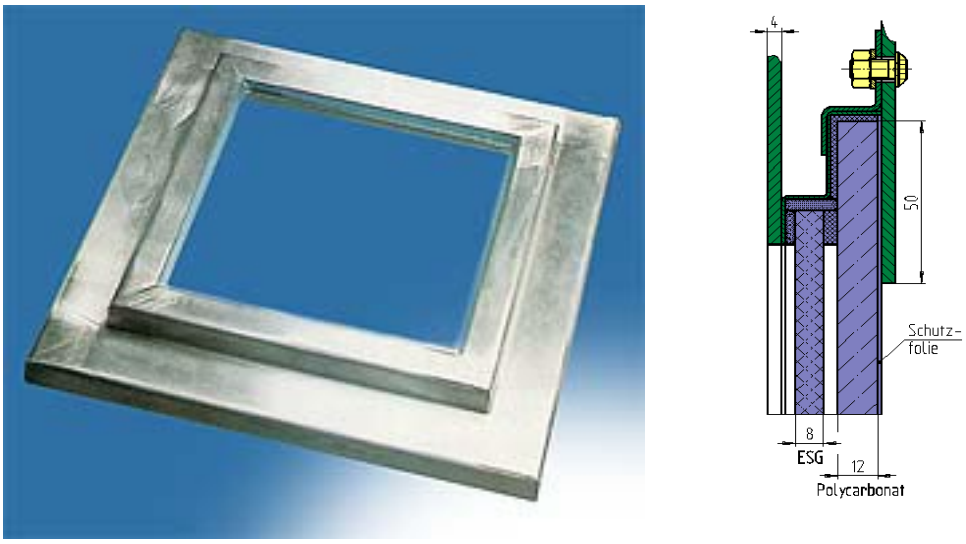


Bild 2-19: Maschinenschutzfenster der SEGE – Sicherheitsfenster GmbH

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.

3 Zielsetzung und Handlungsmodell für Auswahl und Entwicklung von Leichtbaumaschinenumhausungen

Die vorliegende Arbeit wendet sich in erster Linie an Hersteller von Werkzeugmaschinen, die unter Einhaltung der Vorschriften für trennende Schutzvorrichtungen gezwungen sind ihre Maschinen mit sehr dicken und damit auch schweren Stahlumhausungen zu versehen.

Bei der Drehbearbeitung stellt das Versagen der gesamten Backeneinheit den Worst-Case dar. Dabei ergeben sich bei der konventionellen Bearbeitung mit maximalen Futterdurchmessern von 500 mm Schadensenergien von über 55.000 Nm. Bei höheren Drehzahlen, wie sie bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung auftreten, können diese Energien mehr als 70.000 Nm betragen.

Eine Maschinenkapsel, die diesen Energien sicher widersteht, müsste bei normkonformer Dimensionierung eine Wanddicke von mehr als 10 mm Stahlblech aufweisen. Dies würde einer Kapselungsmasse von etwa 80 kg/m² entsprechen. Im Bereich der Bearbeitungszentren liegen die Bearbeitungsgeschwindigkeiten moderner Werkzeugmaschinen bei mehr als 200 m/s. Auch für diesen Fall kann der Maschinenhersteller die Sicherheit seiner Maschinen nur durch den Einsatz von Stahlblechen mit Wanddicken von mehr als 8 mm gewährleisten.

Grenzen für die Aufstellung stark gepanzerter Werkzeugmaschinen ergeben sich teilweise schon aus bautechnischen Gründen. Viele Fertigungshallen, gerade im Bereich der KMU, verfügen nicht über ausreichend dimensionierte Hallenböden zur Verankerung dieser Maschinen.

Weitere Gründe für den Einsatz von Leichtbaumaschinenumhausungen bzw. Leichtbaumaschinentüren liegen sowohl in der Notwendigkeit die Schutzeinrichtung trotz des großen Gewichtes zumindest teilweise beweglich zu gestalten, da eine gute Zugänglichkeit zum Arbeitsraum zu gewährleisten ist; als auch in der Handhabung sowie der Ver- bzw. Bearbeitung der einzusetzenden Umhausungsmaterialien.

Diese Materialsubstitution durch alternative Leichtbaumaterialien muss allerdings vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit genau analysiert werden. Weiterhin darf der Einsatz von Leichtbaumaterialien nicht auf Kosten der Sicherheit der Maschine erfolgen.

Das im Folgenden beschriebene, ganzheitliche Handlungsmodell für die Auswahl und die Einsatzgebiete von Leichtbaumaschinenumhausungen bzw. Leichtbauma-

schinentüren ist in einzelne Module unterteilt, die sich innerhalb der Gliederung der vorliegenden Arbeit wiederfinden, **Bild 3-1.**

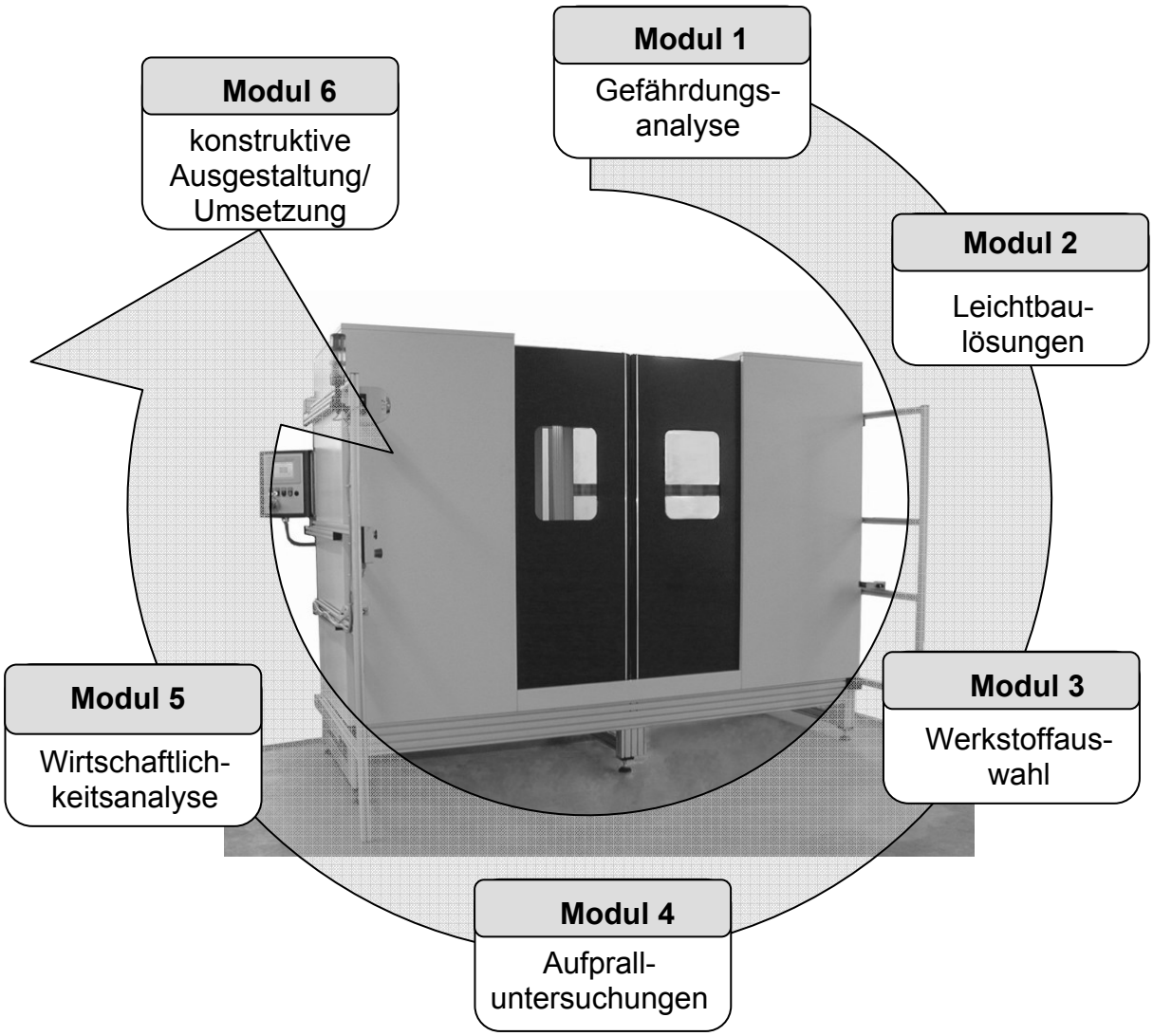


Bild 3-1: Handlungsmodell für die Auswahl und die Entwicklung trennender Schutzeinrichtungen in Leichtbauweise

Den Ausgangspunkt des Handlungsmodells bildet das Modul „GEFÄHRDUNGS-ANALYSE“, in welchem nicht nur die technischen Daten der Bearbeitungsverfahren und die normativer Randbedingungen für den Einsatz von trennenden Schutzeinrichtungen beschrieben werden, sondern ebenfalls eine erste Abschätzung des Bedarfs an leichten Maschinenumhausungen bzw. Maschinentüren erfolgt. Des Weiteren werden die Normativen Grundlagen und Anforderungen an trennende Schutzeinrichtungen beschrieben.

Das zweite Modul „LEICHTBAULÖSUNGEN“ erläutert die komplexe Problemstruktur des Leichtbaus. Hier werden die Gewichtsproblematik, die Kostenproblematik und

die konstruktiven Problematiken einzeln beschrieben und diskutiert. Es werden Berechnungsmethoden vorgestellt und die verschiedenen Leichtbauweisen erläutert und abschließend verglichen. Dieses Modul bietet dem Maschinenhersteller aufgrund der im ersten Modul festgestellten Bedarfe die Möglichkeit eine Entscheidung für die für ihn geeignete Leichtbaulösung zu treffen.

Im dritten Modul „WERKSTOFFAUSWAHL“ werden anhand einer Materialdatenbank Werkstoffe mit Potenzial für den Einsatz in trennenden Schutzeinrichtungen zur Verfügung gestellt. Zur Beurteilung der Eignung werden Technologiewerte wie statische Kenngrößen, thermisches Verhalten, Medienbeständigkeit, Spänebeständigkeit, schalltechnische Eigenschaften und eine Ökobilanz zur Verfügung gestellt und die einzelnen Werkstoffe mit Hilfe dieser Technologiewerte verglichen. Weiterhin werden in diesem Modul die Ver- und Bearbeitungsmöglichkeiten der alternativen Leichtbaumaterialien diskutiert und gegenübergestellt. Die bereitgestellten Daten bilden die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl des einzusetzenden Werkstoffs.

Innerhalb des vierten Moduls „AUFPRALLUNTERSUCHUNGEN“ werden die ausgewählten Werkstoffe verschiedenen Aufprallprüfungen unterzogen. Hierfür werden zum Einen normierte Aufprallprüfungen nach DIN EN 12415 [N3] und DIN EN 12417 [N4] durchgeführt und zum Anderen wird auf eine Forderung der Industrie nach einer Mehrfachbeschussprüfung eingegangen. Für das Bestehen der Normprüfungen werden die monolithischen Aufbauten solange in ihrer Dicke variiert bzw. die Verbundaufbauten in ihrer Zusammensetzung optimiert bis die durch die Gefahrenanalyse geforderten Sicherheiten erreicht sind. Für die Durchführung der Mehrfachbeschussprüfung ist in Anlehnung an die DIN EN 1063 [N5] eine Prüfvorschrift entwickelt worden, welche den Fall des Wiederholungstreffers abbildet. Die Mehrfachbeschussprüfung wird an dem Baumuster durchgeführt, welches zuvor bei der Normprüfung als idealer Aufbau identifiziert worden war. Für den Maschinenhersteller wird auf der Basis der durchgeführten Aufpralluntersuchungen ein Vergleich der Massen und der Dicken der optimierten Prüfmuster durchgeführt. Mit den im vierten Modul zusätzlich bereitgestellten Daten wird die Auswahl des einzusetzenden Werkstoffs weiter eingeengt.

Das fünfte Modul „WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE“ stellt einen Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Leichtbaumaschinenumhausungen bzw. Leichtbaumaschinentüren dar. Hier werden die statischen und dynami-

schen Investitionsrechenverfahren erläutert und ihre Anwendbarkeit anhand eines realen Fertigungsbeispiels beurteilt.

Im letzten Modul „KONSTRUKTIVE AUSGESTALTUNG / UMSETZUNG“ wird auf Basis der in den vorangegangenen Modulen erarbeiteten Ergebnisse mit der konstruktiven Ausgestaltung des entsprechenden Anwendungsfalles begonnen. Hierfür werden Hinweise anhand eines realen Beispiels gegeben.

4 Leichtbaustrategien und Umsetzungsmöglichkeiten

4.1 Einleitung

Der Einsatz von Leichtbau erscheint in vielen Bereichen sinnvoll, um hohe physikalische Beanspruchungen beherrschen zu können. Jedoch kann das Bestreben nach Gewichtsminimierung selten als Hauptziel erachtet werden, sondern sollte sich stets in einem angemessen Verhältnis von Aufwand und Nutzen befinden [131]. Klein [47] schlägt daher eine Betrachtung nach Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten unter Zuhilfenahme eines Gewichts- und Kostenmodells vor, um die Abhängigkeiten von Strukturgewicht, Herstellkosten und dem wirtschaftlichen Nutzwert darzustellen. In Anlehnung daran wurden bereits die Gewichts- und die Kostenproblematik erläutert, um nun auf die Schwierigkeiten im Bereich der Leichtbaukonstruktion einzugehen.

4.2 LEICHTBAUWEISEN

4.2.1 Allgemeines

An dieser Stelle sollen die konstruktiven Ausführungen von Leichtbau in Form der einzelnen Bauweisen behandelt werden. Schapitz [100] formuliert die Zielsetzungen von Leichtbauweisen als:

- die möglichst harmonische Verteilung der Beanspruchungen auf die gesamte Konstruktion,
- die weitgehende und gleichmäßige Ausnutzung der zulässigen Spannungen sowie
- die Gestaltung der verfügbaren Räume zu Trägern von großer Tragfähigkeit und hoher Steifigkeit.

Neben dieser recht allgemeinen Formulierung kann auf Klein [47] zurückgegriffen werden, der als spezielle Auswahlkriterien für die konstruktiven Lösungsprinzipien den Kraftflussverlauf, die Werkstoffeigenschaften, die Umgebungsbedingungen, die Sicherheitsanforderungen, die Zuverlässigkeit der Fügungen sowie die Möglichkeiten der Fertigung anführt. Unter diesen Vorrausetzungen haben sich abhängig von ihren funktionalen Eigenschaften die Differential-, die Integral-, die integrierende und die Verbundbauweise als mögliche allgemeine, funktional unterteilte Ausführungen durchgesetzt, die im Folgenden vorgestellt werden sollen. Als Grundlagen der Erläuterungen sollen die Ausführungen von Klein [47] und Wiedemann [131] dienen. Beispielhaft werden potenzielle Leichtbauvarianten für den Einsatz als Maschinenum-

hausung dargestellt. Wie Eingangs beschrieben bedingen die verschiedenen Fertigungsverfahren unterschiedliche Leichtbaukonzepte. Im Bereich der Bearbeitungszentren und der Schleifmaschinen werden in der Regel große Arbeitsräume, im Bereich der Drehmaschinen eher kleinere Arbeitsräume umbaut. Einen großen Einfluss auf die wirtschaftliche Konstruktion der Leichtbauumhausung hat die Eingangs beschriebene Unterteilung in die Gefahrenbereiche erster und zweiter Ordnung. Bei besonders kostenintensiven Lösungen kann auf einen modularen Aufbau zurückgegriffen werden, welcher nur im Gefahrenbereich erster Ordnung über ein besonders hohes Rückhaltevermögen verfügt. Auf diese Art können die Kosten reduziert werden ohne auf die Sicherheit zu verzichten. Auch die Art der Belastung im Impact-Fall unterscheidet sich erheblich. Während die Maschinenumhausungen von Dreh- und Schleifmaschinen für den Rückhalt von großen und vergleichsweise langsamen Bruchstücken ausgelegt werden müssen haben die Umhausungen von Bearbeitungszentren die Aufgabe kleinere und wesentlich schnellere Bruchstücke zurückzuhalten. Diesen unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen muss durch die gezielte Auswahl der Leichtbaulösung begegnet werden.

4.2.2 Differentialbauweise

Die Differentialbauweise entspricht der klassischen konstruktiven Aufbautechnik im Blechleichtbau. Grundlage des differentiellen Prinzips ist die punktuelle Verbindung der Einzelteile, wobei das Zusammenfügen der Komponenten (im Blechbau: Haut, Stringer und Rippen) durch Nieten, Kleben oder (Punkt-)Schweißen erreicht wird, siehe **Bild 4-1**.

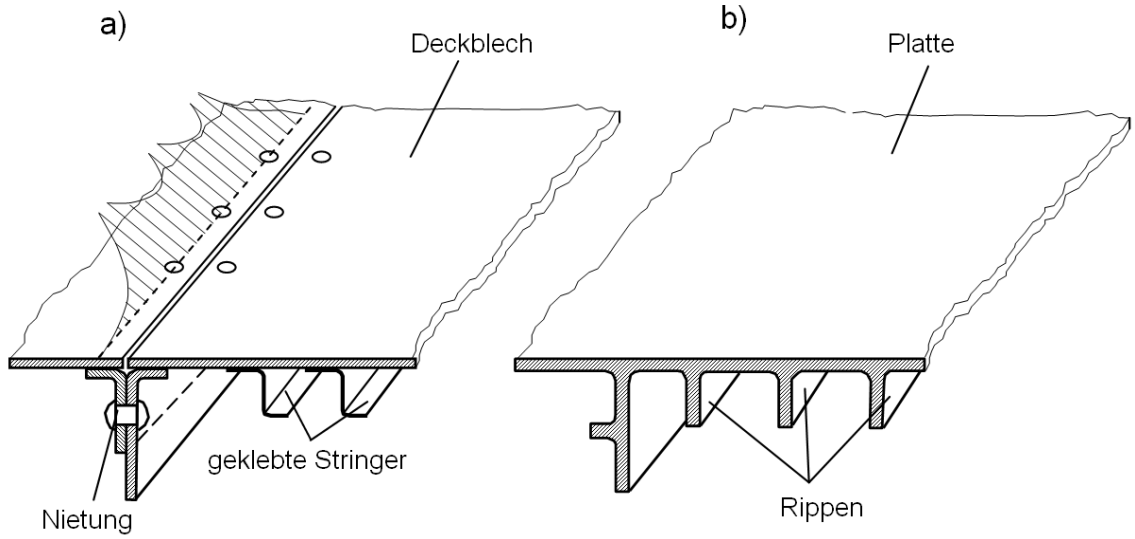


Bild 4-1: Vergleich a) Differential- und b) Integralbauweise [47]

Das punktuelle Verfahren stellt eine relativ einfache und anpassbare Verbindungsart dar. Jedoch erhöhen die Nietlöcher die Anfälligkeit einer Konstruktion für Kerbwirkung und Anrisse. Außerdem kann das Korrosionsverhalten der Konstruktion problematisch sein. Andererseits bietet die Bauweise gute Fail-Safe-Qualitäten (dynamisches Sicherheitsverhalten), da die Rissausbreitung durch die vorhandenen Löcher und Querschnittsübergänge deutlich eingeschränkt bzw. gebremst wird. Ferner bestehen durch das Zusammenfügen mehrerer Einzelteile sowie gegebenenfalls unterschiedlicher Werkstoffe gute Möglichkeiten für Reparatur und Recycling. Dies hat in der jüngsten Vergangenheit insbesondere im Automobilbau an Bedeutung gewonnen, da im Zuge der EU-Altauto-Richtlinie inzwischen 85 % des Fahrzeuggewichts stofflich recycelt oder wiederverwertet werden müssen und der Anteil sich in den nächsten Jahren noch erhöhen soll [99]. Die Intention der Gewichtsminimierung wird jedoch bei der Differentialbauweise durch Materialüberlappungen an den Verbindungsstellen behindert, so dass sich neben den hohen Kosten des Recyclings auch ökologische Nachteile (z. B. beim Kraftstoffverbrauch) ergeben.

4.2.3 Integralbauweise

Um die Gewichtsminimierung zu verstärken, werden in der Integralbauweise möglichst viele Einzelteile zusammengefasst und aus einem Stück gefertigt (siehe auch Bild 4-2). Inzwischen werden dabei sogar Funktionen wie Lager oder Zwischengelenke in die Geometrie integriert.
In der Integralbauweise können Bauteile sehr gut an die Beanspruchungen angepasst und Spannungskonzentrationen innerhalb eines Bauteils vermieden werden. Die Fertigung solcher Bauteile ist jedoch sehr kostenintensiv. Ferner kann ein Bauteil, bedingt durch den gleichartigen Materialeinsatz, einer Rissausbreitung kaum Widerstand leisten und ist daher sehr schädigungsanfällig.

Integrierende Bauweise

Eine Kombination der Vorteile von Differential- und Integralbauweise wird mit der Teilintegration angestrebt. Dabei wird versucht, die Zusammenfassung von Einzelteilen zu begrenzen und eine sinnvolle Unterteilung der Gesamtstruktur zu erreichen, **Bild 4-2**.

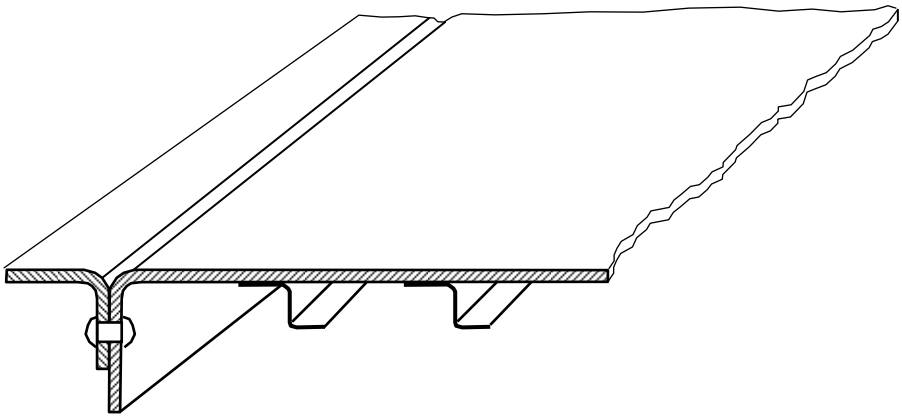


Bild 4-2: Prinzip der integrierenden Bauweise [47]

In Zusammenarbeit mit der NICO GmbH wurde eine Leichtbauumhausung für Schleifmaschinen in integrierender Bauweise entwickelt und auf ihre Rückhaltefähigkeit geprüft, **Bild 4-3**. Durch die optimierte Konstruktion wurden Funktionen wie die mechanische Dämpfung im Falle eines Aufpralls, die Schmiermittelführung sowie die Möglichkeit der modularen Bauweise in den Einzelmodulen integriert. Die Masse der Maschinenverkleidung konnte durch diesen Aufbau um ca. 50% reduziert werden.

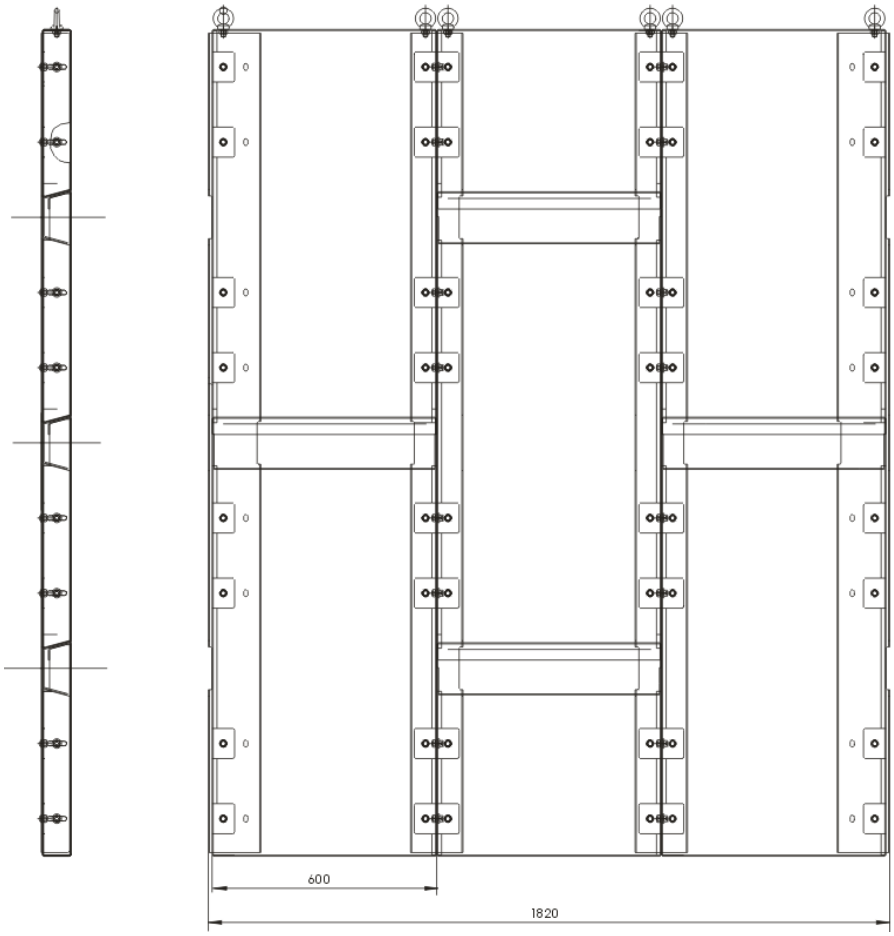


Bild 4-3: Praxisbeispiel einer Leichtbaumaschinenverkleidung in Modulbauweise der Fa. NICO GmbH, Berlin

Neben der lokalen Ausnutzung der Vorteile von Addition und Integration können Kerbwirkung, Korrosion und Rissausbreitung deutlich eingeschränkt werden.

4.2.4 Verbundbauweise

In der Verbundbauweise werden verschiedene Werkstoffe nach ihren spezifischen Eigenschaften zusammengefügt, um eine möglichst optimale Kombination zur Erfüllung von komplexen Anforderungen an Steifigkeit und Tragfähigkeit bei minimalem Gewicht zu erhalten. Sandwich- und Faserverbundkonstruktionen sind dabei gängige Umsetzungen. In **Bild 4-4** ist die Umsetzung einer Leichtbaumaschinentür in Verbundbauweise dargestellt. Für diesen Aufbau wurde eine Sandwich- mit integrierter Faserverbundkonstruktion eingesetzt. Durch diesen Aufbau konnte die Masse der Maschinentür um ca. 60% reduziert werden.

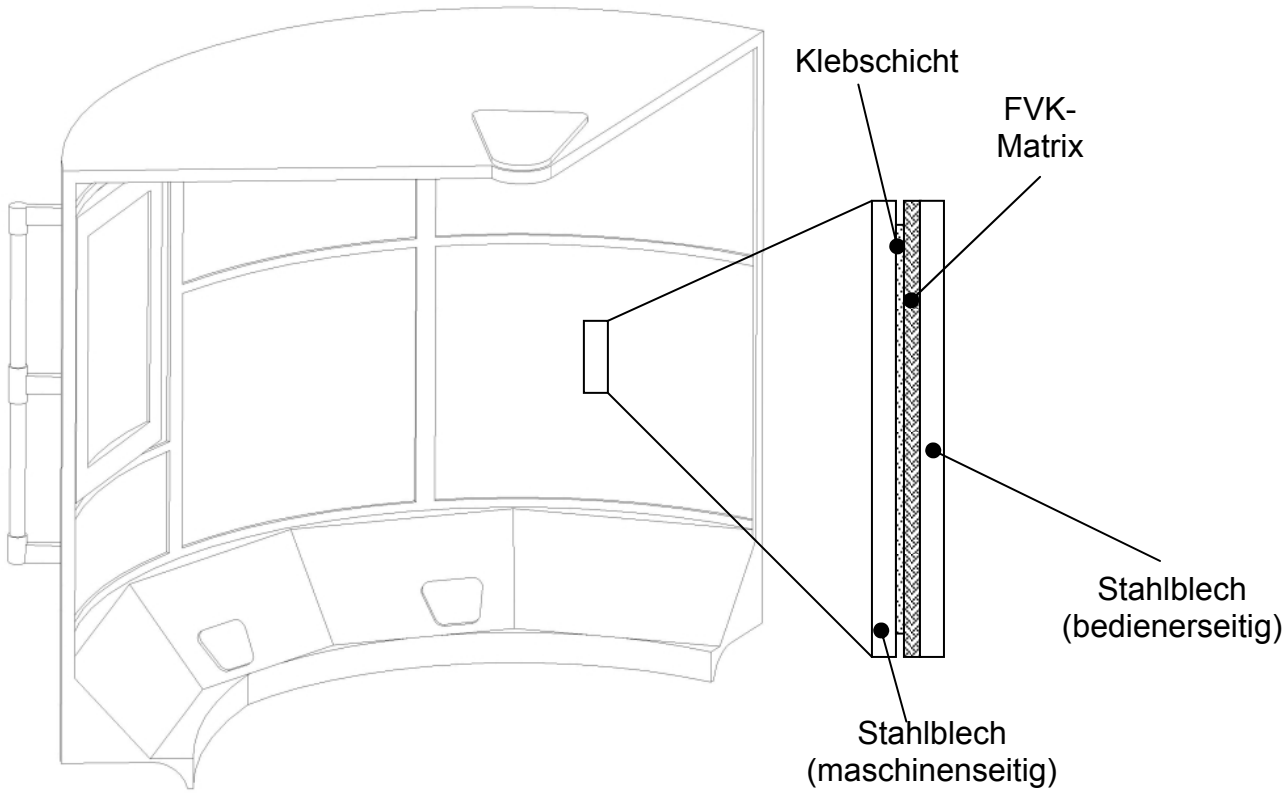


Bild 4-4: Praxisbeispiel einer Leichtbaumaschinentür in Verbundbauweise ausgeführt in einer Sandwich- und Faserverbundkonstruktion

Die Sandwichbauweise besteht aus zwei Deckschichten oder Außenhäuten und einer Zwischenschicht, die auch Kern genannt wird. Die Häute bestehen aus Metallblech oder faserverstärkten Kunststoffen und bilden die tragende Struktur. Der

Schaumstoff- oder Wabenkern stützt die Deckhäute, erträgt Querschubkräfte und sorgt mit seinem hohen spezifischen Volumen für einen großen Abstand der Häute.
Bei Faserverbundkonstruktionen werden Kunststoffe eingesetzt, die im Allgemeinen durch Glas- Kohle- oder Aramidfasern verstärkt sind. Diese können dann wie beispielsweise im Flugzeugbau mit Aluminium-Profilen als Hybridbauweise kombiniert werden.
Faserverbünde werden vornehmlich im Flugzeugbau, Motorsport und in der Sportgeräteindustrie eingesetzt, da sie die steigenden Anforderungen an Sicherheit bei minimalem Gewicht erfüllen können. Als Beispiele hierfür können die Cockpits in Automobilrennwagen, moderne Fahrradrahmen oder Rumpfteile im Flugzeugbau genannt werden. Die Herstellung dieser Verbünde kann sich jedoch sehr aufwändig gestalten, da Fertigung, Krafteinleitung und Fügung komplex sind. Durch moderne Verfahren in der Herstellung können jedoch Kosten gesenkt und der Einsatz dieser flexiblen Bauweisen wirtschaftlicher gestaltet werden [31, 13]. Probleme beim Kontrollieren von Schädigungen oder Produktionsfehler sind jedoch nicht vollständig auszuschließen und eine Reparatur von geschädigten Teilen kann sich auch als schwierig herausstellen. Eine detaillierte Vorstellung von Faserverbünden und den zugehörigen Werkstoffen erfolgt in Kapitel 5.

4.3 Zusammenfassung

Für einen Überblick sind in **Tabelle 4-1** die Vor- und Nachteile der einzelnen Bauweisen zusammengefasst.

	Vorteile	**Nachteile**
Differentialbauweise	▪ einfache Fügung ▪ Reparatur und separates Recycling möglich ▪ gutes Fail-Safe-Verhalten	▪ zusätzliches Verbindungsgewicht ▪ Kerbwirkung, Korrosion
Integralbauweise	▪ niedriges Gewicht durch „Einstückigkeit“ ▪ Anpassung an Kraftfluss und niedrige Eigenspannungen	▪ hohe Fertigungskosten ▪ schlechtes Schädigungsverhalten
Integrierende Bauweise	▪ lokale Nutzung der Vorteile aus Differential- und Integralbauweise ▪ Kerbwirkung, Korrosion und Rissausbreitung deutlich reduziert	
Verbundbauweise	▪ optimale Werte für Steifigkeit und Tragfähigkeit möglich ▪ Gewichtsreduktion durch Einsatz moderner Leichtbauwerkstoffe	▪ aufwändige (teure) Herstellung ▪ Schädigung und Struktur schwer kontrollierbar, evtl. komplizierte Reparatur

Tabelle 2-2: Übersicht der allgemeinen Bauweisen

Aus der Tabelle geht hervor, dass es keine optimale Lösung gibt, die für jeden Anwendungsfall sinnvoll ist. Die integrierende Bauweise bietet den besten Ansatz. Sie konkurriert in den erreichbaren Kennwerten mit der Verbundbauweise. Wie bereits mehrfach erwähnt, sind daher stets die einzelnen Aspekte (Kosten, Schädigungsverhalten, Reparaturfähigkeit, etc.) abzuwägen, bevor eine Entscheidung getroffen werden kann. Obwohl der Trend im Automobil- und Flugzeugbau zu den modernen Verbundbauweisen mit innovativen Werkstoffen und entsprechenden Lösungen weist, sind die Vorteile der anderen Aufbauten nicht zu vernachlässigen.

5 Werkstoffauswahl

5.1 Einleitung

Die Arbeitsicherheit an Werkzeugmaschinen nimmt einen sehr wichtigen Faktor im Bereich der industriellen Fertigung ein. Allgemein dient der Arbeitsschutz dazu, den (arbeitenden) Menschen vor gesundheitlichen Schädigungen, Beeinträchtigungen und Gefahren aller Art zu schützen [101]. Um den Schutz des Bedieners im Falle eines Werkzeug- oder Werkstückbruches zu gewährleisten, sind umfangreiche Maßnahmen im Rahmen des Maschinenschutzes durchzuführen. Der Maschinenschutz beinhaltet dabei die Gesamtheit aller technisch-konstruktiven Maßnahmen zur Verhinderung von Unfällen [101].
Die einzusetzenden Schutzeinrichtungen teilen sich in trennend und nichttrennend auf. Im Mittelpunkt der folgenden Betrachtungen sollen hier die trennenden Schutzeinrichtungen stehen, die im Gegensatz zu den nichttrennenden eine physikalische Isolierung von Maschine und Bediener bewirken und dabei über eine ausreichende Stoßfestigkeit, Steifigkeit und sichere Befestigung verfügen müssen. Hatten diese auch als Maschinenkapselung bezeichneten Gehäuse in der Vergangenheit als Hauptaufgaben die Verhinderung des Eingriffs in den Maschinenarbeitsraum sowie des Austretens von Kühlschmierstoff und Lärm, so ist inzwischen das Zurückhalten von abgeschleuderten Teilen in den Mittelpunkt gerückt [10].
Die herkömmlich verwendeten Materialien sind aufgrund der gestiegenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten und den damit verbundenen höheren Gefährdungen nur zum Teil in der Lage, die gestiegenen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, und stoßen bei der geforderten Rückhaltefähigkeit an ihre Grenzen. Dies gilt sowohl für die Schutzwände (i. d. R. aus Stahl) als auch für die Sichtfenster (Kunststoffe: meist Polycarbonat).

5.2 Neue Werkstoffe für den Maschinenschutz

5.2.1 Allgemeines

Seit Jahrzehnten bilden konventionelle Werkstoffe wie Stahl und Kunststoff die Grundlage für individuell gefertigte Produkte. Daneben gewinnen heute „Neue Werkstoffe“ immer mehr an Bedeutung. Sie zeichnen sich durch herausragende Materialeigenschaften wie eine hohe Festigkeiten und geringes Gewicht aus. Diese Eigen-

schaften werden durch aufwändige Forschung und Entwicklung für bestimmte Anwendungsbereiche gezielt maßgeschneidert. Neue Werkstoffe, die entweder Weiterentwicklungen konventioneller Werkstoffe oder echte Neuentwicklungen darstellen, lassen sich wiederum in die klassischen Materialklassen einteilen:

- Metalle,
- Polymere,
- Keramische Werkstoffe und
- Verbundwerkstoffe.

Neue Werkstoffe sind Grundlage technischer Innovationen in vielen Industriebereichen. Sie haben eine Schlüsselstellung für den technischen und wirtschaftlichen Fortschritt.

5.2.2 Werkstoffauswahl

Die systematische Suche, die experimentelle Erprobung und der anschließende praktische Einsatz neuer Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde mit hoher Aufprallfestigkeit wurden in der Vergangenheit intensiv im Bereich des Militärwesens und des Personenschutzes durchgeführt [34, 35, 88, 90, 94, 112, 120, 133].

Basierend auf einer Literaturrecherche zu Erkenntnissen aus ballistischen Untersuchungen mit hochaufprallfesten Werkstoffen [2, 14, 21, 52, 54, 86, 103, 104] wurden Materialverbünde entwickelt und im Rahmen von experimentellen Aufpralluntersuchungen hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in trennenden Schutzeinrichtungen analysiert.

Aus den klassischen Materialklassen wurden aufgrund der gegebenen Materialparameter und stichprobenartig durchgeführten Aufpralluntersuchungen folgende Werkstoffe als geeignete Weiterentwicklungen bzw. Neuentwicklungen für den Maschinenschutz identifiziert:

- **Metalle:** Metallschäume, Aluminiumleichtbau, Hochleistungsstähle und wölbstrukturierte Bleche.
- **Polymere:** Polycarbonat, Mineralguss, Kautschuk, Kunstharzpressholz und Polypropylenkernwabe (MonoPan).
- **Keramische Werkstoffe:** Hochaufprallfeste Keramiken.
- **Verbundwerkstoffe:** Faserverbundwerkstoffe sowie Verbünde verschiedener Materialklassen.

Metalle

Bei den Wandmaterialien im Maschinenschutz nimmt der klassische Werkstoff Stahl die dominierende Rolle ein. Dies ist neben den deutlichen Kostenvorteilen auch durch die vorhandene Vielfalt in den mechanischen und verarbeitungsrelevanten Eigenschaften begründet. Jedoch sind für zukünftige Leichtbauanwendungen weitere Metallarten, beispielsweise in Form von Legierungen oder Schäumen, durchaus denkbar. Um einen Überblick zu erhalten, sollen die für den Maschinenschutz potenziell interessantesten Metalle kurz vorgestellt werden.

Stahl

Die gängigen Werkstoffe im Bereich des Maschinenschutzes sind un- und niedriglegierte Stähle [134]. Für die Wandbereiche werden dabei Kaltumformstähle mit einer Blechdicke bis 3 mm nach DIN EN 10130 [N6] eingesetzt. Beispiele hierfür sind der DC 05 und der DC 06. Bei Rahmenstrukturen und Umgriffen werden dagegen warmgewalzte, unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025 [N7] verwendet. Verbreitete Baustahlsorten sind dabei der S185 und der S235JRG2 [10].

Bei erhöhten Anforderungen werden entweder die Blechdicken erhöht oder mehrlagige Aufbauten eingesetzt. Die relativ hohe Dichte des Werkstoffs wirkt jedoch möglichen Leichtbauinteressen entgegen.

Die Stahlindustrie hat in den letzten Jahren einen großen Forschungs- und Entwicklungsaufwand betrieben, um insbesondere für den Automobilbau (z. B. New Steel Body) innovative bzw. nach Kundenwünschen entwickelte Stahlsorten herzustellen und damit dem Vormarsch der Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium, Magnesium oder den faserverstärkten Kunststoffen Einhalt zu bieten [98]. Von diesen Entwicklungen könnte der Maschinenschutz ebenfalls profitieren, indem Sicherheits- oder auch spezielle Edelstähle auf ihre Einsatztauglichkeit geprüft werden. Bei den Edelstählen ist insbesondere der austenitische Chrom-Nickel-Stahl X5CrNi18-10, auch unter dem Handelsnamen „Nirosta“ bekannt, zu nennen, der in stichprobenartig durchgeführten Aufpralluntersuchungen exzellente Rückhaltefähigkeiten vorweisen konnte.

Aufgrund des Kostenvorteils könnten zukünftige Untersuchungen an den genannten oder auch weiteren modernen Stahlsorten durchaus interessant sein. Durch Anwendung von Verfahren wie Legieren, Einsatzhärten oder Vergüten im Rahmen der Stahlherstellung ist eine sehr große Bandbreite der mechanischen Eigenschaften möglich, die sogar eine gezielte Züchtung von Eigenschaften eines Leichtbaustahls für den Maschinenschutz ermöglichen könnte. Jedoch ist das Interesse der Stahl-

hersteller an einer Entwicklung eines Sonderstahls für den Maschinenschutz aufgrund der niedrigen Stückzahlen eher zu bezweifeln. Die Konzentration auf existierende Stahlsorten oder sogar Werkstoffalternativen bzw. Mischbauweisen (Sandwichkonstruktionen) steht daher im Fokus.

Aluminium (-schäume)

Aluminium hat sich unter der Zielsetzung des Leichtbaus in Bereichen wie dem Automobilbau als echte Alternative zum Stahlwerkstoff etabliert [31, 105]. Ähnlich wie Stahl besitzt Aluminium die Fähigkeit, durch verschiedene Legierungsarten und Herstellungsverfahren eine hohe Bandbreite der mechanischen und technologischen Eigenschaften zu erreichen [47]. Damit ist der Werkstoff sehr vielseitig und erfüllt durch seine geringe Dichte auch eine Zielsetzung des Leichtbaus. Die Produktion von Aluminiumwerkstoffen ist oft jedoch sehr aufwändig und bedeutet daher im Vergleich zu den Stahlwerkstoffen höhere Herstellungskosten.

Die allgemein im Leichtbau eingesetzten Aluminiumwerkstoffe sind Knet-, Guss- sowie die in der Luft- und Raumfahrt verbreiteten Sinteraluminiumpulver-(SAP-) Legierungen.

Eine weitere Anwendung stellt die Verwendung in Form von Aluminiumschäumen dar. Mit Hilfe komplexer Herstellungsverfahren kann dabei eine selbsttragende Struktur mit sehr geringer Dichte hergestellt werden, die sich zur Verwendung im Rahmen von extremen Leichtbaubestrebungen eignet [1, 20, 22, 32, 33, 47, 57, 58, 70].

Da die Festigkeitswerte unterhalb derer von Stahl liegen, ist eine Verwendung von Aluminium im Maschinenschutz hauptsächlich innerhalb von Sandwichstrukturen denkbar. Als mögliche Lösungen könnten sich Aluminiumwaben oder -schäume als Kern zwischen zwei Deckschichten aus Stahl anbieten.

Weitere Metalle

Ein weiteres zu nennendes Leichtmetall ist Magnesium. Die Eigenschaften gehen in die Richtung von Aluminium, wobei mit den Legierungen bei etwas geringeren Festigkeitswerten noch geringere Dichten zu erreichen sind. Obwohl unter anderem im Fahrzeugbau schon häufig eingesetzt [9], hat der Werkstoff jedoch Nachteile in der hohen Korrosionsanfälligkeit und geringer Schadenstoleranz [47], wodurch ein Einsatz im Maschinenschutz nach den genannten Anforderungen nicht als sinnvoll erscheint.

Gemäß den Forderungen nach geringer Dichte bei hohen Festigkeitswerten gilt Titan als ein hochinteressanter Leichtmetallwerkstoff, der im Allgemeinen als reines Metall

oder in Form von Legierungen verwendet wird. Im Vergleich zu Stahl besitzt Titan bei deutlich niedrigerer Dichte sogar teilweise höhere Festigkeiten und bietet sich daher für extreme Anwendungen in der Medizintechnik oder der Raumfahrt an. Da Titan jedoch sehr aufwändig herzustellen und nur schwer zu bearbeiten ist [47, 5], bilden die damit verbundenen sehr hohen Kosten ein klares Hindernis zum Einsatz in einer vom Kostendruck geprägten Branche wie dem Maschinenbau.

Polymere

Polymerwerkstoffe werden im Maschinenschutz häufig für die Sichtscheiben der Schutzeinrichtungen eingesetzt. Weit verbreitet ist dabei die Verwendung von Polycarbonat. Die mechanischen Kennwerte insbesondere bei Festigkeit und Steifigkeit sind im Vergleich zu anderen Werkstoffen jedoch geringer. Dessen ungeachtet ist aber auch eine Verwendung der Polymere im Rahmen von Sandwichverbindungen denkbar. Einige in Betracht kommende Polymere sollen nun kurz vorgestellt werden.

Polycarbonat (PC)

Aufgrund seiner guten Festigkeit und Härte, hohen Zähigkeit, dem großen thermischen Einsatzbereich und vor allem der hohen Transparenz [5] hat sich Polycarbonat in der Vergangenheit als Sichtscheibenwerkstoff etabliert. Im Vergleich zu den vorher verwendeten Sicherheits- bzw. Panzerglasarten zeichnet sich der Stoff außerdem durch seine niedrige Dichte, hohe Biegsamkeit und gute Verformbarkeit aus. Da Polycarbonat Schwächen in der Abriebfestigkeit besitzt, wird in der Praxis oft ein Verbund mit einer maschinenseitig verwendeten Sicherheitsglasscheibe eingesetzt. Des Weiteren werden Schutzfolien gegen die chemische Alterung an der Bedienerseite angebracht [10]. Um den erhöhten Ansprüchen der HSC-Bearbeitung zu genügen, können mehrere PC-Scheiben zu Scheibenverbünden gefügt werden. Die damit verbundene Erhöhung der Aufprallfestigkeit hat jedoch auch eine Gewichtserhöhung zur Folge.

Bedingt durch die oben genannten Eigenschaften ist ein Einsatz als Sandwich mit Polycarbonat als Kernmaterial und Stahldeckblechen für den Wandbereich ebenfalls denkbar.

Weitere Polymere

Ähnlich wie Polycarbonat eignen sich auch einige andere Polymere aufgrund ihrer geringen Dichte, ihrer weitgehenden Medienbeständigkeit, guten schalldämpfenden

Eigenschaften sowie der vielfach guten Verarbeitbarkeit [49] für die Verwendung als Sandwich-Kernmaterialien für eine Maschinenschutzwand.
In stichprobenartigen Aufpralluntersuchungen wurden u. a. bereits

- Polyurethan (Studien von Langbein [55] und Lehmann [56]),
- Kautschuk,
- Kunstharzpressholz sowie
- Polypropylen eingesetzt.

Die Anwendung erfolgte zumeist in Form von Sandwichbauweisen mit jeweils zwei Stahlblechen als Deckschichten. Die getesteten Polymerwerkstoffe konnten bei den Versuchen vielfach gute Ergebnisse erzielen und scheinen daher eine geeignete Alternative zum herkömmlichen Stahl darzustellen.

Keramische Werkstoffe

Keramiken sind nichtmetallische-anorganische Werkstoffe, die durch sehr hohe Härte, hohe Verschleiß- und Druckfestigkeit sowie hohe thermische Beständigkeit gekennzeichnet sind [5]. Im Vergleich zu Stahl besitzen sie auch eine deutlich geringere Dichte, wodurch sie sich in Form von hochaufprallfesten Ausführungen durchaus für den Einsatz im Maschinenschutz eignen könnten. Bedingt durch die hohe Verschleißfestigkeit besteht ferner eine hohe Spänebeständigkeit, wodurch auf ein maschinenseitiges Stahlblech zur Abriebverminderung der Schutzwand verzichtet werden könnte.
Als großer Nachteil ist jedoch die große Sprödigkeit zu nennen, die bei einer Beschädigung der Struktur zu einem großflächigen Bruch im Material und damit einer schlechten Fail-Safe-Eigenschaft führen kann.

Verbundwerkstoffe

Geprägt von einer Reihe Neu- und Weiterentwicklungen gelten die Verbundwerkstoffe als sehr moderne Werkstoffform. Ein Verbund entsteht dabei durch die Kombination von mehreren Werkstoffen, wobei die vorteilhaften Eigenschaften der einzelnen Stoffe optimal zur Wirkung kommen sollen. Die bekanntesten Verbünde sind die faserverstärkten Kunststoffe. In den letzten Jahren wurden jedoch auch weitere Faserverbindungen mit Keramiken oder Metallen entwickelt [132]. Die erreichbaren Stoffeigenschaften können bedingt durch die unterschiedlichen Werkstoffe dabei stark variieren.

Faserverstärkte Kunststoffe

Die Faserverstärkten Kunststoffe gehören zu der Gruppe der Polymer-Verbundwerkstoffe (PMC = Polymer Matrix Composites) und stellen die bekannteste und wichtigste Gruppe aller Verbundwerkstoffe dar [42]. Das Konstruktionsprinzip beruht dabei auf einer Einbettung von Fasern in einen polymeren Grundwerkstoff (Matrix) zur Erhöhung der Festigkeit und Steifigkeit [132]. Die am weitesten verbreiteten Faserwerkstoffe stellen dabei die Glas-, Kohle- und Aramidfasern dar. Als polymerer Matrixwerkstoff werden im Allgemeinen Thermoplaste (z. B. Polyamid) und Duromere (Harze aus Epoxid oder Polyester) eingesetzt [47].

Die vergleichsweise preiswerten glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK) eignen sich insbesondere zur Aufnahme von Biegebelastungen, während sich die sehr teuren kohlefaserverstärkten Kunststoffe (CFK) durch ihre hohe Festigkeit für den Einsatz in sehr hoch belasteten Bauteilen anbieten. Aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK) zeichnen sich vor allem durch ihre sehr hohe Energieaufnahme bei Zug- und Schlagbelastung aus. Wegen dieser Eigenschaften werden sie bisher insbesondere zum ballistischen Schutz im Militärwesen und im Personenschutz eingesetzt. Im Vergleich zu den anderen genannten Faserarten zeichnen sich die Aramidfasern zusätzlich durch ein sehr geringes Gewicht aus [12, 42, 43, 83, 84, 85, 117].

Aus den oben genannten Gründen bietet sich daher der Einsatz von AFK-Strukturen auch für den Maschinenschutz an. Es ist dabei lediglich zu beachten, dass wie bei allen Verbundwerkstoffen die Kosten für Herstellung und Verarbeitung im Vergleich zu allen anderen genannten Werkstoffgruppen noch einmal deutlich höher liegen.

Weitere Verbünde

Aus dem Bereich der PMC kann weiterhin der Polymerbeton genannt werden. Der Werkstoff besteht aus der duromeren Bindemasse (Grundmatrix) und einem Füllstoff aus Steinchen oder Sand [42].

Weiterhin könnten die faserverstärkten Metalle aus der Gruppe der Metallmatrix-Verbundstoffe (MMC = Metal Matrix Composites) zukünftig für den Maschinenschutz interessant werden. Diese werden meistens auf Basis der Leichtmetalle Aluminium und Magnesium hergestellt und zielen damit ebenfalls auf den Leichtbau ab [28]. Als Verstärkungswerkstoff werden Kohlenstoff- oder Borfasern verwendet. Die Herstellung dieser Verbünde ist aufgrund der hohen Verarbeitungstemperaturen der Metalle jedoch noch sehr schwierig und folglich mit hohen Kosten verbunden. Vielfach befinden sich die Werkstoffe auch noch in der Entwicklung [47]. Keramikfasern bilden

durch ihre höhere Temperaturbeständigkeit eine Alternative zu den konventionellen Fasertypen [42].

Die dritte Gruppe der Keramikmatrix-Verbundstoffe (CMK = Ceramic Matrix Composites) enthält die Verstärkung von keramischen Werkstoffen mit Hilfe von Keramikfasern, wodurch der oben genannte Nachteil der großen Sprödigkeit von Keramiken verringert werden kann. Die Verbünde bieten sich bei hohen Einsatztemperaturen, einer korrosiven Umgebung und verschleißbeanspruchten Bauteilen an. Aufgrund ihrer immens hohen Kosten werden sie jedoch nur in wenigen Bereichen wie dem Motorsport (Bremsscheiben) eingesetzt [42] und stellen somit keine Alternative für den Maschinenschutz dar.

5.2.3 Werkstoffeigenschaften

Für die erfolgreiche Anwendung der unterschiedlichen Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde ist in der Regel nicht nur eine bestimmte Eigenschaft maßgebend. Erst eine Kombination der positiven Eigenschaften ist für die häufigsten Einsätze zielführend. Die für die Entwicklung trennender Schutzeinrichtungen zu untersuchenden Eigenschaften sind die statischen Kenngrößen, das thermische Verhalten, die Medienbeständigkeit, die Spänebeständigkeit, die Rückhaltefähigkeit bei Einzel- und Mehrfachbeschuss, die schalltechnischen Eigenschaften sowie die Ökobilanz.
Die Werkstoffeigenschaften wurden so weit als möglich durch Zahlenangaben in Tabellenform präzisiert, wo das nicht möglich ist, wurden verbale Aussagen möglichst klar formuliert [89].

Statische Kenngrößen

Maschinenumhausungen werden weniger nach hohen Festigkeiten, sondern meist unter Steifigkeitsgesichtspunkten – minimale Verformung bei Krafteinleitung – dimensioniert. Die statischen Kenngrößen der ausgewählten Materialien sind in **Tabelle 5-3** dargestellt.

statische Kenngrößen		**Werkstoffeigenschaft**			
		Elastizitätsmodul [kN/mm²]	Dichte [g/cm³]	Druckfestigkeit [N/mm²]	Rißzähigkeit [MPam$^{1/2}$]
Material	Stahl	100-400	7,85	250-1500	50-150
	Keramik	270-380	3,8-3,96	2000-4000	3-5
	Polycarbonat	2,4	1,2	110	1
	Aluminium	70	2,7	124	36
	Mineralguss	30-50	2,2-2,4	130-150	0,2-1,4
	Aluminiumschaum	0,4-1,0	0,23-0,25	1,7-2,2	0,31-0,37
	Aluminiumwabe	70	0,46	2,5-4	30
	Kunstharzpressholz	170	1,35-1,4	270	2-4
	Aramidfaser	71	1,44	-	12-25

Tabelle 5-3: Statische Kenngrößen der untersuchten Werkstoffe

Thermisches Verhalten

Durch Prozesswärme sowie äußere und innere Wärmequellen treten an Maschinenkomponenten thermisch bedingte Deformationen auf [91]. Von außen sind insbesondere Strahlungseffekte, Luftzirkulation sowie der Temperaturgradient in der Werkhalle von Bedeutung. Innere Wärmequellen sind Motoren, Pumpen, Hydrauliken, Führungen und Spindeln. Das thermische Verhalten von Werkstoffen wird im Wesentlichen von den Kenngrößen thermischer Ausdehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität bestimmt, **Tabelle 5-4**.

thermische Kenngrößen		**Werkstoffeigenschaft**		
		thermischer Ausdehnungskoeffizient (α) [10^{-6}/K]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kgK)]
Material	Stahl	12	50	0,49
	Keramik	7,1-7,3	24-28	0,9
	Polycarbonat	70	0,21	1,17
	Aluminium	23	209	0,9
	Mineralguss	9-18	1-3	0,7-1,3
	Aluminiumschaum	2,3-2,68	3,5-4,5	0,83-0,87
	Aluminiumwabe	2,4	0,95-2,7	-
	Kunstharzpress-holzz	8	0,28-0,31	-
	Aramidfaser	-1,5-0	0	-

Tabelle 5-4 Thermische Kenngrößen der untersuchten Werkstoffe

Medienbeständigkeit

In Maschinen werden immer wirksamere und aggressivere Kühlschmierstoffe eingesetzt. Bei der Verwendung neuer Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde für den Einsatz in der Maschinenumhausung ist deshalb die Beständigkeit gegenüber diesen Medien für den Maschinenhersteller und -anwender besonders wichtig. Im Gegensatz zu konventionellen Metallwerkstoffen findet bei vielen neuen Werkstoffen keine Korrosi-

on statt. Daher lassen sich sowohl kostenaufwändige Korrosionsschutzmaßnahmen einsparen als auch die Optik der Oberflächen verbessern.

Polycarbonat stellt zurzeit das meist eingesetzte Sichtscheibenmaterial dar. Polycarbonat besitzt ein deutlich höheres Energieaufnahmevermögen als andere transparente Kunststoffe oder Mineralglas, und ist somit gut geeignet schlagartige Beanspruchungen aufzunehmen [66, 67, 115]. Aus diesem Grund lag der Einsatz auch als Wandmaterial in der trennenden Schutzeinrichtung nahe.

Für den praktischen Einsatz ist die Kenntnis der Medienverträglichkeit wichtig. Polycarbonat ist beständig gegen Mineralsäuren, viele organische Säuren, Oxidationsmittel, neutrale und saure Salzlösungen, viele Fette, Wachse und Öle, gesättigte aliphatische und cycloaliphatische Kohlenwasserstoffe und Alkohole ausgenommen Methylalkohol [23, 44, 113]. Relativ gut beständig ist Polycarbonat auch gegen wässrige Lösungen von Peroxiden, Persulfaten oder oxidierend wirkenden Säuren bis zu hohen Konzentrationen.

Besondere praktische Bedeutung hat die Unverträglichkeit mit einigen PVC-Weichmachern [25, 60], was speziell bei der Verwendung von Schutzfolien auf Polycarbonathalbzeugen zu beachten ist. Polycarbonat ist unbeständig gegen niedermolekulare halogenierte Kohlenwasserstoffe, niedermolekulare aromatische Verbindungen (Toluol, Chlorbenzol u. a.) und basische Komponenten wie Amine. Diese Substanzen treten beispielsweise in industriellen Reinigern auf [87].

Aramidfasern haben eine gute chemische Beständigkeit und werden erst von starken Säuren und Basen bei erhöhten Konzentrationen und Temperaturen angegriffen. Allerdings neigen sie zur Feuchtigkeitsaufnahme (1-7 % bei 20°C und 55 % rel. Feuchte) [68, 78].

Die wegen ihrer geringen Dichte eingesetzten Aluminiumwerkstoffe überziehen sich an Luft mit einer Oxidhaut und besitzen damit eine bestimmte Korrosionsbeständigkeit. Diese Schicht kann durch Eloxierung künstlich verstärkt werden. Aluminiumwerkstoffe sind damit im normalen Betrieb resistent gegen Umgebungseinflüsse. Es existieren jedoch Ausnahmefälle, insbesondere in Industrieatmosphäre, bei Benetzung mit Kühlschmierstoffen oder auftretenden Dämpfen, bei denen es zu einer Auflösung bzw. zu einer Lochfraßkorrosion des Aluminiumwerkstoffs kommen kann.

Das untersuchte Kunstharzpressholz zeichnet sich durch seine Unempfindlichkeit gegen Öle und viele Chemikalien sowie durch seine Korrosionsbeständigkeit aus.

Allerdings nimmt Kunstharzpressholz in Abhängigkeit von seiner Dicke Wasser auf und kann durch diese Aufnahme von Feuchtigkeit quellen.
Die bei Mineralguss auftretenden Quellerscheinungen aufgrund zyklischer Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe durch die in diesem Werkstoff vorhandenen Kapillaren sind bei epoxidharzgebundenen Mineralgusswerkstoffen nicht [97] bzw. nur in minimalem Umfang [91] zu beobachten. Mineralguss besitzt eine hohe chemische Widerstandsfähigkeit gegenüber Kühl-, Schmier- und Reinigungsmitteln, Hydraulikölen und Dielektrika [41].
Die zu untersuchenden Kautschukmatten zeigten sich gegenüber Ölen und Chemikalien weitgehend beständig [78].

Spänebeständigkeit

Bei der Hochgeschwindigkeitsdreh- und Fräsbearbeitung treffen Späne unterschiedlicher Geometrie und Temperatur mit hohen Geschwindigkeiten auf die trennenden Schutzeinrichtungen. In der Serienproduktion kann diese Dauerbelastung zu einem nicht unerheblichen Verschleiß an der Maschinenumhausung führen. Zur definierten Simulation des Abriebs ist es notwendig, einen Prüfstand zu entwickeln und aufzubauen, der den Beschuss mit Spänen unterschiedlicher Temperatur und Geometrie zulässt.
Zu einem derartigen „Spänebeschussprüfstand“ ist am Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz (IWU) eine Studie erarbeitet worden, die sämtliche Versuchsbedingungen in einem Dauertest ermöglicht [51]. Die Kosten, die für einen derartigen Prüfstand veranschlagt wurden, beliefen sich auf mehr als 50.000,- €. Aufgrund der hohen Kosten und der Annahme, dass zur Stabilisierung und zum Schutz der Werkstoffe Stahldeckbleche maschinenseitig angebracht werden, wurde auf den Bau eines Prüfstandes verzichtet.

Ökobilanz

Für die Erstellung einer Ökobilanz muss zunächst das zu untersuchende Objekt und das Ziel der Erhebung präzisiert werden. Eine derartige Zieldefinition beinhaltet die Festlegung und Abgrenzung (zeitlich wie räumlich) des zu untersuchenden Objekts, den Grund und die Zielsetzung für die Untersuchung sowie die Interessengruppen. Zur räumlichen Abgrenzung gibt es drei Möglichkeiten [28]:

Betriebsbilanz:

Im Rahmen einer Betriebsbilanz kann wahlweise das ganze Unternehmen, ein Werk oder nur ein Werksbereich untersucht werden. Charakteristisches Merkmal ist, dass nur die Energieströme erfasst werden, die an den Unternehmensgrenzen in sämtliche Produktionsprozesse und Produkte des Betriebes eingehen (Input) und dort entstehen (Output) [71].

Prozessbilanz:

Bei der Prozessbilanz wird ein ausführlicher Einblick in betriebliche Abläufe angestrebt, indem ein einzelner Prozess des Unternehmens bilanziert wird: zunächst erfolgt die Zerlegung in die einzelnen Prozessstufen, dann die Zurechnung der In- und Outputs zu diesen Stufen. Gegenstand dieser Bilanzform ist die Optimierung bestehender Prozesse [45, 74, 96].

Produktbilanz:

Beim Begriff der Produktbilanz muss zwischen der Produktbilanz nach DIN EN ISO 14040 [N8] und der betrieblichen Produktbilanz unterschieden werden. Erstere wird auch als „Life Cycle Assesssment“ (LCA) bezeichnet. Nach DIN EN ISO 14041 [N9] versteht man darunter die Betrachtung des gesamten Lebenswegs eines Produktes „von der Wiege (Rohstoffgewinnung) bis zur Bahre (Entsorgung)“.

Aufgrund der Fülle der zu erhebenden Daten und des damit verbundenen Aufwandes erfolgt in der Unternehmenspraxis zumeist eine Beschränkung auf die eigenen Produktionsschritte in Form der betrieblichen Produktbilanz. Dabei werden nur diejenigen Stoffe, Energien und Emissionen erhoben, die im zu untersuchenden Betrieb für die Herstellung des Produktes eingesetzt werden oder dabei entstehen. Diese In- und Outputs werden dann dem Produkt direkt zugerechnet. Es handelt sich hier also im Gegensatz zur Betriebs- und Prozessbilanz um eine Stückrechnung. Die Energie- und Stoffströme werden nicht auf einen bestimmten Zeitraum, sondern auf eine bestimmte Ausbringungsmenge bezogen).

Vor dem Hintergrund der geringen Wichtung durch die Vertreter der deutschen Werkzeugmaschinenhersteller und des großen Zeitaufwandes wurde auf eine ausführliche Bilanzierung der einzelnen Produkte verzichtet. Viel mehr wurde auf die bereitgestellten Daten der Zulieferer zurückgegriffen, **Tabelle 5-5**.

Werkstoff	Energiebilanz bei Herstellung	Entsorgung / Recycling durch
Polymerbeton (Mineralguss)	Die Herstellung von Mineralguss erfolgt ohne externe Wärmezufuhr. Im Vergleich zu der Erschmelzung von Stahl oder Grauguss 20 % - 40 % weniger Primärenergie notwendig.	- Deponierbar auf Baureststoffdeponien - Verwendung als Auffüllmaterial - Bauschutt-/ Recyclingmaterial
Aramidfaser	k. A.	- Bauteilrecycling - Werkstoffrecycling i) chemisch/thermische Abbauverfahren für die Gewinnung von petrochemischen Zwischenstoffen ii) chemisch/thermische Abbauverfahren für die Rohstoffgewinnung iii) chemisch/thermische Abbauverfahren zur Energiegewinnung iv) chemisch/thermische Verfahren zur Entsorgung von Problemstoffen v) biologische Verfahren
Kautschukmatte	Umweltverträgliche und ressourcenschonende Produktionsmethoden. Für den Fertigungsprozess benötigtes Kühlwasser wird in Kreisläufen gefahren, sodass die verbrauchte Menge an Frischwasser auf ein Minimum reduziert wird. Anfallende Produktionsreste werden betriebsintern als Wertstoffe aufbereitet und in den Fertigungsprozess zurückgeführt.	- Produktionsreste wiederverwertet→ granuliert → Teil der Rohstoffbasis verschiedener Produkte - Rücknahme durch Hersteller - Weiterverwertung - Stoffliche Verwertung - Thermische Verwertung - Vollständige stofflich-thermische Verwertung - deponierbar
Polycarbonat	k. A.	- Werkstoffliches Recycling, - Rohstoffliches Recycling, - Energetische Verwertung.
Aluminium-schaum	Erstherstellung von Aluminium benötigt hohen Energieinput, Energie bleibt aber zu ca. 95 % im Aluminium erhalten.	- z.B. durch Auswaschen mit Salzlösung in Recyclingprozess von Aluminium oder direkt als Schmelze in der Neuherstellung.
Kunstharzpressholz	k. A.	- z.B. Energetische Verwertung
Aluminiumleichtbauwabe	Erstherstellung von Aluminium benötigt hohen Energieinput, Energie bleibt aber zu ca. 95% im Aluminium erhalten	Ist dem Recyclingprozess von Aluminium zuführbar.
Polypropylenkernwabe (MonoPan)	k. A.	k. A.
Aluminiumoxid (Keramik)	k. A.	k. A.

Tabelle 5-5: Produktbilanz der untersuchten Werkstoffe

5.3 Zusammenfassung

In Zukunft können unter der Prämisse des Leichtbaus einige Werkstoffe für den Maschinenschutz interessant werden. Dabei stellen neben modernen Stählen vor allem das Leichtmetall Aluminium in unterschiedlichen Ausführungen (Vollmaterial, Waben, Schäumen) und verschiedene Polymere sinnvolle Alternativen zum herkömmlich verwendeten Stahl dar. Denkbar sind dabei insbesondere Sandwichlösungen, in denen die neuen Werkstoffe als Kern zwischen zwei stützenden und verschleißbeständigen Stahldeckblechen eingesetzt werden könnten. Moderne Verbundwerkstoffe, besonders AFK, sind ebenfalls interessant. Ein großes Hindernis könnten die deutlich höheren Werkstoffkosten bilden.

Alle Werkstoffe müssten in Form von sinnvollen Wand-, Tür- oder Fensteraufbauten intensiv getestet werden, um die komplexen Anforderungen erfüllen zu können.

6 Durchführung von Aufpralluntersuchungen zur Bestimmung des Durchdringungswiderstandes

6.1 Einleitung

Anfang der 90er Jahre wurde am Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit (BIA), Sankt Augustin, eine pneumatische Beschussvorrichtung zur Durchführung von Aufpralluntersuchungen an Maschinenumhausungen aufgebaut. Mit dieser Anlage können Aufprallprüfkörper mit bis zu 2,5 kg Masse und einer Geschwindigkeit von 80 m/s abgeschossen werden. Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wurde 1992 die erste Version des Anhanges A zum Normentwurf DIN EN 12415 [N3] „Sicherheit von Werkzeugmaschinen – kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren“ formuliert, welche 2001 verabschiedetet wurde. In Anlehnung an diesen Normentwurf wurde die Aufprallprüfung auch in den Anhang zum Normentwurf DIN EN 12417 [N4] „Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Bearbeitungszentren“ aufgenommen, welche ebenfalls im Jahr 2001 verabschiedet wurde. Im Jahre 1997 wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) eine Beschussprüfanlage aufgebaut die die Leistungsgrenze der BIA-Prüfvorrichtung mit Geschwindigkeiten von über 250 m/s und Projektilmassen bis 20 kg weit überschreitet. Da die Hersteller moderner Werkzeugmaschinen die Sicherheit ihrer Maschinen nachweisen müssen ist die Aufprallprüfung auch in die folgenden Sicherheitsnormen aufgenommen worden, **Tabelle 6-1**:

Norm	Datum	Kurztitel	Literaturstelle
DIN EN 12417	2001	Sicherheit - Bearbeitungszentren	[N4]
DIN EN 13128	2001	Sicherheit – Fräs- und Bohr-Fräsmaschinen	[N18]
DIN EN 12415	2001	Sicherheit – kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen	[N3]
DIN EN 12478	2001	Sicherheit – große numerisch gesteuerte Drehmaschinen	[N19]
DIN EN 12840	2001	Sicherheit – handgesteuerte Drehmaschinen	[N20]
DIN EN 13788	2002	Sicherheit – Mehrspindel-Drehautomaten	[N21]
DIN EN 14070	2003	Sicherheit – Transfer- oder Sondermaschinen	[N22]

Tabelle 6-1: Produktsicherheitsnormen für Fräs- und Drehmaschinen

Aufgrund des hohen Stellenwertes der Aufprallsicherheit trennender Schutzeinrichtungen wird im Folgenden insbesondere auf dieses Thema sowie auf spezielle Sonderfälle eingegangen. Darüber hinaus wird eine Prüfvorschrift für den Fall der Mehrfachaufprallprüfung entwickelt.

6.2 Durchführung normativer Aufprallprüfungen

6.2.1 Allgemeines

In Zusammenarbeit mit Vertretern der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie wurde eine Gefahrenanalyse an modernen Werkzeugmaschinen für die Dreh- bzw. Fräsbearbeitung durchgeführt. Es wurden zwei Gefahrenbereiche identifiziert, die zum aktuellen Zeitpunkt die höchsten normativ erfassten Belastungen darstellen. Diese stellen sich wie folgt dar:

für *Bearbeitungszentren* nach DIN EN 12417 [N4]

(Projektil: 100 g-Normprojektil; Prüfgeschwindigkeit: $v_{Prüf.}$: 200 m/s),

für *kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren* C3-Prüfung nach DIN EN 12415 [N3]

(Projektil: 2,5 kg-Normprojektil; Prüfgeschwindigkeit: $v_{Prüf.}$: 80 m/s)

Das vorrangige Ziel ist es, Prüfmusteraufbauten mit Hilfe neuer Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünden zu entwickeln, die diesen Belastungen sicher standhalten. Zur Gewährleistung der Rückhaltefähigkeit wurden am IWF Berlin zahlreiche Aufprallprüfungen an den entwickelten Prüfmustern durchgeführt.

Aufprallprüfstand

Für die Versuchsdurchführung wurde folgender Versuchsaufbau genutzt, **Bild 6-1**:

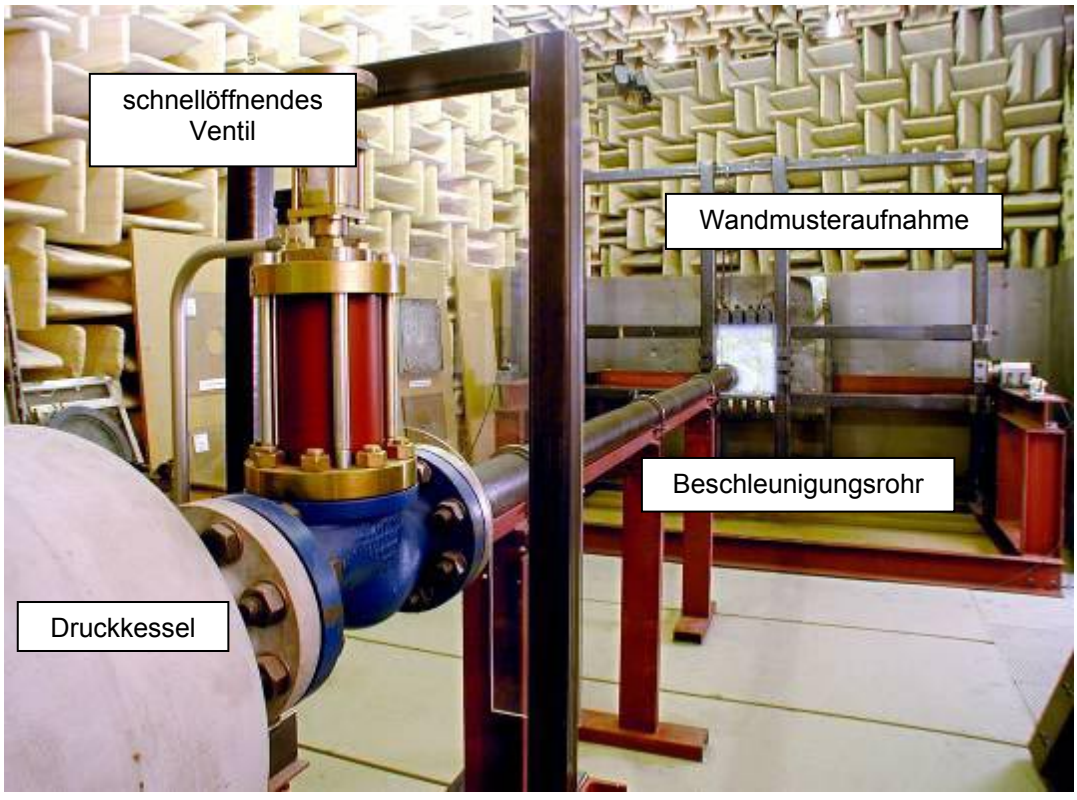


Bild 6-1: Der Aufprallprüfstand am IWF der TU Berlin

Der Versuchsstand ist aus zwei Baugruppen aufgebaut: der Beschleunigungsvorrichtung und der Wandmusteraufnahme. Die Beschleunigungsvorrichtung besteht aus einem Hochdruckkompressor mit einer Maximalleistung von 80 bar, einem 200 l-Druckbehälter, einem schnellöffnenden Ventil und einem Beschleunigungsrohr mit einem Innendurchmesser von 100 mm.

Ein Kompressor verdichtet Luft bis zu einem maximalen Druck von 80 bar in einem für 100 bar zugelassenen Druckkessel.

Die Druckluft wird dann schlagartig über ein schnellöffnendes eigenmediumgesteuertes Ventil in das 4 m lange Beschleunigungsrohr entlassen. Am Ende des Beschleunigungsrohres ist ein Stahlring mit einem kleineren konzentrischen Innenradius von 70 mm befestigt, an dem der Projektilträger abrupt abbremst, während das Projektil seine Bahn fortsetzt.

Die Projektilträger dienen zur kontrollierten Führung des Projektils im Beschleunigungsrohr, um eine bestimmte Austrittsbahn zu gewährleisten. Die Projektilträger für das 100 g-Normprojektil müssen für jeden einzelnen Aufpralltest neu aus einem Zwei-Komponenten PU-Schaum der Firma VOSS-Chemie gegossen werden, da sie beim Auftreffen auf die Stahlringbremse zerstört werden. Das 2,5 kg-Normprojektil wird von zwei Ringen aus Polyamid im Beschleunigungsrohr geführt. Die Polyamidringe werden angesägt, so dass sie beim ersten Auftreffen sofort zerbrechen ohne das Prüfergebnis zu verfälschen, **Bild 6-2**.

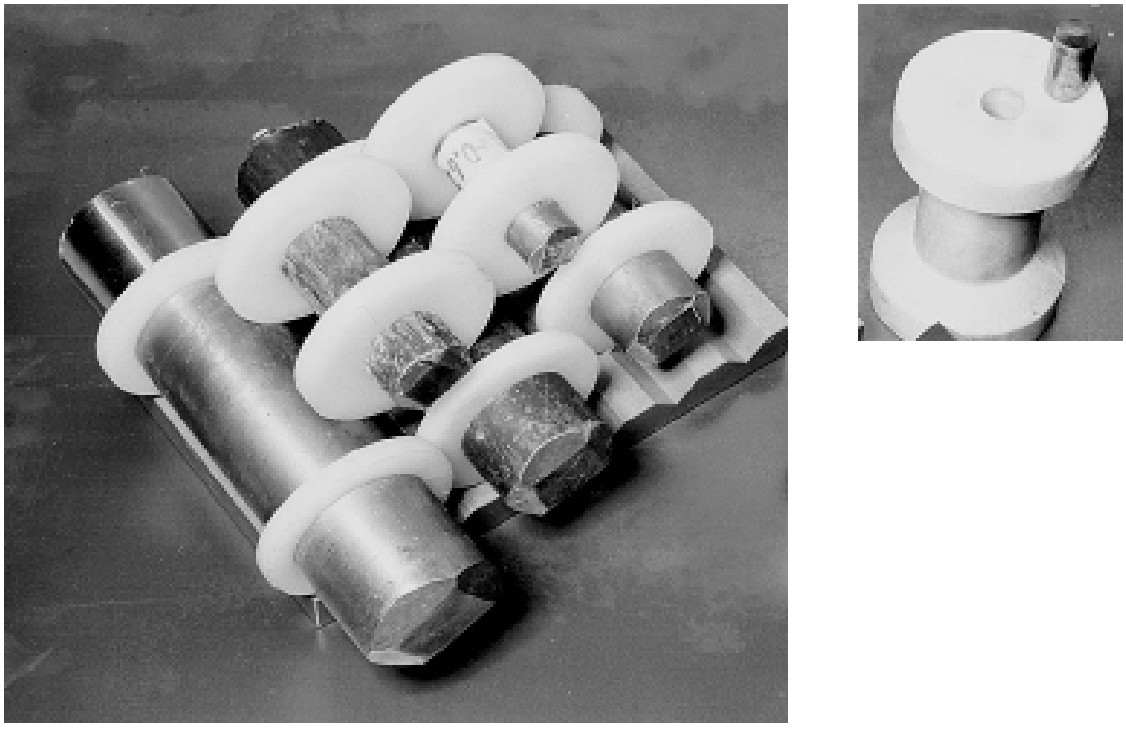


Bild 6-2: Aufprallprüfprojektile: links: DIN EN 12415; rechts: DIN EN 12417

Mit Hilfe zweier Laserlichtschranken, die an einem Oszilloskop angeschlossen sind und sich in einem Abstand von L = 140 mm zueinander befinden, wird die Durchgangszeit Δt des aus dem Rohr geschleuderten Projektils in einer Auflösung von 10 µs gemessen. Die Geschwindigkeit der Projektile errechnet sich dann als Quotient aus Abstand und Zeit zu:

$$v = L / \Delta t \qquad \text{Formel 6-1}$$

Die Wandmusteraufnahme ist als Schweißkonstruktion und in der Horizontalen schwenkbar ausgeführt. Das Grundgestell besteht aus IPB-200-Trägern, der Schwenkrahmen aus Kastenprofilen der Größe 140 mm x 80 mm x 5 mm.

6.2.2 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Ermittlung optimierter Prüfmusteraufbauten

Für die Ermittlung des optimalen Prüfmusteraufbaus müssen verschiedene Faktoren beachtet werden. Zum Einen muss der Prüfmusteraufbau den vorgegebenen Belastungen standhalten und zum Anderen ein möglichst niedriges Gewicht aufweisen. Da ein Großteil der Materialien noch nicht beschusstechnisch untersucht wurden, kann die potenzielle Rückhaltefähigkeit nur anhand von Materialkennwerten abgeschätzt werden. Ist ein Aufbau gefunden, der den vorgegebenen Belastungen standhält, muss dieser bezüglich seiner Masse konstruktiv optimiert werden.

Wie eingangs beschrieben, ist es das Ziel, für zwei unterschiedliche Belastungsformen geeignete Wandmuster zu entwickeln. Im Bereich der Bearbeitungszentren gilt es Projektile mit geringen Massen und hohen Aufprallgeschwindigkeiten sicher zurückzuhalten. Im Bereich der Drehmaschinen müssen Rückhaltesysteme entwickelt werden, die Projektilen mit großen Massen und vergleichsweise niedrigen Geschwindigkeiten standhalten.

Da diese beiden Belastungsformen grundsätzlich unterschiedliche Anforderungen an die Schutzeinrichtungen stellen, müssen für jedes Material je ein Aufbau für jeden Belastungsfall entwickelt und optimiert werden.

6.2.3 Ermittlung des kritischen Durchdringungswiderstandes der optimierten Prüfmuster

Die Aufnahme der Prüfmuster im Aufprallprüfstand erfolgt in der Form, dass die Wandmuster an einen Spannrahmen aus Stahl angelegt und mit diesem zusammen an der Aufnahme reibschlüssig handfest mit Hilfe von Klemmschrauben und Holzleisten aufgespannt werden. Auf diese Weise ist es den Prüfmustern möglich, sich unter

der stoßartigen Aufprallbelastung in der Plattenebene zu bewegen und in den Fensterausschnitt zu fließen.

Die visuelle Bewertung der Aufprallprüfungen wird anhand der Schadensbilder in vier Typen unterteilt, **Tabelle 6-2**.

Typ/Beschreibung	Prüfmusterbeispiel
I • rissfreies Prüfmuster • Beulen im Bereich des Aufprallortes • Prüfung bestanden	
II • durchgehender Riss des Prüfmusters im Bereich des Aufprallortes • bedienerseitiges Aufklaffen • Prüfung nicht bestanden	
III • vollständige Durchdringung des Prüfmusters im Bereich des Aufprallortes • Prüfung nicht bestanden	
IV • rissfreies Prüfmuster • Prüfmuster wird durch die Prüfmusteraufnahme gezogen • Prüfung nicht bestanden	

Tabelle 6-2: Bewertung der Aufprallprüfungen anhand von Schadensbildern

Bei den durchgeführten Versuchen stellten sich drei Aufbauvarianten als optimale Lösungen heraus: der monolithische Aufbau, der Sandwichaufbau und der 2-Komponenten-Verbundaufbau. Sowohl beim Sandwichaufbau als auch beim 2-Komponenten-Verbundaufbau dienen Stahlbleche variabler Dicke als Trägermate-

rial bzw. als Decklagen. Bei den 2-Komponenten-Verbundaufbauten befindet sich das Stahlblech stets auf der Bedienerseite. Die Aufbauten, die sich unter Einhaltung der Sicherheitsanforderungen durch besonders niedriges Gewicht und eine geringe Dicke auszeichneten sind in **Tabelle 6-3** und **Tabelle 6-4** dargestellt. Die ausführlichen Aufprallprüfergebnisse sind im Kapitel12, Anhang A aufgeführt.

Optimierter Prüfmusteraufbau für die Prüfklasse C3 nach DIN EN 12415 (2,5 kg-Prüfprojektil/ 80 m/s Aufprallgeschwindigkeit)						
Material	Prüfmusteraufbau (m²)		Materialdicke [mm]			Masse [kg]
	monolithisch	Verbund	maschinen-seitig	Zwischenlage	bediener-seitig	
Stahl	X		5			39,25
Monopan		Sandwich	1	30	3	32,66
Mineralguss		Sandwich	2	50	2	141,40
Kunstharz-pressholz		Sandwich	1	25	3	65,12
Kautschuk		2-Komponenten*	9	-	4	40,30
Polycarbonat		Sandwich	2	8	1	33,15
Aluminium-schaum		Sandwich	1	25	3	37,64
Aluminium-leichtbauwabe		Sandwich	1	25	3	42,90
Aluminium	X		10			27,00
Edelstahl X5CrNi18-10	X		4			31,60

Tabelle 6-3: Für die Prüfklasse C3 nach DIN EN 12415 [N3] optimierter Prüfmusteraufbau

Optimierter Prüfmusteraufbau für DIN EN 12417 (100 g-Prüfprojektil/ 200 m/s Aufprallgeschwindigkeit)						
Material	Prüfmusteraufbau (m²)		Materialdicke [mm]			Masse [kg]
	monolithisch	Verbund	maschinen-seitig	Zwischenlage	bediener-seitig	
Stahl	X		8			62,80
Monopan		Sandwich	4	30	1	40,48
Mineralguss		Sandwich				64,40
Aramidfaser		2-Komponenten*	4,5	-	1,5	23,08
Kunstharz-pressholz		Sandwich	1	20	2	50,52
Keramik		2-Komponenten*	5	-	5	58,24
Kautschuk		2-Komponenten*	9	-	6	54,48
Polycarbonat		Sandwich	3	6	1	38,60
Aluminium-schaum		Sandwich	3	15	3	50,72
Aluminium-leichtbauwabe		Sandwich	3	15	3	51,70
Edelstahl X5CrNi18-10	X		4			31,60

*Bei den 2-Komponenten-Verbundaufbauten wird das Stahlblech stets bedienerseitig verwandt

Tabelle 6-4: Optimierter Prüfmusteraufbau für DIN EN 12417 [N4]

- Masse der optimierten Prüfmuster

Die innerhalb der Tabellen 6-1 und 6-2 aufgezeigten Potenziale zur Massen- und Dickenoptimierung werden anhand grafischer Darstellungen verdeutlicht. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt immer im Vergleich zur Masse des Ausgangsmaterials.

In **Bild 6-3** und **Bild 6-4** werden die Massen der optimierten Prüfmuster, aufgeteilt nach Bearbeitungszentren und Drehmaschinen, im Vergleich zur Masse des Ausgangsmaterials dargestellt.

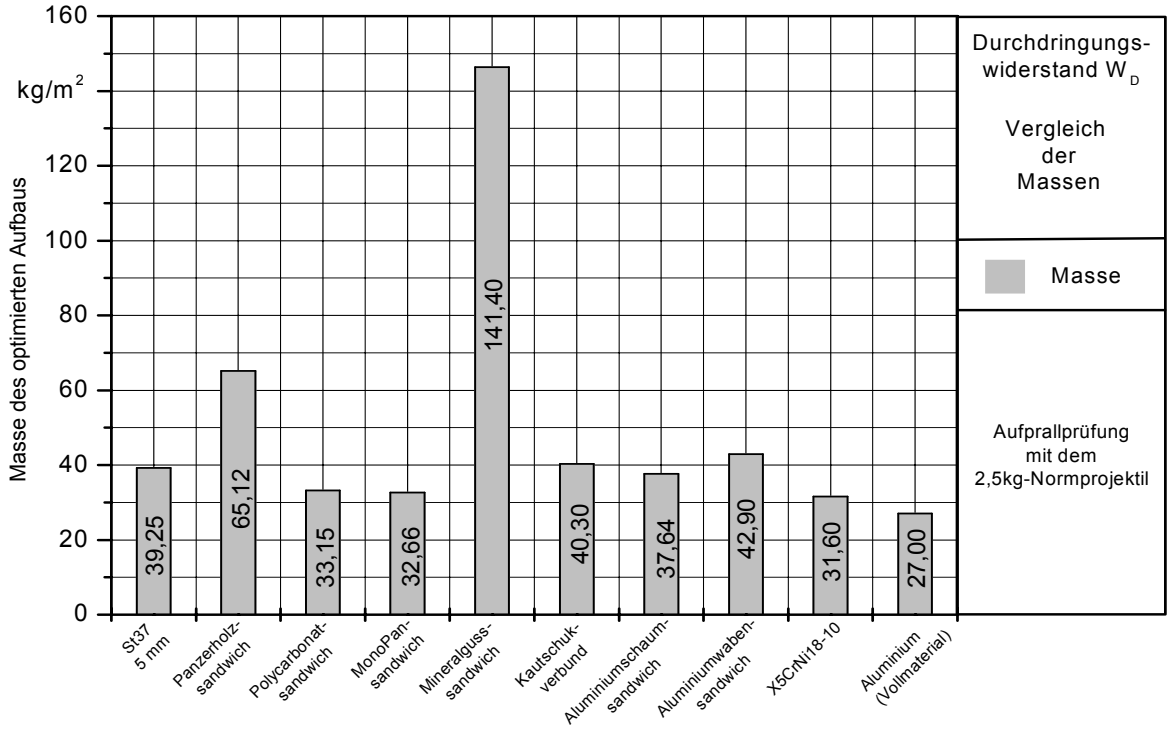


Bild 6-3: Vergleich der Massen der für die Prüfklasse C3 nach DIN EN 12415 [N3] optimierten Prüfmusteraufbauten

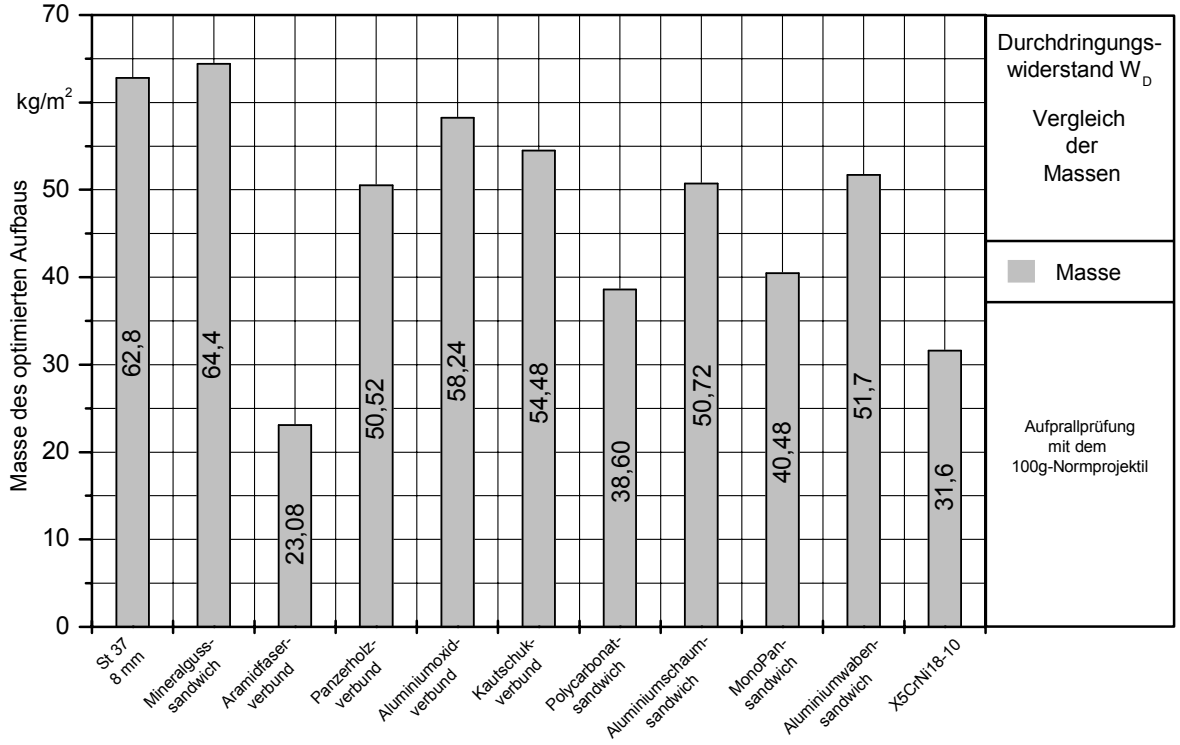


Bild 6-4: Vergleich der Massen der für DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmusteruf-bauten

Dicke der optimierten Prüfmuster

Die innerhalb der Tabellen 4-4 und 4-5 aufgezeigten Potenziale zur Massen- und Dickenoptimierung werden anhand grafischer Darstellungen verdeutlicht. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt immer im Vergleich zur Dicke des Ausgangsmaterials.

In **Bild 6-5** und **Bild 6-6** werden die Dicken der optimierten Prüfmuster, aufgeteilt nach Bearbeitungszentren und Drehmaschinen, im Vergleich zur Dicke des Ausgangsmaterials dargestellt.

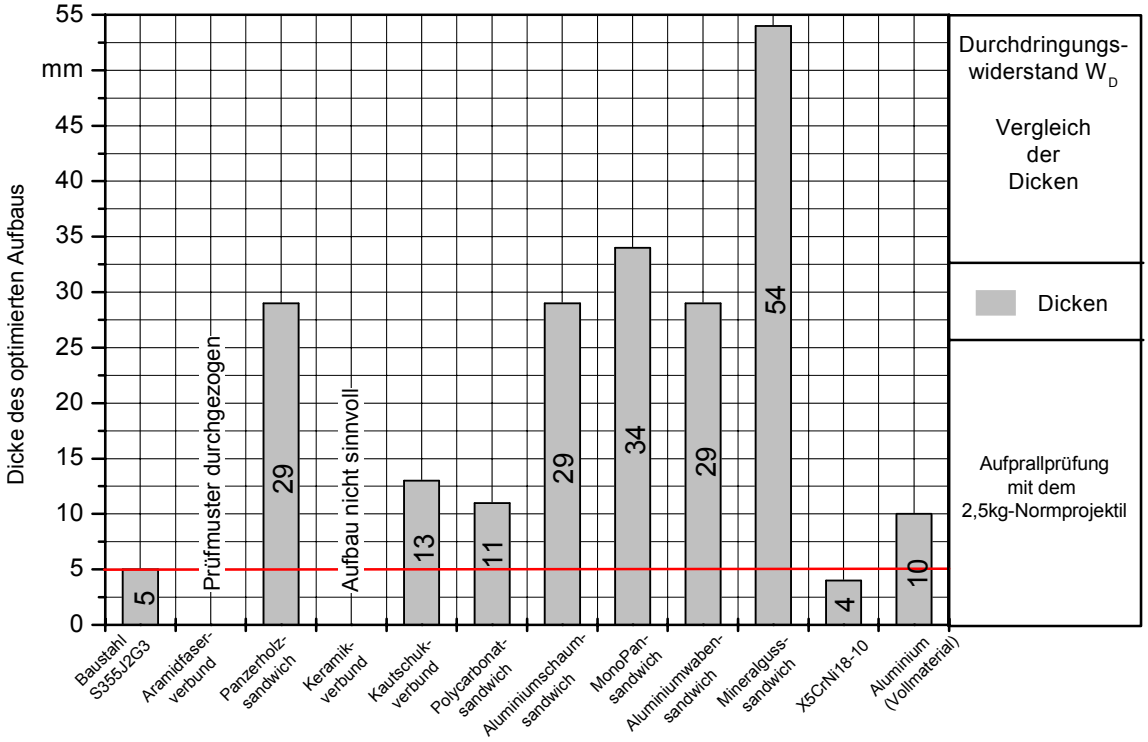


Bild 6-5: Vergleich der Dicken der für die Prüfklasse C3 nach DIN EN 12415 [N3] optimierten Prüfmusteraufbauten

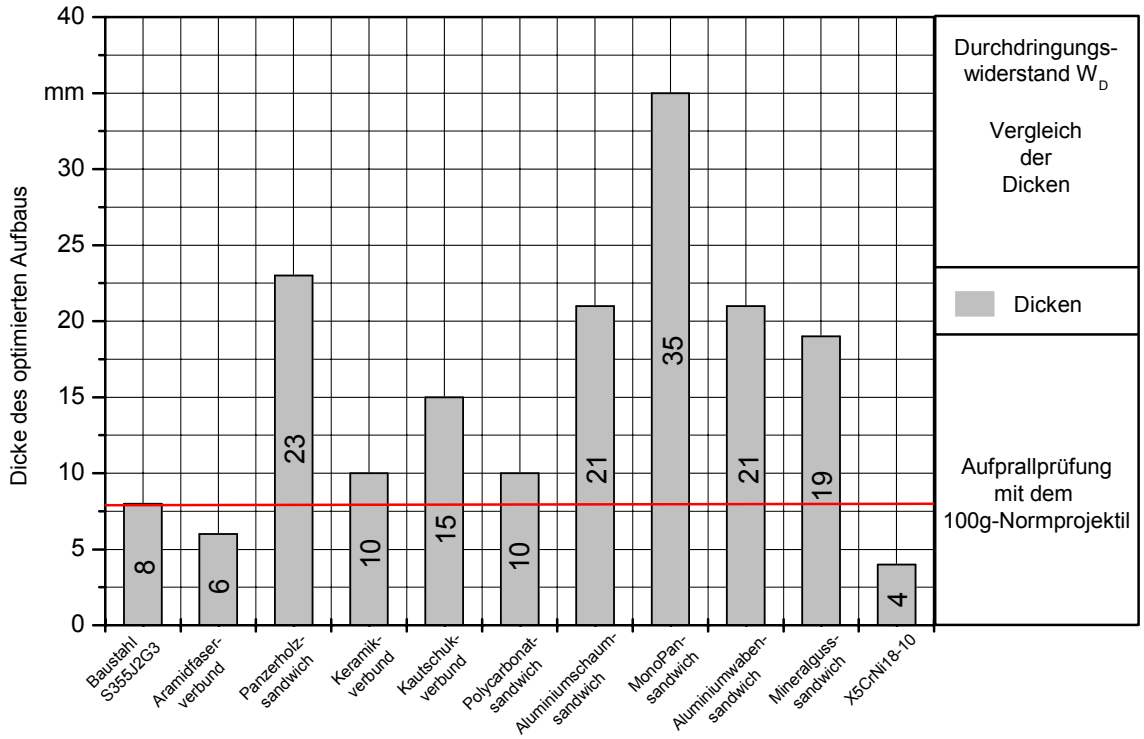


Bild 6-6: Vergleich der Massen der für DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmusteraufbauten

6.2.4 Einfluss der Werkstoff- bzw. Verbundeigenschaften auf den Durchdringungswiderstand

Metalle

Aluminium

Der monolithische Aluminiumaufbau eignet sich in besonderer Weise für den Einsatz in Drehmaschinen und Drehzentren. Bei einer Dicke von 10 mm konnte die Masse des optimierten Aufbaus um mehr als 30 % reduziert werden. Für den Einsatz in Bearbeitungszentren konnte kein sinnvoller Aufbau realisiert werden.

Aluminiumschaum

Als Sandwichaufbau ist der Werkstoff Aluminiumschaum für den Einsatz in Bearbeitungszentren gut geeignet. Durch die Optimierung des Aufbaus konnte eine deutliche Gewichtsreduzierung erreicht werden. Auch für den Einsatz in Drehmaschinen und Drehzentren ist der Werkstoff geeignet.

Aluminiumleichtbauwabe

Als Sandwichaufbau ist die Aluminiumleichtbauwabe sowohl für den Einsatz in Bearbeitungszentren als auch für den Einsatz in Drehmaschinen und Drehzentren geeignet. Im Bereich der Bearbeitungszentren konnte die Masse des Aufbaus deutlich reduziert, und im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren konstant gehalten werden.

S700MC (sog. Panzerstahl)

Bei der Untersuchung ausgewählter höherfester ballistischer Stähle zeigte sich nicht der erhoffte Zuwachs an Rückhaltefähigkeit. Keines der untersuchten Bleche war in der Lage, aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit, einen Millimeter normalen Baustahl zu substituieren.

Edelstahl (X5CrNi18-10)

Der Edelstahl X5CrNi18-10 zeigte unter Aufprallbelastung auffallend gute Ergebnisse. Dieser Werkstoff ist aufgrund seiner außerordentlich hohen Bruchdehnung bei gleichzeitig hoher Zugfestigkeit sowohl für den Einsatz in Bearbeitungszentren als auch für den Einsatz Drehmaschinen und Drehzentren besonders gut geeignet.

Polymere

Kautschuk

Die beschusshemmende Kautschukmatte ist als Verbundaufbau mit einem Stahlblech als Trägermaterial sowohl für den Einsatz in Bearbeitungszentren als auch für den Einsatz in Drehmaschinen und Drehzentren geeignet. Im Bereich der Bearbei-

tungszentren konnte die Masse des optimierten Aufbaus reduziert und im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren konstant gehalten werden.

Polypropylenkernwabe

In der Sandwichbauweise ist die Polypropylenkernwabe im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren besonders gut geeignet. Aufgrund ihres extrem niedrigen Gewichtes ist der optimierte Aufbau deutlich leichter. Im Bereich der Bearbeitungszentren konnte die Masse des optimierten Aufbaus erheblich reduziert werden.

Polycarbonat

Der Werkstoff Polycarbonat ist als Sandwichaufbau sowohl für den Einsatz in Bearbeitungszentren als auch für den Einsatz in Drehmaschinen und Drehzentren sehr gut geeignet. Im Bereich der Bearbeitungszentren konnte die Masse des optimierten Aufbaus erheblich reduziert und im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren deutlich reduziert werden.

Kunstharzpressholz

In Sandwichbauweise ist der Werkstoff Kunstharzpressholz für den Einsatz in Bearbeitungszentren gut geeignet. Durch die Optimierung des Aufbaus konnte eine deutliche Gewichtsreduzierung erreicht werden. Auch für den Einsatz in Drehmaschinen und Drehzentren ist der Werkstoff geeignet.

Keramische Werkstoffe

Keramik (Aluminiumoxid)

Als Verbundaufbau mit einem Stahlblech als Trägermaterial ist der Werkstoff Aluminiumoxid für den Einsatz in Bearbeitungszentren geeignet. Durch die Optimierung des Aufbaus konnte eine Gewichtsreduzierung erreicht werden. Für Arbeitsgeschwindigkeiten weit über 200 m/s stellt der Keramikverbundaufbau aufgrund seiner steigenden Effektivität bei höheren Geschwindigkeiten eine gute Alternative zu den herkömmlichen Stahlblechen dar. Für den Einsatz in Drehmaschinen und Drehzentren ist der Werkstoff nicht geeignet.

Verbundwerkstoffe

Aramidfaserverstärkte Kunststoffe

Der Aramidfaserverbund erfüllte die geforderten Rückhaltefähigkeiten nur im Bereich der Bearbeitungszentren. Im Bereich der Drehmaschinen wurde der Aufbau zwar nicht durchschossen, allerdings wurde er durch die Prüfmusteraufnahme durchgezogen. Dieses Verhalten wird nach DIN EN 12417 als nicht bestandene Prüfung bezeichnet.

6.2.5 Zusammenfassung

Bei den durchgeführten Aufpralluntersuchungen stellte sich heraus, dass es keinen Universalwerkstoff gibt, der für alle untersuchten Aufprallsituationen geeignet ist. Es zeigte sich vielmehr, dass jeder Werkstoff nach seinen speziellen Eigenschaften sowie nach vorliegender Aufprallsituation mit anderen Werkstoffen kombiniert werden muss, um eine definierte Rückhaltefähigkeit zu gewährleisten.

Damit ein Projektil höherer Masse sicher zurückgehalten wird, muss die Aufprallenergie durch Verformung der Schutzeinrichtung absorbiert werden. Bei Projektilen mit geringerer Masse und wesentlich höheren Geschwindigkeiten spielt die Energieabsorption durch Verformung nur eine untergeordnete Rolle, da die meisten der untersuchten Materialien nicht in der Lage sind sich hochdynamisch zu verformen. Ausnahmen bilden Werkstoffe auf Aramidfaserbasis sowie die Werkstoffe Polycarbonat und der Edelstahl X5CrNi18-10.

Bei den durchgeführten Aufpralluntersuchungen stellte sich heraus, dass der Werkstoff X5CrNi18-10 unter bestimmten Voraussetzungen für die untersuchten Aufprallsituationen geeignet ist. Es zeigte sich jedoch, dass gerade dieser Werkstoff einer sehr großen Chargenschwankung unterliegt (siehe Kap. 6.4.3). Bei einem Einsatz in einer Schutzumhausung müssen definierte Materialkennwerte präzise eingehalten werden, um eine definierte Rückhaltefähigkeit zu gewährleisten.

Die Aufprallergebnisse der hochfesten Stähle rechtfertigen im Bereich der Bearbeitungszentren nicht die Substitution einfacher Baustahlbleche. Gerade für die dickeren Bleche wäre eine Dickenreduzierung von 1 mm, entsprechend einer Massenre-

duktion von 8 kg/m², ein erstrebenswertes Ziel gewesen, um die höheren Kosten für den sog. „Panzerstahl“ zu rechtfertigen.

Sollten die Aluminiumschaumsandwichs die die aufgrund ihrer Porenstruktur erwartet guten Schalldämmeigenschaften bestätigen, stellen sie sowohl im Bereich der Bearbeitungszentren als auch im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren eine gute Alternative zum Baustahlblech dar.

6.3 Entwicklung einer Prüfvorschrift für die Ermittlung des kritischen Durchdringungswiderstandes bei Mehrfachbeschuss

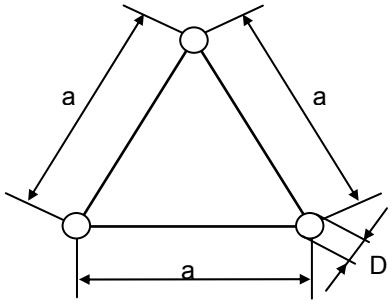
6.3.1 Allgemeines

Aus der industriellen Praxis werden Unfallszenarien beschrieben, bei denen es zu Mehrfachtreffern der Schutzeinrichtung kommen kann. Durch unsachgemäße Handhabung oder Materialermüdungen kann zum Auslösen von Werkstücken oder Werkzeugen führen welche beim Aufprall nahe an die Belastungsgrenze der Maschinenumhausung herankommen. Aus Zeit- und Kostengründen wird oft ohne entsprechende Gegenmaßnahmen oder Instandsetzungsarbeiten weiter gefertigt, so dass die Belastungsgrenze der Maschinenumhausung bei einem erneuten Treffer im Bereich des Ersten überschritten werden kann.
Bei der Fräsbearbeitung mit großen Fräsköpfen kann es nach dem Auslösen einer Fräskassette zu einem unwuchtbedingten, fliehkraftinitiierten Auslösen weiterer Fräskassetten kommen.
In beiden Fällen können die Auftreffpunkte so nahe beieinander liegen, dass es trotz der unkritischen Einzelenergien zu einem Überschreiten der Belastungsgrenze der Maschinenumhausung kommt.
Aus diesem Grund wurde eine Mehrfachbeschussprüfung entwickelt und definiert.

6.3.2 Definition des Mehrfachbeschusses

In Anlehnung an die DIN EN 1063 „Sicherheitssonderverglasung“ [N5] wurde ein Prüfverfahren entwickelt, welches unter Berücksichtigung der Prüfkörpermasse einen definierten Trefferabstand vorschreibt, **Bild 6-7**. Die Geschwindigkeiten der Aufprallprüfung richten sich im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren nach DIN EN 12415 [N3] und im Bereich der Bearbeitungszentren nach DIN EN 12417 [N4].

Trefferbild für Prüfmuster 500 x 500 mm²



Mit

D: Äquivalenter Geschossdurchmesser [mm]

D = 20mm für die Aufprallprüfung nach DIN EN 12417
D = 30mm für eine Aufsatzbackenmasse bis 0,625 kg
D = 40mm für eine Aufsatzbackenmasse bis 0,625 kg bis 1,250 kg
D = 50mm für eine Aufsatzbackenmasse bis 1,250 kg bis 2,500 kg

a: Trefferabstand

a = 130mm für die Aufprallprüfung nach DIN EN 12417
a = 150mm für eine Aufsatzbackenmasse bis 0,625 kg
a = 170mm für eine Aufsatzbackenmasse bis 0,625 kg bis 1,250 kg
a = 190mm für eine Aufsatzbackenmasse bis 1,250 kg bis 2,500 kg

Bild 6-7: Trefferbild für die Mehrfachbeschussprüfung

6.3.3 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Bestimmung des kritischen Durchdringungswiderstandes bei Mehrfachbeschuss

Unter Berücksichtigung der bekannten Schadensfälle mit Mehrfachtreffern wurde eine Prüfvorschrift entwickelt, die auch in diesen Fällen eine ausreichende Sicherheit des Bedieners vor wegfliegenden Werkzeug- oder Werkstückbruchstücken gewährleisten soll. Auf der Grundlage der Normen DIN EN 12415 „Kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren“ [N3] und DIN EN 12417 „Bearbeitungszentren“ [N4] wurden Trefferanzahl sowie Trefferabstand in Abhängigkeit von der Projektilmasse und dem Projektildurchmesser definiert. Der Trefferabstand wächst mit zunehmendem Durchmesser des Projektils, so dass sowohl der zweite Treffer und insbesondere der dritte Treffer immer auf vorgeschädigtes Material im ähnlichen Flächenverhältnis treffen, **Tabelle 6-5**.

Widerstands-klasse	Projektilmaß D x a mm x mm	Projektil-masse [kg]	Aufprall-geschwindigkeit [m/s]	Aufprall-energie [Nm]	Anzahl Treffer	Trefferabstand [mm]
A1	30 x 19	0,625	32	310	3	150 + 10
A2			50	781		
A3			80	2000		
B1	40 x 25	1,25	50	1562	3	170 + 10
B2			63	2480		
B3			80	4000		
C1	50 x 30	2,50	50	3124	3	190 + 10
C2			63	4960		
C3			80	8000		

Tabelle 6-5: Widerstandsklassen der DIN EN 12415 [N3] mit Trefferanzahl und Trefferabstand

6.3.4 Untersuchung der Werkstoff- bzw. Verbundeigenschaften bei Mehrfachbeschuss

Für die Untersuchung des Durchdringungswiderstandes bei Mehrfachbeschuss werden nur die in Kapitel 6.2 identifizierten optimalen Prüfmuster herangezogen. Eine weitere Optimierung findet aus Kostengründen nur im konkreten Bedarfsfall statt. Die Versuchsdurchführung entspricht der unter Kapitel 6.2.3. Zusätzlich wird das Prüfmuster nach jeder Prüfung gedreht und neu ausgerichtet, so dass die vorgeschriebenen Zielpunkte getroffen werden. Die visuelle Beurteilung richtet sich ebenfalls nach der in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Vorgehensweise. Es wird unterschieden in Prüfung bestanden, Prüfung nicht bestanden (Anriss), Prüfung nicht bestanden (Durchschuss), Prüfung nicht bestanden (Prüfmuster durch den Spannrahmen gezogen).

Die Ergebnisse der Mehrfachprüfung sind in **Tabelle 6-6** und **Tabelle 6-7** dargestellt.

Optimierter Prüfmusteraufbau für die Prüfklasse C3 in Anlehnung an DIN EN 12415 (2,5 kg-Prüfprojektil/ 80 m/s Aufprallgeschwindigkeit)	
Prüfmuster	Ergebnis
Baustahl S355J2G3 (St52)	Prüfung bestanden
Kunstharzpressholzsandwich	Prüfung bestanden
Kautschukverbund	Prüfung nicht bestanden: starke Verformung nach erstem Treffer, bei zweitem Treffer wird Prüfmuster durch den Rahmen gezogen
Polycarbonatsandwich	Prüfung nicht bestanden: starke Verformung nach erstem Treffer, Polycarbonatscheibe bricht bei zweitem Treffer spröde, Durchschuss
Aluminiumschaumsandwich	Prüfung nicht bestanden: Verformung nach erstem Treffer, starke Verformung nach zweitem Treffer, Prüfmuster kann nicht mehr gespannt werden
MonoPansandwich	Prüfung nicht bestanden: durch die Federwirkung des Materials löst sich bei erstem Treffer das vordere Deckblech, Prüfmuster kann nach zweitem Treffer nicht mehr gespannt werden
Edelstahl X5CrNi18-10	Prüfung bestanden

Tabelle 6-6: Ergebnisse der Mehrfachprüfung mit dem 2,5 kg-Normprojektil

Optimierter Prüfmusteraufbau in Anlehnung an DIN EN 12417 (100 g-Prüfprojektil/ 200 m/s Aufprallgeschwindigkeit)	
Prüfmuster	Ergebnis
Baustahl S355J2G3 (St52)	Prüfung bestanden
Aramidfaserverbund	Prüfung bestanden
Kunstharzpressholzsandwich	Prüfung nicht bestanden: leichter Anriss nach zweitem Treffer, starker Anriss nach drittem Treffer
Keramikverbund	Prüfung nicht bestanden: Keramik bricht nach erstem Treffer großflächig, zweiter Treffer Durchschuss
Kautschukverbund	Prüfung bestanden
Polycarbonatsandwich	Prüfung bestanden
Aluminiumschaumsandwich	Prüfung bestanden
MonoPansandwich	Prüfung bestanden
Edelstahl X5CrNi18-10	Prüfung bestanden

Tabelle 6-7: Ergebnisse der Mehrfachprüfung mit dem 100 g-Normprojektil

Bild 6-8 links zeigt die Einbausituation der Prüfmuster sowie die Auftreffpunkte nach der unter 5.3 beschriebenen Prüfvorschrift. In **Bild 6-8** rechts ist deutlich zu sehen, dass der Bereich der Verformung so gering ist, dass die Vorschädigung beim zweiten bzw. dritten Treffer nur eine untergeordnete Rolle spielt.

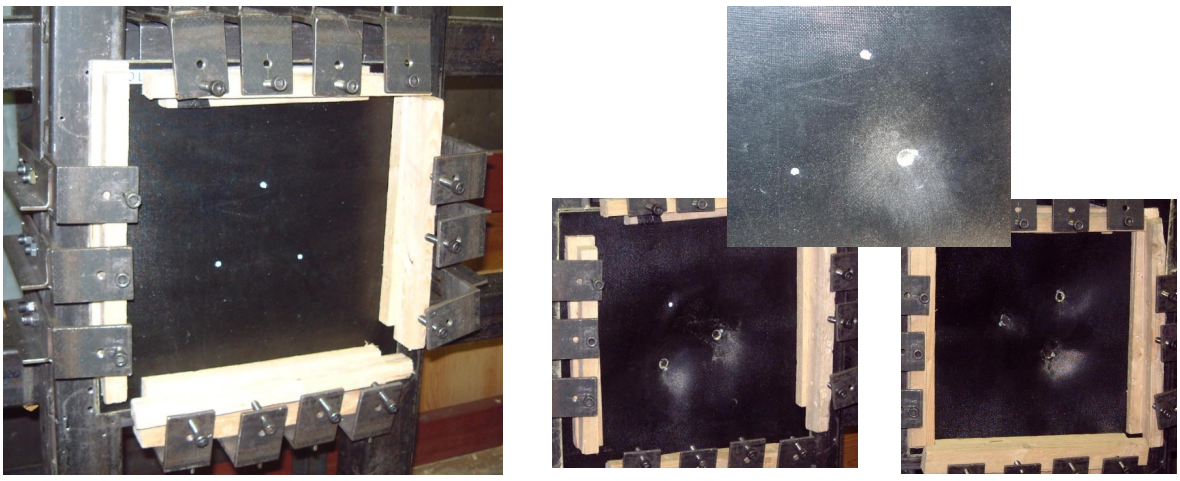


Bild 6-8: Aramidfaser/Stahl-Sandwich in der Einbausituation sowie nach der Prüfung

Bei der Prüfung nach DIN EN 12415 [N3] konnten nur die Materialien überzeugen, die aufgrund ihrer Materialdicke eine hohe Steifigkeit besitzen, wie das Kunstharzpressholzsandwich **Bild 6-9**, das Baustahlblech in einer Dicke von 8 mm oder das Edelstahlblech, das durch die Eigenschaftskombination sehr hohe Bruchdehnung und gute Zugfestigkeit die Anforderungen erfüllt.

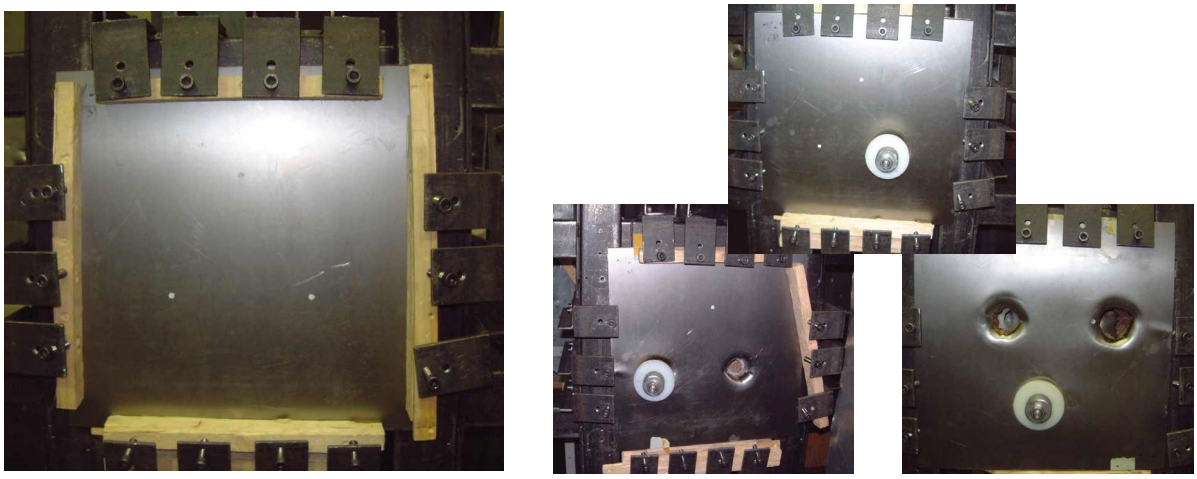


Bild 6-9: Kunstharzpressholzsandwich in der Einbausituation sowie nach der Prüfung

In **Bild 6-10** sind die Verbundaufbauten dargestellt, die der Mehrfachbeschussprüfung nicht standgehalten haben. Links das Aluminiumschaumsandwich, in der Mitte der Kautschukverbund und rechts das MonoPansandwich.

Bild 6-10: links: Aluminiumschaumsandwich, mitte: Kautschukverbund, rechts: MonoPansandwich.

6.3.5 Zusammenfassung

Das Ziel der Mehrfachbeschussprüfungen war es, die nach DIN EN 12415 [N3] und DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmusteraufbauten auch auf ihre Sicherheit im Falle von Mehrfachtreffern zu untersuchen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass der Zusammenhalt der Verbundaufbauten bis zum dritten Treffer von entscheidender Bedeutung ist. Im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren kommt es bei der Aufprallprüfung durch den hohen Energieeintrag zu einer sehr starken Verformung der Verbundaufbauten. Der Kautschukverbund wies schon nach dem ersten Treffer so starke Verformungen auf, dass der Verbund beim zweiten Treffer durch die Prüfmusteraufnahme gezogen wurde. Das Material wurde zwar nicht zerstört, jedoch entspricht das Durchziehen durch die Prüfmusteraufnahme einer nicht bestandenen Prüfung.

Die Polycarbonateinlage im Polycarbonatsandwich wurde beim ersten Treffer so stark verformt, dass es zu einem hohen Spannungseintrag ins Material kam. Beim zweiten Treffer brach das Polycarbonat aufgrund der inneren Spannungen spröde.

Beim Aluminiumschaumsandwich ist die Verformung nach dem zweiten Treffer so stark, dass das Prüfmuster nicht mehr eingespannt werden kann.

Bei der Prüfung des MonoPansandwichs wird der Verbund schon nach dem ersten Treffer aufgrund der hohen Federwirkung des Polypropylenkerns zerstört.

Im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren konnten nur die Prüfmuster Edelstahl, Baustahl und das Kunstharzpressholzsandwich die gestellten Sicherheitsanforderungen erfüllen. Das Baustahlprüfmuster besteht die Prüfung aufgrund seiner hohen Festigkeit und damit verbundenen geringeren Verformung. Das Edelstahlprüfmuster verformt sich aufgrund seiner höheren Bruchdehnung mehr als das Prüfmuster aus Baustahl, besteht die Prüfung aber trotzdem sicher.

Aus der großen Dicke des Kunstharzpressholzsandwich resultiert eine sehr hohe Steifigkeit des Verbundes. Es kommt selbst bei der Dreifachprüfung zu keinen großen Verformungen, so dass das Muster die Prüfung sicher besteht.

Im Bereich der Bearbeitungszentren ist die Einflusszone der Aufprallenergie wesentlich geringer, so dass die einzelnen Treffer sich gegenseitig weniger beeinflussen.

Mit Ausnahme des Keramikverbundes und des Kunstharzpressholzsandwichs bestehen alle für die DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmuster die Mehrfachbeschussprüfung.

Bei der Prüfung des Keramikverbundes bricht der Keramiklayer großflächig, so dass der zweite Treffer das Stahlblech durchschlägt.

Bei der Prüfung des Kunstharzpressholzsandwichs durchschlägt das Projektil das maschinenseitige Deckblech und durchdringt das Kunstharzpressholz. Das Projektil wird erst vom bedienerseitigen Deckblech aufgehalten. Da das Kunstharzpressholz die Verformung des bedienerseitigen Deckbleches nicht mitmachen kann, löst sich die Verbindung zwischen Kunstharzpressholz und Deckblech. Beim zweiten Treffer besteht keine Verbindung mehr zwischen der Kunstharzpressholzeinlage und dem bedienerseitigem Deckblech. Der Aufbau wirkt in diesem Fall wie ein loser Verbund. Dieser Verbund hat eine geringere Rückhaltefähigkeit als ein fester Verbund, so dass es zu einem Anriss im bedienerseitigen Deckblech kommt.

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]

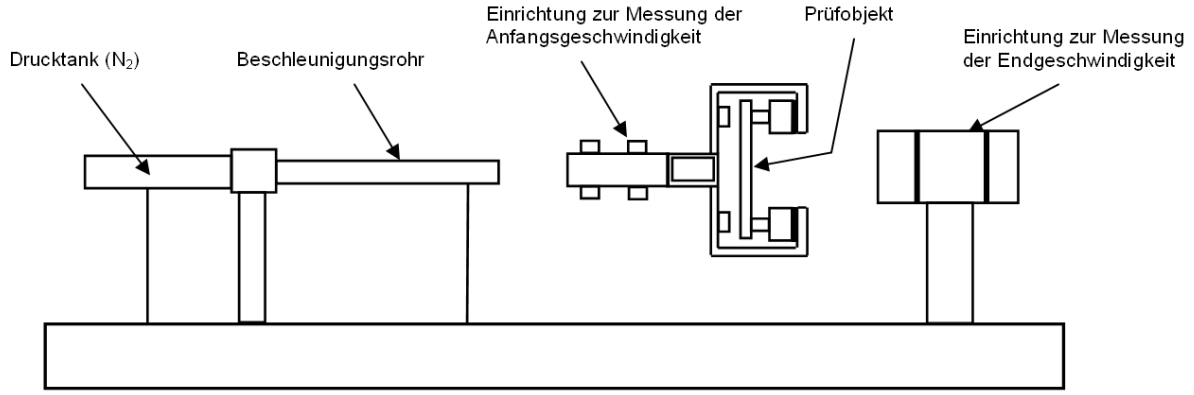


Bild 6-11: Versuchsstand nach Corran, Shadbolt, Ruiz [15]

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.

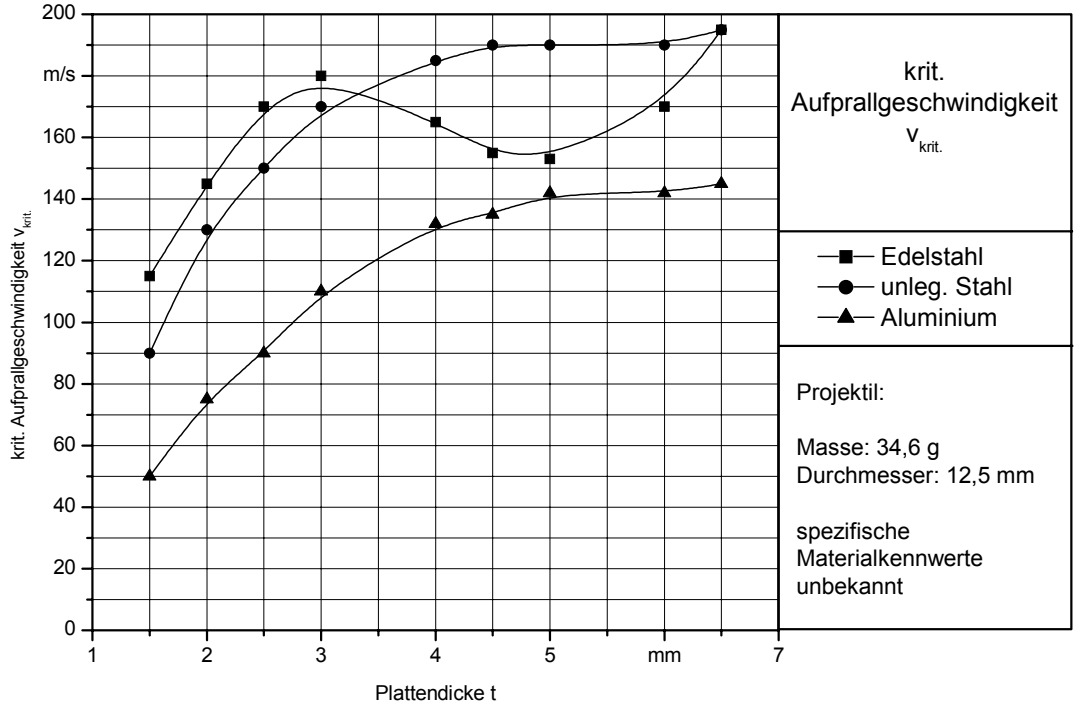


Bild 6-12: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für Edelstahl, unlegierter Stahl und Aluminium [15]

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 (AlMg3) 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 Verbindungstechni-

ken (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 AlMg3 sind in **Tabelle 6-8** dargestellt.

Materialdicke d [mm]	**kritische Geschwindigkeit v_{krit} [m/s]**	**Energie E [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] – AlMg3

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

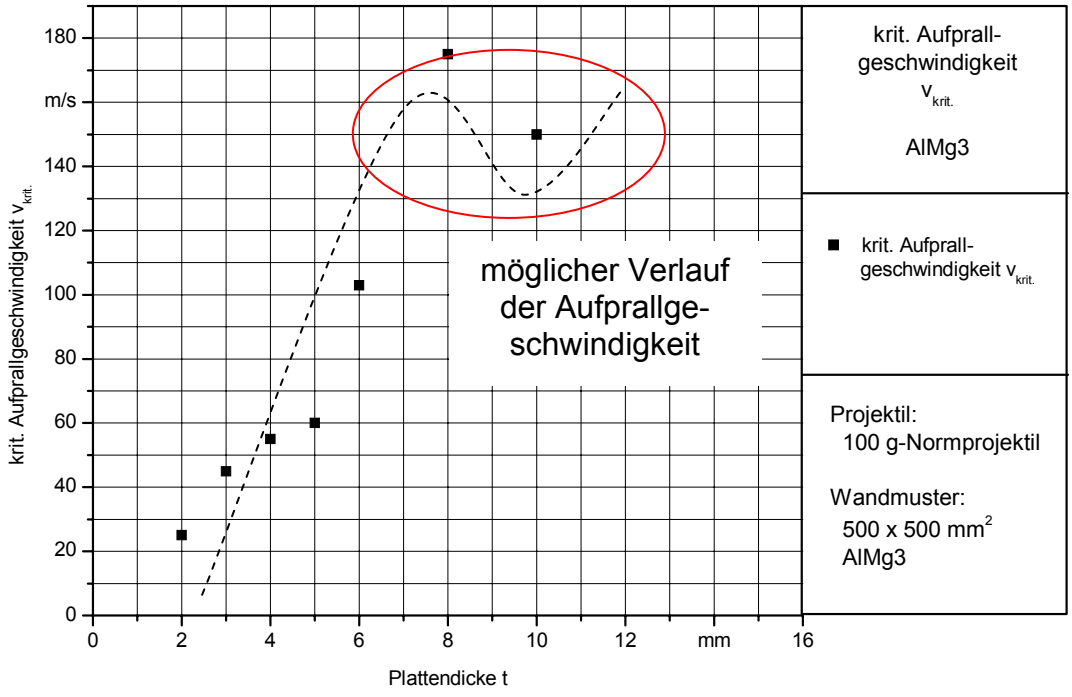


Bild 6-13: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für die Prüfung nach DIN EN 12417 [N4] – AlMg3

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

Materialdicke d [mm]	**kritische Geschwindigkeit v_{krit} [m/s]**	**Energie E [Nm]**
Stand der Technik		
4	70	245
6	101	510
8	120	720
10	145	1051
12	150	1125
weiterführende Untersuchungen		
14 (8+6)	166	1377
15	149	1110
24 (12+12)	230	2645
26 (8+10+8)	233	2714

Tabelle 6-9: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für die Prüfung nach DIN EN 12417 [N4] – Polycarbonat

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

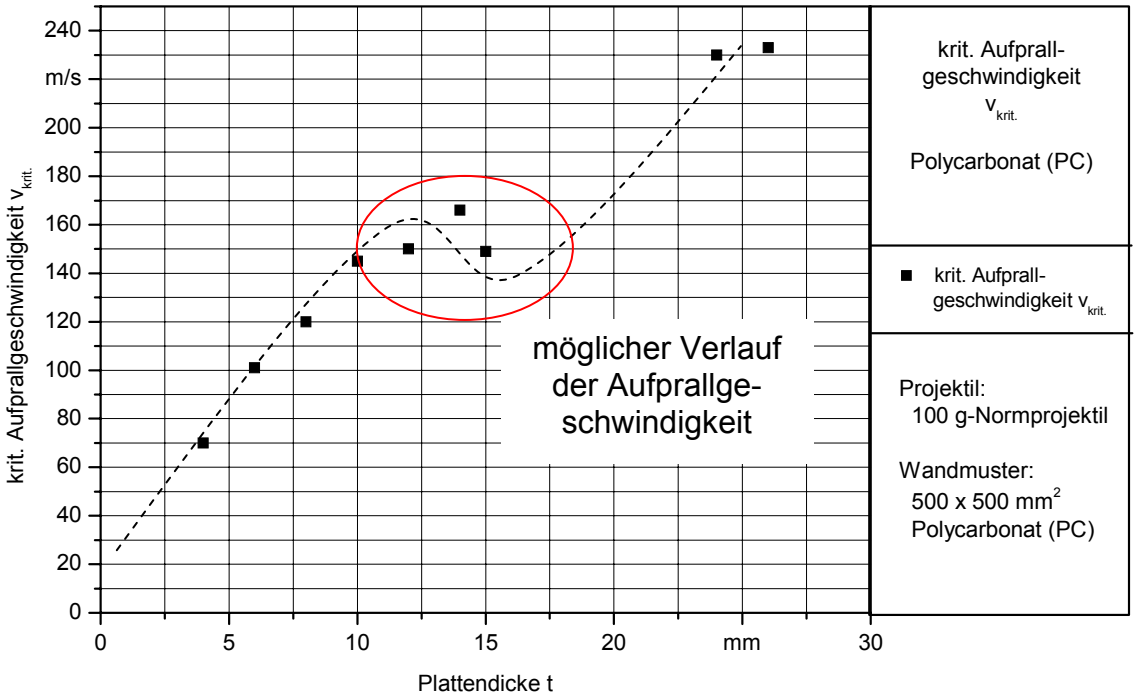


Bild 6-14: Kritische Aufprallgeschwindigkeiten für die Prüfung nach DIN EN 12417 [N4] – Polycarbonat

Die Bilder 6-13 und 6-14 zeigen jeweils eine deutlich ausgeprägte Knickstelle in der Darstellung der kritischen Aufprallgeschwindigkeiten über der Materialdicke. Der Durchdringungswiderstand des Aluminiumwerkstoffs (AlMg3) steigt bis zu einer Materialdicke von 8 mm annähernd linear an. Bei einer Dicke von 10 mm ist ein deutlicher Rückgang der kritischen Aufprallgeschwindigkeit zu verzeichnen. In Bild 6-14 wird ein approximierter Verlauf des kritischen Durchdringungswiderstandes aufgezeigt, da es nicht möglich war Werkstoffproben mit Dicken über 10 mm zu prüfen.
Der Durchdringungswiderstand des monolithischen Polycarbonats steigt bis zu einer Materialdicke von 14 mm annähernd linear an. Bei einer Dicke von 15 mm gibt es einen signifikanten Rückgang der kritischen Aufprallgeschwindigkeit. Die Aufbauten mit den Dicken 24 mm und 26 mm haben wieder eine deutlich höhere Rückhaltefähigkeit, was die eingangs getroffenen Annahmen bestätigt.

6.4.2.4 Modellbildung und mathematische Herleitung des Kink-Effektes

Der Grund für die Abnahme des Rückhaltevermögens liegt in erster Linie im Zusammenwirken von Zugfestigkeit, Verformungsvermögen und Steifigkeit des Werkstoffs.
Die folgende quantitativ dargestellte Aufteilung der Energieformen beschreibt dieses Phänomen, **Bild 6-15**:

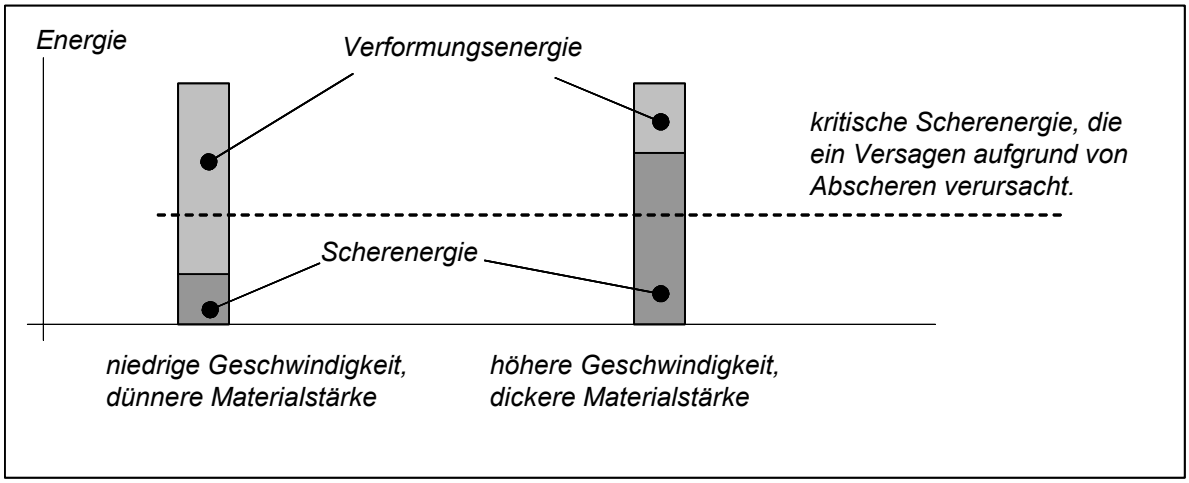


Bild 6-15: Mögliche Aufteilungen der Energieformen in Abhängigkeit von Materialdicke und Prüfgeschwindigkeit

Technologisch tritt hier das Phänomen von überkritischen Tragreserven der dünneren Bleche auf. Diese werden insbesondere im Flugzeugbau genutzt, da auf diese Weise die Konstruktion von besonders dünnen und somit leichten Tragwerken möglich ist. Begründet ist die Tatsache dadurch, dass gerade dünne Bleche unter geringer Last ausbeulen ohne jedoch zu versagen. Die weit über der kritischen Beullast

liegende Grenztragfähigkeit bewirkt recht große überkritische Tragreserven. Bei sehr dicken Blechen liegt die Grenztragfähigkeit nur unwesentlich über der kritischen Beullast [114].

Diese technologische Eigenschaft von Blechen begründet das ungewöhnlich Verhalten der durch Aufprallprüfung untersuchten Werkstoffproben.

Zum weiteren Verständnis werden im folgenden **Bild 6-16**, die verschiedenen Aufprallzonen untersucht. Die Einteilung in die Aufprallzonen erfolgt in derart, dass die Zuordnung der einzelnen Arten der Energieumwandlung ermöglicht wird.

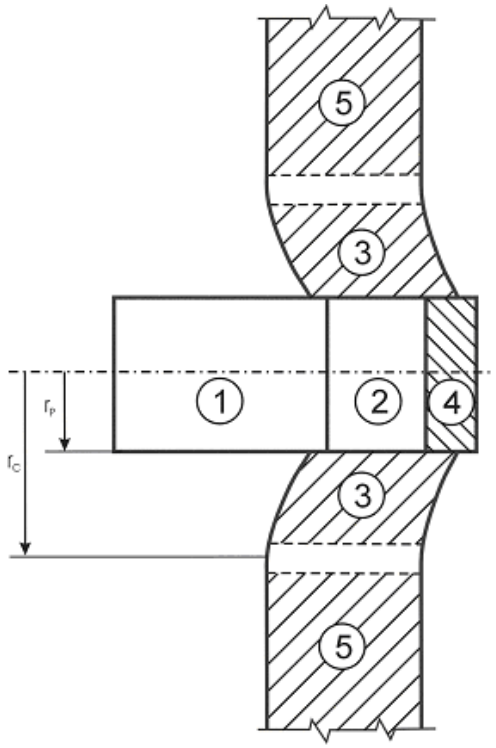


Bild 6-16: Beschussversuch – allgemeine Darstellung mit Aufteilung in fünf Zonen; nach Liss, Goldsmith [59]

Die Aufprallregion kann in folgende Zonen eingeteilt werden: Im Teilbereich 2 findet in erster Linie eine elastische Verformung des verwendeten Projektils statt. Zwischen den Bereichen 2 und 4 befindet sich eine Zone, die starke plastische Verformungen ausprägt. Diese Verformung ist in erster Linie auf den Aufschlagdruck zurückzuführen. Der Teilbereich 3 wird auf Schub belastet. Da die Struktur nur geringe Biegeverformungen erfährt und die Schubspannungen im Zeitverlauf immer größer werden, bildet sich ein Pfropfen (engl. "Plug") aus, der förmlich aus der Struktur herausgedrückt wird. Im Bereich 3 findet plastische Verformung statt, während der Bereich 5 nur elastisch verformt wird – im Zwischenbereich ohne Schraffur findet eine Kombination aus elastischer und plastischer Verformung statt [59].

Die beiden eingetragenen Maße sind in der Arbeit von Corran, Shadbolt, Ruiz (1982) definiert worden[15]:

r_P: Projektilradius,

r_C: Radius der plastischen Verformung (Clamp-Radius).

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde der Radius des Projektils (r_P) nicht variiert. Der Radius r_C konnte für jede Aufpralluntersuchung messtechnisch ermittelt werden, fand aber keinen Eingang in diese Arbeit.

Mathematische Herleitung des Kink-Effektes

Das beschriebene Werkstoffverhalten lässt sich auch mathematisch erklären: Wie bereits beschrieben existieren insgesamt vier Mechanismen, die für die Umwandlung der kinetischen Energie des Projektils verantwortlich sind. Aus den anschließend beschriebenen Gründen werden nur noch folgende Energieformen betrachtet:

- elastische Verformung,
- plastische Verformungen und
- Abscheren.

Die Untersuchungen von Corran, Shadbolt, Ruiz (1982) betrachten zudem das sog. Mushrooming, also die plastische Verformung des Projektils als eine vierte Energieform, die somit nicht vom Prüfmuster, sondern vom Projektil absorbiert wird. In den vorliegenden Versuchen hat diese Energieform jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse nehmen können. Die eingesetzten Projektile wiesen auch bei wiederholtem Einsatz in Aufpralluntersuchungen (Werkstoffe hierbei AlMg3, Polycarbonat, Stahl) keine relevanten plastischen Verformungen auf.

Interessant für das Entstehen des Kink-Effekts ist vor allem die Betrachtung der Scherenergie E_S, die sich aus den Größen Projektilradius r_P, der Weite der Scherzone e, der Dicke des Werkstoffes h, der Scherspannung τ_y, und der kritischen Scherspannung γ_f zusammensetzt und in der **Formel 6-1** dargestellt wird.

$$E_S = 2 \cdot \pi \cdot r_P \cdot e \cdot h \cdot \tau_y \cdot \gamma_f \qquad \text{Formel 6-1}$$

Es ist offensichtlich, dass bei einer dickeren Platte der Anteil der Scherenergie zunimmt, da diese linear in die Berechnung der Energiemenge eingeht. Wenn durch Projektilmasse und Projektilgeschwindigkeit keinerlei Veränderungen eingebracht werden, ist die Summe der oben aufgeführten Energien (Scherenergie, plastische Verformung, elastische Verformung) für jede Materialdicke identisch. Nimmt die Scherenergie dann bei gleich bleibender Gesamtenergie zu, müssen entweder die

Energie der plastischen Verformung und/oder die Energie der elastischen Verformung abnehmen.

Die Energie der elastischen Verformung E_E (Schwingungen, etc.) bildet sich demnach aus dem Radius der Ausbeulung r_c, der Dicke der Werkstoffprobe h, der Projektilgeschwindigkeit v, der Materialnachgiebigkeitsspannung bei 50 Hz und der Aufprallenergie, **Formel 6-2**.

$$E_E = \frac{3\pi r_c^{\,2} h\left(1-v^2\right)\sigma_r^{\,2}}{8E} \qquad \text{Formel 6-2}$$

Auch in diese Energieberechnung geht die Dicke der Werkstoffprobe in einfacher positiver Potenz ein und führt somit dazu, dass diese Energieform für dickere Werkstoffproben unter sonst gleichen Bedingungen linear ansteigt.

Die Analyse konzentriert sich auf **Formel 6-3**, die nach [15] die plastische Verformungsenergie E_p durch das Integral über die plastische Membrankraft N_0, die radiale Dehnung ε_r, das plastische Verformungsnachgiebigkeitsmoment M_0, die radiale Krümmung κ_r und die Umfangskrümmung κ_θ berechnet.

$$E_P = \int_{r_p}^{r_c} \left(N_0\varepsilon_r + M_0\kappa_r + M_0\kappa_\theta\right) 2\pi r\,dr \qquad \text{Formel 6-3}$$

Da das vorliegende Integral eine lineare Funktion ist und lediglich von r_p bis r_c über r integriert wird, sind die einzigen Einflussfaktoren auf die plastische Verformungsenergie die Grenzen des Integrals. Die in der Klammer vorkommenden Werte sind ebenso wie der Faktor 2π als Konstanten anzusehen, sodass alle vorkommenden Werte größer als Null sind und eine lineare Funktion nach dem Muster $f(x) = C \cdot x$ integriert wird. Als Integral hat die Funktion den folgenden Wert E_P, **Formel 6-4**:

$$E_P = \frac{1}{2}C \cdot r_C^{\,2} - \frac{1}{2}C \cdot r_P^{\,2} = \frac{1}{2}C \cdot \left(r_C^{\,2} - r_P^{\,2}\right) \qquad \text{Formel 6-4}$$

Der einzige Einflussfaktor ist im Fall der konstanten Rahmenbedingungen die Größe der Ausbeulung an der geprüften Platte (r_c). Je näher die Grenzen der umgeformten Bereiche (r_c) am Radius des Projektils liegen, desto geringer ist die vorhandene plastische Energie. Dieser Faktor geht in zweifacher Potenz in die Energieberechnung ein.

Die folgende **Tabelle 6-10** veranschaulicht die Einflussfaktoren in der Energiebilanz.

	Potenz, in welcher der Faktor in die Kalkulation eingeht	
	(Plattendicke) **h**	(Radius der Verformung) $\mathbf{r_C}$
Scherenergie (E_S)	1	0
Plastische Umformenergie (E_P)	1	2
Elastische Umformenergie (E_E)	0	2

Tabelle 6-10: Einflussfaktoren bei der Energieberechnung

Schwierig wird die rein qualitative Betrachtung dieses Phänomens, da in der Regel (bei Beibehaltung der Parameter Projektilmasse und Geschwindigkeit) durch höhere Plattendicke auch der Radius der Umformung abnimmt – die beiden Einflussfaktoren daher in einem negativen Proportionsverhältnis stehen. Nimmt somit also die Verformung bei plastischer Umformenergie und elastischer Umformenergie ab, so geht dieser Faktor (bei zweifacher Potenz) vermutlich stärker zurück als der einfache Faktor der Plattendicke bei der plastischen Umformenergie einfließt.

Ab einer definierten Materialdicke nimmt jedoch das Rückhaltevermögen wieder zu. Einerseits zeigen die hier angestellten Versuche gemäß DIN EN 12417 [N4] dieses Phänomen für den Werkstoff AlMg3 auf; aber auch Corran, Shadbolt, Ruiz (1982) stellen den Anstieg der kritischen Geschwindigkeiten bei steigenden Materialdicke dar. Erklären lässt sich diese Eigenschaft damit, dass zwar die Verhältnisse zwischen den einzelnen Energieformen qualitativ verschoben auftreten, jedoch selbst bei 100 % auftretender Scherenergie nicht jede beliebige Materialdicke zum Versagen geführt werden kann.

Zudem wird jeweils ein Teil der Energie auch in elastische und plastische Verformungsenergie umgewandelt (letztere Energieform zusätzlich auch ansteigend bei höherer Plattendicke) und sorgt somit insgesamt dafür, dass nicht die gesamte Energie in Scherkräfte umgewandelt wird.

Es existiert also für jeden Kurvenverlauf, der eine sog. Knickstelle aufweist, auch wieder ein steigender Kurvenabschnitt. Ausprägung und Form dieser Knickstelle hängen maßgeblich von Material sowie der Projektilform, -masse und -größe ab.

6.4.2.5 Hinweise zur Konstruktion trennender Schutzeinrichtungen unter Berücksichtigung des Kink-Effektes

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Werkzeugmaschinenhersteller, der einen annähernd linearen Anstieg der Aufprallgeschwindigkeiten über der Materialdicke zugrunde legt und in Zukunft Bereiche höherer Bearbeitungsgeschwindigkeiten abdecken möchte, nicht davon ausgehen kann, dass der lineare Verlauf auch für höhere Werkstoffdickendicken gerechtfertigt ist.

Die durchgeführten Versuchsreihen waren exemplarisch und lassen sich nicht für alle Werkstoffe verallgemeinern und müssen im Einzelfall durch eine Aufpralluntersuchung abgesichert werden. Oftmals lässt sich eine Knickstelle nur mit sehr hohem Aufwand identifizieren, da weder die Werkstoffproben in jeder Dicke verfügbar sind, noch die Projektilgeschwindigkeiten in beliebig engen Grenzen eingestellt werden können.

Zusammenfassend sollte darauf hingewiesen werden, dass eine Versuchsreihe mit nur wenigen Messwerten keine ausreichend Sicherheit für die Vorhersage der kritischen Aufprallgeschwindigkeiten über das gesamte Werkstoffdickenspektrum bietet.

Hinsichtlich der übergelagerten Schutzziele sind die Werkstoffproben durch eine entsprechende Materialprüfung abzusichern.

6.4.3 Einfluss der Legierungszusammensetzung auf das Aufprallverhalten austenitischer Edelstähle

6.4.3.1 Allgemeines

Im industriellen Einsatz von Werkstoffen kommt es oft zu sich widersprechenden Anforderungen wie beispielsweise Gewichtseinsparung und Energieaufnahmevermögen. Dies gilt insbesondere auch für den Anwendungsfall von Maschinenumhausungen zum Schutz des Bedieners. Bei der systematischen Suche nach neuen, innovativen Werkstoffen für den Einsatz im Maschinenschutz wurden u. a. verschiedene Stahlwerkstoffe untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden stichprobenartig Aufpralluntersuchungen an sog. Panzerstählen sowie an austenitischen Edelstählen durchgeführt. Bei der Untersuchung des Werkstoffs X5CrNi18-10 fiel dieser durch einen signifikant hohen Durchdringungswiderstand auf. Das Potenzial dieser Werkstoffklasse begründet sich in einer verformungsinduzierten Gefügeumwandlung, die die Festigkeit während der Beanspruchung steigert. Dies führt zu einer Festigkeitssteigerung bei aber weiterhin hohen Dehnungen und damit zu einem hohen Energieaufnahmevermögen. In den durchgeführten Untersuchungen konnten die guten Ergebnisse des Materials X5CrNi18-10 aus vorhergehenden stichprobenartigen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse verschiedener Studien bzw. auch die Ergebnisse verschiedener Einzelbleche weisen eine sehr Streubreite auf.
Um das offensichtlich große Potenzial dieses Werkstoffs ausnutzen zu können, wird im Folgenden versucht, die Parameter einzugrenzen, die zu einem Werkstoff mit reproduzierbarem Durchdringungswiderstand führen. Hierfür wird insbesondere auf die Legierungszusammensetzung des Werkstoffs eingegangen.
Austenitischen Stähle weisen bedeutend geringere Festigkeitswerte ($R_m \approx 600$ N/mm²), aber bis zu doppelt so hohe Bruchdehnungswerte ($A \approx 40$-50 %) im Vergleich zu ferritischen, martensitischen oder austenitisch-ferritischen Stählen auf [57]. Das Gefüge austenitischer Stähle ist homogen.
Die genauen mechanischen Eigenschaften der austenitischen Stähle werden von verschiedenen Faktoren wie der chemischen Zusammensetzung, der Wärmebehandlung sowie der Kaltumformung bzw. Warmkaltumformung beeinflusst.
Die bisher durchgeführten Untersuchungen haben das hohe Potenzial von austenitischen Chrom-Nickel-Stählen aufgezeigt. Aufgrund der, im Vergleich zu Baustahl, höheren Kosten dieser Materialien muss versucht werden, die untere Leistungsgren-

ze, der aus sicherheitstechnischen Gründen notwendigen Materialdicke, empirisch abzuschätzen.

Wie eingangs beschrieben, hängt die Rückhaltefähigkeit der austenitischen Edelstähle nicht nur von den Werkstoffparametern wie der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von den Umformparametern wie der Umformtemperatur, der Umformgeschwindigkeit und dem Spannungszustand ab.

Die daraus resultierende Chargenschwankung der Versuchsergebnisse lässt eine definierte Rückhaltefähigkeit, wie sie in den Normen DIN EN 12415 (Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren) [N3] und DIN EN 12417 (Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Bearbeitungszentren) [N4] gefordert ist, nicht zu. Im Folgenden wird versucht die genannte Chargenschwankung zu verifizieren um den erheblichen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet zu motivieren.

6.4.3.2 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Verifizierung des Einflusses verschiedener Legierungselemente auf den kritischen Durchdringungswiderstand

In Zusammenarbeit mit der ThyssenKrupp AG wurden austenitische Edelstähle in verschiedenen Dicken mit definierten Nickelgehalten ausgewählt. Die Zugstäbe wurden aus einem Blech herausgetrennt um eine Chargenschwankung im Vorfeld ausschließen zu können. Zusätzlich wurden die Zugproben hinsichtlich ihrer Walzrichtung variiert. Dieselben Bleche wurden im nach dem heraustrennen der Zugproben für die Durchführung der Aufpralluntersuchungen vorbereitet, so dass der Zusammenhang zwischen Zugversuch und Aufprallprüfung sichergestellt war.

Der Zugversuch

Der Zugversuch wurde mit der Materialprüfmaschine T1-Fr150SN.A4K der Fa. Zwick/Roell durchgeführt, **Bild 6-17**. Es handelt sich um eine Stand – Prüfmaschine in Ständerbauweise. Die maximale Prüfkraft liegt bei 150 kN.

Bild 6-17: Zugprüfmaschine in Ständerbauweise

Die Zugproben sind entsprechend DIN EN 10002-1 dimensioniert [N10]. Als Beispiel dient das Bild einer Probe vor und nach dem Zugversuch, **Bild 6-18**. Alle Zugproben wurden nach ihrer Walzrichtung, die Edelstahlproben auch nach ihrem Nickelgehalt variiert.

Bild 6-18: Zugproben vor und nach dem Zugversuch. Die Anfangsmesslänge ist schwarz markiert.

Auf den Proben ist mittig eine definierte Länge L_0 markiert. Sie dient später zur Ermittlung der Dehnung.

Aufprallprüfung

Zur Verifizierung der Chargenabhängigkeit und zur Beurteilung des Einflusses von Legierungselementen auf den kritischen Durchdringungswiderstand des austenitischen Edelstahls werden die Werkstoffproben aus denen die Zuproben herausgetrennt wurden im Anschluss definierten Aufprallprüfungen unterzogen. Das einzige

Legierungselement das zurzeit von den Stahlproduzenten gezielt eingestellt wird ist der Nickelgehalt. Daher muss an dieser Stelle auf die Variation weiterer Legierungselement oder Umformparameter verzichtet werde.

6.4.3.3 Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzung der Legierungselemente auf den kritischen Durchdringungswiderstand

Zugversuche

Um die Walzrichtung zu variieren, wurden bei der Herstellung der Proben, die pro Materialdicke alle aus einem Blech stammen, sowohl Proben in Längsrichtung des Bleches als auch senkrecht dazu entnommen und entsprechend mit A und B gekennzeichnet. Da die Walzrichtung der Bleche nicht bekannt war, ist die Lage der entnommenen Proben zur tatsächlichen Walzrichtung ebenfalls nicht sichergestellt.

Der Zugversuch wird nach DIN EN 10002-1 [N10] durchgeführt. Das Maß b_0 wird für die Berechnung der Zugfestigkeit an allen Proben noch einmal gemessen. So werden herstellungsbedingte Ungenauigkeiten erfasst. Jeweils eine der vorbereiteten Proben wird in das obere Futter der Prüfmaschine eingespannt. Nachdem ein Kraft-Null-Abgleich an der Maschine durchgeführt wurde, wird auch das untere Futter gespannt. Die Probe wird dann mit einer Vorspannkraft von 5 N-15 N belastet. Die Vorspannkraft wurde entsprechend der Materialstärke variiert und liegt, wie in der Norm verlangt, immer unter 5 % der Maximalkraft.

Während des Zugversuches belastet die Prüfmaschine die Probe langsam bis zum Bruch. Aus den Maßen a_0 und b_0 und der maximalen Kraft wird die querschnittsbezogene Maximalkraft in N/mm² errechnet. Dieser Wert entspricht der Zugfestigkeit R_m.

Nach dem Bruch werden beide Teile der Probe aus der Prüfmaschine ausgespannt und wieder zusammengefügt. Der Abstand der Markierungen L_u, die vorher L_0 auseinander lagen, wird messtechnisch bestimmt. Entsprechend **Formel 6-8** wird die Bruchdehnung ε_B ermittelt.

$$\varepsilon_B = \left[\frac{(L_0 - L_u)}{L_0} \right] \cdot 100\% \qquad \text{Formel 6-8}$$

Sowohl die Werte der Bruchdehnung als auch die der Zugfestigkeiten der Einzelversuche werden über alle gleichartigen Proben (bezüglich Stärke, Walzrichtung, Nickelgehalt) gemittelt.

Die Streckgrenze wird im ausgedruckten Spannungs-Dehnungs-Diagramm grafisch ermittelt. Dazu wird der Wert der Ordinate an dem Punkt abgelesen, an dem sich die Spannungs-Dehnungskurve sichtbar von der Hookschen Geraden entfernt.
Für die Edelstahlproben X5CrNi18-10 wurden im Zugversuch folgende Werte gemessen, **Tabelle 6-11**:

Materialdicke in [mm]	Nickelgehalt in [%]	Zugrichtung (zur Walzrichtung)	Streckgrenze $R_{p0,2}$ [N/mm²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	Bruchdehnung ε_B [%]
2	8,1	A	350	647,5	56,0
2	8,1	B	350	666,0	53,0
2	8,9	A	350	627,0	57,0
2	8,9	B	350	644,0	54,0
2	unbekannt	A	350	682,7	53,7
2	unbekannt	B	350	704,5	55,0
3	8,1	A	335	660,0	59,0
3	8,1	B	335	666,0	58,0
3	8,5	A	330	646,0	58,0
3	8,5	B	330	657,5	56,0
3	unbekannt	A	365	652,9	60,0
3	unbekannt	B	365	661,3	60,0
4	8,5	A	350	635,5	58,5
4	8,5	B	350	640,0	58,5

Tabelle 6-11: Ergebnisse des Zugversuches bei X5CrNi18-10

Die Ergebnisse innerhalb einer Materialdicke, Zusammensetzung und Richtung sind sehr kohärent (sehr geringe Standardabweichungen).
Die Messwerte der Zugfestigkeit und Bruchdehnung weisen für die unterschiedlichen Werkstoffzusammensetzungen starke Streuungen auf.
Vergleicht man die Messwerte jeweils einer Materialstärke zeigt sich, dass die Werkstoffe mit dem höheren Nickelgehalt (8,9 % bei 2 mm bzw. 8,5 % bei 3 mm) eine geringere Zugfestigkeit aufweisen als der Werkstoff mit geringerem Nickelgehalt (8,1 % bei 2 mm und bei 3 mm).
Die Bruchdehnungswerte zeigen im Zusammenhang mit dem Nickelgehalt kein eindeutiges Verhalten. Bei 2 mm Materialdicke liegen die Werte unterschiedlicher Zusammensetzung übereinander. In jeder Zugrichtung (zur Walzrichtung) sind die Bruchdehnungswerte des nickelreicheren Materials (8,9 %) höher als die des Nickelarmen (8,1 %). Vergleicht man die Werte der 3 mm-Bleche zeigt sich ein entgegen-

gesetztes Ergebnis: die Bruchdehnung des nickelarmen Materials (8,1 %) ist größer als die des Nickelreicheren (8,5 %).

Die Streuung ist im unteren Bereich bei 2 mm Bleckdicke am stärksten und sinkt mit zunehmender Materialdicke. Ein quasilinearer Zusammenhang zwischen den Messwerten beider Größen auf der einen Seite und der Materialdicke auf der anderen Seite ist nicht zu erkennen. Bei allen Ergebnissen sind starke Unterschiede zwischen den Proben verschiedener Walzrichtung vorhanden.

Die Werte der Streckgrenzen zeigen keine richtungsspezifischen Unterschiede. Es gibt ebenfalls starke Differenzen entsprechend der Zusammensetzung des Edelstahls. Bei einer Blechdicke von 2 mm liegt die Streckgrenze des nickelreicheren Materials (8,9 %) weit unter der des nickelarmen Materials (8,1 %). Bei 3 mm Materialstärke liegt der Wert des nickelarmen Stahls (8,1 %) etwas über dem des Nickelreicheren (8,5 %).

Aufprallprüfungen

Die Aufprallprüfungen mit dem Edelstahl X5CrNi18-10 ergaben folgende Werte, **Tabelle 6-12**:

Materialstärke t [mm]	Nickelgehalt [%]	krit. Aufprallgeschwindigkeit $v_{krit.}$ [m/s]	krit. Durchdringungswiderstand $W_{D,krit.}$ [Nm]
2	8,1	70	245
2	8,9	75	281,25
2	unbekannt	54	145,8
3	8,1	135	911,25
3	8,5	120	720
3	unbekannt	118	696,2
4	8,5	180	1620
4	unbekannt	138	952,2

Tabelle 6-12: Ergebnisse der Aufprallprüfungen auf X5CrNi18-10

Die Durchdringungswiderstände der Edelstahlbleche steigen erwartungsgemäß mit zunehmender Materialdicke an, jedoch sind die Streuungen in Abhängigkeit zum Nickelgehalt signifikant, **Bild 6-19**.

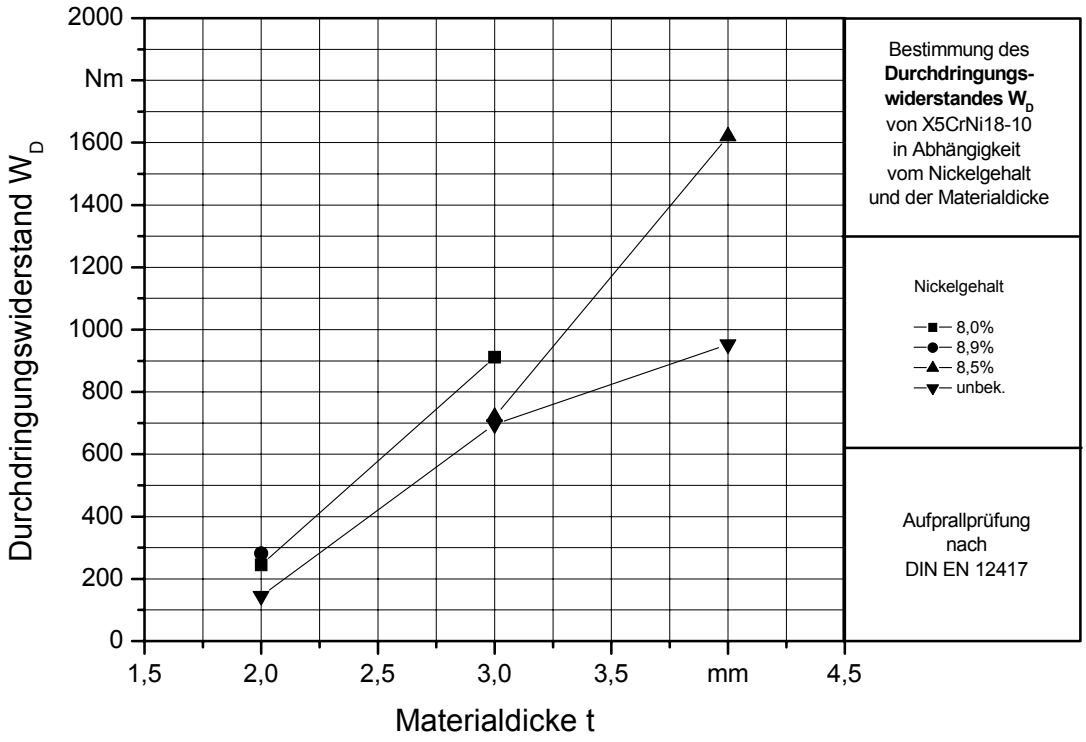


Bild 6-19: Durchdringungswiderstände von X5CrNi18-10 – Blechen

Ein klarer Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Aufprallprüfungen und dem Nickelgehalt der Bleche ist nicht erkennbar. Bei einer Blechdicke von 2 mm ist der kritische Durchdringungswiderstand $W_{D,krit.}$ des nickelreichen Materials (8,9 %) höher als der des nickelarmen Materials (8,1 %). Bei einer Blechdicke von 3 mm liegt der Durchdringungswiderstand des nickelarmen Materials (8,1 %) über dem des Nickelreicheren (8,5 %). Die Ergebnisse des Materials mit unbekannter Zusammensetzung liegen unter den Messwerten der übrigen Bleche.

6.4.3.4 Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Zusammensetzung der Legierungselemente und dem kritischen Durchdringungswiderstand

Aufgrund der Ergebnisse der Zugversuche kann ein Zusammenhang zwischen dem Nickelgehalt und der Zugfestigkeit unterstellt werden. Ein steigender Nickelanteil des Edelstahls führt zu einer Absenkung der Zugfestigkeit. Damit bestätigen die durchgeführten Untersuchungen die Ergebnisse bisheriger Analysen.

Ein Zusammenhang zwischen dem Nickelgehalt und der Bruchdehnung oder der Streckgrenze kann nicht bestätigt werden. Unterstellte Zusammenhänge monoton steigender oder monoton fallender Art werden sogar von den Ergebnissen der Zugversuche widerlegt. Ebenso kann ein Einfluss des Nickelgehaltes auf den Durchdringungswiderstand nach den Ergebnissen der Aufprallprüfung nicht bestätigt werden.

Die auftretenden Streuungen sind sehr stark und offensichtlich der Chargenzugehörigkeit zuzuordnen.

Ein grundlegenden Parameter, der die Stabilität eines austenitischen nichtrostenden Stahls bestimmt, ist die chemische Zusammensetzung [7, 19, 36, 37, 38, 80]. Als problematisch stellt sich insbesondere. der Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10) heraus. Dieser Stahl, der mengenmäßig den größten Anteil an der Stahlproduktion austenitischer nichtrostender Stähle hat, kann durch eine nach Norm zulässige Variation der chemischen Zusammensetzung sowohl als stabil als auch als instabil eingestellt werden. So liegt beispielsweise die zulässige Schwankungsbreite des Legierungselementes Chrom zwischen 17 % und 19 %, die des Legierungselementes Nickel zwischen 8,5 % und 10,5 %. Zusätzlich existieren in der betrieblichen Produktion erhebliche Unterschiede im Silizium-Gehalt sowie keinerlei Festlegungen bei den Legierungselementen Molybdän, Niob und Titan. Der entscheidende Einfluss auf die Austenitstabilität, der sich in den Nickeläquivalenten widerspiegelt, wird jedoch den Legierungselementen Kohlenstoff, Stickstoff, Mangan und Kupfer zugeschrieben. Allerdings ist der Stickstoff- und Kupfergehalt in der Norm überhaupt nicht fixiert und die durch die Norm zugelassenen Streubreiten bei Kohlenstoff und Mangan lassen die Nickeläquivalenz um bis zu 3 % differieren.

Würde man den 1.4301 in seinem Normbereich in ein Schaeffler-Diagramm [3] eintragen, würde sich als Ergebnis nicht ein rein austenitisches Gefüge ergeben, sondern man erhält nahezu alle Gefügebereiche, **Bild 6-20**.

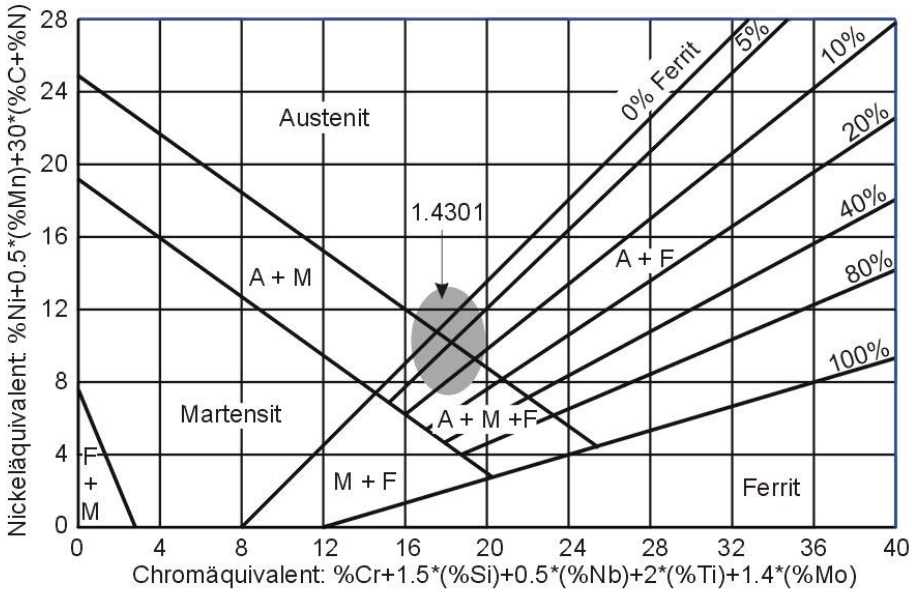


Bild 6-20: Schaeffler-Diagramm mit dem Bereich der Normzusammensetzung des Stahls 1.4301 [3]

Den zweiten Haupteinflussfaktor auf das Verhalten austenitischer nichtrostender Stähle stellen die Umformparameter dar. Die Umformung austenitischer Edelstähle ist eine sehr komplexe Angelegenheit, die von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst wird, wobei sich die Auswirkungen einzelner Effekte durchaus überlagern können. In **Bild 6-21** sind diese Größen aufgelistet und in zwei Bereiche eingeteilt.

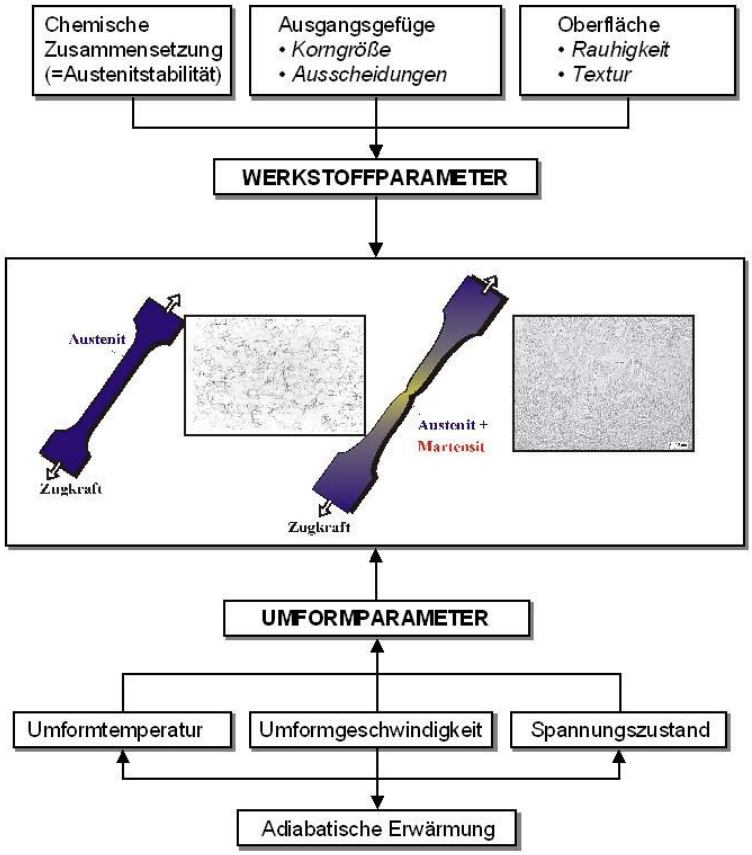


Bild 6-21: Einflussparameter auf die verformungsinduzierte Austenit-Martensit-Umwandlung bei austenitischen nichtrostenden Stählen

Die Werkstoffparameter beinhalten alle Größen, die direkt durch die Herstellung des Werkstoffs beeinflusst werden können. Darunter fallen die chemische Zusammensetzung, die Mikrostruktur und die Oberflächeneigenschaften. Die Umformparameter sind hingegen die Größen, die vor oder während des Umformprozesses eingestellt werden können. Hierunter fallen Umformtemperatur, -geschwindigkeit oder Spannungszustand wobei diese Größen wiederum den Effekt der adiabatischen Erwärmung steuern können [24, 27, 40, 118, 119]. Sowohl die Werkstoffparameter als auch die Umformparameter haben einen direkten Einfluss auf den TRIP-Effekt und damit auf das Verhalten der austenitischen Edelstähle.

Aufgrund der beschriebenen Bandbreite von möglichen Einflussfaktoren sind die beobachteten Streuungen des kritischen Durchdringungswiderstandes allerdings nicht überraschend.

6.4.3.5 Empfehlungen für den Einsatz austenitischer Edelstähle in trennenden Schutzeinrichtungen

Gängige Wandmaterialien für Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen sind zurzeit unlegierte und niedriglegierte Stähle, wie z. B. St12.03. Dies entspricht aber bei weitem nicht dem heutigen Entwicklungsstand in der Stahlindustrie. Mittlerweile existieren bezüglich Energieaufnahmevermögen optimierte Werkstoffe, die deutlich vielversprechendere Eigenschaften für die genannte Anwendung zeigen würden.
Diese hervorragenden Eigenschaften werden auch bei Beanspruchungen unter hohen Geschwindigkeiten beibehalten.
Um die Stähle aber optimal und gezielt einsetzen zu können, ist eine genaue Kenntnis des Beanspruchungsfalls und des TRIP-Effektes (Transformation Induced Plasticity) mit seinen Einflussgrößen unabdingbar.
Um den TRIP-Effekt (Transformation Induced Plasticity) austenitischer Edelstähle zu nutzen, muss die chemische Zusammensetzung über die geforderte Genauigkeit der Norm hinaus eingestellt werden und es müssen Temperatur, Spannungszustand und Dehnrate während der Beanspruchung bekannt sein, da diese Größen die Umwandlung beeinflussen.
Aufgrund der erzielten Ergebnisse kann eine Verwendung des austenitischen Edelstahls X5CrNi18-10 im Maschinenschutz nach heutigem Stand nicht empfohlen werden. Ergebnisse von durchgeführten Aufpralluntersuchungen zur Bestimmung des kritischen Durchdringungswiderstandes können nicht über die untersuchte Charge hinaus verallgemeinert werden. Für eine sichere Verwendung ist es nötig, die Stahlbleche der zu verwendenden Charge erfolgreich zu prüfen.

7 Entwicklung von Methoden zur Vorhersage der Leichtbaugüte

7.1 Einleitung

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen und die Anforderungen aus der industriellen Praxis haben gezeigt, dass die Entwicklung einer Leichtbaumaschinenumhausung eine sehr komplexe Angelegenheit ist. Aufgrund der Vielzahl der zu untersuchenden Parameter erscheint es sinnvoll, dem Maschinenhersteller Werkzeuge für eine schnelle Vorhersage der Leichtbaugüte potenzieller Werkstoffe an die Hand zu geben. Im Folgenden werden zwei Methoden vorgestellt, die es dem Maschinenhersteller erlauben eine erste Abschätzung der Eignung der in Frage kommenden Werkstoffe ohne kosten- und zeitaufwändige Untersuchungen zu treffen. Die erste Methode stellt eine Möglichkeit zur Berechnung der kritischen Durchdringungswiderstände monolithischer Werkstoffe aus den Größen Geschossdurchmesser, Materialdicke, Zugfestigkeit, Streckgrenze und der Bruchdehnung dar. Die zweite Methode ermöglicht die Grobabschätzung der Leichtbaugüte über die Werkstoffmasse und den Durchdringungswiderstand. Im Gegensatz zur ersten Methode, die nur den Vergleich monolithischer Werkstoffe ermöglicht, besteht hier auch die Möglichkeit Werkstoffverbünde zu vergleichen.

7.2 Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Bestimmung des kritischen Durchdringungswiderstandes

7.2.1 Allgemeines

Zur Reduzierung von aufwändigen und damit kostenintensiven Aufprallprüfungen von zu untersuchenden Materialien für Maschinenkapselungen ist neben der FEM-gestützten Simulation eine Formel zur Grobabschätzung des kritischen Durchdringungswiderstandes der Materialen wünschenswert.

Zur Grobabschätzung der maximal von der Maschinenkapselung aufnehmbaren kinetischen Geschossenergie wurde eine empirische Korrelation aufgestellt. Der kritische Durchdringungswiderstand $W_{D,krit.}$ ist die maximale kinetische Energie, die die Maschinenkapselung aufnehmen kann, ohne dass dabei das Projektil die Maschinenkapselungswand durchschlägt oder zumindest anreißt. Eine stark vereinfachte Annahme ergibt sich aus der folgenden einfachen Beziehung, **Formel 7-1** [95]

$$W_{D,krit.} \approx V \cdot w \qquad \text{Formel 7-1}$$

V bezeichnet das verformte Volumen und w das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen des Werkstoffs.

Mit den vereinfachenden Annahmen der **Formel 7-2**

$$V = \pi \cdot \frac{1}{4} D^2 \cdot t \qquad \text{Formel 7-2}$$

und **Formel 7-3**

$$w \approx R_m \cdot \varepsilon_B \qquad \text{Formel 7-3}$$

mit dem Geschossdurchmesser D, der Materialdicke t, der Zugfestigkeit R_m und der Bruchdehnung ε_B ergibt sich die **Formel 7-4** zu

$$W_{D,krit.} = C \cdot D^2 \cdot t \cdot R_m \cdot \varepsilon_B \qquad \text{Formel 7-4}$$

wobei der Proportionalitätsfaktor C bei gleichem Auftreffwinkel und gleicher Geschossform gilt. Für stumpfe, zylindrische Projektile ergibt sich ein gemittelter Proportionalitätsfaktor von C = 4,73.

Diese Formel wurde an dem Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit (BIA) in Sankt Augustin für Geschosse der Massen 625g, 1250g und 2500g entwickelt und für verschiedene Materialien verifiziert. Der Durchmesser D der unterschiedlichen verwendeten Projektile ist jeweils in **Tabelle 7-1** angegeben.

Diese Berechnungsgleichung (7-4) für die Abschätzung den kritischen Durchdringungswiderstand $W_{D,krit.}$ gilt nur für vergleichsweise große Projektile (> 625 g) mit entsprechend niedrigen Geschossgeschwindigkeiten. Somit ist die Formel 7-4 für kleinere Projektile, die wesentlich höhere Geschossgeschwindigkeiten aufweisen, nicht ohne weiteres zu verwenden.

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

Tabelle 7-1: Projektile nach DIN EN 12415 [N3]

Für die in Tabelle 8-1 genannten Massen der Projektile sind die kritischen Durchdringungswiderstände $W_{D,krit.}$ über dem Produkt, **Formel 7-5**

$$D^2 \cdot t \cdot R_m \cdot \varepsilon_B \qquad \text{Formel 7-5}$$

der unterschiedlichen Materialien in **Bild 7-1** grafisch aufgetragen. Der Proportionalitätsfaktor C entsteht als gemittelter Wert der Steigung des Graphen, der sich aus den empirischen $W_{D,krit.}$-Werten und dem Berechnungsansatz (7-5) ergibt. Es zeigt sich, dass die Streuung dieser Korrelation noch relativ groß ist.

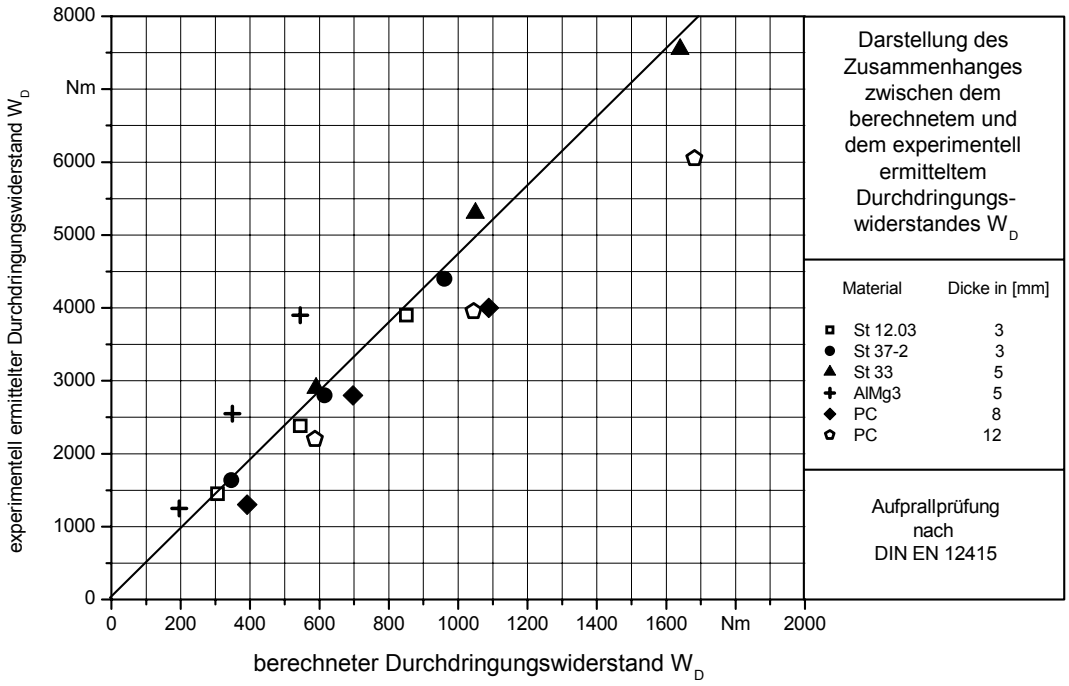


Bild 7-1: Zusammenhang zwischen dem kritischen Durchdringungswiderstand, dem Geschossdurchmesser, der Dicke, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung der geprüften Werkstoffe [65]

7.2.2 Entwicklung einer Methodik zur Verifizierung und Modifizierung der gegebenen Formeln

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Verifizierung der Anwendbarkeit und die Modifizierung der von der BIA entwickelten Formel 7-4 zur groben Abschätzung der kritischen Durchdringungswiderstände $W_{D,krit.}$ unterschiedlicher Werkstoffe auch für kleine Projektile mit geringen Massen und höheren Geschwindigkeiten.

Die in der Formel 7-4 verwendeten Werkstoffkennwerte Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind innerhalb der Norm oftmals mit erheblichen Toleranzen angegeben. Aus diesem Grund werden zunächst Zugversuche an den zu prüfenden Werkstoffen durchgeführt, um exakte Materialkennwerte zu ermitteln. Anschließend werden die kritischen Durchdringungswiderstände $W_{D,krit.}$ dieser Materialien mit Hilfe eines Versuchsstandes für Aufprallprüfungen am IWF ermittelt. Anhand der ermittelten empirischen Daten soll dann eine Analyse bezüglich der Gültigkeit der Berechnungsgleichung 7-5 insbesondere auch für das 100 g-Normprojektil erfolgen.

7.2.3 Verifizierung und Modifizierung der gegebenen Formeln

Vorversuch: Zugversuche

Der Zugversuch in Anlehnung an die DIN EN 10002-2 [N11] definiert die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse aus dem einachsigen Zug als mechanische Werkstoffkennwerte wie z. B. die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung. Die Zugversuche werden auf der Material-Prüfmaschine T1-Fr150SN.A4K der Firma Zwick / Roell durchgeführt.

Diese Materialprüfmaschine ist eine Stand–Prüfmaschine mit einer maximalen Prüfkraft von 150 kN. Die Zugversuche der unterschiedlichen Materialien erfolgen an mindestens fünf Proben. Die Mittelwerte der Materialkennwerte der Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind in **Tabelle 7-2** dargestellt. Die Zugfestigkeit ist direkt dem Prüfprotokoll zu entnehmen. Die Bruchdehnung wird anhand der Längenänderung der Zugprobe nach Formel (7-6) berechnet. Die Proben mussten gekerbt werden, da sonst der Riss wiederholt nahe der Einspannung erfolgt wäre und so stark abweichende Ergebnisse zur Folge hätte.

$$\varepsilon_B = \left[\frac{(L_0 - L_u)}{L_0} \right] \cdot 100\% \qquad \text{Formel 7-6}$$

L_0: Ausgangsmesslänge der Probe in mm

L_u: Messlänge der Probe nach dem Zerreißen in mm

ε_B: Bruchdehnung der Probe in %

Material	Gemessene Werte			Tabellenwerte	
	Dicke t [mm]	Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	Bruchdehnung ε_B [%]	Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	Bruchdehnung ε_B [%]
S355J2G3 (St52)	4,4	625	26	490-630	22
S235JR (St37)	4	433	30	340-470	26
S700MC	4	950	12 – 12,5	750 – 950	10
X5CrNi18-10 (Nirosta)	2	670	54	500-700	45
	3	630	54		
	4	610	54		
30CrMo5-2 (Secure 400)	3,3	Werte bewegen sich nicht in einer Bandbreite; Zugversuche nicht nötig		1150	11

Tabelle 7-2: Ergebnisse der Zugversuche und Tabellenwerte

Modifizierung der Formel 7-4 zur Bestimmung des kritischen Durchdringungswiderstandes

Zur Voraussage der kritischen Geschossenergien bei Geschossprojektilen mit Massen zwischen 0,625 kg und 2,5 kg, ergeben sich aus der Formel 7-4 relativ gute Ergebnisse bei bekanntem Geschossdurchmesser sowie bekannter Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Dicke des zu untersuchenden Bleches. Auffällig ist allerdings die noch erhebliche Streuung einiger Messwerte insbesondere bei Polycarbonat und AlMg3. Im Folgenden wird versucht die Formel 7-4 zu modifizieren.
Die getroffene Annahme, dass sich das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen eines Werkstoffs proportional zu dem Produkt aus Zugfestigkeit und Bruchdehnung verhält ist zu ungenau. Präziser ist die Annahme, dass das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen, das Integral aus Kraft über Dehnung, aus dem einachsigen Zugversuch in guter Näherung abgeleitet werden kann, **Formel 7-7**.

$$w \sim \int R_m \cdot d\varepsilon_B \qquad \text{Formel 7-7}$$

Da dieses Integral im Allgemeinen nicht explizit zur Verfügung steht, wird eine praxisorientierte, leicht anzuwendende Vereinfachung gesucht. Wie in **Bild 7-2** dargestellt, wird hierbei von der rechteckigen Fläche aus Zugfestigkeit multipliziert mit der Bruchdehnung (entsprechend Formel 7-3), ein angepasstes Dreieck subtrahiert, um das Integral nach Formel 7-7 in sehr einfach zu handhabender Form und guter Nährung zu beschreiben.
Diese von der rechteckigen Fläche (Zugfestigkeit multipliziert mit Bruchdehnung) zu subtrahierende Dreiecksfläche wird folgendermaßen bestimmt:
Der $R_{p0,2}$ –Wert (Fließgrenze) gibt an, bei welcher Spannung das Material eine bleibende Dehnung von 0,2 % erhält. Bis zum Erreichen des $R_{p0,2}$ –Wertes ist die zu subtrahierende Fläche vergleichsweise klein. Gravierenden Einfluss hat die Fläche oberhalb des $R_{p0,2}$ –Wertes bis zur Zugfestigkeit R_m. Zur Ermittlung der Größe der Dreiecksfläche sind unterschiedliche Spannungs-Dehnungsdiagramme ausgewertet worden. Daraus ergab sich eine einfache Beziehung in guter Näherung, **Formel 7-8**:

$$w \sim \int R_m \cdot d\varepsilon_B \sim R_m \cdot \varepsilon_B - \left[\frac{2}{3}\left(R_m - R_{p0,2}\right)\cdot \varepsilon_B\right]\cdot\frac{1}{2} = R_m \cdot \varepsilon_B - \left(R_m - R_{p0,2}\right)\cdot\frac{1}{3}\varepsilon_B \qquad \text{Formel 7-8}$$

Für die Ermittlung der kritischen Geschossenergie ergibt sich somit die folgende **Formel 7-9**:

$$W_{D,krit.} = C \cdot D^2 \cdot t \cdot \left[R_m \cdot \varepsilon_B - \left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3} \varepsilon_B \right] \qquad \text{Formel 7-9}$$

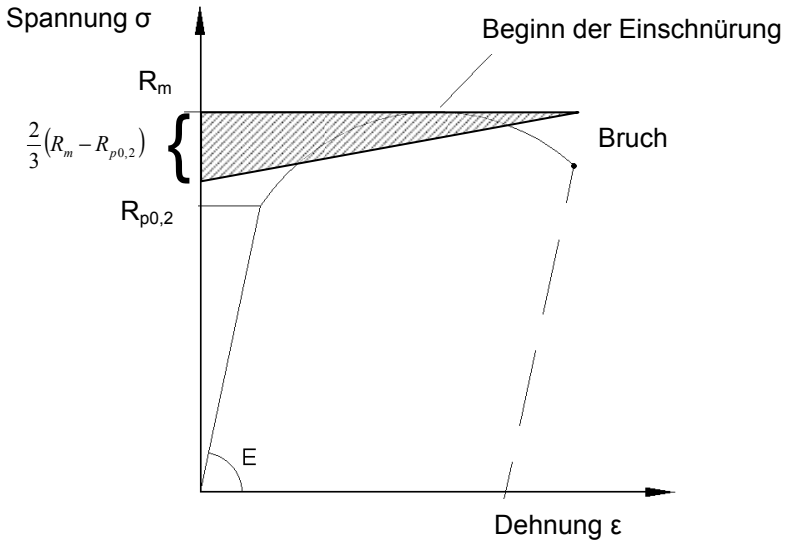


Bild 7-2: Veranschaulichung zur modifizierten Formel (7-9) für die kritische Geschossenergie

Im Folgenden wird die Verbesserung der modifizierten Formel 7-9 durch Anwenden auf die veröffentlichen Ergebnisse der BIA überprüft. Hierzu benötigt man die Materialkennwerte der Streckgrenzen (R_{eh}) bzw. der Fließgrenzen ($R_{p0,2}$) der verwendeten Materialien. Da diese Werte in der Veröffentlichung der BIA [65] nicht explizit genannt sind, werden Werte aus der Literatur bzw. nach Angaben der Werkstoffproduzenten verwendet, **Tabelle 7-3.**

Material	**Streck- bzw. Fließgrenze [N/mm²]**
St 12.03	280
St37-2	235
St33	185
AlMg3	160
Polycarbonat (Makrolon)	16

Tabelle 7-3: Streck- bzw. Fließgrenzen unterschiedlicher Materialien

Die Streck- bzw. Fliessgrenze für Polycarbonat konnte nicht der Literatur entnommen werden. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm des Polycarbonats Makrolon der Firma Bayer ist die Grundlage des ermittelten Fließgrenzenwertes. Die Streckgrenzegibt an wann sich das Material um 0,2 % gedehnt hat. Anhand der Hookschen Graden (elastischer Bereich mit konstanter Steigung) und der Dehnung von 0,2 % wurde in **Bild 8-3** die Streckgrenze von Polycarbonat ermittelt.

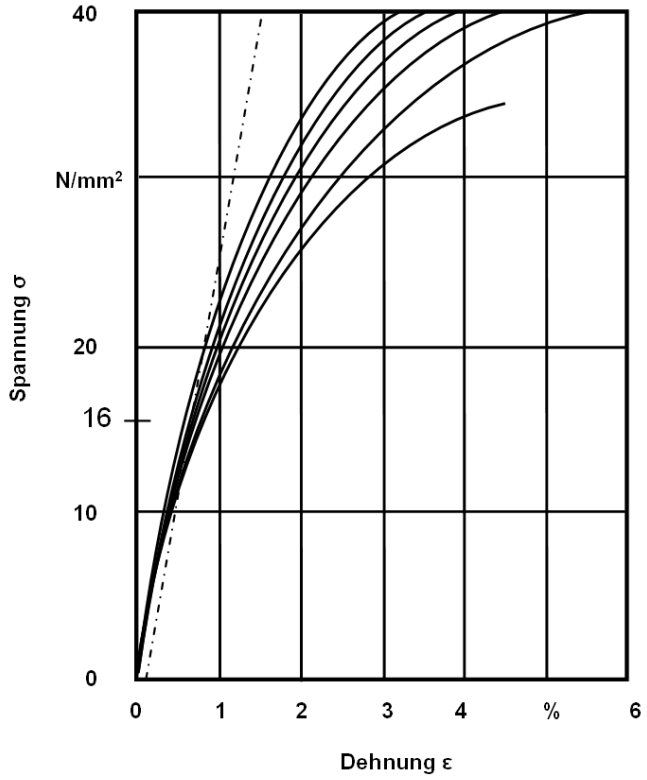


Bild 7-3: Grafische Ermittelung der Streckgrenze von Polycarbonat

Die modifizierte Formel 7-9 unterscheidet sich von der Formel 7-4 in dem Term zur Beschreibung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramms des Zugversuches. Diese beiden Terme sind in der **Tabelle 7-4** in Spalte 2 (Formel 7-4) und Spalte 3 (Formel 7-9) für die in [65] verwendeten Materialien dargestellt. In der Spalte 4 ist die sich daraus ergebene prozentuale Änderung der beiden Terme dargestellt.

	Term aus Formel 7-4	**Term aus Formel 7-9**	**prozentuale Abweichung der beiden Terme (Formel 7-4, 7-9)**
Material	$R_m \cdot \varepsilon_B$	$R_m \cdot \varepsilon_B - \left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_B$	$\frac{R_m \cdot \varepsilon_B - \left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_B}{R_m \cdot \varepsilon_B}$
St 12.03	113,4	101,7	0,90
St37-2	128,1	109,6	0,85
St33	131,2	114	0,86
AlMg3	43,6	38,5	0,89
Polycarbonat (Makrolon)	54,4	40,5	0,74

Tabelle 7-4: Vergleich der ursprünglichen Formel 7-4 mit modifiziertem Term der Formel 7-8

In **Bild 7-4** sind die aus Formel 7-4 und modifizierten Formel 7-9 berechneten Werte dargestellt.

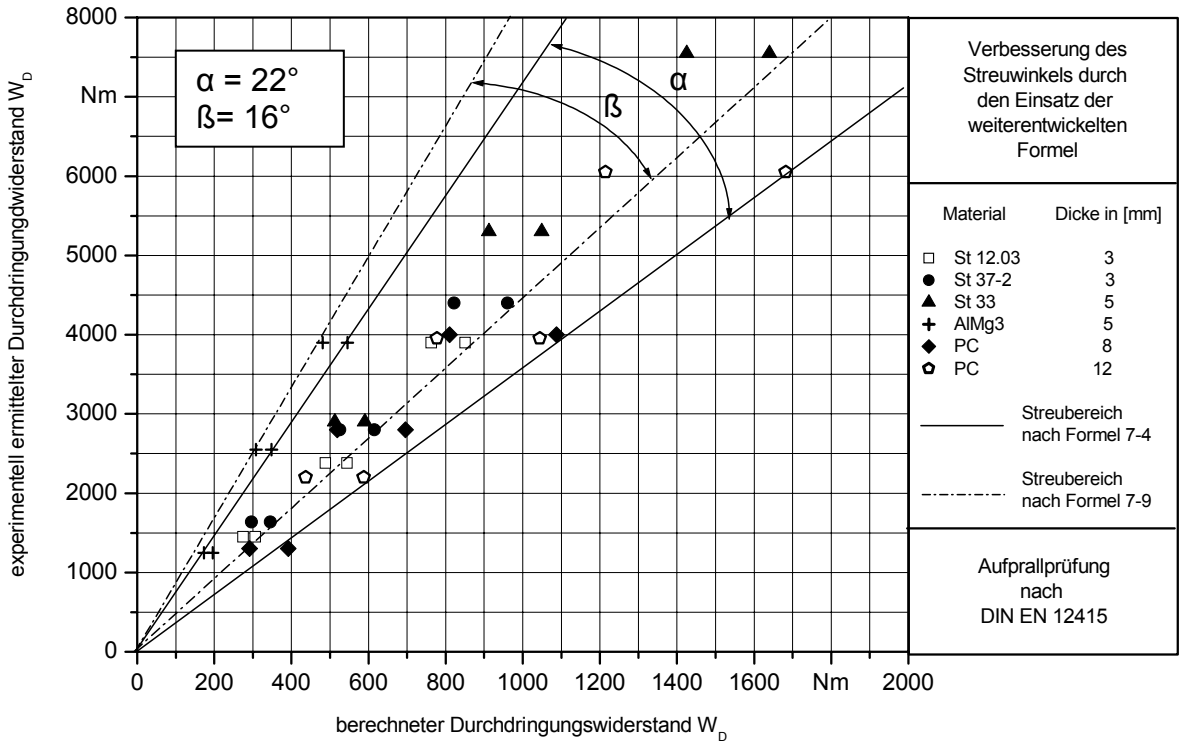


Bild 7-4: Grafische Darstellung der in Tabelle 7-4 ermittelten Korrekturen

Der Winkel α markiert den Streubereich, der nach Formel 7-4 errechneten Werte. Analog begrenzt der Winkel β den Streubereich der nach Formel 7-9 modifizierten Werte. Anhand der resultierenden Streuwinkel lässt sich die Reduzierung der Streuung beurteilen. Somit ergibt sich, dass die modifizierte Formel 7-9 die Genauigkeit der Berechnungsgleichung für die kritische Geschossenergie um tanβ/tanα = 0,645

d. h. um ca. 35 % erhöht. Die erhebliche Reduzierung der Streubreite ergibt sich durch die genauere Quantifizierung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens. Dadurch ergibt sich bei Materialien mit großem Produktwert aus Zugfestigkeit und Bruchdehnung ($R_m \cdot \varepsilon_B$), wie bei St 33, eine größere horizontale Verschiebung (bei jeweils gleicher kritischer Geschossenergie), als bei den Materialien mit kleinem Produktwert ($R_m \cdot \varepsilon_B$).

Für die Proportionalitätsfaktoren C der modifizierten Formel 7-9 ergeben sich folgende Werte für die einzelnen Werkstoffe:

- $C_{Aluminium}$ = 7,6
- C_{St} = 5,5 (gemittelt für St 33, St 37-2 und St 12.03)
- C_{PC} = 4,6

Überprüfen der modifizierten Formel anhand vorhandener Versuchsergebnisse

Im Folgenden wird überprüft, ob sich die guten Resultate der modifizierten Formel auch bei den Ergebnissen der eigenen durchgeführten Aufprallversuche und Zugversuche bestätigen. Hierzu werden die Versuchsergebnisse analog zu **Tabelle 7-5** und **Bild 7-5** dargestellt.

	Term aus Formel 7-4	**Term aus Formel 7-9**	**prozentuale Abweichung der beiden Terme (Formel 7-4, 7-9)**
Material	$R_m \cdot A$	$R_m \cdot \varepsilon_B - \left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_B$	$\frac{R_m \cdot \varepsilon_B - \left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_B}{R_m \cdot \varepsilon_B}$
S235JR (St37-2)	128,1	109,6	0,85
S355J2G3 (St52)	162,5	138,6	0,85
S700Mc	114	110,8	0,97
30CrMo5-2 (Secure 400)	126,5	110,1	0,94
X5CrNi 18-10 2mm (Nirosta)	361,8	274,4	0,76
X5CrNi 18-10 3mm	340	260,8	0,76
Polycarbonat (Makrolon)	54,4	40,5	0,74

Tabelle 7-5: Vergleich der Formel 7-4 mit der modifizierten Formel 7-9 für das 2,5 kg-Normprojektil

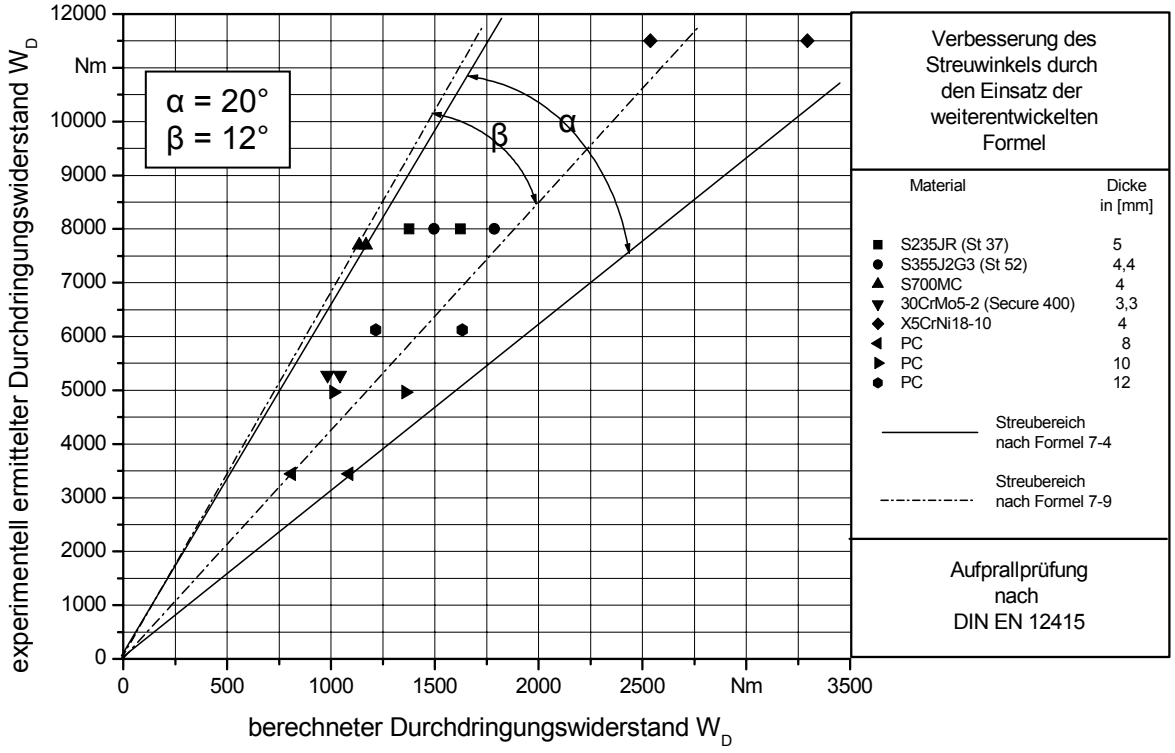


Bild 7-5: Grafische Darstellung der in Tabelle 7-5 ermittelten Korrekturen zu den Aufprallversuchen mit dem 2,5 kg-Normprojektil

Analog zur Interpretation von Bild 7-4 begrenzen in Bild 7-5 die durchgezogenen Linien den Streubereich bei Anwendung von Formel 7-4 und die gestrichelten Linien den Streubereich bei Anwendung von Formel 7-9. Der Vergleich der Steigungen (Proportionalitätskonstanten C) der modifizierten Formel 7-9 ergibt eine gute Übereinstimmung der in [65] veröffentlichten und der eigenen Versuchsergebnisse auf der Basis gleicher oder zumindest ähnlicher Materialien (Stahlwerkstoffe und Polycarbonat), **Tabelle 7-6**:

Versuchsergebnisse der BIA [65]	**eigene Versuchsergebnisse**
C_{St} = 5,5 (gemittelt für St33, St37-2 und St12.03)	C_{St37} = 5,8
C_{PC} = 4,6	C_{PC} = 4,7

Tabelle 7-6: Vergleich der Proportionalitätsfaktoren C aus modifizierter Formel 7-8

Im Rahmen der eigenen Versuche kamen auch höchstfeste Stähle, wie S700MC und 30CrMo5-2 (Secure 400) sowie der Edelstahl X5CrNi 18-10 zum Einsatz.
Die höchstfesten Stähle erfahren durch die modifizierte Formel 7-8 nur eine vergleichsweise geringe Korrektur gegenüber Formel 7-4, weil Streckgrenze und Zug-

festigkeit dabei sehr nahe beieinander liegen, die Bruchdehnung ε_b gering ist, und somit das Korrekturglied $\left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_B$ klein ist. Im Gegensatz dazu ist beim Nirosta Edelstahl die Differenz von Zugfestigkeit und Streckgrenze sowie die Bruchdehnung groß. Somit nimmt das Korrekturglied $\left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_B$ für Edelstahl einen großen Betrag an.

Für die Proportionalitätsfaktoren C ergeben sich nach Formel (7-9) die folgenden Werte:

C_{S700MC} = 6,8

$C_{Secure400}$ = 5,3

C_{St37} = 5,8

C_{St52} = 5,3

$C_{X5CrNi18-10}$ = 4,4

C_{PC} = 4,7

Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass mit Hilfe der modifizierten Formel (7-9) sogar unter Berücksichtigung von höchstfesten Werkstoffen die Genauigkeit für die Berechnung der kritischen Geschossenergien um ca. 30 % gegenüber der Formel (7-2) erhöht werden konnte.

Anwendung der modifizierten Formel 7-9 für die eigenen Versuchsergebnisse mit kleinen Projektilen

Die ursprüngliche Formel 7-4 entstand für Projektilmassen zwischen 0,625 kg und 2,5 kg. In der Literatur existiert bisher noch keine einfach handhabbare Berechnungsformel für die Bestimmung der kritischen Geschossenergien bei kleinen Projektilen. Aus diesem Grund wird versucht die modifizierte Formel auch für das 100 g-Normprojektil anzuwenden. Für den Vergleich werden die modifizierte Formel 7-9 und die Formel 7-4 auf die eigenen Versuchsergebnisse angewendet und in **Bild 7-6** grafisch dargestellt. Anschließend wird das Ergebnis anhand des Streuwinkels beurteilt.

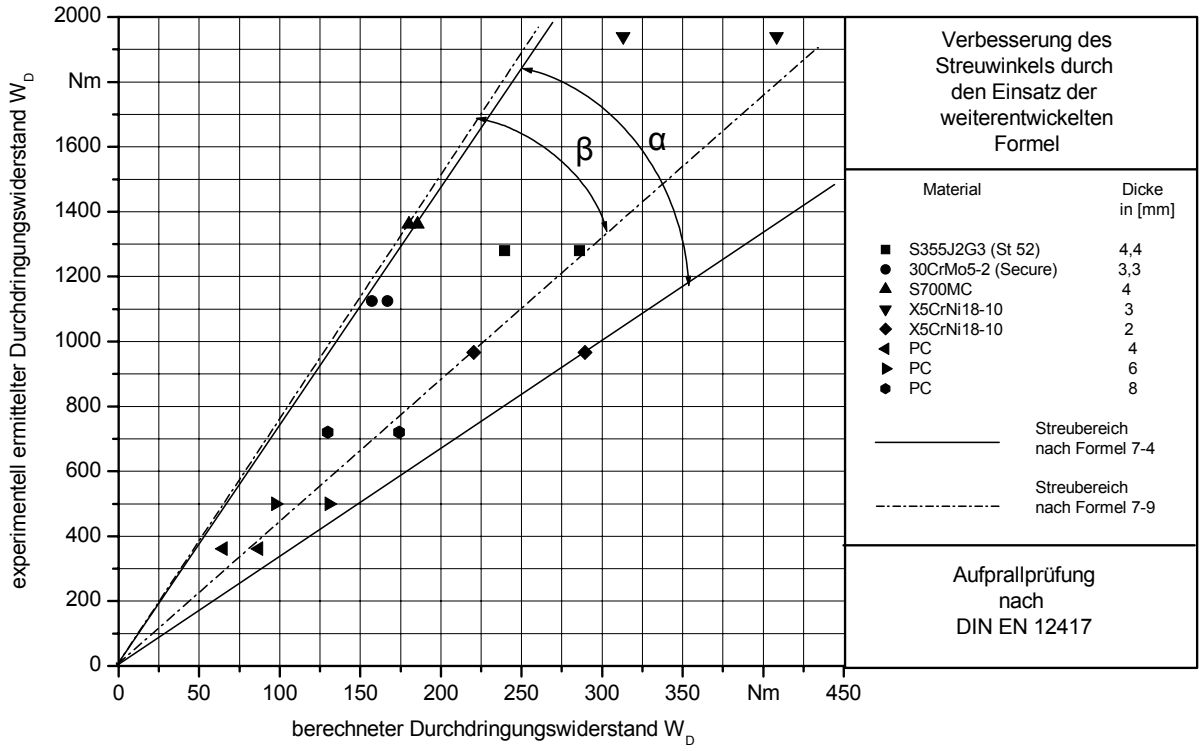


Bild 7-6: Grafische Darstellung der in Tabelle 8-5 ermittelten Korrekturen zu den Aufprallversuchen mit dem 100 g-Normprojektil

Für die Proportionalitätsfaktoren C ergeben sich bei Anwendung der Formel 7-9 für das 100 g-Normprojektil die folgenden Werte:

- C_{S700MC} = 7,6
- $C_{Secure400}$ = 7,2
- C_{St52} = 5,4
- C_{PC8mm} = 5,6

Die ermittelten Proportionalitätsfaktoren C bezüglich der 100 g-Normprojektile sind bis auf C_{St52} zum Teil deutlich höher als diese bezüglich der 2,5 kg-Normprojektile.

7.2.4 Beurteilung der Anwendbarkeit der modifizierten Formel

Die erhebliche Reduzierung der Streuung der Messergebnis für Aufpralluntersuchungen mit Projektilen >650 g ergibt sich durch die genauere Quantifizierung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens. Dies bewirkt bei Materialien mit großem Produktwert aus der Differenz von Streckgrenze und Zugfestigkeit und der Bruchdehnung eine größere horizontale Verschiebung als bei den Materialien mit kleinem Produktwert.

Im Rahmen der eigenen Versuche kamen auch höchstfeste Stähle, wie S700MC und 30CrMo5-2 (Secure 400) sowie der Edelstahl X5CrNi 18-10 zum Einsatz.
Die höchstfesten Stähle erfahren durch die modifizierte Formel nur eine vergleichsweise geringe Korrektur, da Streckgrenze und Zugfestigkeit sehr nahe beieinander liegen, die Bruchdehnung ε_b gering ist, und somit das Korrekturglied $\left(R_m - R_{p0,2}\right) \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_B$ klein ist. Bei den austenitischen Edelstählen ist das Produkt vergleichsweise hoch und das Korrekturglied nimmt einen großen Betrag an. Hierdurch werden die Streuwinkel deutlich reduziert.
Bei der Anwendung der modifizierten Formel auf Aufprallprüfungen mit dem 100 g-Normprojektil zeigt sich ebenfalls eine deutliche Reduzierung des Streuwinkels.

7.2.5 Zusammenfassung

Die Ausgangsgleichung der BIA lässt nur ungenügend genauen Schluss von den Ergebnissen der Zugversuche auf die Ergebnisse der Aufprallprüfungen zu.
Die modifizierte Formel berücksichtigt die realen Beziehungen der Werkstoffparameter zueinander. Wie gezeigt wurde, minimiert sie die maximalen Streuwinkel deutlich.
Die werkstoffspezifischen Konstanten wurden anhand der getesteten Einzelbleche ermittelt. Eine weitere Optimierung dieser Konstanten kann sich durch weitere Ergebnisse in zukünftigen Studien ergeben.
Die Verwendung dieser Formeln sollte jedoch mit einer nötigen Distanz und nur unter Einbeziehung von Expertenwissen erfolgen. Obwohl die Abweichungen bei der Anwendung der neuen Formel deutlich geringer ausfallen, sind sie immer noch im Bereich von ca. 100 Nm. Die maximale Abweichung je Werkstoff muss von der errechneten Zahl abgezogen werden, um die notwendige Sicherheit zu garantieren.
In Übereinstimmung mit den Aussagen in Kapitel 6.4 muss gesagt werden, dass eine zuverlässige und genaue Angabe des kritischen Durchdringungswiderstandes $W_{D,krit.}$ eines Bleches nur nach Durchführung statistisch abgesicherter Aufprallprüfungen mit Blechen derselben Charge gemacht werden kann.

7.3 Entwicklung einer Leichtbaukennzahl für den Maschinenschutz

7.3.1 Allgemeines

Zur Beurteilung der Eignung bzw. zum Vergleich von Werkstoffen und Bauweisen werden oft Kennzahlen herangezogen. Für die Leichtbauwerkstoffe bieten sich dabei zunächst die rein mechanischen Kennwerte an. Dabei sind vor allem die Werte für Festigkeit (Streckgrenze R_{eH}, Dehngrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m) und Steifigkeit (Elastizitätsmodul E) sowie die Dichte ρ für den Leichtbau interessant.
Für die Beurteilung der Eignung eines Werkstoffes für den Einsatz in einer Leichtbaumaschinenumhausung ist der Zusammenhang zwischen dem kritischen Durchdringungswiderstand und der Leichtbaugüte entscheidend.
Für den einfachen und schnellen Vergleich verschiedener potentieller Leichtbauwerkstoffe stellt daher die Entwicklung einer Leichtbaukennzahl für den Impact-Fall ein probates Mittel dar.

7.3.2 Herleitung einer Leichtbaukennzahl für den Impactfall

Gütekennzahlen
Für Werkstoffvergleiche und möglicherweise schnelle Vorauswahlen können so genannte Gütekennzahlen dienen. Dabei werden zwei Werkstoffe mit Hilfe ihrer Dichte in ein Massenverhältnis gesetzt und hinsichtlich einer konstanten mechanischen Eigenschaft (Festigkeit oder Steifigkeit) verglichen. Um einen umfangreichen Vergleich zu erhalten, wird die Gütekennzahl auf einen Werkstoff normiert und alle anderen Stoffe an diesem gemessen. Daraus lässt sich dann erkennen, „um wie viel leichter oder schwerer eine geometrisch ähnliche Konstruktion aus dem betrachteten Werkstoff ist, verglichen mit jener aus dem gewählten Bezugswerkstoff [47]“. **Tabelle 7-7** zeigt zwei beispielhafte Gütekennzahlen bei Normierung auf die Aluminium-Legierung.

Eigenschaft	Gütekennzahl	Werkstoff					
		Al-Leg.	Holz	Stahl	GFK	CFK	AFK
stat. Festigkeit	$\left[R_m/(g\cdot\rho)\right]'$	1	1,54	0,49	3,17	5,52	8,58
Längssteifigkeit	$\left[E/(g\cdot\rho)\right]'$	1	0,93	1,03	0,79	6,88	1,86

Tabelle 7-7: Gütekennzahlen [47]

Nach den obigen Werten würde bei gleicher statischer Festigkeit eine Struktur aus GFK um den Faktor 3,17mal leichter sein, als wenn sie aus einer Aluminium-Legierung gefertigt wäre. Betrachtet man jedoch die Auslegung auf gleiche Längssteifigkeit, dann wäre die GFK-Struktur nur 0,79mal so leicht, also 1,26mal schwerer.

Leichtbaukennzahlen

Um einzelne Werkstoffe nach Leichtbauaspekten direkt miteinander vergleichen zu können, reichen die normierten Gütekennzahlen nicht aus. In diesem Zusammenhang wurden entsprechende Leichtbaukennzahlen entwickelt.

Allgemein stellt die Leichtbaukennzahl LBK das Verhältnis der von einer Konstruktion aufzunehmenden maximalen Gesamtlast F_G zur Eigenlast (Eigengewicht) F_E dar, **Formel 7-9** [47]:

$$LBK = \frac{F_G}{F_E}$$ Formel 7-10

Die absolute Größe der LBK gibt dabei die Vorteilhaftigkeit für den Leichtbau an. Diese allgemeine Kennzahl kann dann auf einzelne Belastungsfälle angewendet werden, um eine spezielle Eigenschaft zu bewerten. Zum Beispiel ist nach Klein [47] die Leichbaukennzahl für die Bewertung eines Zugstabes definiert als:

$$LBK_Z = \frac{R_{p0,2} \diagup eH}{(g \cdot \rho) \cdot L}$$ Formel 7-11

Der Wert berechnet sich dabei aus der Streck- bzw. Dehngrenze $R_{p0,2/eH}$, der Dichte ρ, der Stablänge L sowie der Gravitationskonstanten g. Um die Vergleichsmöglichkeit auf größere komplexe Strukturen auszudehnen, wurde die LBK in der Praxis weiterentwickelt. Als Beispiel ist im Automobilbau die Leichtbaugüte eine wichtige Kennzahl zum Vergleich von Teil- oder gar Gesamtkarosserien. Am weitesten verbreitet ist dabei die Leichtbaugüte für Torsionssteifigkeit L_T, die sich aus der Torsionssteifigkeit c_T, der Masse der Rohkarosserie m_{RK} und der projizierten Fläche A ergibt [47, 7.4]:

$$L_T = \frac{m_{RK}}{c_T \cdot A}$$ Formel 7-12

Dieser möglichst kleine Kennwert wird insbesondere im Rahmen der großen Leichtbaubemühungen der Automobilbauer herangezogen, um eine Vergleichbarkeit un-

terschiedlicher moderner Karosserien zu erhalten. Er gibt dabei an, mit wie wenig Masse bei gegebener Radaufstandfläche welche Steifigkeit erreicht wurden [7.4].
Weitere Anwendungsbereiche der Leichtbaugüte im Automobilbau sind die Belastungsfälle Absenkbiegung und Eigenfrequenz [47].
Die oben genannten Kennzahlen erlauben einen allgemeinen Vergleich von Werkstoffen oder Strukturen hinsichtlich einer Reihe von mechanischen Eigenschaften. Bezogen auf die Anwendung im Maschinenschutz sind jedoch diese Werte nicht ausreichend, da sie noch relativ wenig über das reale Verhalten der Stoffe in trennenden Schutzeinrichtungen im Impactfall aussagen. Der Impactfall bezeichnet dabei ein Auftreffen von im Schadensfall abgeschleuderten Werkzeug-, Werkstück- oder Spannzeugteilen auf die Maschinenkapselung. Es ist daher eine eigene Leichtbaukennzahl für diesen Belastungsfall zu entwickeln, die eine Vergleichbarkeit verschiedener Wandstrukturen zulässt.
Eine Größe, die sich auf der Basis der Erkenntnisse vorangegangener Studien für eine derartige Verwendung anbietet, ist der kritische Durchdringungswiderstand $W_{D,krit.}$. Dieser ist im Allgemeinen durch Aufprallversuche mit entsprechenden Prüfmustern zu ermitteln, da Berechnungsmodelle weiterhin nicht zu vernachlässigende Abweichungen zu den experimentell erhaltenen Ergebnissen liefern.
Als Bezugswert bietet sich die Masse m der Wandstruktur an, da die Dichte von Werkstoffkombinationen oft schwierig zu bestimmen ist. Ein Bezug zur Fläche der Struktur ist nicht nötig, da die Prüfmuster im Rahmen der Versuche einheitliche Größen aufweisen. Ferner wird die Masse im Rahmen der Versuche spezifisch in Bezug zur Fläche angegeben (kg/m²).
Aus der allgemeinen Definition der Leichtbaukennzahl (Formel 7-9) kann somit eine Leichtbaukennzahl für den Impact-Fall LBK_{IF} abgeleitet werden:

$$LBK_{IF} = \frac{W_{D,krit.}}{m} \qquad \text{Formel 7-13}$$

Die Gesamt- oder Nutzlast der Struktur wird dabei in Form des kritischen Durchdringungswiderstandes, die Eigenlast durch die Masse der Struktur repräsentiert.
Es ist jedoch zu beachten, dass diese Kennzahl nicht allgemein anzuwenden ist, sondern jeweils auf den Belastungsfall der Versuchsreihe angepasst ist.

7.3.3 Verifizierung der Leichtbaukennzahl

Zur Veranschaulichung soll die Formel nun auf die Daten der untersuchten Werkstoffe angewendet werden. Eine Zusammenstellung der verwendeten Werte enthält Kapitel 12, Anhang B. Aus den Versuchsergebnissen der Aufpralluntersuchungen nach DIN EN 12417 [N4] (Bearbeitungszentren) mit dem 100 g-Normprojektil lassen sich folgende Werte für die Leichtbaukennzahl LBK_{IF} ermitteln, **Bild 7-7**

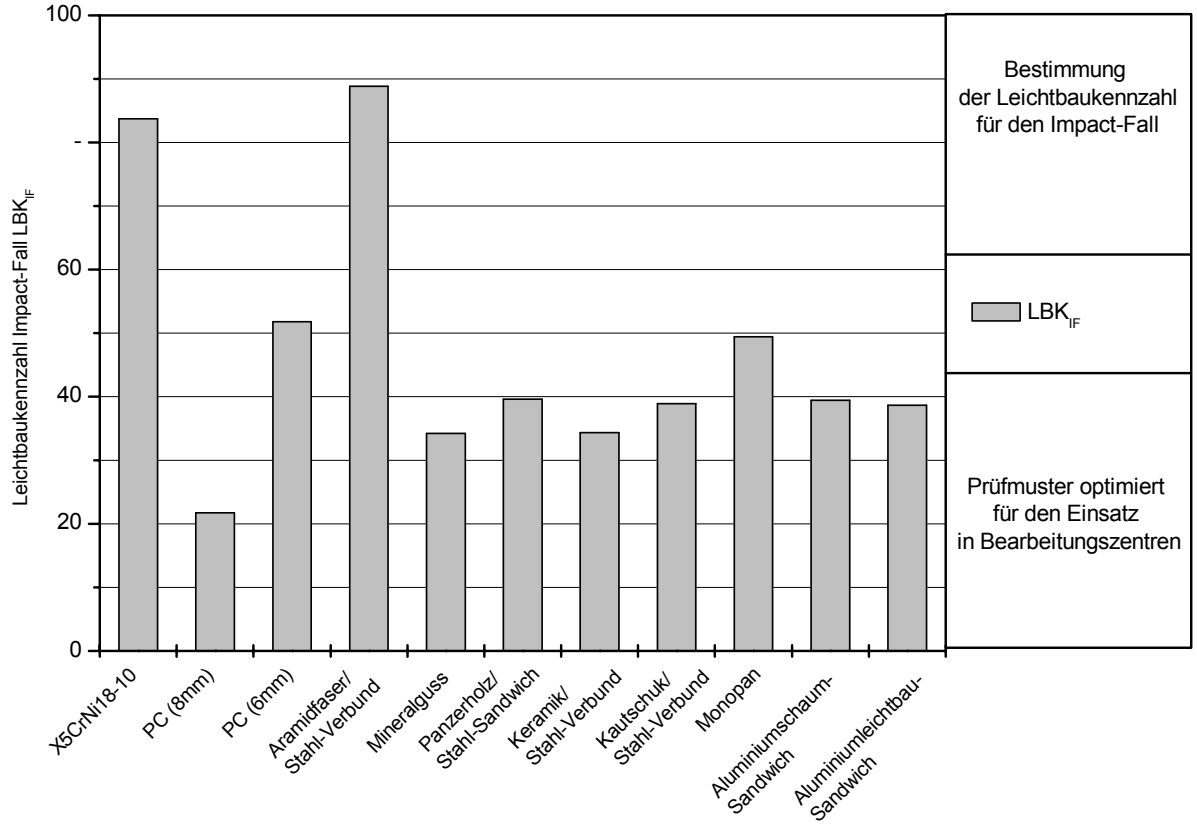


Bild 7-7: Leichtbaukennzahlen für Bearbeitungszentren

Bild 7-8 zeigt die ermittelten Leichtbaukennzahlen aus den Aufprallversuchen mit dem 2,5 kg-Normprojektil nach DIN EN 12415 [N3] für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren. Die auffällig bessere LBK_{IF} des 6mm Polycarbonates resultiert zum Einen aus dem sehr guten Verhältnis zwischen dem kritischen Durchdringungswiderstand und der Masse der Struktur bei der Prüfung mit dem 2,5 kg-Normprojektil und zum Anderen könnte hier der Kink-Effekt zum Tragen kommen.

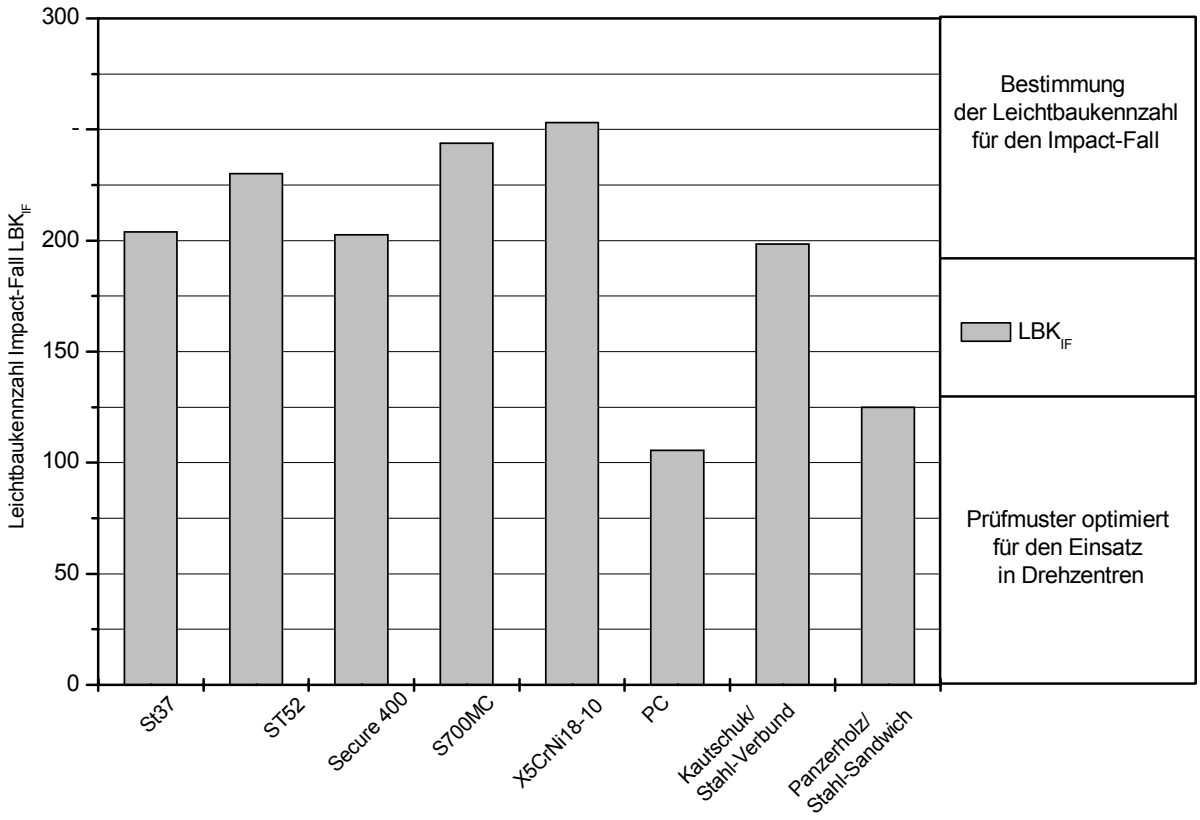


Bild 7-8: Leichtbaukennzahlen für Drehmaschinen und Drehzentren

7.3.4 Beurteilung der Anwendbarkeit der entwickelten Leichtbaukennzahl für den Impact-Fall

Die in vorhergehenden Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse werden für den Bereich der Bearbeitungszentren durch die entwickelte Leichtbaukennzahl bestätigt. Hiernach haben der austenitische Edelstahl X5CrNi18-10 sowie der Aramidfaserverbund die höchsten Kennzahlen und besitzen damit die beste Eignung für den Einsatz in Bearbeitungszentren.

Die Kennzahlen für den Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren bestätigen nur teilweise die Ergebnisse der vorangegangenen Versuchsreihen. Neben dem Edelstahl X5CrNi18-10 erwies sich auch das Kunstharzpressholzsandwich als besonders geeignet für den geforderten Einsatz. Dies liegt jedoch an weiteren Kriterien wie Schallschutz und Optik, die nicht in die Leichtbaukennzahl mit einfließen.

7.3.5 Zusammenfassung

Die Leichtbaukennzahl LBK_{IF} kann ein sinnvolles Hilfsmittel zur Auswahl von geeigneten Werkstoffen bzw. Werkstoffkombinationen darstellen. Jedoch ist zu beachten,

dass sie sich lediglich auf den technischen Kennwert des Durchdringungswiderstandes bezieht und weitere, zur Auswahl wichtige Eigenschaften wie Verarbeitungsmöglichkeit, Schallschutz, Nachrüsteignung oder vor allem auch die Herstellungskosten außer acht lässt. Daher kann die Kennzahl lediglich als ein Teilkriterium im Auswahlprozess dienen.

8 Untersuchungen der schalltechnischen Eigenschaften der für den Impact-Fall optimierten Prüfmuster

8.1 Einleitung

Die Geräuschbelastungen von Werkzeugmaschinen sind besonders kritisch einzuschätzen. Nach Angaben des VMBG (Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften) werden häufig Schmerzschwellen von 120-130 dB(A) erreicht.
Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) geht sogar von etwa 5 Millionen deutschen Berufstätigen aus die während der Arbeit Lärmbelastungen oberhalb von 85 dB(A) ausgesetzt sind.
Nach der neuen EU-Lärmschutz-Richtlinie 2003/10/EG, die am 15.02.2003 in Kraft gesetzt wurde, werden die zulässigen Immissionswerte für den Lärmschutz am Arbeitsplatz um 5 dB(A) herabgesetzt. Mit der Umsetzung in nationales Recht, die bis spätestens 15.02.2006 erfolgen musste, wurde die bis dahin noch gültige BG-Vorschrift “Lärm“ (BGV B3, “UVV Lärm“) abgelöst. Viele Hersteller bekommen bereits jetzt die Auswirkungen der neuen Richtlinie in Form von deutlich gestiegenen Kundenanforderungen zu spüren. Bei den in der EU-Lärmschutz-Richtlinie festgesetzten Expositionsgrenz- und Auslösewerten handelt es sich um Immissionspegel, in die auch Pegelanteile wie z. B. Raumreflexionen und Fremdgeräusche eingehen, die sich dem Einfluss des Herstellers entziehen. Der Hersteller kann nur Emissionspegel garantieren. Der Hauptschwerpunkt des Lärmschutzes liegt somit bei der Entwicklung, Herstellung und dem bevorzugten Einsatz lärmarmer Arbeitsmittel und -verfahren sowie bei der schallschutzgerechten Errichtung oder Umgestaltung der Arbeitsstätten. Im Folgenden werden die nach ihrem Durchdringungswiderstand und ihrer Masse optimierten Prüfmuster auf ihre Schalldämmungseigenschaften hin untersucht um eventuelle Synergieeffekt zu verifizieren.

8.2 Referenzschallmessung an einem Bearbeitungszentrum

8.2.1 Allgemeines

Da es aus Kostengründen nicht möglich war, die optimierten Prüfmuster in realen Werkzeugmaschinen einzusetzen und schalltechnisch zu untersuchen, mussten Eingangs- und Zielgrößen definiert werden. Hierfür wurden Referenzschallmessungen an einem realen Bearbeitungszentrum durchgeführt [61] und die gemessenen Er-

gebnisse als Eingangsgröße für die Beurteilung der Schalldämmeigenschaften der optimierten Prüfmuster verwendet.

8.2.2 Entwicklung einer Prüfmethodik zur Durchführung von Referenzschallmessungen

Zur Bestimmung des zu erreichenden Schutzzieles wurden Referenzmessungen an dem Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum Mikromat 10V HSC der Mikromat Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG, Dresden, durchgeführt. Die Versuche fanden im Versuchsfeld des Produktionstechnischen Zentrums (PTZ), Berlin statt.

Schallleistungsbestimmung an dem Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum Mikromat 10V HSC

Als zu analysierende Schallquelle wurde im Rahmen dieses Projektes das Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum Mikromat 10V HSC festgelegt, **Bild 8-1**. Dieses ist eine auf Fräsoperationen ausgelegte Werkzeugmaschine mit drei unabhängig verfahrbaren Linearachsen sowie zwei rotatorischen Achsen. Die Steuerung der Maschine erfolgt über eine CNC-Steuerung der Fa. Andron.

Die Mikromat 10V HSC kann mit zwei unterschiedlichen, direkt angetriebenen Hauptspindeln betrieben werden. Zur Ansteuerung der Antriebe wird das SERCOS-Interface als Schnittstelle zwischen CNC-Steuerung und Antrieb genutzt.

Bild 8-1: Mikromat 10 V HSC im Versuchsfeld des IWF

Bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ist eine hohe dynamische Steifigkeit der Werkzeugmaschine zu gewährleisten. Aus diesem Grund ist die Maschine in Portalbauweise ausgeführt.

Tabelle 8-1 stellt wichtige Leistungs- und Geometriedaten der betrachteten Werkzeugmaschine übersichtlich dar.

Technische Daten Mikromat 10V HSC	
Arbeitsbereich:	
X-Achse (Tisch)	1200 mm
Y-Achse (Schlitten)	1000 mm
Z-Achse (Spindel)	600 mm
Vorschubgeschwindigkeiten:	
X,Y,Z	0...30 m/min
Max. Achsbeschleunigung X,Y,Z	4 m/s²
Aufspannfläche:	1000 mm x 1500 mm
Arbeitsspindel 1:	
Leistung des Spindelmotors	20 kW
Max. Spindeldrehzahl	15.000 min-1
Drehmoment der Spindel	110 Nm
Arbeitsspindel 2:	
Leistung des Spindelmotors	10 kW
Max. Spindeldrehzahl	40.000 min-1
Drehmoment der Spindel	6 Nm

Tabelle 8-1: Technische Daten der Mikromat 10 V HSC

Versuchsaufbau

Zu Beginn der Messungen werden die Abmessungen der Maschine erfasst. Anschließend erfolgt die Festlegung der Messflächen nach DIN EN ISO 9614-1 (Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen) [N12]. Die begrenzten räumlichen Verhältnisse am Aufstellungsort der Maschine und das Ziel, die gesamte Maschine mit allen Zusatzaggregaten zu betrachten, führen zu der in **Bild 8-2** dargestellten Messfläche. Die Messungen werden auf vier rechteckigen Teilmessflächen durchgeführt, **Tabelle 8-2**.

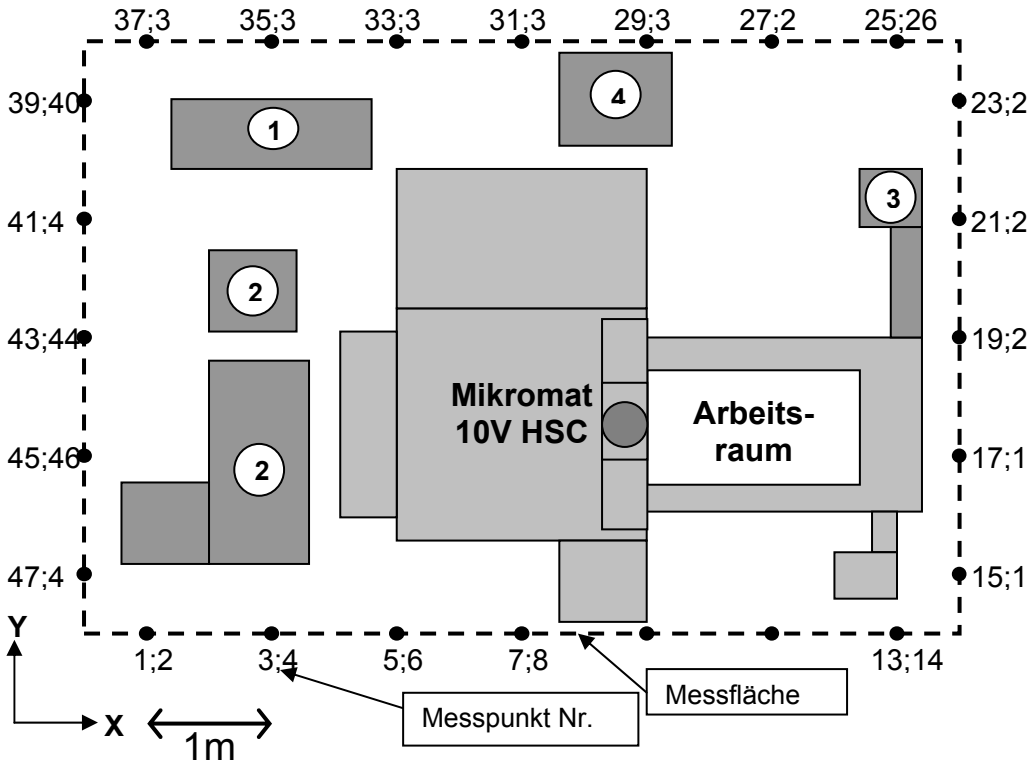


Bild 8-2: Lage der Messfläche um Maschine und Zusatzaggregate [61]

Bild 8-2 zeigt eine Draufsicht auf die Maschine mit den nummerierten Zusatzaggregaten

- Kühleinheit für Steuerungskomponenten (1),
- Hydraulikaggregate (2),
- Spanförderer (3) und
- Absaugfilter (4).

Teilmessfläche	**Messpunkte**	**Dimension (Breite x Höhe)**
„Front“	1 bis 14	7 m x 2 m
„Right“	15 bis 24	5 m x 2 m
„Back“	25 bis 38	7 m x 2 m
„Left“	39 bis 48	5 m x 2 m

Tabelle 8-2: Messflächendimension [61]

Zur Festlegung der Messfläche wurde die Lage der Messpunkte in Länge und Breite am Boden markiert. Die Höhe der jeweiligen Messpunkte kann mittels eines Stativs eingestellt werden. Alle geraden Messpunkte liegen in einer Höhe von einem Meter,

die ungeraden Messpunkte liegen in einer Höhe von zwei Metern. Die Messpunkte auf einer Teilfläche haben jeweils einen horizontalen Abstand von einem Meter. Damit ergeben sich Messflächensegmente der Größe 1 m². Dies entspricht den Anforderungen an die Größe der Messflächensegmente gemäß DIN EN ISO 3744 (Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen) [N13].

8.2.3 Bestimmung der Schallleistung des untersuchten Bearbeitungszentrums

Die Messwertaufnahme mit dem Schalldruckpegelmessgerät erfolgt in zwei Abschnitten. Da die Werkzeugmaschine während des Bearbeitungsvorganges nicht ständig an- und ausgeschaltet werden kann, müssen die Fremdgeräuschpegel vor oder nach der Bearbeitung aufgenommen werden. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Fremdgeräusche nicht signifikant von den während der Bearbeitung auftretenden Fremdgeräuschen unterscheiden. In jedem Messpunkt wird eine zeitliche Mittelung von 20 Sekunden bei der Messwertaufnahme eingehalten. Die Aufnahme der Schalldruckpegel L'_p erfolgt zeitnah zu der Messwertaufnahme mit der Schallintensitätssonde.

Tabelle 8-3 zeigt die für die Berechnung der Schallleistung aus Schalldruckpegelwerten genutzte Messwerttabelle. Die Tabelle enthält zusätzlich zu den Messwerten auch Angaben zu Ort und Zeitpunkt der Messung sowie wichtige Einstellungen des Messgerätes.

Der gemessene Messflächen-Schalldruckpegel L_p ergibt, korrigiert um die Faktoren für Fremdgeräusch (K_1) und reflektierten Schall (K_2), einen Wert von 66,1 dB. Gemeinsam mit dem Messflächenmaß L_S = 16,8 dB ergibt sich somit gemäß

$$L_W = L_P + L_S + K_0 \qquad \text{Formel 8-1}$$

K_0 : Korrekturfaktor für geänderte atmosphärische Bedingungen

eine Schallleistung von 82,9 dB, **Tabelle 8-3**.

Messung Nr : 1 **Datum:** 13.02.02
Uhrzeit: 10:30

Ort: Versuchsfeld des PTZ, Berlin
Messflächengröße: 48 m²
Messraumgröße: 1000 m²

Geräteeinstellungen Brüel&Kjaer 2233

Detector:	RMS
Time weighting:	S
Frequency weighting:	A
Sound incidence:	Random
Mittelungszeit:	20 s

Schallquelle:
MIKROMAT 10V HSC Hochgeschschwindigkeits Fräsbearbeitungszentrum

Messpunkt:	L''_p	L'_p	L'_p-L''_p		L''_{mean}	L'_{mean}
1	58,9	62,4	3,5		776247,1	1737800,8
2	58,7	63,0	4,3		741310,2	1995262,3
3	58,6	62,7	4,1		724436,0	1862087,1
4	58,7	64,6	5,9		741310,2	2884031,5
5	59,6	63,1	3,5		912010,8	2041737,9
6	59,2	64,1	4,9		831763,8	2570395,8
7	58,5	63,4	4,9		707945,8	2187761,6
8	58,4	64,2	5,8		691831,0	2630268,0
9	58,5	66,5	8,0		707945,8	4466835,9
10	58,7	65,6	6,9		741310,2	3630780,5
11	58,5	63,5	5,0		707945,8	2238721,1
12	58,6	63,2	4,6		724436,0	2089296,1
13	58,3	62,2	3,9		676083,0	1659586,9
14	58,4	63,7	5,3		691831,0	2344228,8
15	57,5	63,1	5,6		562341,3	2041737,9
16	57,4	66,2	8,8		549540,9	4168693,8
17	57,8	68,1	10,3		602559,6	6456542,3
18	57,6	66,8	9,2		575439,9	4786300,9
19	58,1	68,2	10,1		645654,2	6606934,5
20	58,3	67,8	9,5		676083,0	6025595,9
21	59,3	67,5	8,2		851138,0	5623413,3
22	60,0	69,2	9,2		1000000,0	8317637,7
23	59,5	68,8	9,3		891250,9	7585775,8
24	59,5	69,4	9,9		891250,9	8709635,9
25	60,7	66,5	5,8		1174897,6	4466835,9
26	60,7	68,1	7,4		1174897,6	6456542,3
27	60,8	68,2	7,4		1202264,4	6606934,5
28	61,1	68,8	7,7		1288249,6	7585775,8
29	64,1	69,5	5,4		2570395,8	8912509,4
30	63,9	68,7	4,8		2454708,9	7413102,4
31	63,8	72,6	8,8		2398832,9	18197008,6
32	64,0	70,7	6,7		2511886,4	11748975,5
33	64,8	70,2	5,4		3019951,7	10471285,5
34	66,2	71,0	4,8		4168693,8	12589254,1
35	61,7	70,0	8,3		1479108,4	10000000,0
36	62,1	72,3	10,2		1621810,1	16982436,5
37	60,4	68,3	7,9		1096478,2	6760829,8
38	60,3	69,0	8,7		1071519,3	7943282,3
39	59,3	65,8	6,5		851138,0	3801894,0
40	59,8	68,3	8,5		954992,6	6760829,8
41	60,3	69,2	8,9		1071519,3	8317637,7
42	60,1	66,9	6,8		1023293,0	4897788,2
43	59,6	67,0	7,4		912010,8	5011872,3
44	60,1	69,2	9,1		1023293,0	8317637,7
45	58,9	67,0	8,1		776247,1	5011872,3
46	59,1	68,2	9,1		812830,5	6606934,5
47	59,1	64,9	5,8		812830,5	3090295,4
48	59,0	67,0	8,0		794328,2	5011872,3
			7,3		1122663,4	5992176,4
Mittelwert:					**60,5**	**67,8** dB

K_1 0,9 dB **maximal 1,3 !**
K_2 0,8 dB
L_p 66,1 dB **Schallleistung:** **82,9** **± 1,5 dB**

Tabelle 8-3: Messwerttabelle für Geräuschmessungen an der Mikromat 10V HSC [61]

8.2.4 Zusammenfassung

Die während der Bearbeitung durchgeführten Messungen an der Werkzeugmaschine Mikromat 10V HSC zeigten, dass die emittierte Schallleistung nur in geringem Maße von den Prozessparametern abhängig ist. Der größte Anteil der Schallleistung der betrachteten Werkzeugmaschine wird durch die Zusatzaggregate und Antriebe verursacht.

Gegenstand dieser Referenzuntersuchung war die Bestimmung des Schalldruckpegels eines Bearbeitungszentrums zur Zielfestlegung für die akustischen Dimensionierungen der optimierten Prüfmuster. Die Messungen erfolgten an einem Hochgeschwindigkeits- Bearbeitungszentrum des Typs Mikromat 10V HSC der Mikromat Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG, Dresden.

Der bei der Untersuchung des Bearbeitungszentrums Mikromat ermittelte Schallleistungswert dient als Orientierungsgröße für die Schalldurchgangsuntersuchungen der optimierten Prüfmuster.

8.3 Bestimmung des Schalldämmmaßes der optimierten Prüfmuster

8.3.1 Allgemeines

Für die Herstellung eines akustisch optimierten Aufbaus ist die Kenntnis der Schallenergiebilanz an einer Wand unablässig.

Bei dieser Energiebetrachtung wird ein Teil der Schallenergie zurückgeworfen, der andere Teil wird von der Wand aufgenommen. Von der absorbierten Energie wiederum wird ein Teil als Körperschall zur Erregung der Wand selbst abgezweigt, ein weiterer Teil wird durch die Wand hindurch gelassen und in den jenseits der Wand liegenden Luftraum abgestrahlt. Man spricht von transmittierter Energie, die unmittelbar mit der Schalldämmung der Wand zusammenhängt. Schließlich wird der restliche Teil der absorbierten Energie vor allem im vorderen Teil der Wand geschluckt und in Wärme umgewandelt. In diesem Fall spricht man von Energiedissipation oder Schalldämpfung in der Wand [29]. Die Verhältnisse sind in **Bild 8-3** dargestellt.

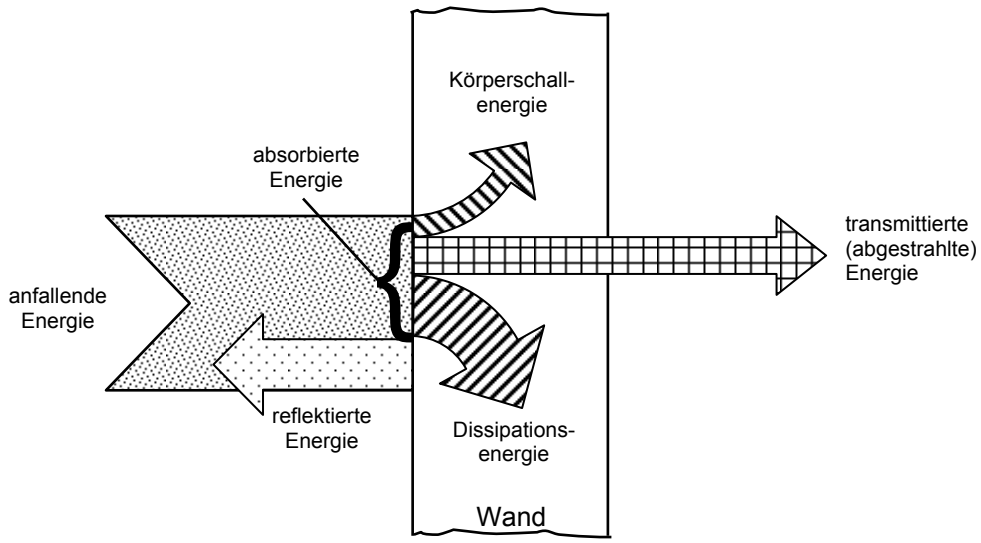


Bild 8-3: Schallenergiebilanz an einer Wand [29]

Die Dissipationsenergie, die stark von der Art der Vorderseite abhängt, macht für den betroffenen Raum mit der einfallenden und der reflektierten Energie einen wesentlichen Anteil der Energiebilanz aus.

8.3.2 Entwicklung einer Prüfmethodik und Aufbau eines Prüfstandes zur Bestimmung des bewerteten Luftschalldämmmaßes der optimierten Prüfmuster

Messung der Luftschalldämmung

Bei der Messung des Luftschalldämmmaßes bildet das Messobjekt die Trennwand zwischen zwei Räumen, die im Folgenden als Sende- und Empfangsraum bezeichnet werden. Der in einem Raum vorhandene Schallpegel hängt nicht nur von der eindringenden Leistung, sondern auch von der akustischen Raumausstattung ab. Würde man als Maß für die Schalldämmung einer Wand gegenüber Luftschall einfach die aus den Pegeln im Sende- und Empfangsraum gebildete Differenz benutzen, so wäre diese Zahl nicht nur für die Wandeigenschaften, sondern zugleich für die Räume charakteristisch. Grundsätzlich benutzt man daher als wandbeschreibendes Maß den Transmissionsgrad τ,

$$\tau = P_E / P_S \qquad \text{Formel 8-2}$$

der das Verhältnis aus empfangsseitig durchgelassener Leistung P_E zur sendeseitig auftreffenden Leistung P_S darstellt. Den Transmissionsgrad drückt man noch durch das Schalldämmmaß R

$$R = 10\lg \frac{1}{\tau} = L_S - L_E - 10\lg \frac{A_E}{S}$$ Formel 8-3

aus, wobei A_E die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes ist. Da die Schalldämmmaße von Bauteilen frequenzabhängig sind, steigen sie in der Tendenz mit der Frequenz an, so dass die Messung meist in Terz- oder Oktavschritten vorgenommen wird. Als Prüfschall wird Rauschen entsprechender Bandbreite benutzt. Man erhält so einen Frequenzgang von R, der im so genannten „bauakustischen" Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 3,15 kHz ermittelt wird. Höhere Frequenzen interessieren an dieser Stelle nicht, da hier die Dämmung fast immer groß ist. Bei tieferen Frequenzen lässt die Ohrempfindlichkeit rasch nach, auch ist die Messung nur schwer durchführbar und ungenau.

Um von dem gemessenem Luftschalldämmmaß auf eine vergleichbare Eigenschaft schließen zu können, wird das bewertete Schalldämmmaß R_W durch Vergleich mit einer „Sollkurve" ermittelt [29].

Prüfstand

Für die Bestimmung des bewerteten Schalldämmasses R_W wird der Luftschallprüfstand am Institut für technische Akustik der Technischen Universität Berlin genutzt, **Bild 8-4**.

Bild 8-4: Luftschallprüfstand am Institut für technische Akustik der Technischen Universität Berlin

Um eine Schallübertragung zwischen Schallquelle und Empfänger über Luftschall zu verhindern, wird üblicherweise eine mehr oder weniger schalldichte Wand angebracht, die den direkten Schallweg unterbricht, **Bild 8-5**. Der für die Untersuchungen genutzte Prüfstand verfügt über einen durch eine akustisch entkoppelte Wand getrennten Sende- und Empfangsraum mit einer Durchgangsöffnung von 1250 x 1500 mm².

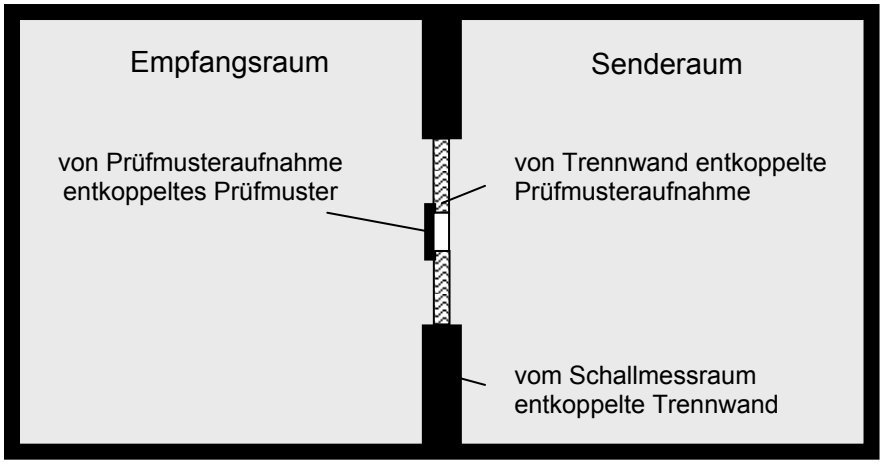


Bild 8-5: Schematische Darstellung eines Luftschallprüfstandes

Da die optimierten Prüfmuster eine genormte Größe von 500 x 500 mm² aufweisen, musste die Durchgangsöffnung verringert werden. Hierfür wurde ein Aufbau nach DIN EN ISO 20140-2 „Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen“ [N14] entwickelt, **Bild 8-6**.

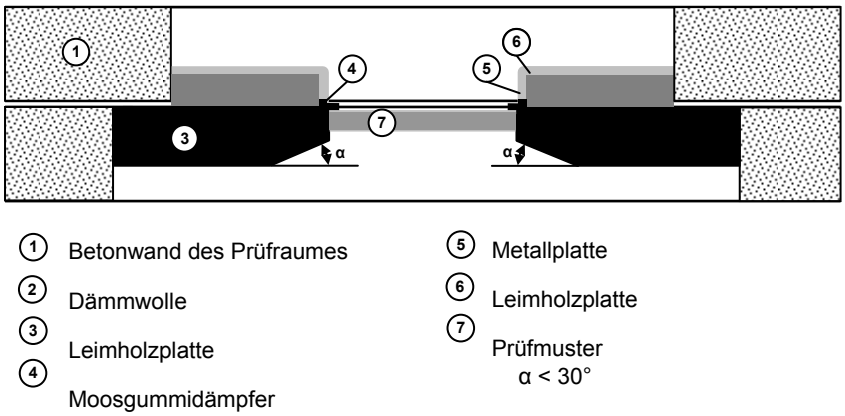


Bild 8-6: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Verringerung der Durchgangsöffnung

Prüfmuster

Bei der Entwicklung und Konstruktion der Prüfmuster lag der Fokus nicht auf der schalltechnischen Optimierung. Es sollte vielmehr die Rückhaltefähigkeit gegen abgeschleuderte Werkzeug- oder Werkstückbruchstücke sichergestellt werden. Vor diesem Hintergrund wurde die Masse der Prüfmuster durch konstruktive Maßnahmen optimiert.

Die rückhalte- und gewichtsoptimierten Prüfmuster wurden anschließend einer schalltechnischen Untersuchung unterzogen ohne weitere kostensteigernde, schall-

technische Veränderungen vorzunehmen. Das Ziel dieser Untersuchung war es, die werkstoffimmanenten schalltechnischen Eigenschaften zu beurteilen.
Die Einteilung der Prüfmusteraufbauten gemäß 6.1.3 ist in **Tabelle 8-4** dargestellt.

Prüfmusteraufbau	Einschalig	Mehrschalig	Porenabsorber
Baustahl	X		
Edelstahl	X		
Polycarbonatsandwich		X	
Aluminiumschaumsandwich		X	X
MonoPansandwich		X	X
Kunstharzpressholzsandwich		X	X
Kautschukverbund		X	
Aramidfaserverbund		X	X

Tabelle 8-4: Einteilung der Prüfmusteraufbauten

8.3.3 Bestimmung des bewerteten Luftschalldämmmaßes der optimierten Prüfmuster

Die Schalldämmung einer Wand oder darin enthaltener Elemente wird wie folgt ermittelt: Von dem Lautsprecher im Senderaum wird ein Testsignal abgestrahlt, dessen Pegel $L_1(f)$ (z. B. als Funktion der Frequenz mit Hilfe eines Terz-Band-Filters) gemessen wird. Ebenso wird der Pegel $L_2(f)$ im Empfangsraum (ggf. frequenzabhängig) gemessen. Als Luftschalldämmmaß R in dB ergibt sich dann folgende Größe:

$$R = L_1(f) - L_2(f) - 10\lg\frac{S}{A} \qquad \text{Formel 8-4}$$

Dabei bezeichnet S die Oberfläche des Testobjektes und A die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes. Um eine möglichst hohe Messgenauigkeit zu erzielen, ist der Empfangsraum als Hallraum ausgeführt und die äquivalente Absorptionsfläche lässt sich aus der Nachhallzeit dieses Hallraumes berechnen. Der letzte Faktor (10lgS/A) soll den Einfluss der akustischen Eigenschaften des Empfangsraumes weitgehend eliminieren [29].
Für die bessere Vergleichbarkeit verschiedener Trennelemente wird versucht die Vielzahl von Werten des Frequenzganges in einen Einzahlwert umzurechnen, der das Luftschalldämmmaß durch einen einzigen Zahlenwert wenigstens grob zusammenfasst. Die Zusammenfassung des Frequenzganges zu einem Einzahlwert muss wegen der immer vorgefundenen Frequenzabhängigkeit mit einer genormten Bezugskurve hergestellt werden, **Bild 8-7**.

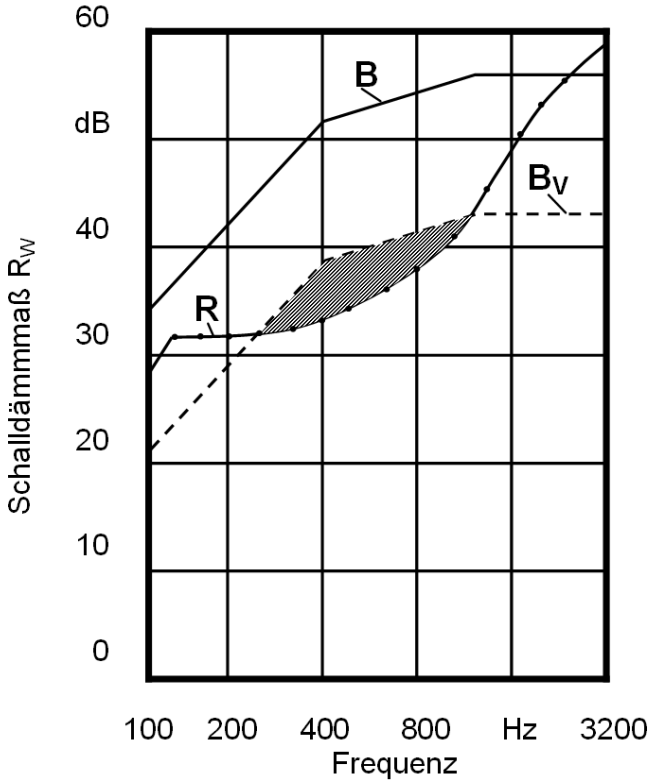


Bild 8-7: Bestimmung des bewerteten Luftschalldämmmaß R_W [29]

Der Vergleich der Messkurve R mit der Bezugskurve B zur Bestimmung des Einzahlwertes geschieht wie folgt:

Die Bezugskurve wird solange in 1 dB-Schritten in Richtung auf die Messkurve verschoben, bis die „Summe der Unterschreitungen“ der Messkurve gegenüber der Bezugskurve weniger als 32 dB beträgt.

Die Verschiebung, die erforderlich ist, um Bezugskurve und Messkurve einander anzugleichen, wird Luftschall-Schutz-Maß LSM genannt.

Das LSM wird nicht mehr benutzt; es dient nur als Zwischengröße zur Bestimmung des heute verwendeten „bewerteten Schalldämmmaßes“ R_W, das zu R_W = LSM + 52 dB definiert ist. 52 dB entspricht der Bezugskurve bei der mittleren Frequenz von 500 Hz [16].

Auf der Grundlage des am Bearbeitungszentrums Mikromat 10 V HSC gemessenen Schalldruckpegels wird „weißes Rauschen“ mit einem ähnlichem Schalldruckpegel erzeugt. Im ersten Schritt wird die so genannte „Nullmessung“ durchgeführt, d. h. der Schalldruck wird im Empfangsraum ohne Prüfmuster gemessen. Anschließend werden sämtliche optimierten Prüfmuster vermessen und mit der Nullmessung verglichen.

Die gemessene Luftschalldämmung für die nach DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmuster ist in **Bild 8-8** dargestellt. In **Bild 8-9** ist der für die Bearbeitungszentren relevante Bereich noch einmal hervorgehoben.

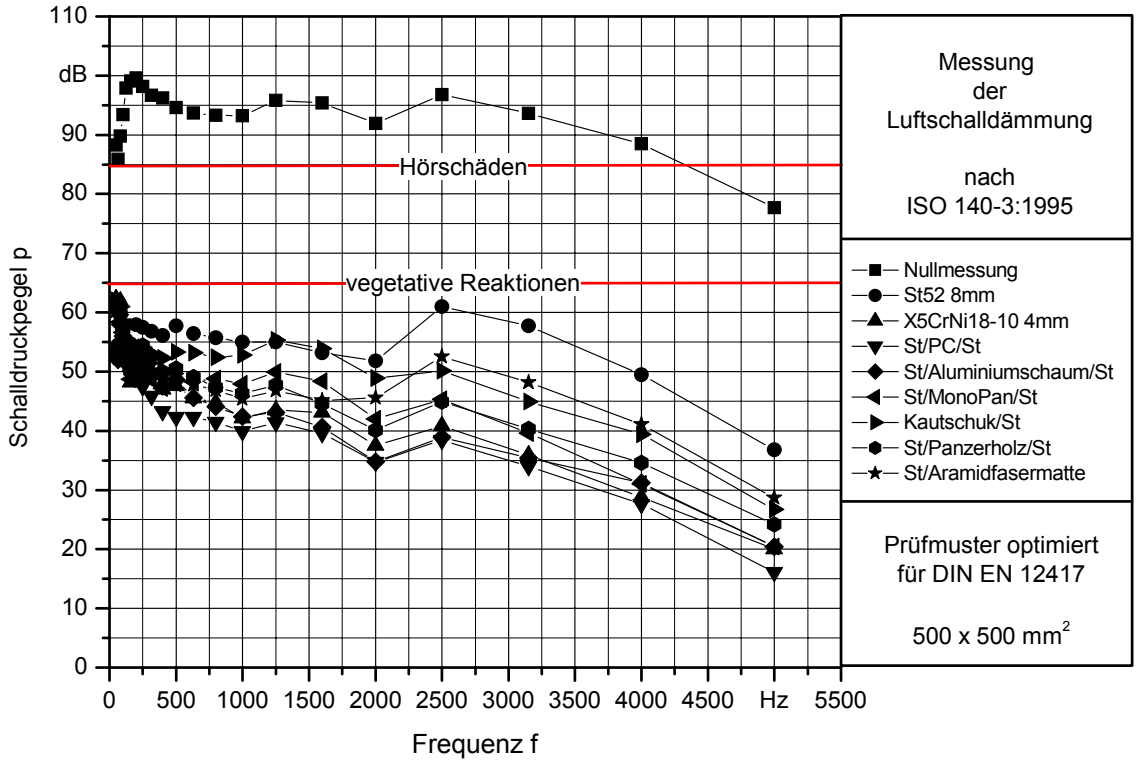


Bild 8-8: Luftschalldämmung für die nach DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmuster

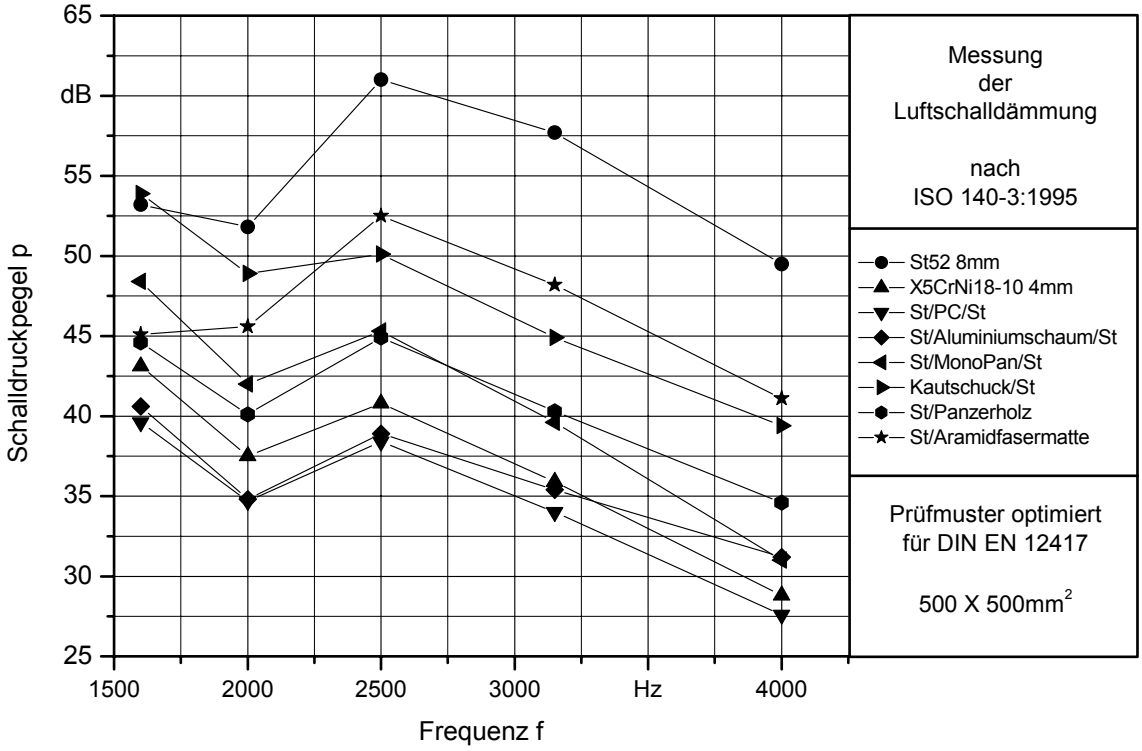


Bild 8-9: Darstellung des für Bearbeitungszentren relevanten Bereiches

Die gemessene Luftschalldämmung für die nach DIN EN 12415 [N3] optimierten Prüfmuster ist in **Bild 8-10** dargestellt. In **Bild 8-11** ist der für die Drehmaschinen relevante Bereich noch einmal hervorgehoben.

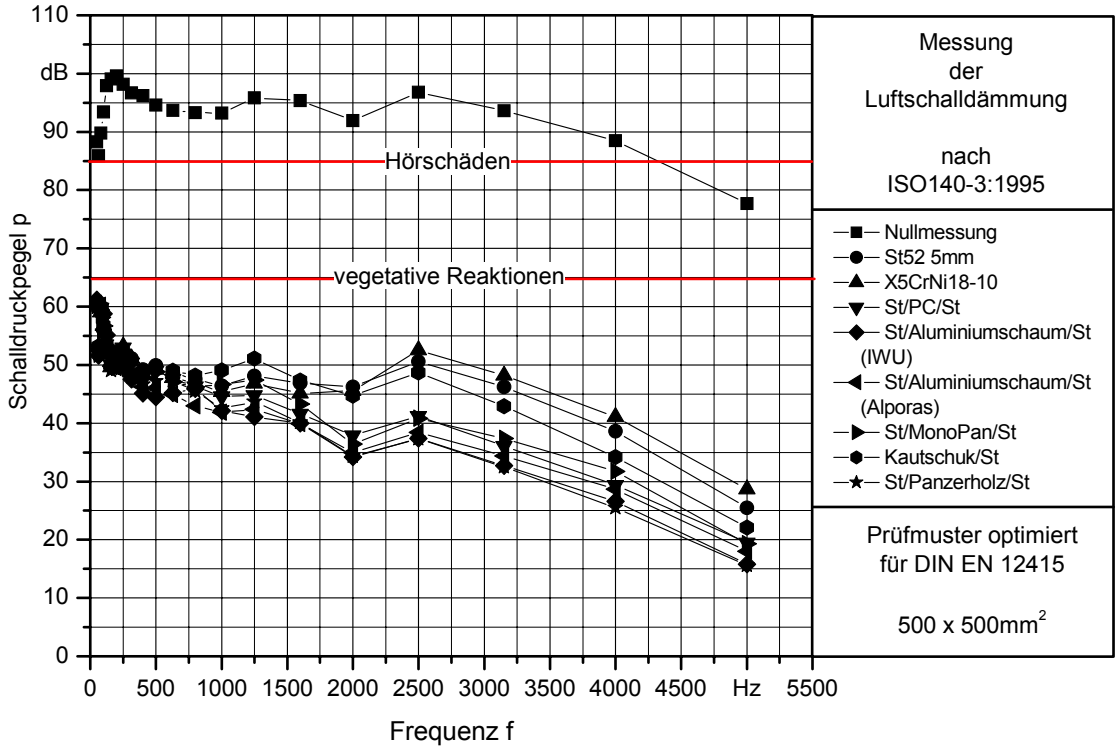


Bild 8-10: Luftschalldämmung für die nach DIN EN 12415 [N3] optimierten Prüfmuster

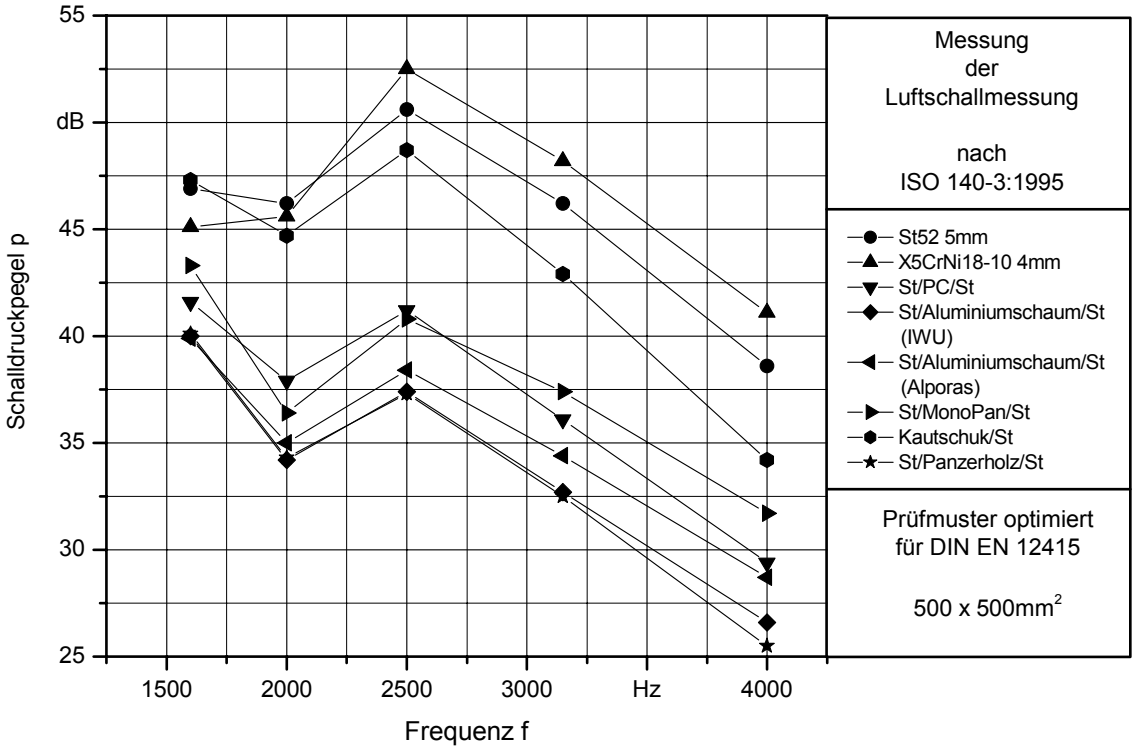


Bild 8-11: Darstellung des für Drehmaschinen relevanten Bereiches

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass das Luftschalldämmmaß R_W stark frequenzabhängig ist. Für den Vergleich der optimierten Prüfmuster ist jedoch eine Gesamtbewertung erforderlich. Eine qualifizierte Einzahlbewertung für die Luftschalldämmung ist in dem in DIN EN ISO 717-1 [N15], eingeführten bewerteten Luftschalldämmmaß R_W gegeben. In **Tabelle 8-5** ist das bewertete Luftschalldämmmaß R_W des Ausgangsmaterials St52 dem bewerteten Luftschalldämmmaß R_W der optimierten Prüfmuster gegenübergestellt.

Prüfmuster	**bewertetes Schalldämmmaß R_W der nach DIN EN 12417 optimierten Prüfmuster in [dB]**	**bewertetes Schalldämmmaß R_W der nach DIN EN 12415 optimierten Prüfmuster in [dB]**
Baustahl S355J2G3 (St52)	24,4	32,4
Aramidfaserverbund	34,0	-
Kunstharzpressholzsandwich	28,5	37,4
Kautschukverbund	33,7	32,4
Polycarbonatsandwich	37,1	36,0
Aluminiumschaumsandwich	40,3	38,5 (Alporas) / 38,7 (IWU)
MonoPansandwich	37,4	35,6
Edelstahl X5CrNi18-10	32,7	32,7

Tabelle 8-5: Bewertetes Schalldämmmaß R_W der optimierten Prüfmuster

In **Bild 8-12** und **Bild 8-13** sind die quantitativen Änderungen des bewerteten Luftschalldämmmaßes R_W grafisch dargestellt.

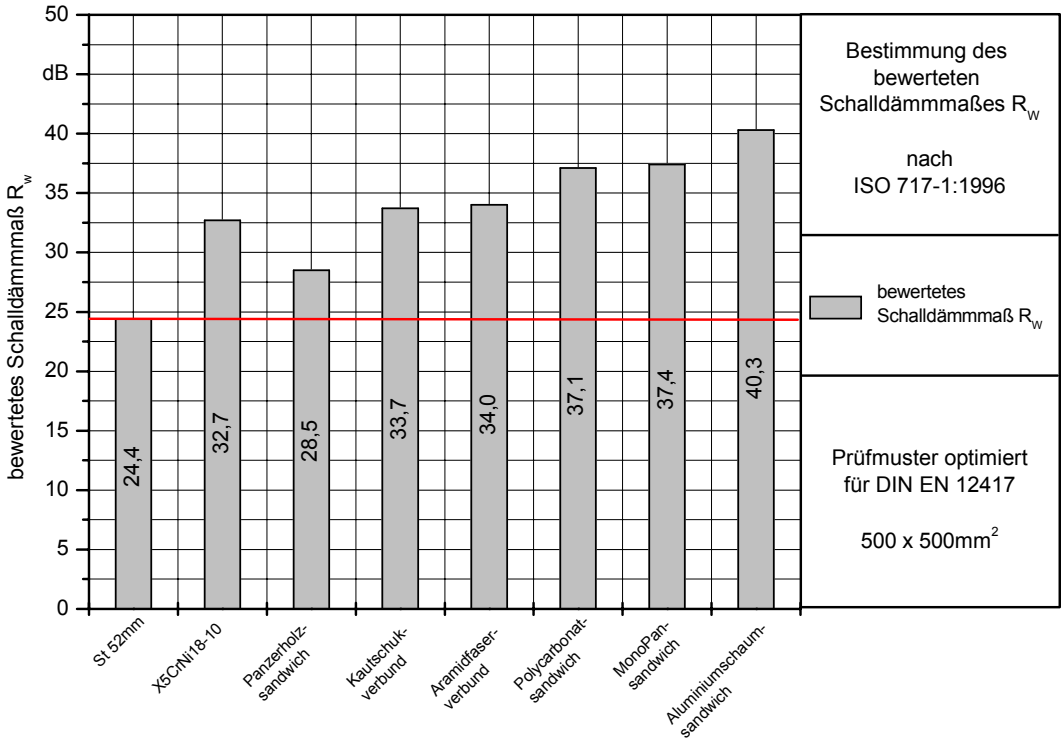


Bild 8-12: Bewertetes Schalldämmmaß R_W der nach DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmuster

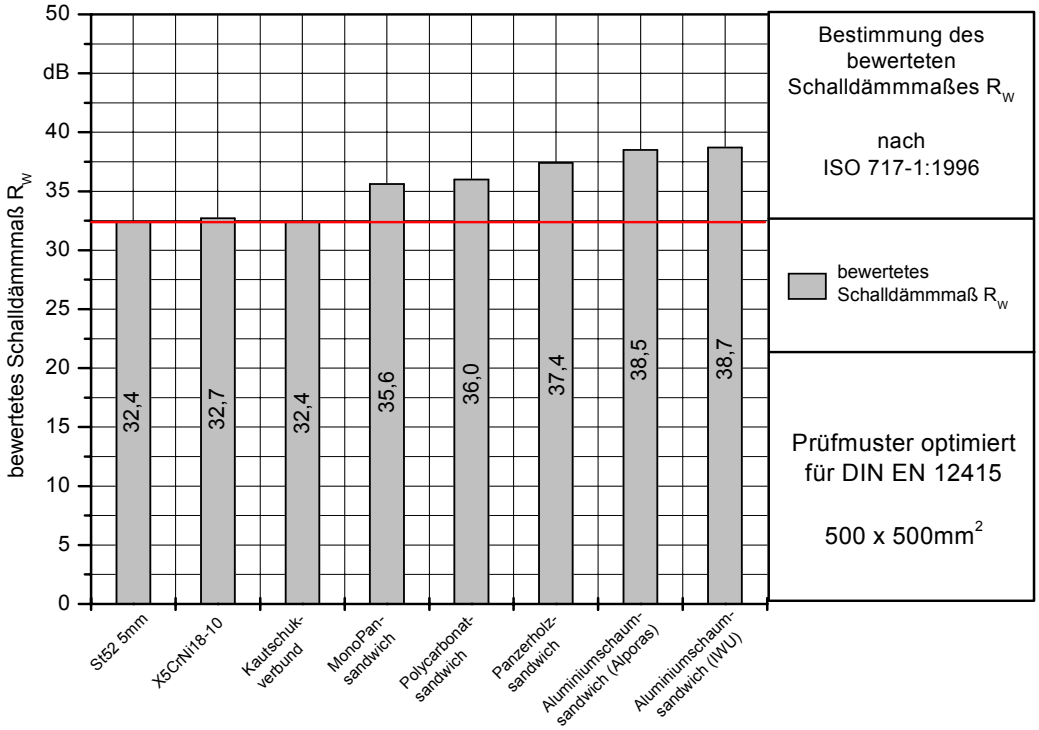


Bild 8-13: Bewertetes Schalldämmmaß R_W der nach DIN EN 12415 [N3] optimierten Prüfmuster

8.3.4 Einfluss der Werkstoffe bzw. der Prüfmusteraufbauten auf die Luftschalldämmung

Bei der Messung der Luftschalldämmung nach DIN EN ISO 140-3:1995 [N16] zeigen die Messkurven der optimierten Prüfmuster den erwarteten Verlauf. Sie variieren lediglich in der Höhe des Schalldruckpegels p. Die untersuchten Prüfmuster unterteilen sich in die folgenden Aufbauvarianten, **Tabelle 8-6**.

Aufbauvarianten	**Prüfmuster**
einschalig	▪ St 52 ▪ X5CrNi18-10
mehrschalig	▪ Kunstharzpressholzsandwich ▪ Polycarbonatsandwich
Poren und Resonanzabsorber	▪ Aluminiumschaumsandwich (IWU) ▪ Aluminiumschaumsandwich (Alporas) ▪ MonoPansandwich ▪ Kautschukverbund ▪ Aramidfaserverbund

Tabelle 8-6: Aufbauvarianten

Im Weiteren werden die schalldämmenden Wirkungsweisen erläutert und die Messergebnisse diskutiert.

Ein qualitatives Verständnis über die Luftschalldämmung von Wänden kann man durch Betrachtung der Schalldämmung an homogenen Platten gewinnen, die in **Bild 8-14** schematisch dargestellt ist:

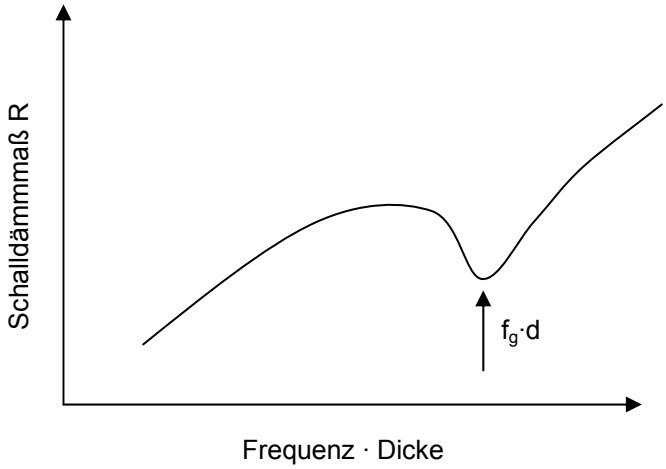


Bild 8-14: Schematische Darstellung des Luftschalldämmmaß über dem Produkt aus Frequenz und Dicke [29]

Dargestellt ist in Bild 8-2 das Luftschalldämmmaß als Funktion des Produktes aus Frequenz f und Dicke d der Platte, die ein Flächengewicht m“ aufweisen soll. Bei diesem Frequenzgang kann man drei Bereiche unterscheiden:

a) Bei tiefen Frequenzen beträgt R:

$$R = \left(20\lg\frac{\pi \cdot f \cdot m''}{\rho \cdot c} - 3 \right) dB \qquad \text{Formel 8-5}$$

Dabei bezeichnet $\rho \cdot c$ den Wellenwiderstand von Luft und f die Frequenz, so dass für die Größe von R bei tiefen Frequenzen ausschließlich die Flächendichte m“ entscheidend ist.

b) Mit zunehmender Frequenz tritt die Platte in Resonanz mit der anregenden Schwingung, so dass die Schalldämmung verschlechtert wird. Diese Resonanz tritt bei der Frequenz fg auf mit:

$$f_g = \left| \frac{c^2}{2 \cdot \pi} \right| \sqrt{\frac{m''}{B}} \approx \left(6{,}4 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{d} \cdot \sqrt{\frac{\rho_p}{E}} \right) Hz \qquad \text{Formel 8-6}$$

Dabei bezeichnet E den Elastizitätsmodul und ρ_p das spezifische Gewicht der Platte.

c) Oberhalb der Resonanzfrequenz wird die Platte nicht mehr wesentlich zu Schwingungen angeregt, so dass eine bessere Schalldämmung mit zunehmenden Frequenzen resultiert (ca. 25 dB / Dekade). Hier berechnet sich das Luftschalldämmmaß R zu:

$$R = \left(20\lg\frac{\pi \cdot f \cdot m''}{\rho \cdot c} - 10\lg\frac{1}{2 \cdot \eta}\sqrt{\frac{f_g}{f}} \right) dB \qquad \text{Formel 8-7}$$

Neben der Verbesserung der Schalldämmung durch eine Erhöhung der Masse kann auch eine Verbesserung durch mehrschalige Bauweise erreicht werden, **Bild 8-15**, in dem der Schall mehrere Impedanz-Sprünge passieren muss (mit entsprechenden Reflexions- und Absorptionsverlusten).

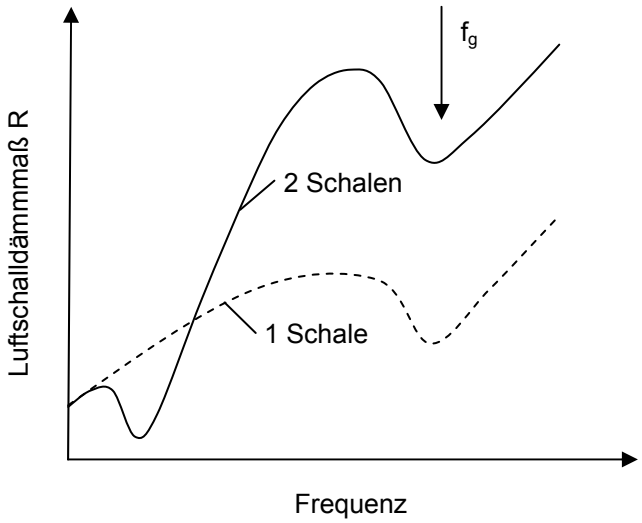


Bild 8-15: Prototyp (schematisch) einer doppelschaligen Bauweise [16]

Im Vergleich zur einschaligen Bauweise weist die zweischalige Bauweise bei tiefen Frequenzen eine Verschlechterung auf, weil eine Resonanz zwischen den Massen der Schalung und der dazwischen bei niedrigen Frequenzen als Feder wirkende Verbindung auftritt. Mit zunehmender Frequenz wird die Schalldämmwirkung jedoch höher [16].

Zusätzlich zur eben erläuterten Schalldämmung durch die Erhöhung der Masse oder den Einsatz mehrschaliger Aufbauten, kann der Schall auch durch den Einsatz von Absorbermaterialien gedämpft werden.

Bei der Beurteilung der Schallintensität werden also zwei Mechanismen unterschieden:

Luftschalldämmung einschaliger und mehrschaliger Bauteile

Bei der Luftschalldämmung einschaliger und mehrschaliger Bauteile wird die Schalldämmung verbessert, wenn die beiden wesentlichen Parameter, die Massenbelegung m“ und die Grenzfrequenz f_g, hohe Werte aufweisen. Bei homogenem Wandmaterial sind beide Forderungen nicht gleichzeitig erfüllbar. So ist bei einer dicken Wand zwar m“ groß, aber gleichzeitig f_g klein. Dieser Tendenz kann entgegengewirkt werden, indem Platten mit geringer Biegesteifigkeit und hohem Flächengewicht hergestellt werden.

Die unmittelbare Verdopplung der Dicke einer Wand und damit die Verdopplung ihrer Massenbelegung führt bei reiner Luftschalldämmung zu einer Erhöhung der Däm-

mung um 6 dB. Bei schweren Wänden bedeutet dies eine schlechte Ausnutzung des Materials. Kommt die Massenverdopplung durch Hinzufügen einer zweiten Wand gleicher Dicke zustande, so müsste sich eigentlich die Luftschalldämmung gegenüber der einfachen Wand verdoppeln. Dies ist auch der Fall, wenn beide Wände vollkommen entkoppelt aufgestellt werden. D. h. zwischen den Wänden darf keine Körperschallbrücke vorhanden sein und der Wandabstand muss im Verhältnis groß gegenüber der Wellenlänge des zu dämmenden Luftschalls sein. Solche Abstände betragen üblicherweise 6 cm bis 8 cm und sind deshalb nicht praktikabel [16].

Luftschalldämpfung an Poren und Resonanzabsorbern

Bei der Luftschalldämpfung an Poren oder Resonanzabsorbern erfolgt im Gegensatz zur freien Schallausbreitung die Umwandlung der Schallenergie in Wärme an den Grenzen des Schallfeldes. Hier sind es Reibungseffekte der hin- und herströmenden Luft, die besonders effizient sind, wenn die Begrenzung eine porige Struktur besitzt wie beispielsweise bei Vorhängen, Polsterungen, Textilien aller Art, Backsteinmauerwerk und Holzpaneelen. Zur gezielten Verstärkung dieses Effektes sind so genannte Schallschluckstoffe entwickelt worden. Dies sind hochporöse Stoffe, z. B. poröse Absorptionsmaterialien auf der Basis von künstlichen Mineralfasern wie Glaswolle, Stein- oder Schlackenwolle oder offenporige Schaumstoffe bzw. Metallschäume. Alle Stoffe besitzen offene Poren, die regellos verlaufen und miteinander in Verbindung stehen. Die auftreffenden Schallwellen dringen in die engen Poren des Schallschluckmaterials ein und lassen die Luft in diesen Poren hin- und herschwingen. Dadurch wird die so genannte Zähigkeitsreibung in engen Kanälen hervorgerufen [16].

8.3.5 Empfehlungen zur Umsetzung schalldämmender Maschinenumhausungen

Das Ziel der durchgeführten Schallmessungen war, das bewertete Luftschalldämmmaß R_W für die nach DIN EN 12415 [N3] und DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmusteraufbauten zu bestimmen.

Wie zu erwarten war, weisen die mehrschaligen Verbundaufbauten mit einer Absorberschicht als Zwischenlage die höchsten bewerteten Luftschalldämmmaße R_W auf.

An erster Stelle, sowohl im Bereich der Bearbeitungszentren als auch im Bereich der Drehmaschinen, liegt das Aluminiumschaumsandwich.

Aluminiumschaum erwies sich als sehr gut schallabsorbierend und vibrationsdämmend. Die Dämpfung hängt nur im geringen Maße von der Frequenz ab. Die Schallwelle dringt in den Schaum ein und wird innen durch die unregelmäßige Porenoberfläche reflektiert. Durch minimale Verformungen der Zellwände wird die Schwingungsenergie abgeleitet und in Wärme umgewandelt. Dadurch wird die Intensität des reflektierten Schalls gesenkt [73].

Im Vergleich zu anderen schallabsorbierenden Materialien hat perforierter Aluminiumschaum nahezu gleiche Eigenschaften und kann für einige Anwendungen eingesetzt werden, für welche die herkömmlichen Materialien zum Teil nicht geeignet sind, z. B. unter schwierigen Bedingungen (Feuchtigkeit, hohe Temperatur) oder in sterilen Räumen [72].

Bei Versuchen der Firma Mepura, Ranshofen, Österreich, an ALULIGHT-Proben, wurde festgestellt, dass die Schallabsorption umso höher war, je feiner die Porosität war und je mehr Poren miteinander verbunden waren [72].

Im Bereich der Drehmaschinen erzielte das Kunstharzpressholzsandwich aufgrund seines vielschichtigen Aufbaus und der damit verbundenen Impedanz-Sprünge sehr gute Werte.

Im Bereich der Bearbeitungszentren erzielte das MonoPansandwich ebenfalls sehr gute Werte.

Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis ist aufgrund zahlreicher Einflussmöglichkeiten nicht immer gegeben. Die Einflüsse, die die Schalldämmung negativ beeinflussen könnten sind z. B.:

- Undichtigkeiten,
- innere Inhomogenitäten,
- Dickenresonanzen der Wand.

9 Umsetzung der Ergebnisse

9.1 Einleitung

Für die erfolgreiche Umsetzung der Ergebnisse ist die ganzheitliche Betrachtung der Leichtbauthematik Voraussetzung. Bei den bisher durchgeführten Untersuchungen wurde deutlich gezeigt, dass keine Leichtbaulösung, welche für alle denkbaren Einsatzszenarien Anwendung finden kann, existiert. Vielmehr muss der Hersteller einer Werkzeugmaschine den gesamten Entwicklungsprozess, vom Stand der Technik, über die Gefährdungsanalyse, die möglichen Leichtbaulösungen sowie die Werkstoffauswahl bedenken. Begleitende Aufpralluntersuchungen aber auch schalltechnische Untersuchungen sollten im Bedarfsfall durchgeführt werden. Zum Einsatz wird die mögliche Leichtbaulösung allerdings nur kommen, wenn sie dem Hersteller auch unter wirtschaftlichen Aspekten Vorteile bringt. Ein Handlungsmodell welches die angesprochenen Punkte berücksichtigt ist in Kapitel 3 vorgestellt worden. Jeder Maschinenhersteller muss darüber hinaus für seinen individuellen Anwendungsfall die entscheidenden Auswahlkriterien so präzise wie möglich darstellen um am Ende des Entwicklungsprozesses eine optimale Leichtbaulösung zu erhalten. In Zusammenarbeit mit Vertretern der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie wurden sowohl eine Anforderungsliste als auch eine Auswahlliste exemplarische erstellt. Beide Listen dienen als Hilfsmittel für die Auswahl der optimalen Leichtbaulösung. Das erfolgreiche Bearbeiten der Listen ist allerdings nur mit dem nötigen Expertenwissens eines interdisziplinären Teams aus den Bereichen Entwicklung, Konstruktion, Buchhaltung und Vertrieb möglich. Eine Anleitung zum Umgang mit den Anforderungs- und Auswahllisten folgt in Kapitel 9.2.

Aufgrund der hohen Kosten der einzusetzenden neuen Materialien wurde als ein sinnvoller Anwendungsfall die Maschinentür identifiziert. Zum Einen befindet sich die Maschinentür in der Regel im primären Gefahrenbereich und muss deshalb höchsten Sicherheitsanforderungen standhalten und zum Anderen ließen sich durch eine Verringerung der Masse die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten der Maschinentür erhöhen und damit die unproduktiven Nebenzeiten reduzieren. Für die beispielhafte Umsetzung der Forschungsergebnisse wurden im Rahmen einer Umfrage die technischen Randbedingungen zur Bestimmung der Eingangsgrößen für die Entwicklung einer Hochgeschwindigkeitsmaschinentür abgefragt. Hierfür wurden 150 deutsche

Werkzeugmaschinenhersteller sowohl nach ihrem Istzustand als auch nach Ihren konkreten Forderungen und Wünschen befragt.
Im Anschluss an diese Befragung wurde in Zusammenarbeit mit der MAG Powertrain (Ex-Cell-O) das Bearbeitungszentrum XS 211 für die Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse ausgewählt. Als Prozess wurde die Fertigung von Getriebegehäusen in einem verketteten System von sechs Bearbeitungszentren ausgewählt. Zur Einleitung werden zunächst die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung erläutert. Im Anschluss daran werden die verschiedenen Verfahren wie das Investitionsrechenverfahren, die Kostenvergleichsrechnung und die Amortisationsrechnung auf ihre Anwendbarkeit untersucht. In einer abschließenden Zusammenfassung wird die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der Hochgeschwindigkeitsmaschinentür im konkreten Fall diskutiert und deren Probleme und Potenziale erläutert.

9.2 Auswertung und Einsatzempfehlungen

9.2.1 Auswertung der Auswahlkriterien

Zur vergleichenden Bewertung unterschiedlicher Eigenschaften, die in der Summe Einfluss auf die Gesamteigenschaft des „Neuen Materials“ haben, wurde ein in der Auswertepraxis übliches Hilfsmittel angewendet, bei dem alle ermittelten Eigenschaften in einer Matrix dargestellt und ausgewertet werden.

9.2.2 Erstellen der Anforderungsliste

Um Fehlentwicklungen zu vermeiden, wurde eine Anforderungsliste, in der Ziele und Bedingungen in Form von Forderungen und Wünschen enthalten sind, erarbeitet. Forderungen F sind Bedingungen, die unter allen Umständen erfüllt werden müssen, d. h. ohne deren Erfüllung die vorgesehene Lösung keinesfalls akzeptabel ist. Wenn die Möglichkeit besteht, durch einen begrenzten Mehraufwand einen entsprechenden Mehrwert zu schaffen, werden diese Möglichkeiten als Wünsche W formuliert.
Diese Unterscheidung und Kennzeichnung war auch wegen der späteren Beurteilung notwendig, da beim Auswählen nach der Erfüllung von Forderungen gefragt wird, während beim Bewerten nur Varianten in Betracht kommen, die die Forderung bereits erfüllen.
Ohne vorab eine Lösung festzulegen, wurden die Forderungen und Wünsche mit Quantitäts- und Qualitätsaspekten aufgestellt. Die Anforderungen wurden so weit als

möglich durch Zahlenangaben präzisiert, wo das nicht möglich ist, wurden verbale Aussagen möglichst klar formuliert [3]. Die aus der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie genannten Forderungen und Wünsche sind einer Anforderungsliste, **Bild 9-1** und **Bild 9-2** dargestellt.

IWF Berlin		**Anforderungsliste Neue Werkstoffe für den Maschinenschutz**	**Blatt: 1 Seite: 1**
Änderung	F W	Anforderungen	Verantwortung
		Materialbereitstellung	Projektpartner
		Durchdringungswiderstand	IWF Berlin
	F	für Bearbeitungszentren	
		W_D = 2000 Nm nach DIN EN 12417 [N4]	
	F	für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen	
		W_D = 8000 Nm nach DIN EN 12415 [N3]	
		Emulsionsbeständigkeit	
	W	Beständigkeit gegen handelsübliche Kühlschmierstoffe	
	F	Beständigkeit gegen handelsübliche Kühlschmierstoffe mit Randversiegelung	
		Mehrfachbeschuss	
		Sicherheit gegen Mehrfachbeschuss in Anlehnung an die DIN EN 1063 [N5]	
	F	kein Durchschuss	
	W	Prüfmuster wird nicht durchgezogen	
		Verarbeitungsmöglichkeit	
	F	Plattenherstellung möglich	
	W	3D-Formen möglich	
		Masse der Schutzwand	
		- für Bearbeitungszentren	
	F	m < 65 kg/m^2	
	W	m < 63 kg/m^2	
		für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen	
	F	m < 40 kg/m^2	
	W	m < 38 kg/m^2	
		Schallschutz	
		für Bearbeitungszentren	
	F	bewertetes Schalldämmmaß R_W > 25dB	
	W	bewertetes Schalldämmmaß R_W > 30dB	

Bild 9-1: Anforderungsliste an trennende Schutzeinrichtungen - Seite I

IWF Berlin		Anforderungsliste Neue Werkstoffe für den Maschinenschutz	Blatt: 1 Seite: 2
		für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen	
	F	bewertetes Schalldämmmaß RW>33dB	
	W	bewertetes Schalldämmmaß RW>35dB	
		Kosten	
		für Bearbeitungszentren	
	F	€/m² < 75	
	W	€/m² < 35	
		für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen	
	F	€/m² < 50	
	W	€/m² < 20	
		Umweltbilanz	
	F	Werkstoffrecycling	
	W	Bauteilrecycling	
		thermisches Verhalten	
	F	Beständigkeit bei herkömmlicher Bearbeitungs-temperatur	
	W	Beständigkeit bei 25°C über der herkömmlicher Bearbeitungstemperatur	
		Dicke	
		für Bearbeitungszentren	
	F	t < 30 mm	
	W	t < 8 mm	
		für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen	
	F	t < 30 mm	
	W	t < 5 mm	
		Spänebeständigkeit	
	F	Beständigkeit gegen Spänebeschuss bei der Bear-beitung herkömmlicher Werkstoffe	
	W	Beständigkeit gegen Spänebeschuss bei der Bear-beitung von Sonderlegierungen mit Ausbildung scharfkantiger Späne	
		Optik/Gestaltung	
	F	optisch ansprechende Oberflächen nur mit weite-ren Arbeitsgängen zu realisieren	
	W	optisch ansprechende Oberflächen ohne weitere Arbeitsgänge zu realisieren	
		Nachrüsteignung (Nachrüstungszeit)	
	F	Standzeit unter zwei Arbeitstagen	
	W	Standzeit unter fünf Arbeitstagen	

Bild 9-2: Anforderungsliste an trennende Schutzeinrichtungen - Seite II

9.2.3 Erstellen der Auswahlliste

Die große, theoretisch denkbare, aber praktisch nicht verarbeitbare Zahl von oft nicht tragbaren Lösungen muss so früh wie möglich eingeschränkt werden. Andererseits ist darauf zu achten, dass geeignete Wirkprinzipien nicht entfallen, weil oft erst in der Kombination mit anderen eine vorteilhafte Wirkstruktur sichtbar wird. Ein sicheres Verfahren zur Vermeidung von Fehlentscheidungen gibt es nicht; aber mit Hilfe eines geordneten und nachprüfbaren Auswahlverfahrens wurde die Auswahl aus einer Fülle von Lösungsvorschlägen stark vereinfacht. Unterschieden wurden die Auswahlverfahren nach ihren Anwendungsfällen. **Bild 9-3** zeigt die Auswahlliste für Bearbeitungszentren, **Bild 9-4** die Auswahlliste für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren.

Das Auswahlverfahren ist durch die beiden Tätigkeiten Ausscheiden und Bevorzugen gekennzeichnet. Die ungeeigneten Lösungen scheiden nach der beschriebenen Reihenfolge nach den genannten Kriterien aus. Die Kriterien Durchdringungswiderstand, Emulsionsbeständigkeit, Mehrfachbeschuss und Verarbeitungsmöglichkeit unterliegen einer Ja-Nein-Entscheidung und führen bei Nichterfüllung zum sofortigen Ausschluss. Zu den übrigen Kriterien ist eine mehr quantitativ angelegte Untersuchung nötig [89].

Für die Bestimmung der quantitativen Größen wurde das IWF wiederum durch einen Industriearbeitskreis aus Vertretern der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie unterstützt. Bei der Diskussion der zu beurteilenden Kriterien stellte sich heraus, dass sowohl die Kriterien als auch deren Wichtung von den Herstellern der Bearbeitungszentren und den Herstellern der Drehmaschinen identisch eingeschätzt wurden.

Aufgrund der Vielzahl der zu untersuchenden Kriterien wurden zusätzliche Lösungsvarianten definiert. Durch die Erweiterung um die Lösungsvarianten „Verschlechterung und deutliche Verbesserung“ wurde sichergestellt, dass Varianten nicht zu früh aus dem Entscheidungsprozess ausschieden. Somit fielen Varianten die bei der Beurteilung eines Kriteriums zu einer Verschlechterung geführt haben nicht sofort aus dem Entscheidungsprozess, sondern konnten durch deutliche Verbesserungen in anderen Kriterien wieder Punkte gutmachen.

Da das Thema „Leichtbau im Maschinenschutz“ im Rahmen dieser Arbeit zum ersten Mal behandelt wird, wurde ein möglichst breiter Ansatz gewählt, der es erlaubt eine Vielzahl von Werkstoffen und deren Kombinationen dem kompletten Prüf- und Beurteilungsszenario zu unterziehen.

Neue Werkstoffe für den Maschinenschutz

- Bearbeitungszentren -

Aufprallprüfung nach DIN EN 12417

Prüfparamter:

Projektil:
100 g-Normprojektil

Prüfgeschwindigkeit:
v = 200 m/s

Lösungsvarianten (Lv) nach Anforderungsliste beurteilen:

(0) Anforderung nicht erfüllt
(1) Verschlechterung
(2) Anforderung erfüllt
(3) Verbesserung
(4) deutliche Verbesserung

Entscheiden

Lösungsvarianten (Lv) kennzeichnen:
(+) Lösung weiter verfolgen
(-) Lösung scheidet aus
(?) Informationen beschaffen Lösung erneut beurteilen
(!) Anforderungsliste auf Änderung überprüfen

	Durchdringungswiderstand	Emulsionsbeständigkeit	Mehrfachbeschuss	Verarbeitungsmöglichkeit	Massenreduktion	Schallschutz	Kostenreduktion	Umweltbilanz	thermisches Verhalten	Dickenreduktion	Spänebeständigkeit	Optik/Gestaltung	Nachrüsteignung		
Wichtung	**3**	**3**	**3**	**3**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**Bemerkungen (Hinweise)**	**Entscheidung**
Monopanverbund	2	2	1	1	4	3	1	2	2	0	2	2	1	**47**	-
Mineralgusssandwich	2	2	0	0	1	0	0	3	2	0	2	2	0	**23**	-
Aramidfaserverbund	2	2	2	4	4	3	0	2	2	3	1	3	4	**59**	+
Panzerholzsandwich	2	2	2	2	1	3	0	0	2	1	2	3	1	**42**	-
Keramikverbund	2	2												Versuchsreihe abgebrochen	-
Kautschukverbund	2	1	1	3	1	2	0	0	1	1	1	3	3	**45**	-
Plycarbonatsandwich	2	2	1	1	4	3	0	0	2	1	2	2	1	**47**	-
Beulblechverbund	0													Versuchsreihe abgebrochen	-
Aluminiumschaumsandwich	2	2	1	1	3	3	0	0	2	1	2	2	1	**43**	-
Stähle:															
S235JR (St37-2)	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	**48**	+
S335J2G3 (St52-3)	0													Aufbau nicht sinnvoll	-
S700MC	0													Aufbau nicht sinnvoll	-
30CrMo5-2	0													Aufbau nicht sinnvoll	-
X5CrNi18-10	2	2	2	3	4	2	0	0	2	3	2	4	3	**61**	?

Bild 9-3: Auswahlliste für Bearbeitungszentren

Neue Werkstoffe für den Maschinenschutz

- kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren -

Aufprallprüfung C3 nach DIN EN 12415

Prüfparamter:

Projektil:
2,5 kg-Normprojektil

Prüfgeschwindigkeit:
v = 80 m/s

Lösungsvarianten (Lv) nach Anforderungsliste beurteilen:

(0) Anforderung nicht erfüllt
(1) Verschlechterung
(2) Anforderung erfüllt
(3) Verbesserung
(4) deutliche Verbesserung

Entscheiden

Lösungsvarianten (Lv) kennzeichnen:
(+) Lösung weiter verfolgen
(-) Lösung scheidet aus
(?) Informationen beschaffen Lösung erneut beurteilen
(!) Anforderungsliste auf Änderung überprüfen

Durchdringungswiderstand
Emulsionsbeständigkeit
Mehrfachbeschuss
Verarbeitungsmöglichkeit
Massenreduktion
Schallschutz
Kostenreduktion
Umweltbilanz
thermisches Verhalten
Dickenreduktion
Spänebeständigkeit
Optik/Gestaltung
Nachrüsteignung

Entscheidung

Wichtung	**3**	**3**	**3**	**3**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**Bemerkungen (Hinweise)**
Monopanverbund	2	2	1	1	4	3	0	0	2	0	2	2	1	**39**
Mineralgusssandwich	2	2	0	0	1	0	0	0	2	0	2	2	0	**20**
Aramidfaserverbund	0													Versuchsreihe abgebrochen
Panzerholzsandwich	2	2	2	2	1	3	0	0	2	1	2	3	1	**41**
Keramikverbund	2	2												Versuchsreihe abgebrochen
Kautschukverbund	2	1	1	3	1	2	0	0	1	1	1	3	3	**36**
Plycarbonatsandwich	2	2	1	1	4	3	0	0	2	1	2	2	1	**40**
Beulblechverbund	0													Versuchsreihe abgebrochen
Aluminiumschaumsandwich	2	2	1	1	3	3	0	0	2	1	2	2	1	**38**
Stähle:														
S235JR (St37-2)	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	**42**
S335J2G3 (St52-3)	0													Aufbau nicht sinnvoll
S700MC	0													Aufbau nicht sinnvoll
30CrMo5-2	0													Aufbau nicht sinnvoll
X5CrNi18-10	2	2	2	3	4	2	0	0	2	3	2	4	3	**53**

Bild 9-4: Auswahlliste für kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Dreh zentren

9.2.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Auswahlliste zeigen deutlich, dass viele der ausgewählten Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde für die in der Anforderungsliste gestellten Ziele und Bedingungen geeignet sind.

Ausnahmen bildeten der Keramikverbund, der Beulblechverbund sowie die Hochleistungsstähle S355J2G3, S700MC, 30CrMo5-2. Im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren konnte der Aramidfaserverbund die Anforderungen ebenfalls nicht voll erfüllen. Der Verbund wurde bei der Durchführung der Normaufprallprüfung zwar nicht durchschossen, jedoch wurde er vollständig durch den Auflagerahmen der Wandmusteraufnahme durchgezogen.

Bearbeitungszentren

Im Bereich der Bearbeitungszentren stellen der Aramidfaserverbund sowie der Edelstahl X5CrNi18-10 die optimalen Lösungen dar. Besonders in den Bereichen Massenreduktion und Dickenreduktion ließen sich bei beiden Werkstoffen bzw. Werkstoffverbünden deutliche Verbesserungen erzielen. Des Weiteren überzeugt der Aramidfaserverbund durch seine hervorragenden Verarbeitungsmöglichkeiten und seine gute Eignung zur Nachrüstung von Produktionsmaschinen. Der Edelstahl X5CrNi18-10 besitzt weiterhin sehr gute Oberflächeneigenschaften und ist korrosionsbeständig. In vertiefenden Untersuchungen konnten die sehr guten Ergebnisse des Materials X5CrNi18-10 aus vorhergehenden Studien leider nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse verschiedener Studien bzw. auch die Ergebnisse verschiedener Einzelbleche liegen innerhalb der vorliegenden Untersuchung sehr weit auseinander. Die auftretenden Streuungen sind sehr stark und offensichtlich auf die Chargenzugehörigkeit zurückzuführen.

Aus diesem Grund kann eine Verwendung von X5CrNi18-10 im Maschinenschutz aufgrund der hier erzielten Ergebnisse beim heutigen Stand der Erkenntnisse nicht empfohlen werden. Ergebnisse von Prüfungen zum Einsatz von X5CrNi18-10 als trennende Schutzeinrichtungen können nicht über die untersuchte Charge hinaus verallgemeinert werden. Für eine sichere Verwendung ist es nötig, alle nötigen Prüfungen erfolgreich an Blechen der zu verwendenden Charge durchzuführen.

Drehmaschinen und Drehzentren

Im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren stellen der monolithische Aluminiumaufbau sowie der Edelstahl X5CrNi18-10 die optimalen Lösungen dar. Der Edelstahl X5CrNi18-10 überzeugt in diesem Bereich ebenfalls durch die gleichen guten Eigenschaften wie im Bereich der Bearbeitungszentren allerdings müssen auch hier die entsprechenden Untersuchungen zur Bestimmung des tatsächlichen Durchdringungswiderstandes im Vorfeld durchgeführt werden. Großes Potenzial besitzt auch hier der Aramidfaserverbund. Dieser Verbund konnte zwar die Aufprallprüfung nach DIN EN 12415 [N3] nicht bestehen, da er durch die Wandmusteraufnahme durchgezogen wurde, jedoch gelang es nicht den Verbund zu Durchdringen. Aus Sicht der Arbeitssicherheit und des Maschinenschutzes müsste an dieser Stelle eine Gefahrenanalyse durchgeführt und die Beschusssicherheit durch eine Baumusterprüfung sichergestellt werden.

9.3 Umsetzungsmöglichkeiten für die Praxis

9.3.1 Potenzial und Nachfrage

Viele der untersuchten Werkstoffe zeigen ein großes Potenzial, die erhöhten Anforderungen der HVM-Bearbeitung erfüllen zu können. Für den direkten Einsatz neuer Werkstoffe in der Praxis sind Vorüberlegungen notwendig. Eine gesamte Maschinenumhausung aus Leichtbauwerkstoffen herzustellen erscheint nach aktuellen Entwicklungen in der Fertigung durchaus sinnvoll, ist jedoch aufgrund der hohen Fertigungskosten nur durch eine Reduzierung der Nebenzeiten zu rechtfertigen. Um den Einsatz der kostenintensiven Leichtbauwerkstoffe zu realisieren bedarf es weiterer Forschungsprojekte um belastungsgerechte und gleichzeitig wirtschaftliche Lösungen zu finden.

Der Bereich der Maschinentüren bietet einen konkreten Ansatz, da durch eine leichtere Bauweise, eine Verkürzung des Öffnungs- und Schließintervalls und damit eine Verkürzung der Taktzeit erzielt werden kann. Damit würden neben konstanten bzw. erhöhten Sicherheitskennwerten auch direkte wirtschaftliche Vorteile einer gesteigerten Produktivität genutzt. Des Weiteren könnten sich mögliche Folgeeffekte in Form von kleineren Antriebsmotoren oder einem geringeren Raumbedarf ergeben.

Das IWF der TU Berlin hat daher eine Umfrage durchgeführt, die Auskunft über das Interesse der Maschinenbauindustrie an einer Leichtbautür geben sollte. Im allgemeinen Teil des Fragebogens wurden dabei Angaben zu:

- dem generellen Bedarf bzw. Interesse an einer Leichtbautür,
- der Türart und -geometrie,
- den Öffnungs- und Schließzeiten (aktuell und zukünftig) sowie
- dem Einsatzbereich erfragt.

Im weiteren Verlauf sollten ergänzende technische (Spannungsvarianten, Schutzart, etc.) und wirtschaftliche Daten (Preisvorstellung, Bedarf, etc.) angeführt werden. Der komplette Fragebogen ist in Anhang C, Kapitel 10 dargestellt.

Im Rahmen der Umfrage wurden ca. 150 deutsche Maschinenbaufirmen kontaktiert, von denen innerhalb von wenigen Wochen 29 geantwortet haben. Dies entspricht einer Rücklaufquote von ca. 20 Prozent.

Aus der Auswertung der Fragebögen lässt sich ein deutliches Interesse an einer „schnellen“ Leichtbautür erkennen, **Bild 9-5**.

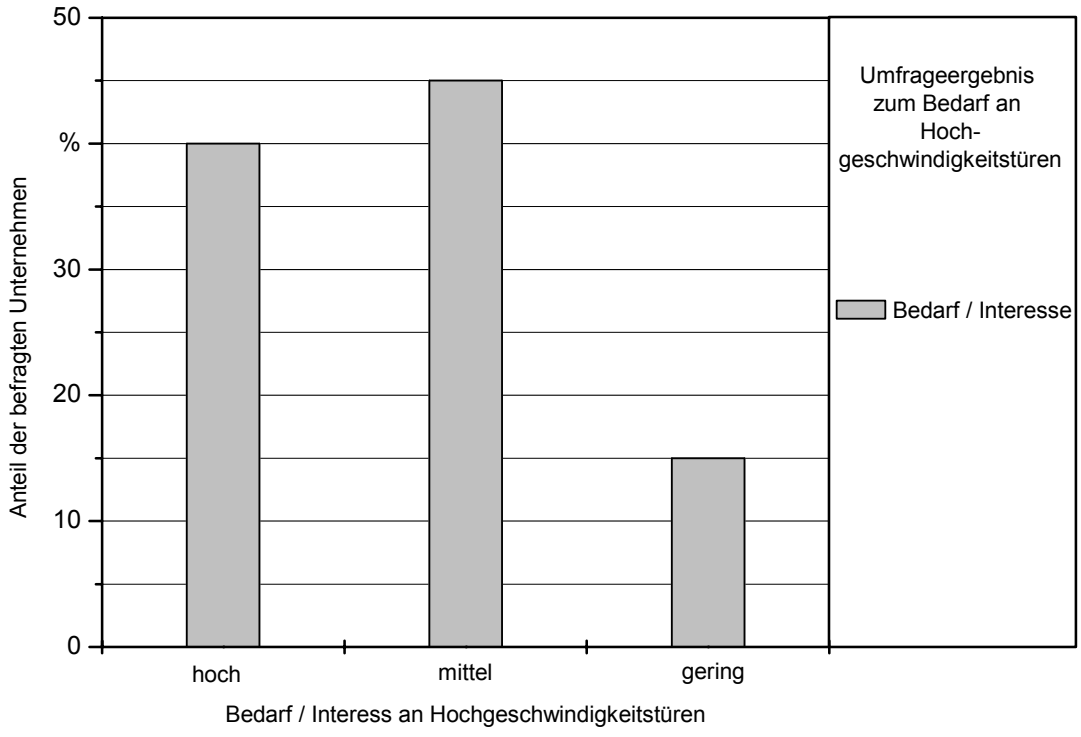


Bild 9-5: Bedarf / Interesse an schnellen Türen

Von den befragten Unternehmen bescheinigten 40 % ein hohes Interesse, wodurch das hohe Potenzial bestätigt wurde. Hinsichtlich der Umsetzbarkeit müssen jedoch die jeweiligen Einsatzfälle betrachtet werden. Speziell die Angaben für den jährlichen

Bedarf an Türen (2 bis 200) sowie die Preisvorstellungen (zwischen 500 € und 4500 €) der Hersteller lagen noch sehr weit auseinander und lassen daher keine generelle Aussage bezüglich eines sinnvollen Einsatzes zu.
Um die Praxistauglichkeit an einem konkreten Beispiel zu ermitteln, soll im Verlauf dieses Kapitels der Einsatz einer Leichtbaumaschinentür für ein Bearbeitungszentrum vorgestellt und anhand eines Fertigungsbeispiels hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit überprüft werden.

9.3.2 Praxisbeispiel Maschinentür

Das Bearbeitungszentrum XS 211, **Bild 9-6**, des Herstellers Ex-Cell-O GmbH, Firma der MAG Powertrain, stellt ein modernes Fertigungskonzept aus der Serie der High Performance Bearbeitungszentren des Maschinenherstellers dar. Die Maschine kann für die Bearbeitung von Aluminium, Stahl oder Grauguss eingesetzt werden und bietet die Möglichkeit durch einen modularen Aufbau an individuelle Kundenwünsche angepasst zu werden.

Bild 9-6: Bearbeitungszentrum XS 211 [34]

Die Maschine zeichnet sich außerdem durch eine kompakte Bauweise, eine gute Zugänglichkeit sowie verschiedene Automationsschnittstellen, beispielsweise die Möglichkeit der Front- oder Dachbeladung aus, die eine Integration in bestehende Fertigungssysteme zulassen. Bei der Frontbeladung wird die in Bild 9-6 verdeutlichte schmale Bauweise durch eine vertikale Türöffnung unterstützt.
Zu den Automatisierungsmöglichkeiten zählen eine Frontbeladung vom Band, eine Portalbeladung sowie eine flexible Zellenbeladung über (schienengeführte) Roboter. Für die weiteren Betrachtungen soll ein Transfersystem mit einer Frontbeladung vom Band als Grundlage verwendet werden [75].

Die Gesamtleistung der Maschine ist mit 50 kW angegeben.

Vergleich der Lösungen für die Maschinentür

Die Firma Ex-Cell-O bietet für eine Frontbeladung des Bearbeitungszentrums XS 211 aktuell zwei unterschiedliche Hubtüren abhängig von der Beladeart an. Es gibt die Möglichkeiten, die Maschine entweder automatisch über eine Beladeeinrichtung (z. B. einen Roboter) oder von Hand zu bestücken. Die Tür für die Automatikbeladung besitzt eine relativ schlichte Ausführung, während bei der manuellen Beladevariante ein Sicherheitssystem inklusive Sicherheitsklemmung und einem Laserscanner integriert ist, um den Bediener vor Unfällen zu schützen. Neben diesen detaillierten Informationen wurden Angaben zu den Gesamtkosten der Türen beim Hersteller erfragt, die in **Tabelle 9-1** aufgeführt sind.

Für die Leichtbautür werden Angaben aus einer Kalkulation der Firma NICO GmbH Maschinen & Anlagen Konstruktion Berlin mit ihren Projektpartnern Langer & Laumann Ing. Büro GmbH Nordwalde sowie dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin entnommen. Die kalkulierte Leichtbautür soll nach ersten Annahmen zwischen 6000 € und 8000 € kosten. Darin wäre ebenfalls eine Sicherheitseinrichtung enthalten, deren Kostenanteil jedoch nicht beziffert werden kann.

In Tabelle 9-1 ist eine Übersicht über verschiedene Daten der unterschiedlichen Türen zusammengestellt. Wie bereits oben erwähnt, stammen die Kostenangaben direkt vom Hersteller, während die weiteren Informationen aus dem schriftlichen Angebot bzw. dem beantworteten Fragebogen der IWF-Studie, Anhang D Kapitel 10, hervorgehen. Da für Lebensdauer und Wartung der Leichtbautür keine konkreten Werte vorliegen, wurden diese von den anderen Türen übernommen.

	Türart		
	Beladung von Hand	**Automatikbeladung**	**Leichtbau**
Lebensdauer	5 Jahre (2 Schichten)	5 Jahre (2 Schichten)	5 Jahre (2 Schichten)
Türöffnungs- bzw. Schließzeit	2 Sekunden	2 Sekunden	1,5 Sekunden
Wartungsintervall	max. 30 Minuten/a	max. 30 Minuten/a	max. 30 Minuten/a
Schutzart	IP 67	IP 67	IP 67
Sicherheitssystem	integriert, Kosten ca. 2200 €	-	Integriert
Gesamtkosten	ca. 4000 €	ca. 1500 €	6000 – 8000 €

Tabelle 9-1: Türdaten [Anhang C, Kapitel 10]]

Der Vorteil der Leichtbautür im Vergleich zu den herkömmlich verwendeten Türen ist die verringerte Öffnungs- bzw. Schließzeit von jeweils 1,5 Sekunden im Gegensatz zu 2 Sekunden. Dies entspricht einer Verringerung von 25 %. Der Verringerung der Nebenzeiten stehen die deutlich höheren Anschaffungskosten gegenüber, die sich hauptsächlich aus den verwendeten teuren Leichtbauwerkstoffen sowie der vorerst geringen Stückzahl (Kosten wurden kalkuliert für 100 Stück) ergeben.

Fertigungssystem für Getriebegehäuse

Im Rahmen eines Großprojekts wurden im Jahr 2004 / 2005 insgesamt 58 Bearbeitungszentren des Typs XS 211 ausgeliefert, um vor Ort die Fertigung verschiedener Bauteile zu gewährleisten. Die Fertigung wird mit Hilfe von vollautomatisierten verketteten Fertigungssystemen gewährleistet. Neben anderen Getriebeteilen werden dort auch Getriebegehäuse gefertigt. Die dafür eingesetzten Fertigungssysteme bestehen aus jeweils sechs Bearbeitungszentren, die durch ein vollautomatisches Fördersystem über die Frontseite vom Band be- und entladen werden [37]. Eine dafür verwendete Schwenkvorrichtung ist in **Bild 9-7** dargestellt.

Bild 9-7: Schwenkvorrichtung zur Be- und Entladung eines Bearbeitungszentrums [75]

Aus dem Förderkonzept geht hervor, dass die Bearbeitungszentren mit einer Automatiktür ausgestattet sind. Die Taktzeit der Fertigung beträgt 198 Sekunden. Diese Angabe bedeutet, dass alle 198 Sekunden ein fertiges Getriebegehäuse dem Fertigungssystem entnommen wird.

In **Tabelle 9-2** ist eine Berechnung der maximal möglichen Produktionsmenge bei der Serienfertigung des Getriebegehäuses dargestellt. Ergänzt wird dies durch einen Vergleich mit der möglichen Mehrproduktion durch Verwendung der Leichtbautür.

Neben Daten aus Tabelle 12-10 wurden Annahmen für die Arbeitstage sowie die Arbeitsstunden pro Schicht getroffen.

Aus Fragebogen entnommenen Daten	
Arbeitstage pro Jahr	220
Schichten pro Tag	2
Arbeitstunden pro Schicht	8 h
Maximale Fertigungszeit pro Jahr	12.672.000 s
Abzüglich 30 min. Wartungszeit pro Jahr	12.670.200 s
Taktzeit (alte Tür)	198 s
Maximal zu produzierende Stückzahl (alte Tür)	63.991
Taktzeit (Leichtbautür)	197 s
Maximal zu produzierende Stückzahl (Leichtbautür)	64.316
Differenz	325 (entspricht +0,51%)

Tabelle 9-2: Berechnung der Produktionsmengen

Aus der Berechnung ist zu entnehmen, dass bei der relativ langen Taktzeit von 198 Sekunden nur eine geringe Produktionserhöhung von einem halben Prozent durch die Verringerung der Öffnungs- bzw. Schließzeit bei dem Einsatz einer Leichtbautür zu erreichen ist.

9.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

9.4.1 Allgemeine Grundlagen zur Wirtschaftlichkeitsrechnung

Im Folgenden wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Anwendung einer Leichtbautür im Bearbeitungszentrum XS 211 anhand des Fertigungsbeispiels Getriebegehäuse erstellt. Zur allgemeinen Verständlichkeit wird zunächst eine kurze Einführung in die Thematik gegeben, indem ein paar grundlegende Begriffe erläutert werden.
Unter dem Begriff Wirtschaftlichkeitsrechnungen werden Methoden verstanden, bei denen aufgrund bestimmter Wirtschaftlichkeitskriterien einzelne Bereiche des Betriebes im Zeitablauf, im Vergleich zu Vorgabewerten oder zu anderen Betrieben untersucht und miteinander verglichen werden [127]. Eine Teilanwendung stellt die Investitionsrechnung dar. Mit den darin enthaltenden Rechenverfahren soll eine Investitionsentscheidung vorbereitet werden, indem unterschiedliche Alternativen hinsichtlich ihrer Vorteilhaftigkeit für den Betrieb geprüft werden [26]. Im Rahmen der Entscheidungsfindung spielen neben den quantitativen Kennzahlen aus den Investitionsrechenverfahren jedoch oft auch qualitative Aspekte, wie Arbeitssicherheit, Umwelt-

schutz oder Ästhetik eine wichtige Rolle, die jedoch nicht unbedingt eindeutig erfassbar sind [127]. Im Verlauf dieser Arbeit sollen hingegen die quantitativen Kennzahlen im Mittelpunkt stehen. Des Weiteren werden Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung als synonym verwendet.

Der Begriff Wirtschaftlichkeit besitzt zwei unterschiedliche Ausprägungen. Absolute Wirtschaftlichkeit kennzeichnet ein Übersteigen der Erträge über die Aufwendungen. Ein Unternehmen hat damit als Basisziel die absolute Wirtschaftlichkeit, um seinen Fortbestand zu sichern. Im Gegensatz dazu ist relative Wirtschaftlichkeit lediglich ein Vergleich zweier Alternativen bei konstanten Kosten oder Erträgen [127, 64]. Die relative Wirtschaftlichkeit einer Alternative gegenüber einer anderen setzt jedoch nicht zwingend die absolute Wirtschaftlichkeit von beiden voraus.

Die Basis einer Wirtschaftlichkeitsrechnung (Investitionsrechnung) bildet die Investition. Allgemein gesehen stellt eine Investition eine zielgerichtete, in der Regel langfristige Kapitalbindung zur Erwirtschaftung zukünftiger Erträge dar [26]. Konkreter lässt sich dies auch durch eine Überführung von Zahlungsmitteln in Sach- oder Finanzvermögen ausdrücken [127]. Eine Investition ist dadurch gekennzeichnet, dass sie stets mit einer Auszahlung in Erwartung zukünftiger Netto-Einnahmen beginnt und daher langfristige Folgewirkungen besitzt [6]. Eine Unterteilung von Investitionen kann hinsichtlich des Investitionsobjekts, des Investitionszwecks oder des Investitionsbereichs geschehen, **Bild 9-8**.

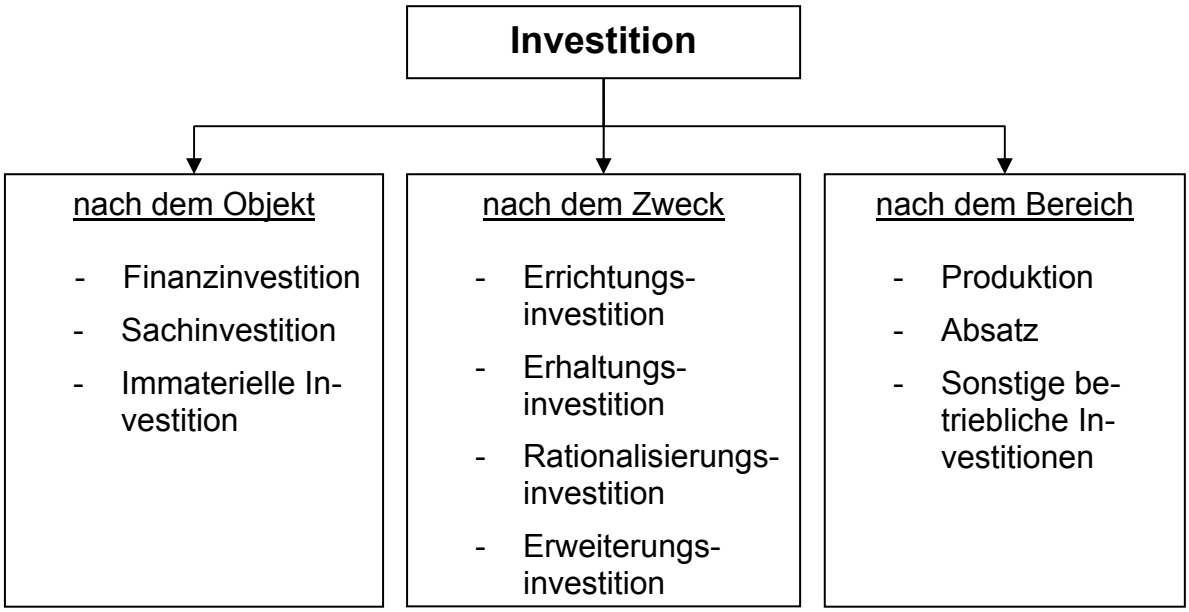


Bild 9-8: Einteilung von Investitionen [64]

Die Investition in eine Leichtbautür stellt nach Bild 9-8 eine Sachinvestition im Bereich der Produktion dar. Dabei kann es sich um eine Errichtungs-, Erhaltungs-, Rationalisierungs- oder Erweiterungsinvestition handeln.
Eine Errichtungsinvestition bezeichnet eine Gründungs- oder Anfangsinvestition, die im Rahmen des Aufbaus eines Unternehmens getätigt wird. Im Gegensatz dazu stellen die drei anderen Arten laufende Investitionen dar. Erhaltungs- oder Ersatzinvestitionen bezeichnen den Austausch veralteter oder zerstörter Betriebsmittel, ohne eine Änderung der Kapazität, der Produktqualität oder eine Form von Rationalisierung vorzunehmen. Rationalisierungsmaßnahmen zielen dagegen auf eine wirtschaftlichere Fertigung ab, während Erweiterungsinvestitionen hauptsächlich der Kapazitätserhöhung dienen. In der Praxis lassen sich die Grenzen der drei laufenden Investitionsarten nicht immer erkennen, da es sich oft um eine Kombination aus zwei oder sogar allen drei Arten handelt [127]. Der Einsatz einer Leichtbautür ist als Kombination aus Rationalisierungs- sowie Erweiterungsinvestition anzusehen, da sowohl eine Verkürzung der Taktzeit (wirtschaftlichere Produktion) als auch eine sich daraus ergebende Kapazitätserhöhung angestrebt wird.

9.4.2 Investitionsrechenverfahren

Die Rechenverfahren zur Beurteilung von Investitionen gliedern sich in zwei Hauptgruppen: die statischen und die dynamischen Verfahren. Eine Übersicht über die gängigen Verfahren bietet **Bild 9-9**.

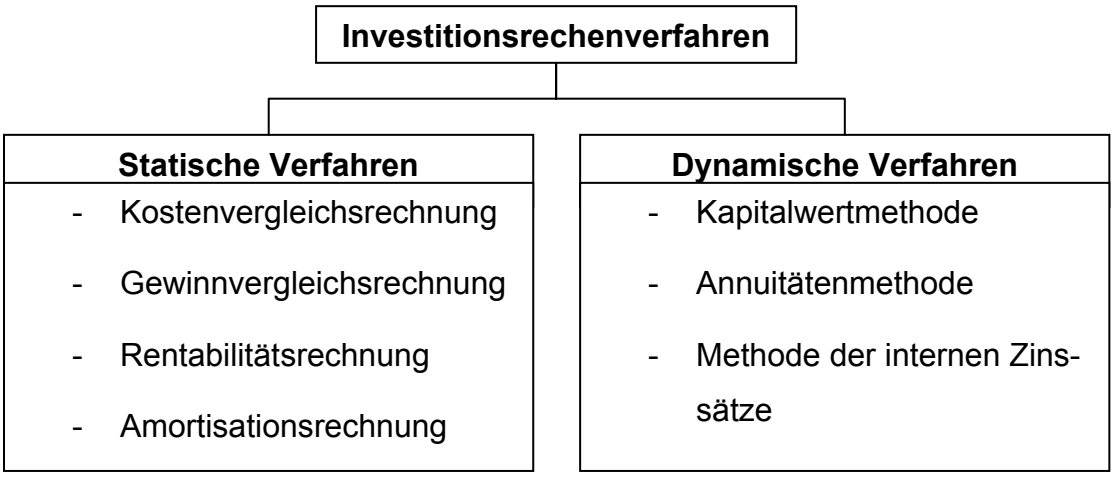


Bild 9-9: Investitionsrechenverfahren [6, 53]

Der Unterschied zwischen beiden Verfahrensarten besteht darin, dass bei den dynamischen Verfahren die zeitliche Struktur beim Anfall von Kosten und Erträgen

wertmäßig durch auf- bzw. abzinsen berücksichtigt wird. Frühere Erträge werden damit höher bewertet als Erträge in späteren Perioden und somit wird das natürliche Interesse eines Investors an „schnellen“ Gewinnen in die Beurteilung miteinbezogen [127, 6, 53].

Statische Verfahren hingegen arbeiten mit durchschnittlichen Erfolgsgrößen und gehen somit von konstanten Werten aus. Daraus ergeben sich die Vorteile, dass die statischen Verfahren einen geringen mathematischen Aufwand erfordern und relativ unproblematisch durchgeführt werden können. Des Weiteren gilt für die statischen Verfahren eine vereinfachte Informationsbeschaffung, da die angesprochenen Durchschnittswerte meist aus einem repräsentativen Nutzungsjahr geschätzt werden [53].

In der Praxis sind die statischen Verfahren trotz Unzulänglichkeiten sehr beliebt. Insbesondere bei unsicheren Ausgangsdaten und geringen Investitionen kann durch die schnelle und unkomplizierte Berechnung eine Beurteilung erhalten werden. Vielfach wird auch eine Kombination von mehreren statischen bzw. dynamischen Rechenverfahren angewandt, um eine bessere Aussagekraft zu erhalten [127].

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Leichtbautür werden im Folgenden zwei Arten der statischen Investitionsrechenverfahren verwendet. Dabei handelt es sich um die Kostenvergleichsrechnung und die Amortisationsrechnung. Diese beiden Verfahren bieten sich an, da hier lediglich ein Vergleich der anfallenden Kosten und die Berechnung der Amortisationsdauer der Leichtbaumehrkosten durchgeführt werden sollen.

9.4.3 Kostenvergleichsrechnung

Bei der Kostenvergleichsrechnung wird der Fokus gänzlich auf die negative Erfolgskomponente (Kosten) gelegt, während die positive Komponente (Erträge) nicht betrachtet wird [53]. Die Anwendung dieser Rechnung kann auf Basis der anfallenden Kosten entweder als Alternativenvergleich oder als Ersatzproblem durchgeführt werden [127, 6]. Beim vorliegenden Fall der Leichtbautür soll geprüft werden, inwieweit sich der Einsatz einer Leichtbautür im Vergleich zu einer herkömmlichen hydraulischen Tür bei einem gegebenen Fertigungsbeispiel lohnt. Daher handelt es sich hierbei um einen Alternativenvergleich.

Für den Kostenvergleich sind alle Kosten zu berücksichtigen, die im Laufe eines (durchschnittlichen) Nutzungsjahres anfallen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um folgende Kostenarten [127, 6]: kalkulatorische Abschreibungen, kalkulatorische

Zinsen, Löhne und Lohnnebenkosten, Materialkosten, Instandhaltungskosten, Energiekosten, Raumkosten und Werkzeugkosten. Beim Kostenvergleich kommt es jedoch nur auf Kostendifferenzen der einzelnen Alternativen an. Daher können Kostenarten, die für alle betrachteten Alternativen gleich hoch sind, aus der Rechnung herausgenommen werden [127, 6].
Ein Kostenvergleich kann entweder auf Basis der Gesamt- oder der Stückkosten erfolgen. Ist die mengenmäßige Leistung der unterschiedlichen Alternativen (nicht unbedingt die Kapazität) gleich hoch, so ist ein Gesamtkostenvergleich pro Periode ausreichend. Bei unterschiedlicher Produktionsleistung der Investitionsalternativen ist jedoch ein Vergleich der Kosten je Leistungseinheit („pro Stück“)von Nöten [127]. Für den Einsatz der Leichtbautür soll zunächst ein Gesamtkostenvergleich bei gleicher Produktionsleistung durchgeführt werden, um anschließend die Stückkosten bei erhöhter Kapazität zu vergleichen.

9.4.4 Gesamtkostenvergleich

Um die Gesamtkosten einer Investitionsalternative K_{ges} zu berechnen, sind die oben genannten relevanten Kostenarten zunächst in variable und fixe Kosten einzuteilen. Die fixen Kosten K_{fix} stellen dabei die produktionsunabhängigen Kosten dar, während die variablen Kosten K_{var} von der produzierten Stückzahl x_S abhängen, **Formel 9-1**.

$$K_{ges} = K_{fix} + x_S \cdot K_{\mathrm{var}} \qquad \text{Formel 9-1}$$

Die fixen Kosten setzen sich aus den kalkulatorischen Abschreibungen, den kalkulatorischen Zinsen, den Raumkosten und den Instandhaltungskosten zusammen [127, 64].
Die einzelnen Bestandteile der Fixkosten berechnen sich folgendermaßen [64]:
Die kalkulatorischen Abschreibungen K_A setzen sich aus den Anschaffungskosten K_0, einem eventuellen Liquidationserlös L_T am Ende der Nutzungsdauer sowie der Nutzungsdauer T_N zusammen, und berücksichtigen damit die Amortisation des gebundenen Kapitals:

$$K_A = \frac{K_0 - L_T}{T_N} \qquad \text{Formel 9-2}$$

Die kalkulatorischen Zinsen KZ sind vom Kalkulationszinssatz i abhängig und bezeichnen die Zinskosten auf das durchschnittlich gebundene Kapital:

$$K_Z = i \cdot \left(\frac{K_0 - L_T}{2} + L_T \right)$$ Formel 9-3

Die Raumkosten hängen vom Flächenbedarf der Anlage sowie den Mietkosten ab. Da der Flächenbedarf aller zu vergleichenden Alternativen als gleich angenommen wird, werden die Raumkosten nicht weiter betrachtet.

Die Instandhaltungskosten werden üblicherweise mit Hilfe der Anschaffungskosten und dem Instandhaltungssatz gebildet. In diesem Fall liegt jedoch ein exakter Zeitwert für Wartung und Instandhaltung aus einem Fragebogen der Firma Ex-Cell-O vor (Anhang C, Kapitel 12). Daher wird dieser Aufwand an anderer Stelle berücksichtigt.

Die produktionsabhängigen variablen Kosten setzen sich aus den anteiligen Lohn- und Lohnnebenkosten K_{LN}, den Materialkosten K_M, den Werkzeugkosten K_W und den Energiekosten K_E zusammen. Da hier nicht explizit die Produktion der Werkstücke betrachtet wird, sind die Kosten für Material und Werkzeuge als konstant angenommen und werden nicht weiter betrachtet.

Damit setzen sich die gesamten Kosten wie folgt zusammen:

$$K_{ges} = \frac{1}{T_N} \cdot (K_0 - L_T) + i \cdot \left(\frac{K_0 - L_T}{2} + L_T \right) + x_S \cdot (K_{LN} + K_E)$$ Formel 9-4

Aus der Literatur wurden folgende Daten für die einzelnen Werte entnommen:

- der Kalkulationszinssatz wird auf 10 % festgesetzt [127, 6].
- der Lohn- und Lohnnebenkostensatz wird mit 27,87 €/h angenommen [106].
- der Energiepreis für Industriestrom beträgt 0,0671 €/kWh [81].
- die Maschinenleistung beträgt 50 kW (siehe oben).

Als weitere Annahmen werden für alle Anlagen eine aus dem Fragebogen von Ex-Cell-O (Anhang C, Kapitel 12) hervorgehende konstante Nutzungsdauer von fünf Jahren festgelegt sowie zur Vereinfachung der Berechnungen ein Liquidationserlös von Null angenommen. Für die Produktionsmenge x_S wird der Wert 63.991 Stück als maximal mögliche zu produzierende Stückzahl für das Fertigungsbeispiel des Getriebegehäuses übernommen. Die Produktionsmenge kann mit der Anzahl der Schließintervalle (auch Leistungseinheiten: L_E) gleichgesetzt werden, die jeweils einen Öffnungs- sowie einen Schließvorgang der Tür beinhalten. Sowohl für den Gesamtkostenvergleich als auch für alle weiteren Berechnungen wird angenommen, dass die maximale Kapazität der Maschine ausgenutzt wird und auch abgesetzt werden kann.

Als Anschaffungskosten für die Leichtbautür wird der Wert 7000 € festgelegt.

Im Gesamtkostenvergleich und den folgenden Berechnungen werden lediglich die Kosten der unterschiedlichen Türen betrachtet. Damit wird vorausgesetzt, dass im Bearbeitungszentrum XS 211 die Tür ausgetauscht werden kann, ohne eine Änderung der übrigen Produktionskosten zu bewirken.
Für den Gesamtkostenvergleich zwischen der Automatik- und der Leichtbautür ergeben sich somit folgende Werte für ein einzelnes Bearbeitungszentrum, **Tabelle 9-3**:

	Türsystem:	
	Automatik	Leichtbau
Anschaffungskosten [€]	1.500,00	7.000,00
Nutzungsdauer [a]	5	5
Produktionsmenge [L_E/a]	63.991	63.991
Dauer des Schließintervalls [s]	4	3
Benötigte Maschinenzeit [h/a]	71,10	53,33
Kalkulatorische Abschreibung [€/a]	300,00	1.400,00
Kalkulatorische Zinsen [€/a]	75,00	350,00
Summe fixe Kosten [€/a]	375,00	1.750,00
Lohn- und Lohnnebenkosten [€/a]	1.981,59	1.486,19
Energiekosten [€/a]	238,54	178,91
Summe variable Kosten [€/a]	2.220,13	1.665,10
Gesamtkosten [€/a]	2.595,13	3.415,10
Kostendifferenz [€/a]	819,97	

Tabelle 9-3: Gesamtkostenvergleich (Einzelmaschine)

Bei den Lohn- und Lohnnebenkosten wurde in der obigen Berechnung die Zuordnung einer Arbeitskraft pro Maschine angesetzt. Zum verketteten Fertigungssystem des Getriebegehäuses gehören sechs Maschinen die insgesamt von einer Arbeitskraft bedient werden. Daher entsprechen die Lohn- und Lohnnebenkosten der Einzelmaschine auch denen des Fertigungssystems. **Tabelle 9-4** bietet einen Überblick über die Kosten der gesamten Fertigung bezogen auf die Maschinentür.

	Türsystem:	
	Automatik	Leichtbau
Kaufpreis [€]	9.000,00	42.000,00
Nutzungsdauer [a]	5	5
Produktionsmenge [L_E/a]	63.991	63.991
Dauer des Schließintervalls [s]	4	3
Benötigte Maschinenzeit [h/a]	71,10	53,33
Kalkulatorische Abschreibung €/a]	1.800,00	8.400,00
Kalkulatorische Zinsen [€/a]	450,00	2.100,00
Summe fixe Kosten [€/a]	2.250,00	10.500,00
Lohn- und Lohnnebenkosten [€/a]	1.981,59	1.486,19
Energiekosten [€/a]	1.431,27	1.073,45
Summe variable Kosten [€/a]	3.412,85	2.559,64
Gesamtkosten [€/a]	5.662,85	13.059,64
Kostendifferenz [€/a]	7.396,79	

Tabelle 9-4: Gesamtkostenvergleich (Fertigungssystem)

Aus beiden Berechnungen geht hervor, dass die deutlich höheren Fixkosten der Leichtbaualternative nicht durch den Vorteil bei den variablen Kosten kompensiert werden können.

9.4.5 Stückkostenvergleich

Es soll nun ein Stückkostenvergleich durchgeführt werden, um einen Überblick über die Kosten pro Leistungseinheit (Schließintervall) bei erhöhter Produktion der Anlage mit der Leichtbautür zu erhalten. In **Tabelle 9-5** werden sowohl die Stückkosten eines einzelnen Bearbeitungszentrums als auch des gesamten Fertigungssystems wiederum bezogen auf die Maschinentür dargestellt.

	Einzelmaschine		Fertigungssystem	
	Automatik	Leichtbau	Automatik	Leichtbau
Produktionsmenge [Stück]	63.991	64.316	63.991	64.316
Summe fixe Kosten [€]	375,00	1.750,00	2.250,00	10.500,00
fixe Kosten [€/LE]	0,006	0,027	0,035	0,163
Summe variable Kosten [€]	2.220,13	1.673,56	3.412,85	2.572,64
variable Kosten [€/LE]	0,035	0,026	0,053	0,040
Gesamtkosten [€/LE]	0,041	0,053	0,088	0,203

Tabelle 9-5: Stückkostenvergleich

Tabelle 9-5 verdeutlicht, dass auch die erhöhte Produktionsmenge der Leichtbauvariante keine große Veränderung der Kostenverhältnisse bewirkt. Der Vorteil bei den variablen Kosten kann die deutlich höheren fixen Kosten nicht kompensieren.
Daraus ergibt sich jedoch, dass es eine kritische Produktionsmenge geben muss, bei der die Produktionskosten beider Alternativen gleich sind. Die Berechnung dieser Menge kann sowohl grafisch als auch numerisch erfolgen. In diesem Fall wird der numerische Weg gewählt. Die gewünschte „Grenzmenge“ S_{grenz} ergibt sich aus folgender **Formel 9-5** [127]:

$$S_{grenz} = \frac{FK_{II} - FK_{I}}{VK_{I} - VK_{II}} \qquad \text{Formel 9-5}$$

FK steht dabei für die fixen, VK für die variablen Kosten der jeweiligen Alternative. Bezogen auf das Fertigungsbeispiel erhält man folgende Grenzmengen:

- $S_{grenz} = 161.410$ für die Einzelmaschine
- $S_{grenz} = 787.500$ für das Fertigungssystem

Die Werte zeigen die theoretisch zu produzierende Menge pro Jahr, ab der die Fertigung mit der Leichtbaukonfiguration kostengünstiger wäre. Da in den Annahmen bereits die maximal mögliche Kapazität der Anlagen verwendet wurde, sind diese Mengen nicht in der Ausgangskonfiguration zu erreichen. Es müssten entweder die Arbeitszeiten erhöht (Extraschicht) oder die Taktzeit verringert werden, um eine Kapazitätserhöhung zu bewirken.

9.4.6 Amortisationsrechnung

Da erhöhte Fixkosten für eine Investition als normal angesehen werden können, soll im Rahmen der Investitionsbeurteilung nun eine Amortisationsrechnung durchgeführt

werden. Ziel dieses Verfahrens ist es, den Zeitraum zu bestimmen, indem das eingesetzte Kapital für eine Investition über die (Zusatz-) Erträge „amortisiert“, also wiedergewonnen werden kann [127, 6, 53]. Dieser Zeitraum lässt sich über zwei mögliche Varianten bestimmen: die Kumulationsmethode und die Durchschnittsrechnung. Bei der Kumulationsmethode variieren die jährlichen Rückflüsse (Erträge) der Investition. Die Durchschnittsrechnung geht ähnlich wie bei der Kostenvergleichsrechnung von (nahezu) konstanten Rückflüssen in jedem Nutzungsjahr aus [53]. Da für den vorliegenden Fall keine expliziten Daten über eine sich ändernde Produktionsmenge vorliegen, wird die Durchschnittsrechnung angewendet.

Grundvorrausetzung der Amortisationsrechnung ist stets die Prämisse, dass die errechnete Amortisationszeit T_A unter einer vorgegebenen Höchstdauer liegt. Diese wird im Allgemeinen von der Geschäftsführung festgesetzt [53]. Für das Bearbeitungszentrum wird mangels Vorgabe die Nutzungsdauer T_N der Anlage als kritischer Höchstwert genutzt. Dieser Wert kann auch als Minimalvoraussetzung angesehen werden.

$$T_A < T_N$$

Für die Durchschnittsrechnung ist die Amortisationszeit T_A definiert als das Verhältnis von Kapitaleinsatz K_0 für eine Investition (Anschaffungskosten) zum durchschnittlichen jährlichen Rückfluss CF [127].

$$T_A = \frac{K_0}{CF}$$ Formel 9-6

Der jährliche Rückfluss wird auch als Cash Flow bezeichnet und ergibt sich aus dem jährlichen Überschuss (oder der Kostenersparnis) zuzüglich der kalkulatorischen Abschreibungen. Ferner sind noch die „zusätzlichen kalkulatorischen Zinsen“ auf das Eigenkapital zu addieren, die die Fremdkapitalzinsen übersteigen [127, 6]. Dazu muss jedoch die Finanzierungsweise des Investitionsobjekts oder die durchschnittliche Kapitalstruktur des entsprechenden investierenden Unternehmens bekannt sein. Da keine entsprechenden Daten vorliegen, wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Zinsen für Fremd- und Eigenkapital (kalkulatorisch) gleich hoch sind und damit keine kalkulatorischen Zinsen zum Cash Flow hinzugerechnet werden.

Für das Bearbeitungszentrum liegen nur ein Teil der erforderlichen Daten vor. Daher wird hier nicht die Amortisationszeit für die gesamte Investition eines Bearbeitungszentrums errechnet, sondern lediglich der Zeitraum, in dem die Mehrkosten für die Leichtbautür durch die zusätzliche Produktionsmenge abgedeckt werden können.

Demzufolge werden für die Anfangsinvestition die kalkulatorischen Abschreibungen sowie für die Produktionskosten jeweils die Differenzbeträge für die Berechnung verwendet. Der jährliche Rückfluss CF bildet sich demnach aus dem Gewinn der Mehrproduktion G_{zus}, der Produktionskostendifferenz K_{pr}, sowie den kalkulatorischen Abschreibungen K_A.

$$CF = G_{zus} - K_{pr} + K_A \qquad \text{Formel 9-7}$$

Die Amortisationszeit ergibt sich demzufolge aus dem Verhältnis der Mehrinvestition zum zusätzlichen jährlichen Rückfluss.
Für die Bewertung der Mehrproduktion wurde ein fiktiver Gewinn von 10 € pro Stück zu Grunde gelegt. Es gilt weiterhin die Annahme, dass die maximale Kapazität produziert und abgesetzt werden kann, **Tabelle 9-6**.

		Einzelmaschine	Fertigungssystem
Anfangsinvestition	[€]	5.500	33.000
Nutzungsdauer	[a]	5	5
kalkulatorische Abschreibungen	[€/a]	1.100	6.600
kalkulatorische Zinsen	[€/a]	275	1.650
Kostendifferenz (-erhöhung)	[€/a]	819,97	7.396,79
Produktionserhöhung	[LE]	325	325
Gewinn	[€/LE]	10,00	10,00
jährlicher Rückfluss	[€]	3.528,30	2.451,48
Amortisationszeit	[a]	1,56	13,46

Tabelle 9-6: Amortisationsrechnung

Die Amortisationszeiten zeigen, dass sich die Investition für die Produktion dieses Getriebegehäuses in einem Fertigungssystem mit sechs Bearbeitungszentren nicht innerhalb der Nutzungsdauer amortisiert. Damit kann die Grundvorrausetzung der Amortisationszeit nicht erfüllt werden und die Investition damit nicht als sinnvoll betrachtet werden.

9.4.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen verdeutlichen, dass ein Einsatz der Leichtbautür für die Produktion des Getriebegehäuses unter den gegebenen Umständen nicht zu empfehlen ist. Die deutlich höheren Fixkosten aus den Kostenvergleichen resultieren aus dem relativ hohen Anschaffungspreis und können nicht

über eine mögliche Mehrproduktion kompensiert werden. Des Weiteren ist der Mehrgewinn sogar so gering, dass sich die erhöhten Anschaffungskosten nicht innerhalb der Nutzungsdauer zurückgewinnen lassen.
Das schlechte Abschneiden der Leichtbauvariante lässt sich insbesondere durch zwei Hauptfaktoren begründen:
Allgemein stellen die hohen Anschaffungskosten der Leichtbautür einen wesentlichen Faktor dar. Im Vergleich zur eingesetzten Automatiktür ergibt sich bei einer Differenz von 5.500 € eine Kostensteigerung um mehr als das 4,5-fache. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Leichtbautür auch für den Ersatz einer von Hand zu öffnenden Tür im Bearbeitungszentrum XS 211 vorgesehen ist und daher bei den Anschaffungskosten von 7000 €, ebenfalls die benötigte Sicherheitstechnik enthält. Da die Kosten dafür nicht zu ermitteln waren, wurden die Gesamtkosten der Leichtbautür für die Berechnung verwendet. Bei der manuellen Tür hat laut Information von Ex-Cell-O die Sicherheitstechnik einen Wert von über 2000 €. Würde man diesen Wert bei den Anschaffungskosten der Leichtbautür abziehen, so ergäben sich folgende Amortisationszeiten, **Tabelle 9-7**:

Leichtbautürkosten: 5000 €	**Einzelmaschine**	**Fertigungssystem**
Amortisationszeit [a]	0,96	6,88

Tabelle 9-7: Variation der Parameter, Anschaffungskosten

Aus Tabelle 9-7 geht hervor, dass auch eine Verringerung der Anschaffungskosten der Leichtbautür um 2000 € unter den gegebenen Umständen nicht zu einer Amortisation der Investition beim Fertigungssystem innerhalb der Nutzungsdauer führen würde.
Eine weitere Hauptursache stellt die relativ lange Taktzeit der Fertigung des Getriebegehäuses dar. Bei einer Taktzeit von 198 Sekunden ergibt eine Sekunde im Rahmen des verkürzten Schließintervalls lediglich einen Zeitgewinn von einem halben Prozent. Dies gilt damit auch für die Mehrproduktion. Der Einsatz der Leichtbautür wäre daher bei einem Produkt mit einer deutlich kürzeren Taktzeit sinnvoller. Zum Vergleich ist in **Tabelle 9-8** die Amortisationszeit der Leichtbauinvestitionen für ein fiktives, im Zweifel weniger komplexes Produkt mit einer Taktzeit von lediglich 130 (im Vergleich zu 198) Sekunden bei der Fertigung im gegebenen verketteten Fertigungssystem unter Beibehaltung aller anderen ursprünglichen Annahmen ange-

geben. Bei Einsatz der Leichtbautür würde damit eine Taktzeit von 129 Sekunden erreicht werden, **Tabelle 9-8**.

Taktzeit: 130 s	**Einzelmaschine**	**Fertigungssystem**
Amortisationszeit [a]	0,68	4,58

Tabelle 9-8: Variation der Parameter, Taktzeit

Die Amortisationszeit aus Tabelle 9-8 zeigt, dass bei der Fertigung eines Produktes mit einer deutlich kürzeren Taktzeit von 130 Sekunden die Investition in die Leichtbautür in einem Fertigungssystem innerhalb der fünf Jahre amortisiert werden kann.
Neben diesen beiden Ursachen können auch die getätigten Annahmen Gründe für das Ergebnis sein. Dabei ist insbesondere die eingeschränkte Datenverfügbarkeit zu nennen. Fraglich ist beispielsweise, ob durch die Leichtbautür eine andere, eventuell günstigere Konfiguration der Bearbeitungszentren oder der Automatisierungseinrichtung möglich wäre. Gleichzeitig kann im Allgemeinen von einer Energieeinsparung beim Antriebsmotor bedingt durch die geringere Masse der Leichtbautür ausgegangen werden. Dies sind nur wenige Beispiele, die mangels detaillierter Informationen in der Wirtschaftlichkeitsanalyse nicht berücksichtigt werden konnten.
Abschließend kann festgehalten werden, dass der wirtschaftliche Einsatz von Leichtbautüren im Maschinenschutz vom konkreten Einsatzbereich der Maschine abhängig ist und daher eine eingehende vorherige Prüfung erfordert.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung an Werkzeugmaschinen besitzt die trennende Schutzeinrichtung. Da ein Restrisiko infolge abgeschleuderter Werkstück-, Spannmittel- oder Werkzeugbruchstücke nicht vollständig verhindert werden kann, ist es deren Aufgabe, den Bediener vor freigesetzten Elementen zu schützen.

Zur Ermittlung der Aufprallfestigkeit von Baugruppen und Materialien trennender Schutzeinrichtungen wird in den Normen DIN EN 12415 „Kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren“ [N3] bzw. DIN EN 12417 „Bearbeitungszentren“ [N4] ein Prüfverfahren beschrieben, bei dem allseitig fest eingespannte Proben mit zylindrischen Körpern stoßartig beansprucht werden. Aufgrund der noch immer steigenden Arbeitsgeschwindigkeiten stoßen herkömmliche Werkstoffe bei der sicheren Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen an die Grenzen ihrer Belastbarkeit bzw. massenbedingten Einsatzfähigkeit.

Das Ziel dieser Arbeit war daher die Erweiterung der bestehenden Datenbanken um alternative Leichtbauprinzipien bzw. -werkstoffe. Hierfür wurden zunächst die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Leichtbauweisen gegenübergestellt und anhand von Praxisbeispielen miteinander verglichen. Es wurde deutlich gezeigt, dass keine Leichtbauweise existiert, die für jeden Anwendungsfall geeignet ist. Vielmehr muss die einzusetzende Leichtbauweise je nach Gefährdungspotenzial, Fertigungsverfahren, Leichtbauanspruch und Preisbereitschaft ausgewählt werden. Ist dies geschehen, kann der Werkstoff identifiziert werden, der das größte Potenzial besitzt den gestellten Anforderungen gerecht zu werden. Wie gezeigt wurde bieten sich hierfür zahlreiche Werkstoffe an. Zur Verifizierung der Einsatztauglichkeit in trennenden Schutzeinrichtungen wurden diese Werkstoffe zahlreichen Aufpralluntersuchungen nach DIN EN 12415 [N3] bzw. DIN EN 12417 [N4] unterzogen.

Es zeigte sich, dass neben modernen Stählen (Edelstahl X5CrNi18-10) vor allem Leichtmetalle (speziell Aluminium) aber auch einige Polymere (Polycarbonat, Kautschuk, Kunstharzpressholz, Polypropylenkernwabe) sowie der Faserverbundkunststoff AFK für einen Einsatz in trennenden Schutzeinrichtungen geeignet sind. Dabei bieten sich insbesondere Materialkombinationen in Form von Sandwichverbünden an, in denen die jeweiligen Leichtbauwerkstoffe als Kern zwischen zwei Deckschichten aus Stahl eingebettet sind. Ausnahmen bildeten der Keramikverbund, der Beulblechverbund sowie die Hochleistungsstähle S355J2G3, S700MC, 30CrMo5-2. Im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren konnte der Aramidfa-

serverbund die Anforderung ebenfalls nicht voll erfüllen, da der Verbund bei der Durchführung der Normaufprallprüfung zwar nicht durchschossen, jedoch vollständig durch den Auflagerahmen der Wandmusteraufnahme durchgezogen wurde.

Der optimierte Keramikverbund konnten bei den normativen Aufpralluntersuchungen zwar sehr gute Ergebnisse erzielen, jedoch wurde während des Aufpralls der Keramiklayer großflächig zerstört, so dass der Verbund bei einem weiteren Treffer versagte. Bei den am Beulblechverbund durchgeführten Aufpralluntersuchungen zeigte sich sehr schnell, dass aufgrund der geringen herstellbaren Materialdicke sowie der Schwierigkeit der Verbundherstellung kein sinnvoller Aufbau hergestellt werden konnte, so dass die Untersuchungen nach der Einzelaufprallprüfung abgebrochen wurden.

Die Aufprallprüfergebnisse der Hochleistungsstähle S355J2G3, S700MC, 30CrMo5-2 rechtfertigen weder im Bereich der Bearbeitungszentren noch im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren die Substitution einfacher Baustahlbleche. Das angestrebte Ziel einer Dickenreduktion von 1 mm entsprechend einer Massenreduktion von 8 kg/m² konnte nicht erreicht werden.

Bei den durchgeführten Aufpralluntersuchungen zeigte sich, dass der Edelstahl X5CrNi18-10 für die untersuchten Anwendungsfälle grundsätzlich geeignet ist. Es stellte sich jedoch heraus, dass gerade dieser Werkstoff einer erheblichen Chargenschwankung unterliegt. Diese Schwankungen sind angesichts der in Kapitel 6.4.3 beschriebenen Bandbreite von möglichen Zusammensetzungen und Herstellungsschritten nicht verwunderlich. Es zeigte sich, dass schon kleine Veränderungen der Masseanteile der Legierungszusätze relativ starke Veränderungen der mechanischen Eigenschaften zur Folge. Bei einem Einsatz in einer trennenden Schutzeinrichtung müssen vorgegebene Materialkennwerte weit über die Toleranzgrenzen der Norm hinaus eingehalten werden, um eine definierte Rückhaltefähigkeit zu gewährleisten.

Aus diesem Grund kann eine Verwendung von X5CrNi18-10 in trennenden Schutzeinrichtungen grundsätzlich nicht empfohlen werden. Ergebnisse von Einzelprüfungen zum Einsatz von X5CrNi18-10 als trennende Schutzeinrichtungen können nicht über die untersuchte Charge hinaus verallgemeinert werden. Für eine sichere Verwendung ist es nötig, alle erforderlichen normativen Prüfungen erfolgreich an Blechen der zu verwendenden Charge durchzuführen.

Ein weiterer Sonderfall der im Rahmen dieser Arbeit herausgearbeitet und diskutiert wurde, war der Kink-Effekt. Dieser Sonderfall beschreibt das unerwartete Absinken des Durchdringungswiderstandes bei gleichzeitig zunehmender Dicke des untersuchten Prüfmusters. Dieses Verhalten wurde mathematisch hergeleitet und experimentell belegt. Es wurde gezeigt, dass sich der kritische Durchdringungswiderstand über der Materialdicke bei zahlreichen Materialien nicht linear verhält.

Diese Sonderfälle und die erweiterten Ansprüche an moderne trennende Schutzeinrichtungen stellen den Maschinenhersteller vor komplexe Probleme. Moderne Schutzeinrichtungen müssen nicht nur freigesetzte Elemente zurückhalten, sondern darüber hinaus einen hohen Widerstand gegen immer aggressivere Schmiermedien bieten, die Mehrfachbeschusstauglichkeit nachweisen, gute Handhabungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten aufweisen, leicht und dünn sein, den neuesten Schallschutzverordnungen entsprechen, zur Nachrüstung von Produktionsmaschinen geeignet und kostengünstig sein. Zur Handhabung dieser Vielzahl von Ansprüchen und zur vergleichenden Bewertung der unterschiedlichen Lösungsvarianten wurde eine Anforderungsliste und anhand einer Matrix dargestellt und ausgewertet.

Nach Auswertung der Auswahlliste für den Bereich der Bearbeitungszentren wurden der Aramidfaserverbund sowie der Edelstahl X5CrNi18-10 als besonders geeignet identifiziert. Besonders in den Bereichen Massenreduktion und Dickenreduktion ließen sich mit beiden Werkstoffen bzw. Werkstoffverbünden erhebliche Verbesserungen erzielen. Der Aramidfaserverbund eignet sich durch seine hervorragenden Be- und Verarbeitungsmöglichkeiten zusätzlich noch zur Nachrüstung von Produktionsmaschinen. Der Edelstahl X5CrNi18-10 besitzt darüber hinaus sehr gute Oberflächeneigenschaften und ist korrosionsbeständig.

Im Bereich der Drehmaschinen und Drehzentren konnten mit Hilfe der Auswahlliste der monolithische Aluminiumaufbau sowie der Edelstahl X5CrNi18-10 als die optimalen Lösungen herausgearbeitet werden. Der Edelstahl X5CrNi18-10 überzeugt in diesem Bereich ebenfalls durch die gleichen guten Eigenschaften wie im Bereich der Bearbeitungszentren, allerdings müssen auch hier die entsprechenden Untersuchungen zur Bestimmung des tatsächlichen Durchdringungswiderstandes im Vorfeld durchgeführt werden. Großes Potenzial besitzt auch hier der Aramidfaserverbund. Dieser Verbund konnte zwar die Aufprallprüfung nach DIN EN 12415 [N3] nicht bestehen, da er durch die Wandmusteraufnahme durchgezogen wurde, jedoch gelang es nicht den Verbund zu durchdringen. Aus Sicht der Arbeitssicherheit und des Ma-

schinenschutzes müsste an dieser Stelle eine Gefahrenanalyse durchgeführt und die Beschusssicherheit durch eine Baumusterprüfung sichergestellt werden.

Für den Fall, dass der Maschinenhersteller ausschließlich den Leichtbau und die Sicherheit der trennenden Schutzeinrichtung betrachtet, ist der Aufwand der durch das Erstellen einer Anforderungsliste und die Auswertung anhand einer Auswahlliste entsteht zu groß. Für diesen Fall wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Möglichkeiten zur Vorhersage der Leichtbaugüte der potenziellen Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde erarbeitet.
Um Leichtbaustrukturen bezüglich ihrer Aufprallfestigkeit besser vergleichen bzw. eine Vorauswahl sinnvoller Aufbauten und Werkstoffe treffen zu können, wurde eine Leichtbaukennzahl für den Impactfall (LBK_{IF}) sowie eine Formel zur Berechnung des kritischen Durchdringungswiderstandes entwickelt. Die LBK_{IF} setzt sich aus dem Verhältnis des kritischen Durchdringungswiderstandes und der Masse der Struktur zusammen. Anhand dieser Kennzahl konnten die Messergebnisse der durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden.
Die entwickelte Formel zur Berechnung des kritischen Durchdringungswiderstandes Formel berücksichtigt die realen Beziehungen der Werkstoffparameter zueinander.
Die Verwendung dieser Formel sollte jedoch nur unter Einbeziehung von Expertenwissen erfolgen. Obwohl die Abweichungen bei der Anwendung der neuen Formel deutlich geringer ausfallen, sind sie immer noch im Bereich von ca. 100 Nm. Die maximale Abweichung je Werkstoff muss von der errechneten Zahl abgezogen werden, um die notwendige Sicherheit zu garantieren.
In Übereinstimmung mit den Aussagen in Kapitel 6.4 muss gesagt werden, dass eine zuverlässige und genaue Angabe des kritischen Durchdringungswiderstandes eines Bleches nur nach Durchführung statistisch abgesicherter Aufprallprüfungen mit Blechen derselben Charge gemacht werden kann.
Da die Aufprallfestigkeit nur einen Teil der erforderlichen Auswahlkriterien wie Verarbeitungsmöglichkeit, Nachrüsteignung, Medienbeständigkeit, Massenreduktion, Kosten etc. darstellt, sind stets alle Faktoren abzuwägen, um anhand des Gesamtergebnisses eine Auswahl treffen zu können.
Wie in Kapitel 8 erwähnt sind die schalltechnischen Anforderungen an Werkzeugmaschinen deutlich gestiegen und stellen neben der Sicherheit einen weiteren wichtigen Aspekt bei der Auslegung von trennenden Schutzeinrichtungen dar.

Das Ziel der durchgeführten Schallmessungen war, das bewertete Luftschalldämmmaß R_W für die nach DIN EN 12415 [N3] und DIN EN 12417 [N4] optimierten Prüfmusteraufbauten zu bestimmen.

Es wurde gezeigt, dass die mehrschaligen Verbundaufbauten mit einer Absorberschicht als Zwischenlage die höchsten bewerteten Luftschalldämmmaße R_W aufweisen. An erster Stelle sowohl im Bereich der Bearbeitungszentren als auch im Bereich der Drehmaschinen liegt das Aluminiumschaumsandwich.

Aluminiumschaum erwies sich als sehr gut schallabsorbierend und vibrationsdämmend. Die Dämpfung hängt nur im geringen Maße von der Frequenz ab. Die Schallwelle dringt in den Schaum ein und wird innen durch die unregelmäßige Porenoberfläche reflektiert. Durch minimale Verformungen der Zellwände wird die Schwingungsenergie abgeleitet und in Wärme umgewandelt. Dadurch wird die Intensität des reflektierten Schalls gesenkt [73].

Im Vergleich zu anderen schallabsorbierenden Materialien hat perforierter Aluminiumschaum nahezu gleiche Eigenschaften und kann für einige Anwendungen eingesetzt werden, für welche die herkömmlichen Materialien zum Teil nicht geeignet sind, z. B. unter schwierigen Bedingungen (Feuchtigkeit, hohe Temperatur) oder in sterilen Räumen [72].

Im Bereich der Drehmaschinen erzielte das Kunstharzpressholzsandwich aufgrund seines vielschichtigen Aufbaus und der damit verbundenen Impedanz-Sprünge sehr gute Werte.

Der sichere, leichte und schalldämmende Werkstoff wird allerdings nur dann zum Einsatz kommen, wenn er dem Maschinenhersteller auch wirtschaftliche Vorteile einbringt. Aus diesem Grund wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für einen konkreten Einsatzfall aus der Praxis durchgeführt. Die Anwendung beinhaltete den Einsatz einer Leichtbautür für ein verkettetes Fertigungssystem bestehend aus sechs Bearbeitungszentren zur Produktion von Getriebegehäusen für den Automobilbau. Die Ergebnisse zeigten, dass der Einsatz der Leichtbautür in diesem Fall nicht wirtschaftlich lohnend ist. Neben den erhöhten laufenden Kosten im Vergleich zur aktuellen Türvariante konnte auch die Mehrinvestition nicht durch die mögliche Mehrproduktion innerhalb der Lebensdauer amortisiert werden. Gründe dafür können in den für die Berechnung gemachten Annahmen liegen oder das Fertigungsbeispiel ist aufgrund der hohen Taktzeit unter den gegebenen Umständen prinzipiell ungeeignet für den Einsatz einer Leichtbautür.

Es existieren jedoch bereits heute Bereiche, in denen der Leichtbau eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative im Maschinenschutz darstellt. Für jedes Einsatzgebiet ist eine genaue Prüfung der Vorteilhaftigkeit notwendig. Trotz teilweise hervorragender technischer Eignung werden womöglich die hohen Kosten insbesondere bei den Faserverbundkunststoffen (z. B. AFK) den baldigen Einsatz mancher Leichtbauwerkstoffe in trennenden Schutzeinrichtungen behindern. Daher sollten in Zukunft weitere Untersuchungen praxisnaher Lösungen stattfinden, um den Unternehmen das Potenzial des Leichtbaus zu verdeutlichen. Dabei ist allerdings stets die Wirtschaftlichkeit der Lösungen zu gewährleisten, die teure Werkstoffe bzw. hoher Entwicklungskosten stets zu berücksichtigen sind.

Zukünftige Forschungsfelder

- *Werkstoffdesign*

Die trennenden Schutzeinrichtungen von Werkzeugmaschinen werden aufgrund der hohen Kosten der Leichtbauwerkstoffe auch in Zukunft überwiegend aus Stahlwerkstoffen bestehen. Aus diesem Grund werden von der Industrie Stähle mit hohem Durchdringungswiderstand bei gleichzeitiger Reduzierung der Masse gefordert. Die durchgeführten Untersuchungen haben das hohe Potenzial von austenitischen Chrom-Nickel-Stählen sowie Aluminiumlegierungen aufgezeigt. Aufgrund der im Vergleich zu Baustahl, höheren Kosten dieser Materialien wird versucht, die untere Leistungsgrenze, der aus sicherheitstechnischen Gründen notwendigen Materialdicke empirisch abzuschätzen.

Es wurde gezeigt, dass die Rückhaltefähigkeit von austenitischen Edelstählen und Aluminiumlegierungen nicht nur von der Legierungszusammensetzung, sondern auch von der Art der Wärmebehandlung bzw. Kaltverfestigung abhängig ist.

Die aus diesen Vorgängen resultierende Chargenabhängigkeit der Versuchsergebnisse lässt eine definierte Rückhaltefähigkeit, wie sie in den Normen DIN EN 12415 (Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren) [N3] und DIN EN 12417 (Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Bearbeitungszentren) [N4] gefordert ist, nicht zu.

Nur die exakte Kenntnis der benötigten Werkstoff- und Herstellparameter zur Gewährleistung der normativ geforderten Sicherheiten, macht es dem Konstrukteur möglich, eine Maschinenumhausung zu konstruieren, die den Menschen im Scha-

densfall zuverlässig vor freigesetzten Werkstück- oder Werkzeugbruchstücken schützt.

Aus diesen Gründen ist es dringend erforderlich, die Zusammenhänge zwischen der Legierungszusammensetzung, dem Herstellverfahren und dem Durchdringungswiderstand zu untersuchen. Zur Einschränkung der zahlreichen und kostenintensiven Aufpralluntersuchungen sollte ein Finite-Elemente-Modell zur Simulation des Impactverhaltens austenitischer Edelstähle und Aluminiumlegierungen entwickelt werden.

- *Verbindungstechnik*

Als mögliche Verbindungstechnik der Schichten eines Verbundaufbaus bietet sich das Kleben an, da es sehr vielseitig einsetzbar ist und aufgrund seines geringen Gewichtes Leichtbaubestrebungen entgegenkommt. Als weitere Verbindungstechniken eignen sich das (Laser-) Schweißen sowie in Sonderfällen das Nieten und Schrauben. Gestützt wurden diese Erkenntnisse aus den Ergebnissen vorangegangener Aufpralluntersuchungen. Eine Unbekannte stellt bisher der Durchdringungswiderstand an den Fügestellen dar. Hier kann sowohl durch die gewählte Verbindungstechnik als auch durch konstruktive Maßnahmen Einfluss genommen werden. Ziel der Untersuchungen muss es sein, einen gleichbleibenden Durchdringungswiderstand über die gesamte trennende Schutzeinrichtung zu gewährleisten. Hierfür müssen im ersten Schritt Aufpralluntersuchungen an mit verschiedenen Fügetechniken verbundenen Werkstoffproben durchgeführt werden. Im Anschluss sind die Fügestellen hinsichtlich des Durchdringungswiderstandes zu optimieren.

- *Explosionsschutz*

In Werkzeugmaschinen mit gekapseltem Arbeitsraum und bei Verwendung des Kühlschmierstoffs Öl, der im Betrieb vernebelt wird sowie bei der Bearbeitung bestimmter Werkstoffe (z. B. Magnesium) können Brände, Verpuffungen und Explosionen auftreten. Hierbei entsteht ein Überdruck im Maschinengehäuse. Der derzeitige Stand der Technik ist durch die VDW-Forschungsberichte VDW 3001/1 und 3001/2 und den Bericht „Verpuffungen und Brände in Werkzeugmaschinen“ des VDMA sowie den Bericht des Institutes IBExU, Freiberg, in ihren Geltungsbereichen sehr gut dargestellt. Die Gefahr, die durch den Verpuffungsdruck und die dabei auftretenden Stichflammen entsteht, ist im Bereich der Leichtbauprinzipien bzw. -werkstoffe noch nicht erfolgt und stellt weiteren Forschungsbedarf dar. Es sollte ein Verfahren entwickelt

werden, mit welchem die Druckfestigkeit von trennenden Schutzeinrichtungen und Verkleidungselementen moderner Werkzeugmaschinen bestimmt werden kann. Ziel sollte es sein, die aus Explosionen resultierenden Druckbelastungen mit Hilfe einer Ersatzprüfung zu simulieren.
Dem Werkzeugmaschinenhersteller sollte schon während des Konstruktionsprozesses die Möglichkeit gegeben werden, die maximale Druckfestigkeit der gesamten Schutzeinrichtung und einzelner Komponenten wie z. B. Steckbleche, Sicherheitsfenster, Teleskope und Schiebetüren zu beurteilen und anhand eines standardisierten Prüfverfahrens zu bestimmen.
Hierfür sind reale Explosionsvorgänge rechnergestützt zu analysieren, eine Prüfeinrichtung zu entwickeln sowie eine Prüfvorschrift zu erstellen, die in Analogie zur DIN EN 12415 [N3] Druckfestigkeits-Prüfklassen definiert.

- *Sicherheitstechnik*

Die im Rahmen dieser Arbeit prototypisch realisierte Hochgeschwindigkeitsmaschinentür ist aufgrund ihrer hohen Beschleunigungen in der Lage, die unproduktiven Nebenzeiten im Produktionsprozess zu verkürzen. Allerdings entsteht durch die hohen Beschleunigungen ein neues Gefährdungspotenzial durch Quetschstellen.
Unter Quetschstellen versteht man allgemein Gefahrenstellen, bei denen sich Teile so gegeneinander oder gegen feste Teile bewegen, dass Körperpartien von Personen gequetscht werden können. Bei trennenden Schutzeinrichtungen treten Quetschstellen z. B. bei den Hauptschließkanten der Schutztürflügel und den Gegenschließkanten sowie zwischen Flügel und festen Teilen der Umgebung auf.
Rund die Hälfte aller Arbeitsunfälle im Zusammenhang mit Türen und Toren sind auf Quetschungen zurückzuführen. In 70 % dieser Unfälle sind Finger, Hände oder Arme betroffen. Dabei sind die Finger die mit Abstand gefährdetsten Körperteile. Der allgemeingültigen Sicherheitsphilosophie folgend müssen Gefahrenstellen vermieden oder abgesichert werden.
Gemäß den Deutschen Vorschriften und Richtlinien (CHV4, BGR 232) liegt bei Türen und Toren eine Quetschstelle beim Einwirken von einer Kraft von mehr als 150 N vor. Aus den Regelwerken geht nicht eindeutig hervor, ob sich dieser Grenzwert nur auf die statischen oder auch auf die dynamischen Kräfte bezieht. Die dynamischen Kräfte, die von der Geschwindigkeit und Masse des Schutztürflügels abhängen, entstehen unmittelbar beim Aufprall des Flügels auf eine Person und können erheblich

über den aus der statischen Antriebskraft resultierenden Klemmkräften liegen.
Für den Einsatz von Hochgeschwindigkeitsmaschinentüren müssen entweder entsprechende Antriebskonzepte wie einem reversierenden Antrieb, bei welchem nach einer bestimmten Zeit die Reversierung der Flügelbewegung einsetzt, so dass auch die Klemmkraft abgebaut wird oder den Richtlinien entsprechende Sicherheitskonzepte die den Maschinenbediener sicher detektieren entwickelt werden.

- *Langzeitverhalten*

Neben der Hauptgefährdung durch wegfliegende Teile sind die Werkstoffe der trennenden Schutzeinrichtung während des Bearbeitungsprozesses einer Reihe von weiteren Einflussfaktoren ausgesetzt. Diese sind im Einzelnen:

- scharfkantige, sehr warme Späne,
- aggressive, flüssige Umgebungsmedien (u.a. Schmieröle, Kühlschmierstoffe),
- aggressive, gasförmige Umgebungsmedien (u.a. Kühlmitteldämpfe) und
- UV-Strahlen.

Da in den untersuchten Werkstoffverbünden zum Teil Kunststoffe eingesetzt werden, kommt es bei einer längerfristigern Beanspruchung durch die oben genannten Einflussfaktoren zu einer Verschlechterung der mechanischen, dynamischen, thermischen, optischen und chemischen Eigenschaften dieser Materialien.

Grundsätzlich ist die Beständigkeit von Kunststoffen gegen die Einwirkung unterschiedlicher aggressiver Umgebungsmedien von der chemischen Zusammensetzung, der Struktur, Vernetzungsdichte sowie den Füllstoffzusätzen und deren Zusammensetzung einerseits und von dem flüssigen oder gasförmigen Umgebungsmedium andererseits abhängig.

Der Verlauf der komplexen Einwirkungen physikalisch oder chemisch aktiver Medien auf Kunststoff- bzw. Gummi-Erzeugnisse wird durch Art, Zeitdauer und Temperatur der Beanspruchung durch das Medium beeinflusst und ist für einzelne Materialien im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen bereits analysiert worden [10].

Gänzlich unberücksichtigt bleiben bei diesen Untersuchungen jedoch die Auswirkungen der Komponentenalterung auf die Rückhaltefähigkeit des Gesamtverbundes in Kombination mit den untersuchten Werkstoffen. Somit besteht die Gefahr, dass ein

an sich alterungsbeständiger Werkstoff in Kombination mit einem alterungsanfälligen Werkstoff zu einer Reduktion der Rückhaltefähigkeit des Gesamtverbundes führen kann. Die Alterungsbeständigkeit bzw. das Langzeitverhalten der neuen einzusetzenden Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde ist daher künftig zu untersuchen.

- *Nachrüstung*

In Europa haben sich ca. 400 Unternehmen auf den Handel mit Gebrauchtmaschinen spezialisiert. Allein in Deutschland sind 130 Unternehmen unter dem Dachverband FDM Fachgruppe „Vereinigung Internationaler Händler gebrauchter Maschinen“ organisiert. Einhergehend mit dem wachsenden Gebrauchtmaschinenhandel werden diese Maschinen mit schneller drehenden Spindeln bzw. mit Spindeln mit der Möglichkeit größere Werkzeuge aufzunehmen nachgerüstet. Diese Veränderung der Maschinen macht eine Nachrüstung der trennenden Schutzeinrichtung zwingend erforderlich. In diesen Fällen wird die sicherheitsgerechte Nachrüstung oder die Neukonstruktion der Maschinenumhausung aus wirtschaftlichen Gründen meist vernachlässigt. Es ist daher dringend erforderlich, Nachrüstlösungen zu entwickeln, mit denen den neu entstandenen Gefährdungspotenzialen wirtschaftlich und nachhaltig im Sinne des Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG) begegnet werden kann.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass Faserverbundwerkstoffe aufgrund ihrer relativ hohen Zugfestigkeiten bei gleichzeitig geringer Dichte und guten Verarbeitungsmöglichkeiten hervorragend zur Nachrüstung von Gebrauchtmaschinen geeignet sein könnten.

11 Literaturverzeichnis

[1] BANHART, J.; BAUMEISTER, J.; MELZER, A.; SEELIGER, H-W.; WEBER, M.: Aluminiumschaum-Leichtbaustrukturen für den Fahrzeugbau. In: Sonderdruck aus Werkstoffe im Automobilbau 98/99. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbh: Wiesbaden.

[2] BARTON, D.C.; STURGES, J.L.; MIRZA, M.S.; CHURCH, P.: Deformation and fracture: Modelling techniques to take account of strain-rate behaviour and stress state. 3rd International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, Strasbourg: 14-18 October 1991, S. 821-828.

[3] BARTZ, W.J. (HRSG.): Rostfreie Stähle- Grundwissen, Konstruktions- und Verarbeitungshinweise, Band 493, Expert-Verlag, S.8.

[4] BECKER, H.; WÜRZ, T.: Sicherheit von Maschinen und Werkzeugen. In: Schulz, H. [Hrsg.]: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. München: Carl Hanser Verlag, 1996.

[5] BERGMANN, W.: Werkstofftechnik Teil 1: Grundlagen. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag München, Wien, 2002.

[6] BLOHM, H.; LÜDER, K.; SCHAEFER, C.: Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung. 9. Auflage, Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 2006.

[7] BLUMENAUER, H. (HRSG.) Werkstoffprüfung. 6. Auflage. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 1994.

[8] BMBF: Abschlussbericht der vordringlichen Aktion – Innovativer Leichtbau. Förderkennzeichen: 02PA25010, 2000.

[9] BODE, H.-G.: Mit Leichtbau neue Potenziale erschließen. In: Innovationsreport – Forum für Wissenschaft, Industrie und Wirtschaft, 03.11.2003.

[10] BOLD, J.: Trennende Schutzeinrichtungen für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. IWF TU Berlin. Dissertation, 2004.

[11] BRAESS, H.-H.; SEIFFERT, U. (HRSG.) Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 4. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/ GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2005.

[12] CHAMIS, C.C.: Mechanics of composite materials: past present and future. Journal: Composite Technology Research, 11/1989, S. 3-14.

[13] CIUPEK, M.: Leichtbau vereint Spezialisten-Wissen. In: VDI-Nachrichten, Düsseldorf, 10.09.2004.

[14] CLOS, R.; SCHREPPEL, U.; HAUFFE, M.; MAYER, U.: Plastisches Verhalten des Stahls 20 MnMoNi 5 5 bei transienter Hochgeschwindigkeitsbelastung. 18. MPA Seminar Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, Staatl. Materialprüfungsanstalt – MPA Stuttgart, 8. und 9.10.1992, S 34.01-34.17.

[15] CORRAN, R.S.J.; SHADBOLT, P.J.; RUIZ, C.: Impact loading of plates – an experimental Investigation, Oxford 1982.

[16] CREMER, L.; MÖSER, M.: Technische Akustik. 5. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.

[17] CZERWENKA, G.; SCHNELL, W.: Einführung in die Rechenmethoden des Leichtbaus.
Bd. 1 (124/124a), BI Hochschultaschenbücher, Mannheim, 1967.

[18] DYBOWSKI, G.: Beitrag zur Dimensionierung von Schleifkörperschutzhauben.
Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaus im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert“,
Maschinenbautechnik 30 (1981) 9, S.420-422.

[19] ECKSTEIN, H.-J. Korrosionsbeständige Stähle. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 1990.

[20] FRIEDRICH, B.; JESSEN, K.; ROMBACH, G.: Aluminium foam – Production, Properties and Recycling Possibilities. In: Erzmetall 56. Clausthal-Zellerfeld: GDMB Medienverlag, 2003, Nr. 11, S. 658-662.

[21] GERLOFF, S.: Analyse des Drehens duktiler Werkstoffe mit der Finite-Elemente-Methode. Dissertation TU Berlin, 1998.

[22] GERS, H.; BRUNGS, D.; NIJHOF, K.; BAUMGÄRTNER, F.; MÄURER, H.-J.: Pulvermetallurgische Fertigung von Bauteilen aus Aluminiumschaum. In: Beiträge vom 2. Symposium „Metallschäume“. Wien: Deutsche Gesellschaft für Metallkunde-Syposium Metallschäume, 2000, S. 403-406.

[23] GNAUCK, B.: Einstieg in die Kunststoffchemie. Hanser Fachbuch, 3. Auflage, 2001.

[24] GROTH, H.P.: Theoretische Ermittlung des Grenzformverhaltens von streck- und tiefziehbaren Schichtverbunden, Zürich, 1992 (Dr.-Ing.-Diss.).

[25] HAAG, E.: SPE Annual Technical Conference 40. 1982, 134-136.

[26] HADELER, TH.; WINTER, E.: Gabler Wirtschafts-Lexikon. 15. Auflage, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 2000.

[27] HÄNSEL, A.: Nichtisothermes Werkstoffmodell für die FE-Simultion von Blechumformprozessen mit metastabilen austenitischen Cr-Ni-Stählen, Zürich, 1998 (Dr.-Ing.-Diss.).

[28] HELLGARDT, S.; KÜHNE, C.; RÖHM, K-H.: Energie- und Stoffoptimierung in der betrieblichen Praxis der Lohnlackierung. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Würtemberg, Karlsruhe, 2002.

[29] HENN, H.; SINAMBARI, G.R.; FALLEN, M.: Ingenieurakustik. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/ Wiesbaden, 2001.

[30] HERTEL, H.: Leichtbau. Reprint, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.

[31] HIEMER, K.: „Abspecken“ mit Alu und Magnesium.
In: Problem und Lösung-20/2006,
Aus: Produktion: Die Wirtschaftszeitung für die deutsche Industrie.

[32] HIPKE, T.; WUNDERLICH, T.: Chancen und Hemmnisse für den Metallschaumeinsatz. In: Beiträge vom 2. Symposium „Metallschäume“. Wien: Deutsche Gesellschaft für Metallkunde-Syposium Metallschäume, 2000, S. 396-399.

[33] HIPKE, T.: Analyse Bewertung und Eignung von Aluminiumschäumen für die Werkzeugmaschinenkonstruktion. Zwickau, 2002, Verlag wissenschaftliche Scripten.

[34] HOHLER, V.; SCHNEIDER, E.; STILP, A. J.; THAM, R.: Length- and velocity reduction of high-density rods perforating mild steel and armor steel plates. 4th International Symposium on Ballistics, Monterey: 1978, American.

[35] HOHLER, V.; STILP, A. J.: Penetration of steel- and high-density rods in semiinfinite stell targets. Proceeding of the Third International Symposium on Ballistics, Karlsruhe: 1977, American Defense Preparedness Association.

[36] HORNBOGEN, E. Werkstoffe. 6.Auflage. Springer–Verlag. 1994.

[37] HORNBOGEN, E., WARLIMONT, H.: Metallkunde. 3.Auflage. Springer–Verlag. 1996.

[38] IRVINE, K.J.T.; GLADMAN, F.B.; PICKERING, J.: Die Festigkeit von austenitischen nichtrostenden Stählen. In: Journal of Iron.

[39] ISING, M.: System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen. IWF TU Berlin, Dissertation, 2001.

[40] IWAMOTO, T.; TSUTA, T.; TOMITA, Y.: International Journal of Mechanical. Sciences 40 (1995), Nr. 2-3, S.173, Elsevier Verlag.

[41] JACKISCH, U-V.: Mineralguss für den Maschinenbau: Herstellung und Eigenschaften eines modernen Werkstoffs für hochpräzise Maschinengestelle. Landsberg/ Lech: Verlag Moderne Industrie, 2002.

[42] JACOBS, O.: Werkstoffkunde. Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg, 2005.

[43] KELLY, A.; DAVIES, G. J.: The principles of the fiber reinforcement of metals. Metallurgical Reviwes, 1965.

[44] KHOKLOV, A.A.: Int. Polym. Sci. Technol. 4. 1977, S. 854-860.

[45] KIPPELEN, C.: SPRENGLER, T.; BRUNN, H. (U.A.): Ganzheitliche Bilanzierung und Bewertung von Produktionsprozessen – dargestellt am Beispiel von Reinigungssystemen für die Oberflächenbehandlung. In: Staub-Reinhaltung der Luft 55, Springer-Verlag, Berlin, 1995, S.361-366.

[46] KLEIN, B. FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode. 3.Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig/ Wiesbaden, 1999.

[47] KLEIN, B.: Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 5. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig/ Wiesbaden, 2001.

[48] KNAUER, B.; SALIER, H.-J.: Polymertechnik und Leichtbau – Konstruktionsprinzipien ohne Zeitgrenzen. Verlag Frankenschwelle KG, Hildburghausen, 2006.

[49] KNAUER, B.; SALIER, H.-J.: Polymertechnik und Leichtbau – Konstruktionsprinzipien ohne Zeitgrenzen. Verlag Frankenschwelle.

[50] KÖNIG, W.; LOWIN, R.; STEFFENS, K.; HANN, V.: Aspekte zur Technologie der Hochgeschwindigkeitszerspanung. Industrie Anzeiger Nr. ½ v. 07.01.1981/103. Jg.; S. 14-20.

[51] KONVICKA, J.: Führungsbahnabdeckungen bei hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Abschlussbericht, AiF, 2002.

[52] KORMI, K.; ETHERIDGE, R.A.; WEBB, D.C.: FEM-Simulation of the static and dynamic forming of circular plates. Journal Of Materials Processing Technology, Band 42 (1994) 4, S. 234-241.

[53] KRUSCHWITZ, L.: Investitionsrechnung. 9. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2003.

[54] KUSSMAUL, K.; KLENK, A.; SCHÜLE, M.; KLAMSER, H.: Development and validation of a simulation method für dynamic tensile and fracture tests using explicit and implicit finite elemente codes. 3rd International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, Strasbourg: 14-18 October 1991, S. 821-828.

[55] LANGBEIN, R.: Maßnahmen zur Steigerung der Sicherheit an Hochgeschwindigkeitsschleifmaschinen. Dissertation, RWTH Aachen, 1976.

[56] LEHMANN, W. R.: Arbeitssicherheit an Drehmaschinen. Dissertation TU Berlin, 1989.

[57] LEITLMEIER, D.; SCHULDENZUCKER, P.; FLANKL, H.: Zum Recycling von Kreislaufmaterial aus METCOMB-Aluminiumschaum. In: 3. Ranshofener Leichtmetalltage, Vom Werkstoff zum Bauteilsystem, Ranshofen, 24.-25.06.2004, 2004.

[58] LEITLMEIER, D.; DEGISCHER, H. P.; FLANKL, H. J.: Develpoment of a foaming Process for Particulate Aluminium Melts. Internet http://www.metalfoam.net/papers/leitlmeier02.pdf, 07.05.2004.

[59] LISS, J.; GOLDSMITH, W.: Plate perforation phenomena due to normal impact of blunt cylinders. Int. J. Impact Engng. Vol 2, pp. 37-64, 1984.

[60] LOOS, W.: Untersuchungen von Korrosionserscheinungen, ausgelöst durch duroplastische Formstoffe (Teil 1). Gehalt von Formstoffen an korrosiven Bestandteilen. Korrosive Wirkungen des Ammoniaks. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Volume 6, Issue 9, Date: September 1975, Pages: 314-324.

[61] MARCKS, P.: Geräuschmessung an Werkzeugmaschinen. IWF TU Berlin. Diplomarbeit, 2002.

[62] MENGES, G.; KIRBERG, K.-W.; ROSENBAUM, U.: Maschinenbauteile aus CFK. Sprechsaal, Vol.121, No. 6 (1988), S. 345-352.

[63] METTE, U.: Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung. Berlin: Technische Universität, Dissertation, 2000.

[64] METTE, U.: Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrums Berlin, Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, IPK Berlin, 2000.

[65] MEWES, D.; TRAPP, R.; WALLRICH, H.: Zeitschrift Materialprüfung 38 Carl Hanser Verlag, München, 1996.

[66] MEWES, D.; TRAPP, R.P.; WAHRLICH, H.J.: Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen. Werkstatttechnik 89, 1999, S. 469-472.

[67] MEWES, D.; TRAPP, R.P.; WAHRLICH, H.J.: Gestaltung und Dimensionierung von Sichtscheiben an Werkzeugmaschinen. Die BG Nr.3, 2001, 128-133.

[68] MICHAELI, W.; WEGENER, M.; BERGEMANN, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. München, Carl-Hanser-Verlag,1989.

[69] MICHAELI, W.; WEGENER, M.; U. A.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. München: Hanser, 1990.

[70] MIYOSHI, T.; ITOH, M.; AKIYAMA, S.; KITAHARA, A.: ALPORAS Aluminium Foam: Production Process, Properties, and Applications. In: Advanced Engineering Materials. 2000, Nr. 4, S. 179-183.

[71] MÖLLER, A.; HÄUSLEIN, A.; ROLF, A.: Öko-Controlling in Handelsunternehmen: Ein Leitfaden für das Stoffstrommanagement. Springer-Verlag, Berlin, 1997.

[72] N. N.: Alulight International GmbH: Prospekt Alulight, 2004.

[73] N. N.: Aluminium Merkblatt W 17- 1. Auflage, „Aluminiumschaum“ Aluminiumzentrale e. V., 1999.

[74] N.N.: Bundesumweltministerium; Umweltbundesamt (Hrsg.): Handbuch Umweltcontrolling. Verlag Vahlen, München,1995.

[75] N.N.: High Performance Bearbeitungszentren der Serie XS 211 / XS 321. Infobroschüre der Firma MAG Powertrain.

[76] N.N.: LEXAN MARGARD und LEXGARD. Datenmaterial der Fa GE PLASTICS GmbH, Rüsselsheim, 1996.

[77] N.N.: MAKROLON 281. Informationsbroschüre der Fa. Röhm GmbH, Darmstadt, 1997.

[78] N.N.: Materialinformation Polyaramid Polyparaphenylenterphthalamid. www.goodfellow.com, 2003.

[79] N.N.: Nichtrostende Stähle. Hrsg.: Edelstahl-Vereinigung e.V. mit Verein deutscher Eisenhüttenleute (VDEh). 2.Auflage. Verlag Stahleisen. 1989.

[80] N.N. Nickellegierte Einsatzstähle. Nickel-Informationsbüro GmbH. Düsseldorf. 1962.

[81] N.N.: Strommarkt: eine Aufsicht für mehr Wettbewerb. Institut der Deutschen Wirtschaft Köln, iwd nr. 34, 19. August 2004.

[82] N.N.: Transmission Case GM 6T. Projektinformation der MAG Powertrain.

[83] N.N.: Engineers Guide to Composite Materials. American Society of Metals, 1987.

[84] N.N.: Technisches Datenblatt. Twaron Products V.o.F.,

1999.

[85] N.N.: Technisches Datenblatt. Swiss-Composite Gewebe-Info, 2002.

[86] NEUBAUER, A.; STROPPE, H.; WOLF, H.: Hochgeschwindigkeitstechnologie der Metallbearbeitung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1988.

[87] NEUMANN, C.: Untersuchungen zur Alterung von Polycarbonatscheiben unter dem Einfluss von Kühlschmierstoff. Diplomarbeit, Berlin 2002.

[88] O´DONNELL, R. G.: Deformation Energy of KEVLAR backing plates for ceramic armours. Journal Of Materials Sciences Letters (1932) 12, S. 1485-1486.

[89] PAHL, G.; BEITZ, W.: Konstruktionslehre. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1997.

[90] PEREZ, E.: Analytisches und stationäres Modell für die Berechnung des Eindringvorganges von Hyperkinetischen Geschossen im Ziel. Technischer Bericht, Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis, 1975.

[91] PIWOWARSKY, E.: Moderne Längsgleitführungen im Maschinenbau. Tagungsband Mineralguss im Maschinenbau. Darmstadt, 16./17. September 1992, S. 72-103.

[92] PRITSCHOW, G.; SPUR, G.; WECK, M.: Technologien für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 2 Nr. 493. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.

[93] REIN, H.; DYBOWSKI, G.; UHLIG, CH.: Gestaltung der Schutzhauben und Maschinenumkleidungen bei Rundschleifmaschinen. In: Werkstatt und Betrieb 117 (1984), Nr. 4, S. 225-228.

[94] RIEWALD, P. G.; FOLGAR, F.; YANG, H. H.; SAUGHNESSY, W. F.: Leightweight helmet from a new aramid fibre. 23th International SAMPE Technical Conference, Kiamesha Lake, USA: 21-24 October 1991, S. 684-695.

[95] ROHLOFF, H.; ZASTERA, A.: Physikalische Eigenschaften gebräuchlicher Stähle. Verlag Stahleisen, 1996.

[96] RÖPENACK, A.: Ökologische Produktoptimierung mit Umweltmanagementsystemen und Ökobilanzen. In: Sietz, M. (Hrsg.): Umweltschutz, Produktqualität und Unternehmenserfolg – vom Öko-Audit zur Ökobilanz. Springer-Verlag, Berlin, 1998.

[97] SAHM, D.: Reaktionsharzbeton für Gestellbauteile spanender Werkzeugmaschinen. RWTH Aachen, Dissertation, 1987.

[98] SCHAMARI, U. Stahl bleibt der dominierende Werkstoff im Automobilbau. In: Problem und Lösung-20/2006, Aus: Produktion: Die Wirtschaftszeitung für die deutsche Industrie.

[99] SCHÄPER, S.: EU bestraft den Leichtbau. In: VDI-Nachrichten, Düsseldorf, 13.10.2000.

[100] SCHAPITZ, E.: Festigkeitslehre für den Leichtbau. 2. Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1963.

[101] SCHMIDT, E. Sicherheit und Zuverlässigkeit aus konstruktiver Sicht. Darmstadt, Technische Hochschule, Diss., 1981.

[102] SCHMIDT, W.: Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte. In: Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 1 Konstruktionstechnik/ Maschinenelemente, Nr. 369. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2004.

[103] SCHNEIDER, E.; STILP, A.J.; ROTT, M.; SCHWEHM, G.: Hypervelocity Impact Simulation Experiments on LDEF-Foils. International Journal of Impact Engineering 14 (1993), S.631-636.

[104] SCHNEIDER, E.; STILP, A.: Hochgeschwindigkeitsimpakt – Bedeutung für die Weltraum-Technologie. Freiburg/Brsg.: Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, 1990, S. 205-220.

[105] SCHRÖDER C.: ASF-Technologie des Audi TT gewinnt EuroCar-Body Award 2006. 28.11.06, In: all4engineers: Mehr Technik. Mehr Wissen http://www.all4engineers.com.

[106] SCHRÖDER, CH. Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich. In: IW-Trends – Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der Deutschen Wirtschaft Köln, 33. Jahrgang, Heft 3/2006.

[107] SCHUBERT, E.: Untersuchungen zum Leichtbau mit Hilfe lasergestützter Mischbauweisen. Strahltechnik Band 23, BIAS Verlag, Bremen, 2003.

[108] SCHULTZ, H.: Leichtbauvorschubeinheiten an Werkzeugmaschinen. In: Ind.-Anz. 69 (1988), S. 35-36.

[109] SCHULTZ, H.: Untersuchungen zum Leichtbau mit Hilfe lasergestützter Mischbauweisen. Strahltechnik Band 23, BIAS Verlag, Bremen, 2003.

[110] SCHULZ, H.: Die Forschungsaktivitäten des PTW auf dem Gebiet der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. München: Carl Hanser Verlag, 1996.

[111] SCHULZ, H.; HUERKAMP, W.: Sicherheitsanforderungen an Werkzeuge für das Hochgeschwindigkeitsfräsen. In: Maschinenmarkt 104 (1998) 5, S. 22-25.

[112] SEGAL, C.-L.: High-Performance organic fibers: Fabrics and composites for sift and hard armor applications. 23th International SAMPE Technical Conference, Kiamesha Lake, USA: 21-24 October 1991, S. 651-660.

[113] TANOUE, S.; UTRACKI, L.A. ; GARCIA-REJON, A.; TATIBOUËT, J.; KAMAL, M.R.: Melt compounding of different grades polystyrene with organoclay. Part 3: Mechanical properties Polymer Engineering & Science Volume 45, Issue 6, Date: June 2005, Pages: 827-837.

[114] SPIEGELHALDER, U.: Zur Materialermüdung infolge Stegatmung. Universität Stuttgart, Diss, 2000.

[115] SPUR, G.; BOLD, J.: Arbeits- und Gesundheitsschutz bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Teilprojekt: Maschinenkapselungen. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsprojekt ARGUS. Berlin: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin 1999.

[116] SPUR, G.; KRAUSE, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. München, Wien: Hanser-Verlag, 1999.

[117] STEEGMÜLLER, R.; HÄUSSER, G.; STELLBRINK, K.; BUSSE, G.: B1 Einkomponentiger Faserverbund als Gradientenwerkstoff. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Tagung „Faserverbundwerkstoffe und -bauweisen in der Luft- und Raumfahrt“, 27.-28. November 1996, Daimler-Benz Aerospace, Ottobrunn.

[118] TOMITA, Y.; IWAMOTO, T.: Journal of Material Science 37 (1995), S.1295 Springer-Verlag.

[119] TOMITA, Y.; OCINDO, A.; SASAYAMA, T.: International Journal of Mechanical Sciences 32 (1990 Elsevier-Verlag), S. 613.

[120] TRINKS, W.; GEIGER, W.; KOLLMANNSPERGER, H.: Grenzen der Schutzwirkung von Panzerwerkstoffen gegen Hohlladungen. Jahrbuch der Wehrtechnik 6 (1971), S. 46-50.

[121] UHLMANN, E.; BOLD, J.: Arbeitssicherheit und Maschinenschutz am IWF Berlin. In: Tagungsband Fachgespräch Arbeitssicherheit, Eckart Uhlmann (Hrsg.). IWF Berlin, 2002.

[122] UHLMANN, E.; ISING, M.: Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen. In: Materialprüfung 41 (1999), Nr. 6, S. 252-257

[123] UHLMANN, E.; WITTNER, M.: Developement from Impact Tests to the Simulation of Damage Events of Grinding Wheels. Annals of the German Academic Society for Production Engineering. X/1, Volume X, Issue 1, S. 147-150. Berlin, 2003.

[124] UHLMANN, E.; KARRASCH,I.; WITTNER, M.: Entwicklung und Konstruktion einer Leichtbaumaschinentür zur Steigerung der Produktion von Werkzeugmaschinen. In: Tagungsband: Berliner Runde 2006.

[125] UHLMANN, E.: HSC-Fräsen. VDI Seminar Handbuch 33-04-02. Düsseldorf: VDI-Bildungswerk 1999

[126] VOLLMER, TH.; SCHAECKENBACH, T.; RAITH, A.: HSC-Werkzeugmaschinen in der Praxis: Erfahrungen aus Anwenderbetrieben. Kassel: Institut für Arbeitswissenschaften, 1998.

[127] WARNECKE, H.-J; BULLINGER, H.-J; HICHERT, R.; VOEGELE, A.: Wirtschaftlichkeitsrechung für Ingenieure. Carl Hanser Verlag München, Wien, 2003.

[128] WECK, M.; MIESSEN, W.; LANGBEIN, R.: Sicherheit beim Hochgeschwindigkeitsschleifen. In: Die Berufsgenossenschaft (1975), Nr. 5, S. 177-182.

[129] WECK, M.; MERTENS, R.; SCHUBERT, I.: Sicherheit an Großmaschinen. VDW-Forschungsbericht 0155/1. Frankfurt/Main: Verein deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V.;1993.

[130] WEINERT, K.: Zerspanen im modernen Produktionsprozess. Begleitband zum Fachgespräch. Universität Dortmund 2001.

[131] WIEDEMANN, J.: Leichtbau 1: Elemente. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996.

[132] WIEDEMANN, J. Leichtbau 2: Konstruktion. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996.

[133] WIENANDES, H. A.; MÜLLER, H.; WEIHRAUCH, G.: Untersuchungen über die Eindringtiefe von Stahlstabgeschossen in Einplattenziele. Technischer Bericht, Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis, 1975.

[134] WITTNER, M.: Beurteilung der Eignung hochaufprallfester Werkstoffe bzw. Werkstoffverbünde für den Maschinenschutz unter den Gesichtspunkten des Leichtbaus und der Nachrüsteignung. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens FWF 0211, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin, 2005.

[135] WITTNER, M.: Sicherheit zum Nachrüsten. In: Werkstatt und Betrieb 9/06 S. 42-45. Carl Hanser Verlag. München, 2006.

[136] WITTNER, M.: Sicherheit von Werkzeugmaschinenumhausungen und praxisgerechte Nachrüstmöglichkeiten. In: Futur 2/2006. Berlin, 2006

[137] WITTNER, M.: Neue Werkstoffe für den Maschinenschutz. In: Futur. Berlin, 2006

[138] YANG, H. H.: Kevlar Aramid Fiber. Chichester, N. Y., Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons Ltd., 1993

Normen

N1	DIN EN ISO 12100-1	Sicherheit von Maschinen - Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodologie. Beuth Verlag Berlin, 2003.
N2	DIN EN 13218	Werkzeugmaschinen Sicherheit – Ortsfeste Schleifmaschinen. Beuth Verlag Berlin, 2002.
N3	DIN EN 12415	Sicherheit von Werkzeugmaschinen – kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren. Beuth Verlag Berlin, 2001.
N4	DIN EN 12417	Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Bearbeitungszentren. Beuth Verlag Berlin, 2007.
N5	DIN EN 1063	Glas im Bauwesen - Sicherheitsscherverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung für den Widerstand gegen Beschuss. Beuth Verlag Berlin, 1999.
N6	DIN EN 10130	Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Flachumformen. Beuth Verlag Berlin, 1991.
N7	DIN EN 10025	Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen. Beuth Verlag Berlin, 1994.
N8	DIN EN ISO 14040	Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag Berlin, 2006.
N9	DIN EN ISO 14041	Umweltmanagement - Ökobilanz - Anwendungsbeispiele zu ISO 14041 zur Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie zur Sachbilanz. Beuth Verlag Berlin, 2001.
N10	DIN EN 10002-1	Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Beuth Verlag Berlin, 2001.
N12	DIN EN ISO 9614-1	Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen - Teil 1: Messungen an diskreten Punkten. Beuth Verlag Berlin, 1995.

N13	DIN EN ISO 3744	Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene. Beuth Verlag Berlin, 1995.
N14	DIN EN ISO 20 140-2	Akustik; Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 2: Angaben von Genauigkeitsanforderungen. Beuth Verlag Berlin, 1993.
N15	DIN EN ISO 717-1	Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung. Beuth Verlag Berlin, 2006.
N16	DIN EN ISO 140-3	Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen. Beuth Verlag Berlin, 2004.
N17	DIN EN ISO 13849-1	Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. Beuth Verlag Berlin, 2007.
N18	DIN EN 13128	Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Fräsmaschinen (einschließlich Bohrmaschinen). Beuth Verlag Berlin, 2007.
N19	DIN EN 12478	Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Große numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren. Beuth Verlag Berlin, 2001.
N20	DIN EN 12840	Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Handgesteuerte Drehmaschinen mit oder ohne Automatiksteuerung. Beuth Verlag Berlin, 2001.
N21	DIN EN 13788	Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Mehrspindel-Drehautomaten.
N22	DIN EN 14070	Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Transfer- und Einzweck- oder Sondermaschinen. Beuth Verlag Berlin, 2004.

12 Anhang

A Aufpralluntersuchungen

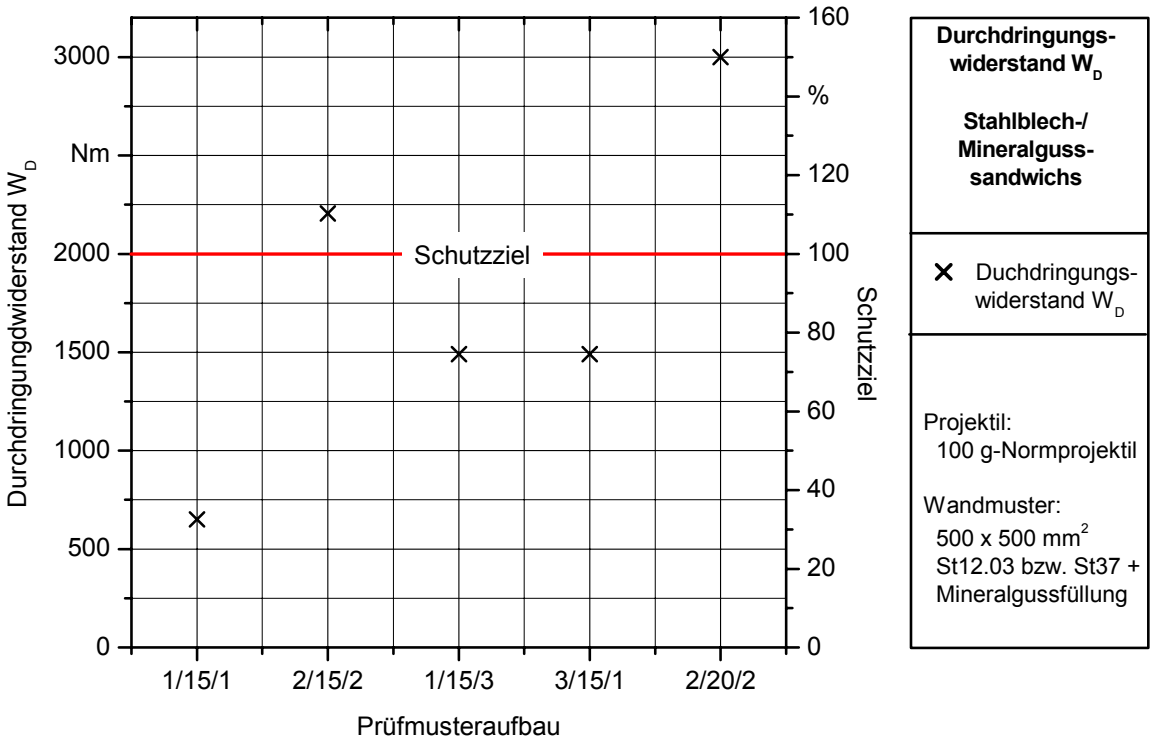


Bild 12-1: Prüfergebnisse des Mineralgusssandwichs mit Variation der Deckblechdicke und der Mineralgussdicke

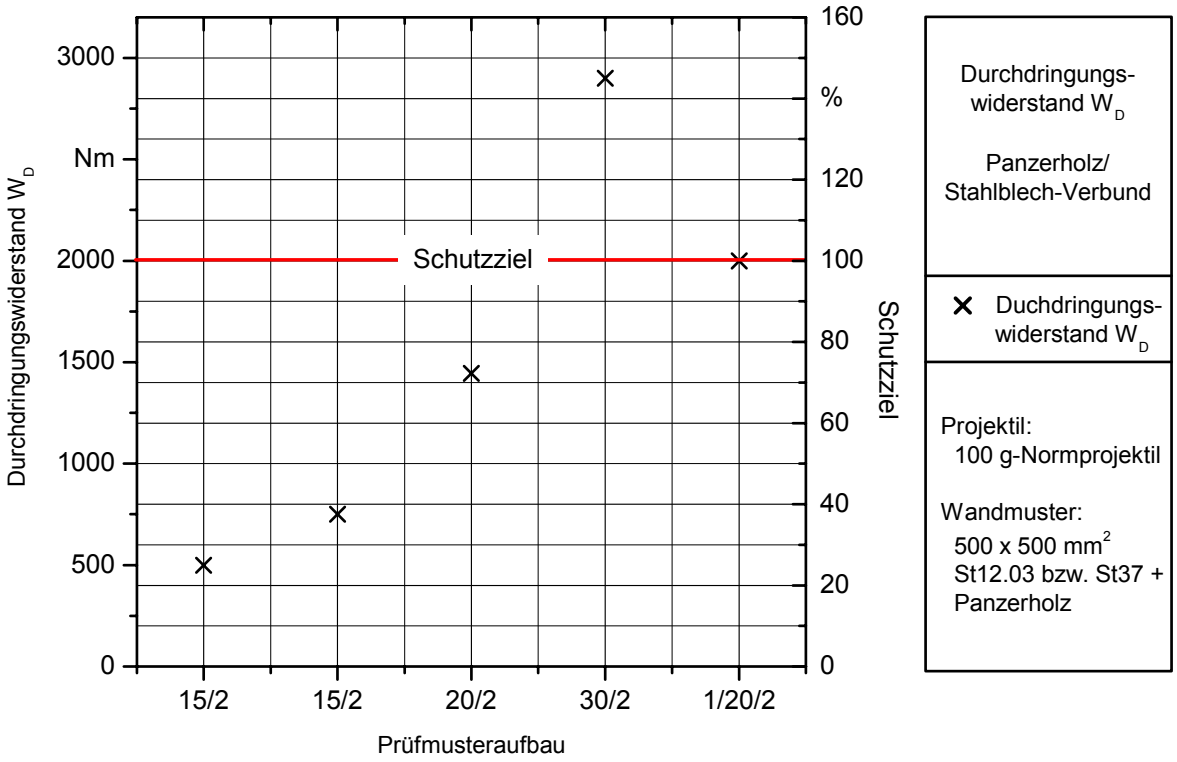


Bild 12-2: Prüfergebnisse der Panzerholzverbünde und des Panzerholzsandwichs mit Variation der Deckblechdicke und der Dicke des Panzerholzes

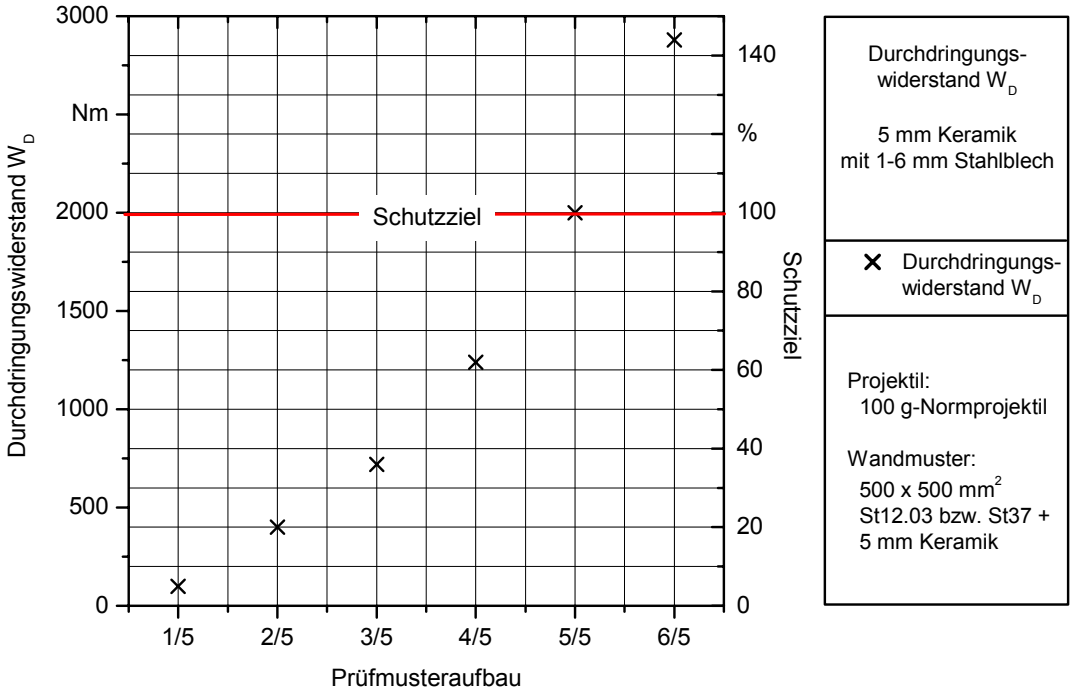


Bild 12-3: Prüfergebnisse des Keramik/ Stahl-Verbundes mit Variation der Deckblechdicke

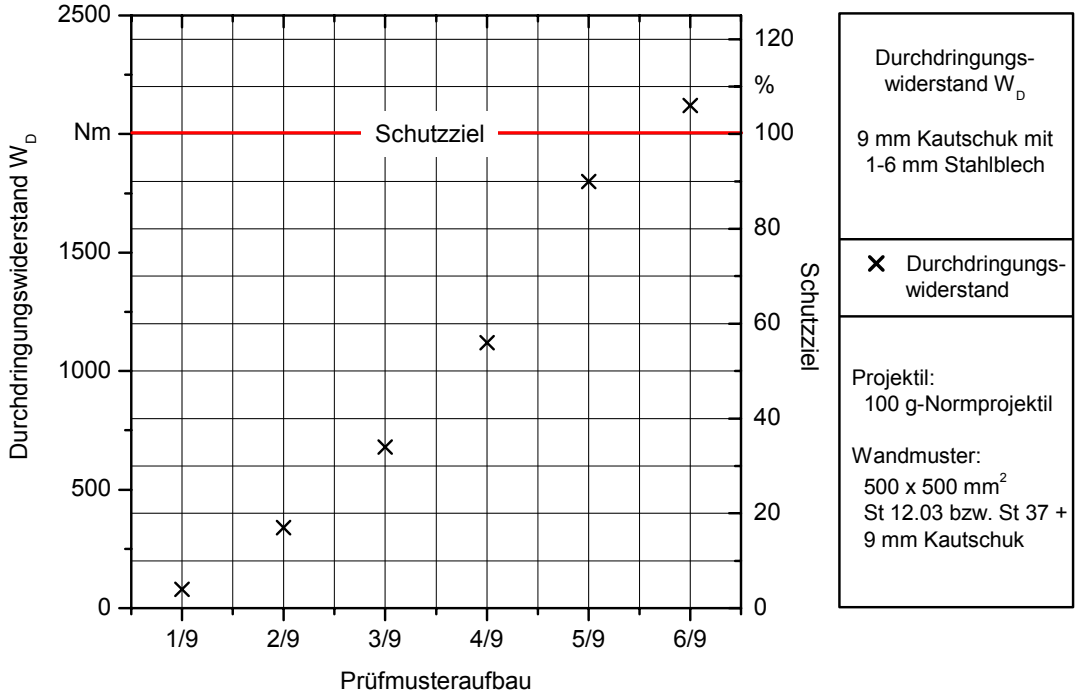


Bild 12-4: Prüfergebnisse des Kautschuk/ Stahl-Verbundes mit Variation der Deckblechdicke

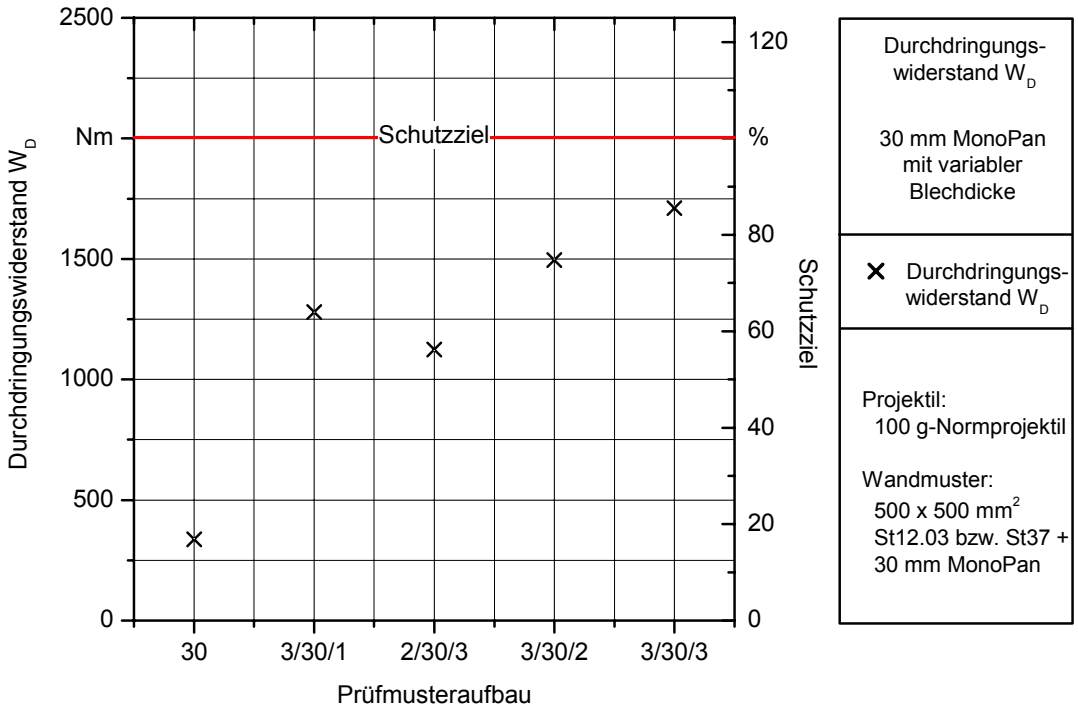


Bild 12-5: Prüfergebnisse des MonoPans und der MonoPansandwichs mit Variation der Deckblechdicke

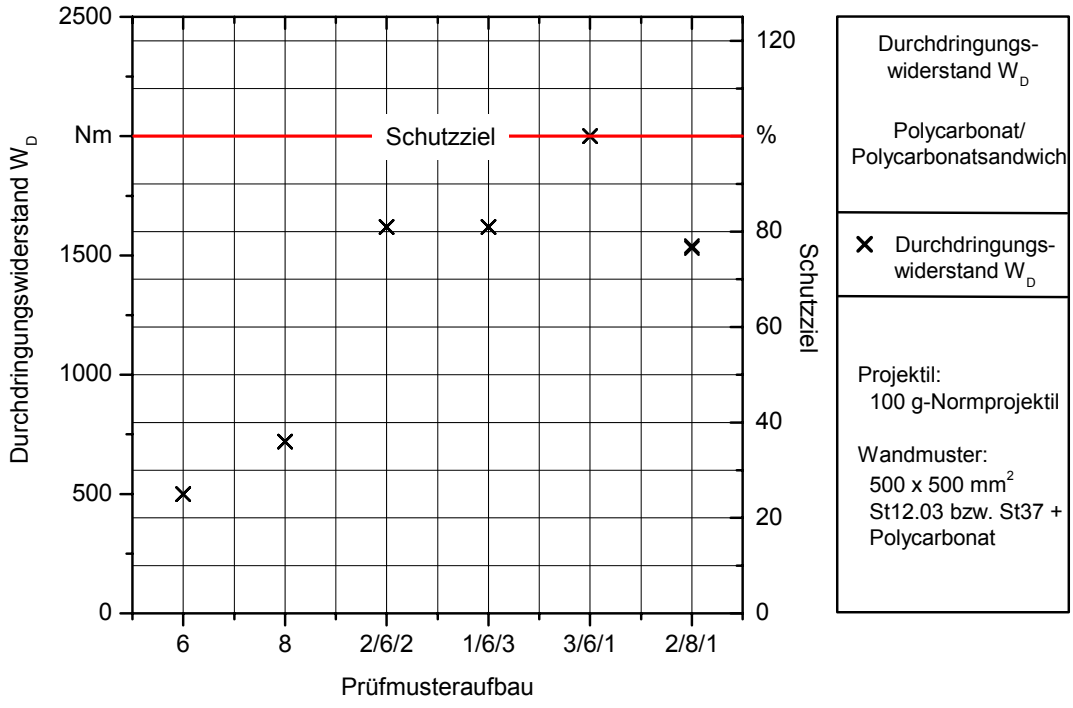


Bild 12-6: Prüfergebnisse Polycarbonat und der Polycarbonatsandwichs mit Variation der Deckblechdicke und der Polycarbonatdicke

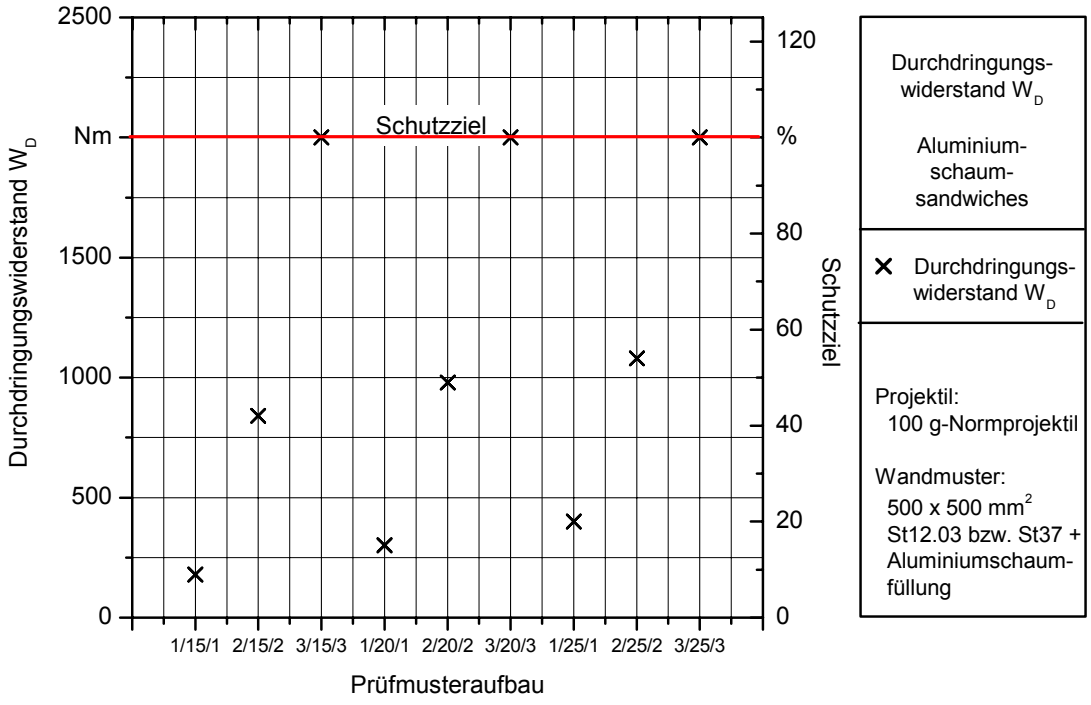


Bild 12-7: Prüfergebnisse der Aluminiumschaumsandwichs mit Variation der Deckblechdicke

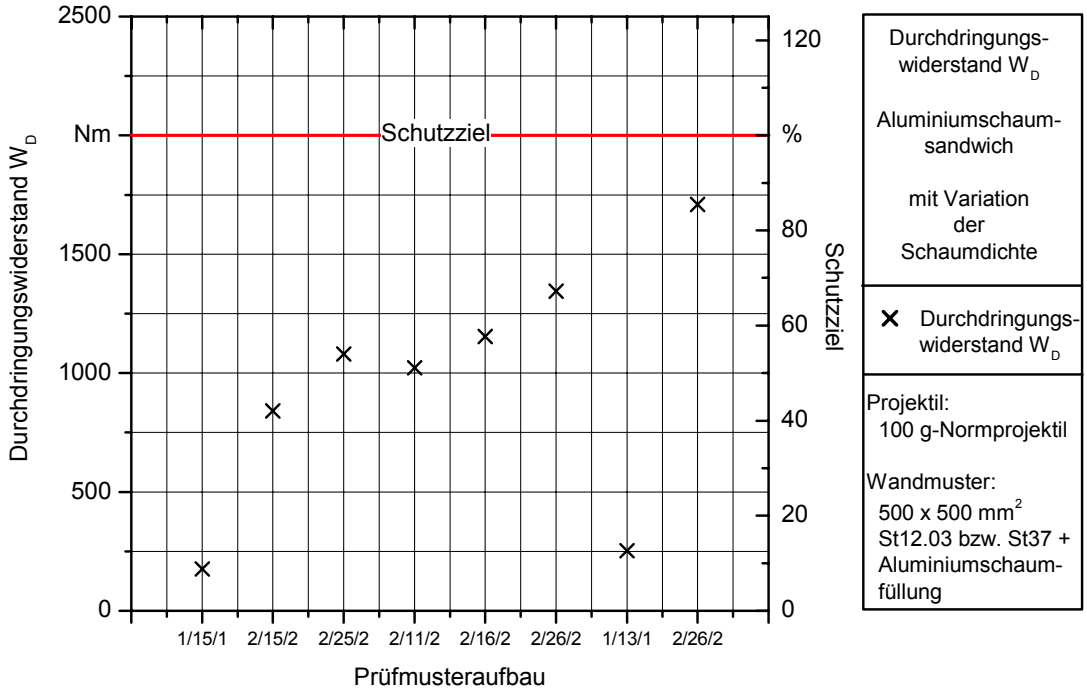


Bild 12-8: Prüfergebnisse der Aluminiumschaumsandwichs mit Variation der Deckblechdicke, der Aluminiumschaumdicke und der Aluminium-schaumdichte

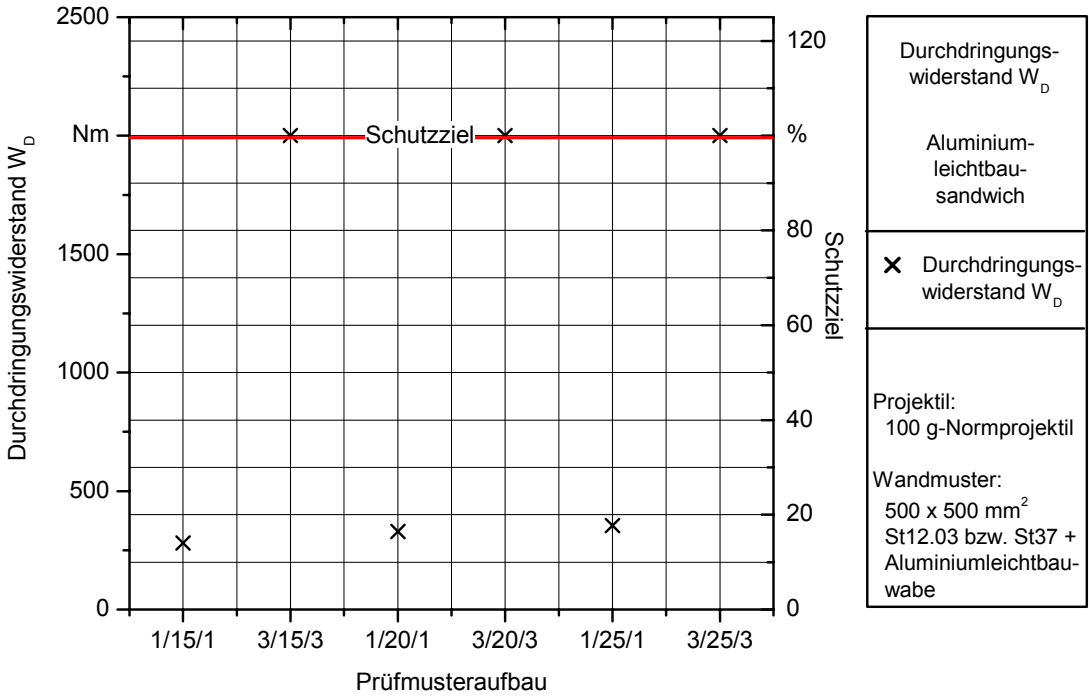


Bild 12-9: Prüfergebnisse des Aluminiumleichtbauwabensandwichs mit Variation der Deckblechdicke und der Wabendicke

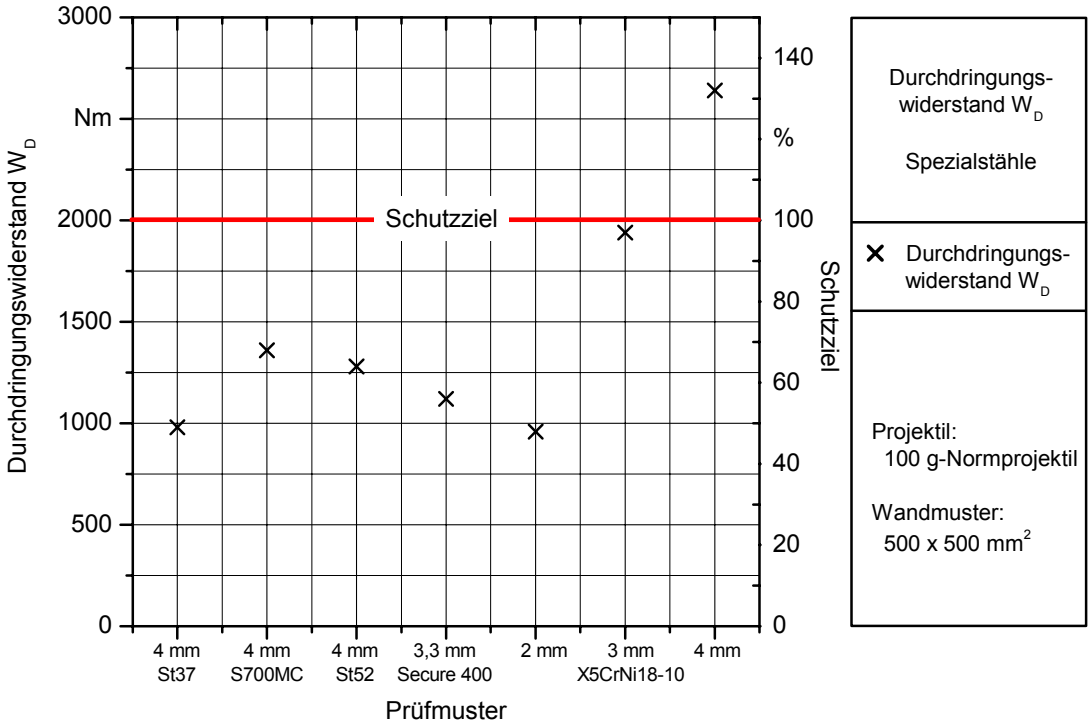


Bild 12-10: Prüfergebnisse Spezialstähle mit Variation der Dicke

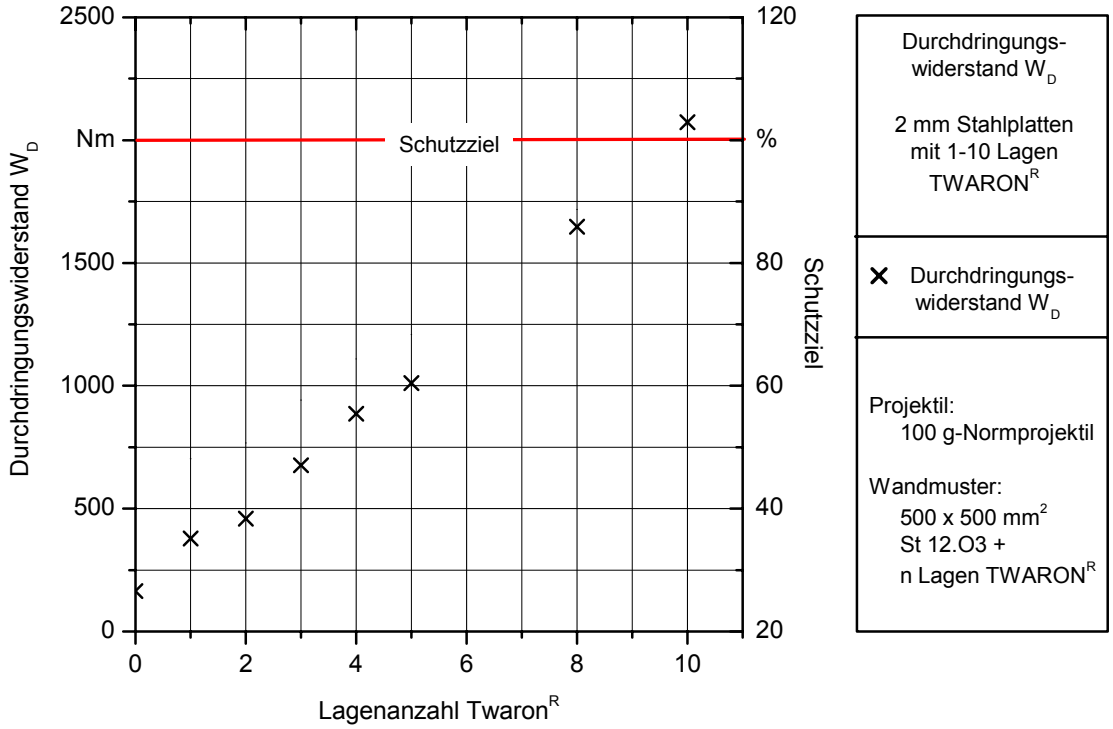


Bild 12-11: Prüfergebnisse des Aramidfaser/ Stahl-Verbundes mit Variation der Lagenzahl des Twaronlaminates

B Zusammengestellte Werte für die Ermittlung der Leichtbaukennzahlen

- *Leichbaukennzahlen für Bearbeitungszentren*

Werkstoff	m [Kg/m²]	$W_{D,krit.}$ aus Versuch [Nm]	$LBK_{IF} = W_{D,krit.}/m$
Nirosta (X5CrNi18-10)	31,60	2645	83,70
PC (8mm)	33,15	720	21,72
PC (6mm)	38,60	2000	51,81
Aramidfaser/Stahl-Verbund	23,08	2050	88,82
Mineralguss	64,40	2205	34,24
Panzerholz/Stahl-Sandwich	50,52	2000	39,59
Keramik/Stahl-Verbund	58,24	2000	34,34
Kautschuk/Stahl-Verbund	54,48	2121	38,93
Monopan	40,48	2000	49,41
Aluminiumschaum-Sandwich	50,72	2000	39,43
Aluminiumleichtbau-Sandwich	51,70	2000	38,68

Tabelle 12-1: Leichtbaukennzahlen für Bearbeitungszentren

- *Leichbaukennzahlen für Drehmaschinen und Drehzentren*

Werkstoff	m [Kg/m²]	$W_{D,krit.}$ aus Versuch [Nm]	$LBK_{IF} = W_{D,krit.}/m$
AlMg3	39,25	8000	203,82
St37	34,76	8000	230,15
St52	26,07	5281	202,57
Secure400	31,60	7703	243,77
S700Mc	31,60	8000	253,16
Nirosta (X5CrNi18-10)	33,15	3500	105,58
PC	40,30	8000	198,51
Kautschuk/Stahl-Verbund	65,12	8000	122,85

Tabelle 12-2: Leichtbaukennzahlen für Drehmaschinen und Drehzentren

C Fragebogen zur Neuentwicklung einer Leichtbaumaschinentür

- *Fragebogen unbeantwortet*

Unternehmen / Abteilung: _____

Name: _____

Tel. / E-Mail: _____

allgemein		
Bedarf / Interesse an schnellen Türen		☐ gering ☐ mittel ☐ hoch
Anteil von schnellen Türen am Gesambedarf		ca. %
Abmessungen der Türöffnung		B x H: mm x mm
Verfahrwege		mm
Masse eines Türflügels bisher		ca. kg
Anzahl der Flügel		☐ 1 Flügel ☐ 2 Flügel in 1 Richtung ☐ 2 Flügel in 2 Richtungen ☐ je 2 Flügel in 2 Richtungen
Fenster erforderlich		☐ ja, ggf. Abmessung: ca. mm x mm ☐ nein
IST	Öffnungs- / Schließzeit	sek. sek.
FORDERUNG	Öffnungs- / Schließzeit	sek. sek.
WUNSCH	Öffnungs- / Schließzeit	sek. sek.
Zwischenstopp für reduziertes Öffnen		Ist notwendig an Positionen Ist wünschenswert an Positionen
Lastzyklus Lebensdauer Wartungsintervall		alle min Öffnen / Schließen Jahre - schichtig pro Jahr, max Stunden Wartung
Gefährdung durch Fertigungsverfahren		☐ Drehen ☐ Fräsen ☐ Schleifen
technisch		
Spannungsvarianten		☐ 400 V / 50 Hz ☐ 460 V / 60 Hz ☐ Weitere?
Schnittstellen zur Steuerung		
Schutzart		IP 54 ausreichend? ☐ ja ☐ nein anderes gefordert? ☐ ja ☐ nein wenn ja, welche:
wirtschaftlich		
Preisvorstellung für komplette Tür incl. - Antrieb, Führung, Türblatt, Sicherheitsschalter - falls erforderlich: Schaltleiste kpl. mit Leitungsführung - falls erforderlich: Stoßdämpfer		 ca. € ca. € ca. €
Bedarf / Jahr Losgröße		Einheiten Einheiten
Kostenanteil der Maschinenkapselung		ca. % der Gesamtmaschine

Tabelle 12-3: Fragebogen zur Erfassung des Bedarfs von Leichtbaumaschinentüren

- *Beantworteter Fragebogen von Ex-Cell-O*

Unternehmen / Abteilung: Ex-Cell-O

Name:

Tel. / E-Mail:

allgemein		
Bedarf / Interesse an schnellen Türen		☐ gering ☐ mittel ☒ hoch
Anteil von schnellen Türen am Gesambedarf		ca. %
Abmessungen der Türöffnung		B x H: 1000mm x 1000mm
Verfahrwege		900 mm
Masse eines Türflügels bisher		ca. 50 kg
Anzahl der Flügel		☒ 1 Flügel ☐ 2 Flügel in 1 Richtung ☐ 2 Flügel in 2 Richtungen ☐ je 2 Flügel in 2 Richtungen
Fenster erforderlich		☒ ja, ggf. Abmessung: ca. 600 mm x 600 mm ☐ nein
IST	Öffnungs- / Schließzeit	2 sek. 2 sek.
FORDERUNG	Öffnungs- / Schließzeit	1,5 sek. 1,5 sek.
WUNSCH	Öffnungs- / Schließzeit	1,5 sek. 1,5 sek.
Zwischenstopp für reduziertes Öffnen		Ist notwendig an Positionen Ist wünschenswert an Positionen
Lastzyklus Lebensdauer Wartungsintervall		alle 3 min Öffnen / Schließen 5Jahre 2 - schichtig 1 pro Jahr, max 0,3 Stunden Wartung
Gefährdung durch Fertigungsverfahren		☐ Drehen ☒ Fräsen ☐ Schleifen
technisch		
Spannungsvarianten		☒ 400 V / 50 Hz ☒ 460 V / 60 Hz ☒ Weitere? 350V / 50Hz
Schnittstellen zur Steuerung		E/A- Schnittstelle
Schutzart		IP 54 ausreichend? ☐ ja ☒ nein anderes gefordert? ☒ ja ☐ nein wenn ja, welche: IP 67
wirtschaftlich		
Preisvorstellung für komplette Tür incl. - Antrieb, Führung, Türblatt, Sicherheitsschalter - falls erforderlich: Schaltleiste kpl. mit Leitungsführung - falls erforderlich: Stoßdämpfer		 ca. € ca. € ca. €
Bedarf / Jahr Losgröße		10-20 Einheiten 5-6 pro Woche Einheiten
Kostenanteil der Maschinenkapselung		ca. 10 % der Gesamtmaschine

Tabelle 12-4: Beantworteter Fragebogen der Fa. Ex-Cell-O zum Bedarf von Leichtbaumaschinentüren

D Auswertediagramm zur Bestimmung des Bewerteten Schalldämmmaßes

- bewertetes Luftschalldämmmaßes für St52

Schalldämm-Maß ISO 140-3:1995

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber IWF

Hersteller: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Prüfgegenstand eingebaut von: IWF
Produktbezeichnung: Probe 10

Messung nach: ISO 140-3:1995 Auswertung nach: ISO 717-1:1996

Flächenbezogene Masse: kg/m² Prüffläche: 0,27 m²

Temperatur [°C]: 16 Feuchtigkeit [%]: 45

Kennz. der Prüfräume: Prüfraum / Prüfraum
Senderaum Volumen: 74,6 m³
Empfangsraum Volumen: 53,0 m³
Prüfdatum: 29.06.2004

Bewertetes Schalldämm-Maß $R_w(C,C_{tr})$ = 24,4 (-1,0;-0,5) dB

Summe der ungünstigen Abweichungen: 31,7 dB
Maximale ungünstige Abweichung: 7,4 dB bei 3150 Hz

$C_{5o\text{-}315o}$: -1,0 dB $C_{5o\text{-}5ooo}$: -0,8 dB $C_{1oo\text{-}5ooo}$: -0,8 dB
$C_{tr5o\text{-}315o}$:: -0,8 dB $C_{tr5o\text{-}5ooo}$: -0,9 dB $C_{tr1oo\text{-}5ooo}$: -0,7 dB

Frequenz [Hz]	R [dB]	L1 [dB]	L2 [dB]	T [s]	Korr. [dB]	u.Abw. [dB]	
50	16,7	88,3	61,5	3,09	-10,1	-,-	
63	19,4	85,9	54,5	1,99	-12,0	-,-	
80	17,2	89,8	59,8	1,66	-12,8	-,-	
100	24,1	93,4	56,8	1,76	-12,5	-,-	
125	30,5	97,9	54,3	1,53	-13,1	-,-	
160	29,8	99,1	54,7	1,10	-14,6	-,-	
200	27,1	99,6	57,9	1,08	-14,6	-,-	
250	24,7	98,2	57,5	0,78	-16,0	-,-	
315	23,0	96,7	56,8	0,64	-16,9	-,-	
400	23,4	96,2	56,1	0,67	-16,7	0,0	
500	22,1	94,6	57,7	1,04	-14,8	2,3	
630	22,2	93,7	56,4	0,98	-15,1	3,2	
800	23,1	93,3	55,7	1,12	-14,5	3,3	
1000	23,6	93,2	55,0	1,08	-14,6	3,8	
1250	26,8	95,8	55,0	1,25	-14,0	1,6	
1600	27,9	95,4	53,2	1,16	-14,3	0,5	
2000	26,0	91,9	51,8	1,21	-14,1	2,4	
2500	21,2	96,8	61,0	1,08	-14,6	7,2	
3150	21,0	93,6	57,7	1,01	-14,9	7,4	
4000	23,7	88,5	49,5	0,92	-15,3	-,-	
5000	25,3	77,7	36,8	0,87	-15,6	-,-	

Inst. für Techn. Akustik TU Berlin

Berlin, 06.07.2004 Tabelle 1 zum Prüfbericht Nr. IWF2-10

Tabelle 12-5: bewertetes Luftschalldämmmaßes für St52

Schalldämm-Maß ISO 140-3:1995

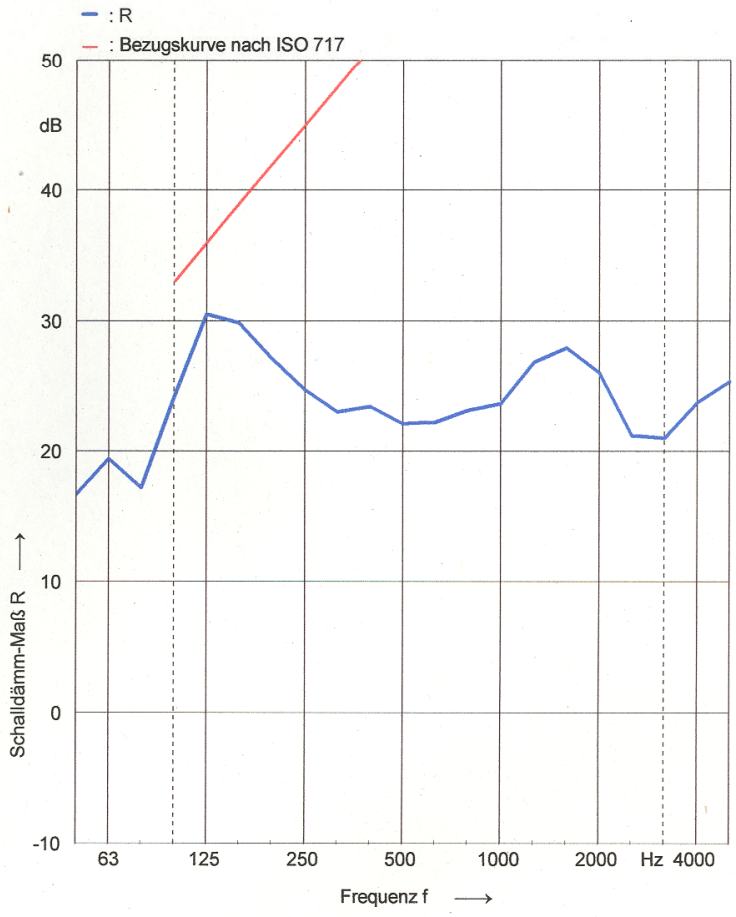
Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Hersteller: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Auftraggeber: IWF
Prüfgegenstand eingebaut von: IWF
Produktbezeichnung: Probe 10
Kennz. der Prüfräume: Prüfraum / Prüfraum
Prüfdatum: 29.06.2004

Aufbau des Prüfgegenstandes:
2-Schalen-Holzplattenkonstruktion im Fensterprüfstand eingesetzt. Lichte Weite 1250mm x 1500mm.
Aufbau: 16mm Holzspanplatte mit 1mm Blech belegt / 90mm Hohlraum / 88mm (4 x 22mm) Spanplatten.
Ausschnitt 520mm x 520mm. Der Hohlraum ist mit Mineralfaserplatten bedämpft.

Prüffläche: 0,27 m²
Flächenbezogene Masse: kg/m²
Temperatur [°C]: 16
Feuchtigkeit [%]: 45
Senderaum Volumen: 74,6 m³
Empfangsraum Volumen: 53,0 m³

Frequenz [Hz]	R Terz [dB]
50	16,7
63	19,4
80	17,2
100	24,1
125	30,5
160	29,8
200	27,1
250	24,7
315	23,0
400	23,4
500	22,1
630	22,2
800	23,1
1000	23,6
1250	26,8
1600	27,9
2000	26,0
2500	21,2
3150	21,0
4000	23,7
5000	25,3



Bewertung nach ISO 717-1
$R_w(C,C_{tr}) = 24,4\ (-1,0;-0,5)$ dB

$C_{5o\text{-}315o}$: -1,0 dB
$C_{5o\text{-}5ooo}$: -0,8 dB
$C_{1oo\text{-}5ooo}$: -0,8 dB
$C_{tr5o\text{-}315o}$: -0,8 dB
$C_{tr5o\text{-}5ooo}$: -0,9 dB
$C_{tr1oo\text{-}5ooo}$: -0,7 dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

Inst. für Techn. Akustik TU Berlin

Auftragsnummer: IWF2-10
Berlin, 06.07.2004
Unterschrift:

Bild 12-12: Grafische Darstellung des bewerteten Schalldämmmaßes des Ausgangsmaterials St52

- bewertetes Luftschalldämmmaßes für das optimierte Aluminiumschaumsandwich

Schalldämm-Maß ISO 140-3:1995

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber IWF

Hersteller: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Prüfgegenstand eingebaut von: IWF
Produktbezeichnung: Probe 20

Messung nach: ISO 140-3:1995 Auswertung nach: ISO 717-1:1996

Flächenbezogene Masse: kg/m² Prüffläche: 0,27 m²

Temperatur [°C]: 16 Feuchtigkeit [%]: 49

Kennz. der Prüfräume: Prüfraum / Prüfraum
Senderaum Volumen: 74,6 m³
Empfangsraum Volumen: 53,0 m³
Prüfdatum: 30.06.2004

Bewertetes Schalldämm-Maß $R_w(C,C_{tr})$ = 40,3 (-1,1;-3,6) dB

Summe der ungünstigen Abweichungen: 31,3 dB
Maximale ungünstige Abweichung: 5,0 dB bei 630 Hz

$C_{5o-315o}$: -1,5 dB $C_{5o-5ooo}$: -0,7 dB $C_{1oo-5ooo}$: -0,3 dB
$C_{tr5o-315o}$:: -6,7 dB $C_{tr5o-5ooo}$: -6,7 dB $C_{tr1oo-5ooo}$: -3,6 dB

Frequenz [Hz]	R [dB]	L1 [dB]	L2 [dB]	T [s]	Korr. [dB]	u.Abw. [dB]	
50	17,3	88,3	60,9	3,09	-10,1	-,-	
63	21,3	85,9	52,6	1,99	-12,0	-,-	
80	18,1	89,8	58,9	1,66	-12,8	-,-	
100	22,8	93,4	58,1	1,76	-12,5	-,-	
125	30,2	97,9	54,6	1,53	-13,1	-,-	
160	35,0	99,1	49,5	1,10	-14,6	-,-	
200	36,0	99,6	49,0	1,08	-14,6	-,-	
250	34,7	98,2	47,5	0,78	-16,0	-,-	
315	33,9	96,7	45,9	0,64	-16,9	2,4	
400	36,2	96,2	43,3	0,67	-16,7	3,1	
500	37,5	94,6	42,3	1,04	-14,8	2,8	
630	36,3	93,7	42,3	0,98	-15,1	5,0	
800	37,3	93,3	41,5	1,12	-14,5	5,0	
1000	38,7	93,2	39,9	1,08	-14,6	4,6	
1250	40,4	95,8	41,4	1,25	-14,0	3,9	
1600	41,5	95,4	39,6	1,16	-14,3	2,8	
2000	43,1	91,9	34,7	1,21	-14,1	1,2	
2500	43,8	96,8	38,4	1,08	-14,6	0,5	
3150	44,7	93,6	34,0	1,01	-14,9	-,-	
4000	45,6	88,5	27,6	0,92	-15,3	-,-	
5000	46,0	77,7	16,1	0,87	-15,6	-,-	

Inst. für Techn. Akustik TU Berlin

Berlin, 06.07.2004 Tabelle 1 zum Prüfbericht Nr. IWF2-20

Tabelle 12-6: bewertetes Luftschalldämmmaßes des Aluminiumschaumsandwich

Schalldämm-Maß ISO 140-3:1995

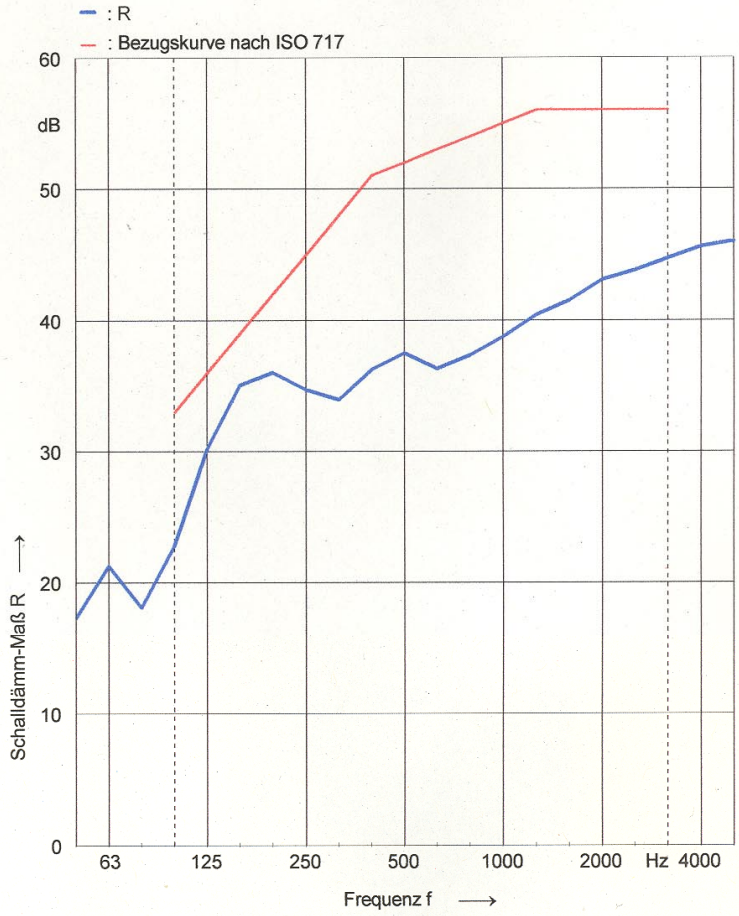
Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Hersteller: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Auftraggeber: IWF
Prüfgegenstand eingebaut von: IWF
Aufbau des Prüfgegenstandes:
2-Schalen-Holzplattenkonstruktion im Fensterprüfstand eingesetzt. Lichte Weite 1250mm x 1500mm.
Aufbau: 16mm Holzspanplatte mit 1mm Blech belegt / 90mm Hohlraum / 88mm (4 x 22mm) Spanplatten.
Ausschnitt 520mm x 520mm. Der Hohlraum ist mit Mineralfaserplatten bedämpft.

Produktbezeichnung: Probe 20
Kennz. der Prüfräume: Prüfraum / Prüfraum
Prüfdatum: 30.06.2004

Prüffläche: 0,27 m²
Flächenbezogene Masse: kg/m²
Temperatur [°C]: 16
Feuchtigkeit [%]: 49
Senderaum Volumen: 74,6 m³
Empfangsraum Volumen: 53,0 m³

Frequenz [Hz]	R Terz [dB]
50	17,3
63	21,3
80	18,1
100	22,8
125	30,2
160	35,0
200	36,0
250	34,7
315	33,9
400	36,2
500	37,5
630	36,3
800	37,3
1000	38,7
1250	40,4
1600	41,5
2000	43,1
2500	43,8
3150	44,7
4000	45,6
5000	46,0



Bewertung nach ISO 717-1
$R_w(C;C_{tr}) = 40,3\ (-1,1;-3,6)$ dB

$C_{5o-315o}$: -1,5 dB
$C_{5o-5ooo}$: -0,7 dB
$C_{1oo-5ooo}$: -0,3 dB
$C_{tr5o-315o}$: -6,7 dB
$C_{tr5o-5ooo}$: -6,7 dB
$C_{tr1oo-5ooo}$: -3,6 dB

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

Inst. für Techn. Akustik TU Berlin

Auftragsnummer: IWF2-20
Berlin, 06.07.2004

Unterschrift:

Bild 12-13: Grafische Darstellung des bewerteten Schalldämmmaßes eines optimierten Aluminiumschaumsandwichs