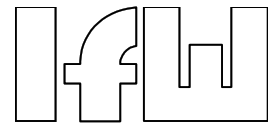


Universität Stuttgart
Institut für Werkzeugmaschinen
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. U. Heisel



Diplomarbeit

cand. techpäd. Stefan Koch
Matrikelnr.: 1754821

Betreuer:
Dipl.-Ing. Martin Dressler

Stuttgart, Juni 2000

Bestimmung des Reflexionsverhaltens eines Spänestrahls an einer festen Wand

Bestimmung des Reflexionsverhalten eines Spänestrahles an einer festen Wand

Abstract

Um die Entwicklung und Konstruktion von Absaughauben für Holzbearbeitungsmaschinen wirtschaftlicher und effektiver zu gestalten, soll der Konstrukteur über ein Programm verfügen, das ihm das Verhalten der Späne in der Absaughaube simuliert. Die Beurteilung der Absaughaube im Hinblick auf den Erfassungsgrad kann somit bereits in der Konstruktionsphase erfolgen.

Für die Konzeption dieses Berechnungsprogramms wird das bislang nicht untersuchte Reflexionsverhalten eines Spänestrahls an einer festen Wand bestimmt. Dabei wurde anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen das Reflexionsverhalten der Späne sichtbar gemacht. Neben der Partikelgrößenverteilung wurde die Art der Reflexion bestimmt. Zusätzlich wurde der Geschwindigkeitsverlust der Späne durch den Aufprall an der Wand ermittelt.

Schlagwörter:

Reflexionsverhalten, Spänestrahls, Absaughaube, Holzbearbeitung, Partikelgrößenverteilung.

Determination of the particle jet behaviour during the collision against a fixed wall

Abstract

To design more economical and more effective the designer needs for development and construction of exhaust hoods for wood working machines a computer program that simulates the behaviour of the chips in the exhaust hood. The valuation of the exhaust hood with regard to the catching rate can already take place in the period of design.

The reflection behaviour of the particle jet against a fixed wall is not yet investigated, it determines the rough copy of the calculation program. A high speed camera makes the behaviour of the particles during the collision with the fixed wall visible.

In addition to the particle size distribution the reflection type was determined. Supplementary the loss of velocity of the chips was investigated during the impact to the wall.

Key words:

reflection behaviour, particle jet, exhaust hood, woodworking machines, particle size distribution

Das Forschungsthema „Auslegung von Absaughauben bezüglich der Späneerfassung durch Simulationsrechnung“ (BMW/ AiF- Nr. 12311), in dessen Rahmen diese Arbeit entstand, wurde aus Mitteln des Bundeswirtschaftsministeriums und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung über das Forschungskuratorium Maschinenbau beim VDMA gefördert.

III Inhaltsverzeichnis

	Titelblatt	1
I	Abstract	2
II	Aufgabenstellung	4
III	Inhaltsverzeichnis	5
IV	Verwendete Formelzeichen und Einheiten	9
V	Abbildungsverzeichnis	12
1	Einleitung	16
2	Stand der Technik	17
3	Theoretische Überlegungen	19
3.1	Allgemeine Beschreibung des Stoßes	19
3.1.1	Der elastische Stoß	21
3.1.2	Der inelastische Stoß	22
3.2	Reflexionswinkel	23
3.3	Geschwindigkeitsänderung durch den Stoß	24
3.4	Verringerung der kinetischen Energie	25
4	Versuchsaufbau	27
4.1	Maschine und Werkzeug	27
4.2	Aufbau der Versuchseinrichtung	28
4.2.1	Anschlag	29
4.2.2	Umlenkblech	30
4.2.3	Auffangelement	30

4.2.4	Prallplatte	32
4.2.5	Kamerahalterung	32
4.3	Verwendete Hochgeschwindigkeitskamera	34
4.4	Verwendete Holzarten und Holzwerkstoffe	35
4.4.1	Massivhölzer	36
4.4.1.1	Buche	36
4.4.1.2	Fichte	36
4.4.2	Holzwerkstoffe	37
4.4.2.1	Spanplatte / Flachpressplatte FPY	37
4.4.2.2	Mittedichte Holzfaserverplatten MDF	38
5	Versuchsdurchführung	39
5.1	Durchführung der Versuche	39
5.2	Visualisierung des Stoßverhaltens und des Späneflugs	40
5.3	Siebanalyse	41
5.3.1	Analyse der Spangrößenverteilung mittels Siebanalyse nach DIN 66 165	41
5.3.2	Bestimmung der notwendigen Siebzeit	43
5.3.2.1	Buche	44
5.3.2.2	Fichte	45
5.3.2.3	MDF	46
5.3.2.4	FPY	47
5.4	Bestimmung der Werkzeugdrehzahl	47
5.5	Bestimmung der Vorschubgeschwindigkeit beim Handvorschub	48

6	Versuchsauswertung	49
6.1	Versuchsauswertung Siebanalyse	49
6.1.1	Kurventypen und Verteilung	50
6.1.2	Kontrollversuche	51
6.1.2.1	Kontrollversuch Buche	52
6.1.2.2	Kontrollversuch Fichte	52
6.1.2.3	Kontrollversuch FPY	53
6.1.2.4	Kontrollversuch MDF	53
6.1.3	Auswertung Buche	54
6.1.3.1	Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten bei Buche	54
6.1.3.2	Visualisierung des Reflexionsverhaltens bei Buche	56
6.1.3.3	Partikelgrößenverteilung Buche	58
6.1.3.4	Ausgewählte Beispiele für Buche	59
6.1.4.	Auswertung Fichte	61
6.1.4.1	Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten bei Fichte	61
6.1.4.2	Visualisierung des Reflexionsverhaltens bei Fichte	64
6.1.4.3	Partikelgrößenverteilung Fichte	66
6.1.4.4	Ausgewählte Beispiele für Fichte	68
6.1.5.	Auswertung FPY	70
6.1.5.1	Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten bei FPY	70
6.1.5.2	Visualisierung des Reflexionsverhaltens bei FPY	72
6.1.5.3	Partikelgrößenverteilung FPY	73
6.1.5.4	Ausgewählte Beispiele für FPY	74
6.1.6	Auswertung MDF	76

6.1.6.1	Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten bei MDF	76
6.1.6.2	Visualisierung des Reflexionsverhalten bei MDF	77
6.1.6.3	Partikelgrößenverteilung MDF	80
6.1.6.4	Ausgewählte Beispiele für MDF	81
6.2	Partikelgeschwindigkeiten	83
6.2.1	Theoretische Partikelgeschwindigkeit	83
6.2.2	Partikelgeschwindigkeit v_p nach Verlassen des Leitelements	83
6.2.3	Geschwindigkeitsverlust der Partikel durch den Aufprall an der Wand	86
7	Diskussion der Versuchsergebnisse	92
8	Zusammenfassung und Ausblick	94
9	Literaturverzeichnis	96
10	Anhang	A 1
10.1	Anhang I: Diagramme und Tabellen des Reflexionsverhaltens	A 2
10.2	Anhang II: Tabellen des Geschwindigkeitsverlustes der Partikel durch den Aufprall an der Wand	A 74
10.3	Anhang III: Tabellen zur Siebzeitbestimmung	A 85

IV Verwendete Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Einheit	Bezeichnung
c_w	-	c_w -Wert
D	[m]	Durchmesser
E	[J]	Energie
E_{kin}	[J]	Bewegungsenergie
E_{kin1}	[J]	Bewegungsenergie vor Stoß
E_{kin2}	[J]	Bewegungsenergie nach Stoß
E_t	[J]	translatorische Energie
E_r	[J]	Rotationsenergie
E_v	[J]	Verlustenergie
E_{vunel}	[J]	Verlustenergie beim unelastischen Stoß
m	[g]	Masse
m_a	[g]	Aufgabemasse
m_d	[g]	Massendifferenz
m_1	[g]	Masse Körper 1
m_2	[g]	Masse Körper 2
m_s	[g]	Spanmasse
n	[min^{-1}]	Drehzahl

s	[m]	Strecke
s_1	[m]	Strecke zwischen Leitelement und Prallwand
s_2	[m]	Strecke zwischen Prallwand und Fach
t	[s]	Zeit
t_s	[s]	Siebzeit
t_1	[s]	Zeit für s_1
t_2	[s]	Zeit für s_2
u	[m / s]	Geschwindigkeit nach Stoß
u_1	[m / s]	Geschwindigkeit Körper 1 nach Stoß
u_2	[m / s]	Geschwindigkeit Körper 2 nach stoß
u_x	[m / s]	Geschwindigkeit in x-Richtung
u_y	[m / s]	Geschwindigkeit in y-Richtung
v	[m / s]	Geschwindigkeit (vor Stoß)
v_1	[m / s]	Geschwindigkeit Körper 1 vor Stoß
v_2	[m / s]	Geschwindigkeit Körper 2 vor Stoß
v_f	[m / s]	Vorschubgeschwindigkeit
v_p	[m / s]	Partikelgeschwindigkeit
v_u	[m / s]	Umfangsgeschwindigkeit
v_x	[m / s]	Geschwindigkeit in x-Richtung
v_y	[m / s]	Geschwindigkeit in y-Richtung

α	[Grad]	Aufprallwinkel
β	[Grad]	Reflexionswinkel
θ	[kg m ²]	Massenträgheitsmoment
ω	[s ⁻¹]	Winkelgeschwindigkeit

Abkürzungen

BU	Buche
bzw.	beziehungsweise
DIN	Deutsche Industrie- Norm
FI	Fichte
FPY	Flachpressplatte / Spanplatte
ISO	International Organization for Standardization
MDF	Mitteldichte Faserplatte
TRGS	Technische Regel für Gefahrstoffe
TRK	Technische Richtkonzentration
z.B.	zum Beispiel

V Abbildungsverzeichnis

Bild 3.1:	Klassifikation der Stoßprozesse	20
Bild 3.2:	Prinzipskizze Aufprall	24
Bild 4.1:	Aufbau Maschine	27
Bild 4.2:	Fräswerkzeug	28
Bild 4.3:	Aufbau der Versuchseinrichtung	29
Bild 4.4:	Umlenblech, Auffangelement und Prallplatte in Position	30
Bild 4.5:	Versuchseinrichtung von oben	31
Bild 4.6:	Blechrahmen mit aufgesteckten Papiertüten im Auffangelement	32
Bild 4.7:	„Galgenkonstruktion“ –Kamerabefestigung	33
Bild 4.8:	Monitorausschnitt mit Erläuterungen	34
Bild 4.9:	Verwendete Hochgeschwindigkeitskamera	35
Bild 4.10:	Verwendete Holzwerkstoffe und Massivhölzer	36
Bild 5.1:	Prinzipbild der Spanreflexion an der Versuchsvorrichtung	39
Bild 5.2:	Vibrationssiebmaschine	41
Bild 5.3:	Siebe mit MDF-Spänen	42
Bild 5.4:	Analysewaage mit Siebsatz Fichtenspäne	43
Bild 5.5:	Abnahme der Massendifferenz über Siebzeit für Fichte 30 g	44
Bild 5.6:	Diagramm Siebzeit Buche	45
Bild 5.7:	Diagramm Siebzeit Fichte	46

Bild 5.8:	Diagramm Siebzeit MDF	46
Bild 5.9:	Diagramm Siebzeit FPY	47
Bild 5.10:	Bild Handvorschub	48
Bild 5.11:	Tabelle Vorschubgeschwindigkeiten	48
Bild 6.1:	Tabelle Siebanalyse für Fichte $\alpha = 20^\circ$	49
Bild 6.2:	Kurventypen	50
Bild 6.3:	Vergleich Buche 50-1 / 50-2	52
Bild 6.4:	Vergleich Fichte 50-1 / 50-2	52
Bild 6.5:	Vergleich FPY 50-1 / 50-2	53
Bild 6.6:	Vergleich MDF 50-1 / 50-2	53
Bild 6.7:	Reflexionsverhalten Buchenspäne	54
Bild 6.8:	Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α bei Buche	55
Bild 6.9:	Flugverhalten Buche bei $\alpha = 10^\circ$	56
Bild 6.10:	Reflexionsverhalten Buche bei $\alpha = 50^\circ$	56
Bild 6.11:	Versuchsaufbau bei Buche $\alpha = 10^\circ$	57
Bild 6.12:	Versuchsaufbau bei Buche $\alpha = 20^\circ$	57
Bild 6.13:	Versuchsaufbau bei Buche $\alpha = 40^\circ$	58
Bild 6.14:	Tabelle Partikelgrößenverteilung für Buche	58
Bild 6.15:	Partikelgrößenverteilung Buche	59
Bild 6.16:	Buche 4,0 mm	60

Bild 6.17:	Buche 1,0 mm	61
Bild 6. 18:	Reflexionsverhalten Fichtespäne	62
Bild 6.19:	Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α für Fichte	63
Bild 6.20:	Sequenz von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für Fichte bei $\alpha = 10^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ und 90°	64
Bild 6.21:	Reflektierte Fichtespäne bei $\alpha = 10^\circ$	65
Bild 6.22:	Fichte $\alpha = 30^\circ$	65
Bild 6.23:	Fichte $\alpha = 80^\circ$	66
Bild 6.24:	Tabelle Partikelgrößenverteilung für Fichte	66
Bild 6.25:	Partikelgrößenverteilung Fichte	67
Bild 6.26:	Verteilung Fichte 2,0 mm	68
Bild 6.27:	Verteilung Fichte 0,5 mm	69
Bild 6.28:	Reflexionsverhalten FPY- Späne	70
Bild 6.29:	Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α für FPY	71
Bild 6.30:	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen FPY für $\alpha = 10^\circ$ und 50°	72
Bild 6.31:	FPY $\alpha = 10^\circ$ von oben	72
Bild 6.32:	FPY $\alpha = 90^\circ$ von oben	73
Bild 6.33:	Tabelle Partikelgrößenverteilung FPY	73
Bild 6.34:	Partikelgrößenverteilung für FPY	74
Bild 6.35:	FPY 0,25 mm	75

Bild 6.36:	FPY 0,063 mm	75
Bild 6.37:	Reflexionsverhalten MDF	76
Bild 6.38:	Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α für MDF	77
Bild 6.39:	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen MDF unter $\alpha = 30^\circ, 40^\circ$ und 50°	77
Bild 6.40:	MDF $\alpha = 20^\circ$	78
Bild 6.41:	MDF $\alpha = 60^\circ$	79
Bild 6.42:	MDF $\alpha = 90^\circ$	79
Bild 6.43:	Tabelle Partikelgrößenverteilung MDF	80
Bild 6.44:	Diagramm Partikelgrößenverteilung MDF	80
Bild 6.45:	Diagramm MDF 0,125 mm	81
Bild 6.46:	Diagramm MDF 0,5 mm	82
Bild 6.47:	Spanflugsequenz ohne Prallwand	84
Bild 6.48:	Tabelle Partikelgeschwindigkeit Buche	84
Bild 6.49:	Tabelle Partikelgeschwindigkeit Fichte	85
Bild 6.50:	Tabelle Partikelgeschwindigkeit FPY	86
Bild 6.51:	Spanflugsequenz Fichte $\alpha = 60^\circ$	87
Bild 6.52:	Tabelle Spangeschwindigkeiten für Fichte $\alpha = 60^\circ$	88
Bild 6.53:	: Diagramm u / v für Fichte	89
Bild 6.54:	Diagramm u / v für Buche	90
Bild 6.55:	Diagramm u / v für FPY	90

1 Einleitung

Die Entwicklung und Konstruktion von Absaughauben für Holzbearbeitungsmaschinen wurden in der Vergangenheit ständig verbessert. Dennoch konnte ein zufriedenstellendes Absaugergebnis, die vollständige Erfassung von Staub und Spänen, nicht erreicht werden. Die sich in der Realität einstellenden Schwachstellen stellen für den Maschinenbediener eine gesundheitliche Gefährdung dar. Daneben bedeutet die nicht vollständige Erfassung auch einen wirtschaftlichen Nachteil. Nicht erfasste Späne verschlechtern die Bearbeitungsqualität und werden für einen erhöhten Werkzeugverschleiß verantwortlich gemacht. Die Optimierung der einzelnen Absaughauben für den jeweiligen Bearbeitungsfall erfolgt in aufwendigen und teuren Versuchen. Ziel des am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart laufenden Forschungsvorhabens ist es, ein Programm zur Verfügung zu stellen, das dem Konstrukteur eine Beurteilung der Absaughaube schon während der Konstruktionsphase ermöglicht. Ausgehend von der CAD-Zeichnung in Kombination mit einem Strömungsberechnungsprogramm soll das Verhalten der Späne in der Absaughaube sichtbar gemacht werden. Dazu sind Daten über das spezifische Verhalten von Spänen notwendig, die eine Berechnung der Flugbahn der Späne ermöglichen. Dazu zählen neben dem c_w -Wert, die Partikelgrößenverteilung, der Streubereich, in dem die Späne das Werkzeug verlassen und die Spananfangsgeschwindigkeit als auch das Reflexionsverhalten der Späne an einer Wand. In dieser Arbeit soll das Reflexionsverhalten eines Spänestrahls an einer festen Wand untersucht werden. Anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen soll es sichtbar gemacht und der Geschwindigkeitsverlust der Späne durch den Aufprall bestimmt werden. Das Reflexionsverhalten soll in Abhängigkeit der Partikelgrößenverteilung für die gängigsten Holzwerkstoffe Spanplatte und MDF und die Massivhölzer Fichte und Buche untersucht werden.

2 Stand der Technik

Die bei der Holzbearbeitung anfallenden Späne und Staub werden bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht zur vollen Zufriedenheit der Anwender und Holzbearbeitungsmaschinenhersteller erfasst und abgeführt. [1] Die unzureichend erfassten Späne und Staubpartikel stellen eine gesundheitliche Gefährdung des Maschinenbedieners dar. Seit 1985 ist wissenschaftlich belegt, dass Buchen- und Eichenholzstäube krebserregend auf den Menschen wirken. [2 und 3] Daraufhin folgte für die TRK- Werte (Technische Richt- Konzentration) für die maximal zulässige Konzentration von Holzstaub in der Luft an Arbeitsplätzen ein Wert von 2 mg/m^3 . Mit der Veröffentlichung der TRGS 553 „Holzstaub“ wurde ein seit dem 01.01.1993 gültiger einheitlicher TRK- Wert von 2 mg/m^3 für alle Anlagen erlassen. [4]

Jedoch nicht nur diese Gesundheitsgefährdung von Holzstaub, sondern auch wirtschaftliche Gesichtspunkte erfordern eine vollständige Erfassung der Späne. Nicht abgesaugte Späne werden innerhalb der Absaughaube verwirbelt und nochmals zerspannt. Infolge dieser Doppelzerspannung entsteht eine schlechte Bearbeitungsqualität. Zudem kann durch reflektierte Späne, die auf die Schneidenkante auftreffen ein erhöhter Werkzeugverschleiß beobachtet werden. [5]

Maßnahmen, die Späneerfassung durch gesteigerte Absauggeschwindigkeiten zu erhöhen haben nicht den gewünschten Erfolg gebracht. Die Steigerung der Absaugluftgeschwindigkeit bis zu 35 m/s bedeutet einen hohen Energieverbrauch der Absauganlage, der in vielen Fällen den Energieverbrauch der Bearbeitungsmaschine übertrifft. Viele Anwender müssten zudem in eine neue leistungsstärkere Absauganlage investieren. [6 und 7] Ein weiterer negativer Punkt der Erhöhung der Absaugleistung wäre die hohe Schallemission des Rohrleitungssystems.

Zur Erzielung von optimalen Absaugergebnissen wurden neben einer verbesserten Luftführung auch strömungstechnisch günstige Absaughauben konstruiert. Dabei wurden die Erkenntnis gewonnen, dass in unmittelbarer Nähe des Werkzeugs, an der Entstehungsstelle der Späne also, die Absaugluftgeschwindigkeit viel geringer als in der Absaugleitung ist. Die Absaugluftgeschwindigkeit wird durch eine mit dem Werkzeug rotierende Luftströmung beeinflusst. Zudem zeigt sich, dass große (massereiche) Späne sich von der Absaugluftströmung nicht beeinflussen lassen. Die kinetische Energie dieser Späne ist zu hoch, um sich von der Luftströmung ansaugen bzw. umlenken zu lassen. Eine Erhöhung der

Absauggeschwindigkeit bzw. Absaugleistung würde also außer gestiegenen Anlage- und Energiekosten nicht den erwünschten Erfolg bringen. [8]

Ein prinzipieller Lösungsansatz dieses Problems ist, die hohe kinetische Energie der Späne zu deren Erfassung zu nutzen. So wird keine hohe Absauggeschwindigkeit benötigt. Für diesen Ansatz müsste man die „schnellen“ Späne an der Haubenwand in die gewünschte Richtung umlenken, und somit die Absauggeschwindigkeit unterstützen. Dazu ist allerdings die richtige Positionierung der Absaughaube und der Leitelemente notwendig. Die trichterförmige Erfassungsöffnung muss dabei in der Richtung des Streubereichs liegen, unter dem die Späne das Werkzeug verlassen. Dies erfordert die Kenntnis der Spanflugrichtung innerhalb der Absaughaube. Durch den Einsatz einer modernen Hochgeschwindigkeitskamera und darauf abgestimmter Stroboskoptechnik kann das Flugverhalten der Späne sichtbar gemacht werden. Bei durchgeführten Untersuchungen wurde durch die Umlenkung der Späne an der Haubenwand auch eine Reduzierung der Geschwindigkeit der Späne beobachtet. Dies hat einen Verlust an kinetischer Energie der Späne zur Folge, was sich wiederum positiv auf deren Erfassung durch den Absaugluftstrom auswirkt. Bei einem flach auftreffenden Spänestrahls ist keine Reflexion des Strahls an der Wandung zu erkennen, er wird an der Wand entlanggeführt und mit verminderter Geschwindigkeit in eine andere Flugbahn umgelenkt. Dieser Geschwindigkeitsverlust bzw. Energiewandlung kann auf die Reibung zwischen Span und Wand und die dadurch entstehende Wärme zurückgeführt werden. [9]

Um diese jedoch aufwendige und teure Untersuchungen für jeden einzelnen Bearbeitungsfall zu vermeiden, soll dem Konstrukteur ein Werkzeug zur Verfügung gestellt werden, welches ihm bereits in der Konstruktionsphase eine Beurteilung der Absaughaube für den ausgewählten Bearbeitungsfall (Werkstoff, Bearbeitungsart, Werkzeug, Zerspanparameter) ermöglicht. [10]

3 Theoretische Überlegungen

Bei den durchzuführenden Versuchen soll das Reflexionsverhalten bezüglich Reflexionswinkel und Streubereich von Holzpartikeln an einer festen Wand unter verschiedenen Auftreffwinkeln untersucht werden. Weiterhin soll eine Aussage über den Verlust an kinetischer Energie E_{kin} der Späne durch den Aufprall gemacht werden. Dabei handelt es sich um ein Stoßproblem, das von der klassischen Physik nicht beschrieben werden kann. Ein Körper (Span) mit der Masse m_1 trifft mit linearer Geschwindigkeit v unter dem Auftreffwinkel α auf einen zweiten Körper, die Prallplatte mit der Masse m_2 . Die Prallplatte stellt ein festes Hindernis dar und hat die Geschwindigkeit null. Nach dem Aufprall, der einen Stoßvorgang darstellt, verlässt der Span unter dem Reflexionswinkel β mit der Geschwindigkeit u die Prallplatte. Vorversuche haben ergeben, dass die Geschwindigkeit u deutlich geringer als v ist und der Reflexionswinkel β nicht dem Auftreffwinkel α entspricht. Durch den Geschwindigkeitsverlust wird eine Minderung der kinetischen Energie des Spanes erreicht, dessen Masse sich vor und nach dem Stoß nicht ändert. Um die beim Auftreffen des Spanes ablaufenden Vorgänge nachvollziehen zu können, soll der physikalische Stoßvorgang näher erläutert werden.

3.1 Allgemeine Beschreibung des Stoßes

Bei einem Stoßprozess berühren sich zwei oder mehrere Körper kurzzeitig unter Änderung ihres jeweiligen Bewegungszustands. Dabei kann es zu einem Zusammenprallen untereinander oder mit einer festen Wand kommen. Sie sind vor und nach dem Stoß getrennt. Kennzeichnend ist die Einmaligkeit und die im Vergleich zur gesamten Beobachtungsdauer kurze Kontaktzeit der beteiligten Körper. In dieser Wechselwirkungszeit treten verhältnismäßig große Kräfte auf. Die Bewegung wenigstens eines der beteiligten Körper ändert sich abrupt. Eine Klassifikation der Stöße zwischen makroskopischen Körpern lässt sich nach den geometrischen Verhältnissen und den Änderungen der kinetischen Energie der Stoßpartner treffen. Bild 3.1 zeigt eine Übersicht. [11]

Bild 3.1: Klassifikation der Stoßprozesse

Die klassische Physik behandelt zwei idealisierte Grenzfälle für die Berechnung des Stoßes, nämlich den vollkommen elastischen und den vollkommen inelastischen (unelastischen) Stoß. Die in der Realität vorliegenden Stoßprobleme liegen zwischen diesen beiden Grenzfällen.

Die während des Stoßprozesses ablaufenden Energiewandlungen sollen vereinfacht am Beispiel von Stahlkugeln beschrieben werden. Dieses Modell ist nur bedingt auf das Stoßverhalten von Holzspänen und –partikeln zu übertragen. Zu Beginn der Berührung kann man durch den Berührungspunkt eine beiden Körpern gemeinsame Tangentialebene legen. Die auf dieser Ebene senkrecht stehende Gerade durch den Berührungspunkt heißt Stoßnormale oder Stoßlinie. Wenn die Stoßnormale durch die Schwerpunkte beider Körper verläuft, spricht man vom zentralen Stoß. Ein gerader zentraler Stoß liegt vor, wenn auch die

Geschwindigkeitsvektoren in der Verbindungsgeraden der beiden Schwerpunkte liegen, sonst spricht man von einem schiefen zentralen Stoß.

Die Untersuchung des mit Deformationen verbundenen Stoßvorganges erfordert die Berücksichtigung der Stoßzeit, also der Dauer der Berührung beider Körper. Es wird zwischen zwei Stoßphasen unterschieden. Die erste Stoßphase ist die Kompressionsphase. Sie beginnt mit der Berührung beider Körper und endet mit deren größter Deformation. In diesem Moment sind sich die Schwerpunkte beider Körper am nächsten. Bei den durchgeführten Versuchen ist davon auszugehen, dass eine größere Deformation nur beim Span stattfindet, eine entsprechende Deformation der Wand ist unwahrscheinlich. Danach setzt die zweite Stoßphase ein, die man auch Restitutionsphase nennt. Während dieser Phase geht die Deformation ganz oder teilweise zurück und die in den stoßenden Körpern reversibel gespeicherte elastische Energie wird in kinetische Energie zurückgewandelt. Die zweite Stoßphase endet mit der Trennung der beiden Körper. [12]

3.1.1 Der elastische Stoß

Beim vollkommen elastischen Stoß geht die Deformation der ersten Stoßphase in der zweiten Stoßphase vollkommen zurück. In diesem Grenzfall liegt also ein reversibler Vorgang ohne Energieverlust vor. Weder Erwärmung noch bleibende Deformationen bleiben erhalten, es wird beim elastischen Stoß keine Bewegungsenergie (kinetische Energie) in eine andere Energieform umgewandelt. Es gilt der Impulssatz (1) sowie der Energieerhaltungssatz (2)

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (3.2)$$

Daraus ergibt sich für die Geschwindigkeiten nach dem Stoß:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2 m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (3.3)$$

$$u_2 = \frac{2m_1 v_1 + (m_2 - m_1) v_2}{m_1 + m_2} \quad (3.4)$$

3.1.2 Der inelastische Stoß

Geht beim Stoßvorgang kinetische Energie beispielsweise durch Reibungs- oder inelastische Verformungsarbeit verloren, dann muss der allgemeine Energiesatz nach Gleichung (2) zur Berechnung der Geschwindigkeiten nach dem Stoß herangezogen und der Energieverlust E_v berücksichtigt werden:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + E_v \quad (3.5)$$

Zusätzlich zum Impulserhaltungssatz nach Gleichung (1) ist eine weitere Bestimmungsgleichung notwendig, um die Geschwindigkeiten u_1 und u_2 nach dem Stoß und den Energieverlust E_v berechnen zu können.

Für den total inelastischen, den unelastischen Stoß gilt, dass die Körper nach dem Stoß aneinanderhaften, und sich mit gemeinsamer Geschwindigkeit $u = u_1 = u_2$ weiterbewegen. Der Impulserhaltungssatz des unelastischen Stoßes (6) lautet:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u \quad (3.6)$$

daraus folgt:

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (3.7)$$

Der Energieverlust E_v durch Verformungsarbeit beim unelastischen Stoß ist demnach:

$$E_{v_{unel}} = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2 \quad (3.8)$$

Beim vollkommen inelastischen, also plastischen oder unelastischen Stoß bleibt die während der ersten Stoßphase erzielte Deformation unverändert bestehen, so dass die zweite Phase wegfällt. Hierbei handelt es sich um einen irreversiblen Vorgang mit maximalem Energieverlust.

Der in den Versuchen auftretende Stoß ist nicht durch einen dieser physikalischen Sonderfälle zu beschreiben, es handelt sich vielmehr um einen teilelastischen Stoß, Energie wird irreversibel umgewandelt. Zudem handelt es sich um einen schiefen Stoß, d.h. die beiden Körper stoßen nicht in einer geraden Linie aufeinander, sondern unter einem vorgegebenen Winkel.

3.2 Reflexionswinkel

Der Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor v und der Prallwand ist der Auftreffwinkel α . Nach dem Stoß verlässt der Partikel die Prallwand unter dem Reflexionswinkel β , der zwischen Prallwand und dem Geschwindigkeitsvektor u aufgespannt ist. Die gesamte Partikelflugbahn liegt in einer senkrechten Ebene, dadurch wird das dreidimensionale Stoßproblem auf zwei Dimensionen reduziert. Die x -Richtung wird in die Prallebene gelegt, das senkrechte Lot durch diese Ebene im Auftreffpunkt der Partikel entspricht der y -Richtung. Wie aus Bild 3.2 zu erkennen ist, entspricht der Reflexionswinkel β nicht dem Auftreffwinkel α . Diese Winkeldifferenz kann auf die beim Aufprall stattfindende Energietransformation zurückgeführt werden [12]. Es ist anzunehmen, dass ein Teil der eingebrachten kinetischen Energie E_{kin} in Deformation, die in Einzelfällen bis zur Partikelzerstörung führt, in Reibung, Wärme und eventuell auch in Schwingungen umgesetzt wird. Dieser nicht messbare Energieanteil, der zu einer Verminderung der kinetischen Energie E_{kin} führt, wird als Energieverlust E_v bezeichnet. Erfahrungswerte lassen darauf schließen, dass bei einem flachen Auftreffwinkel die Späne nur schwach abgebremst und nicht reflektiert werden, sondern an der auftreffenden Wand entlang gleiten. Es soll auch untersucht werden, ob ein Grenzwinkel existiert, bei dessen Unterschreitung das Spangut nicht reflektiert wird, und ob somit eine gezielte Spanleitung möglich ist.

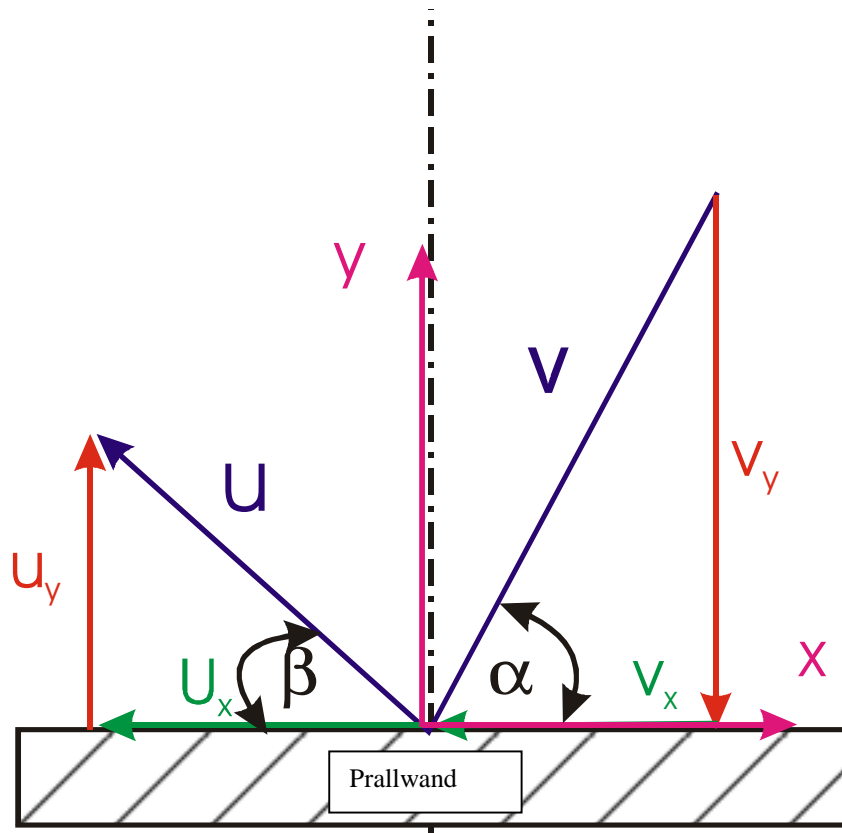


Bild 3.2: Prinzipskizze Aufprall

3.3 Geschwindigkeitsänderung durch den Stoß

Die linearen Geschwindigkeiten v und u sind vektorielle Größen, die durch Betrag und Richtung charakterisiert werden. Sie lassen sich anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmen. Die zurückgelegte Strecke ist durch die Versuchseinrichtung gegeben. Die dafür benötigte Zeit errechnet sich durch die fortlaufenden Bildnummern der Aufzeichnung. Aus diesen beiden Größen lässt sich die lineare Geschwindigkeit nach der Formel

$$v = \frac{s}{t} \quad (3.9)$$

berechnen.

Die Zerlegung der Auftreffgeschwindigkeit v und der Reflexionsgeschwindigkeit u in ihre Komponenten in x - und y -Richtung erfolgt durch die trigonometrische Beziehung zum Auftreffwinkel α , bzw. zum Reflexionswinkel β . Auftreffwinkel α ist durch die Versucheinstellung der Prallplatte gegeben, der Reflexionswinkel β ist auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu erkennen.

Aus Bild 3.2 ergeben sich für die Geschwindigkeitskomponenten folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned}v_x &= v \cos \alpha \\v_y &= v \sin \alpha \\u_x &= u \cos \beta \\u_y &= u \sin \beta\end{aligned}\tag{3.10}$$

Der aus Vorversuchen erkennbare Geschwindigkeitsverlust der Späne nach dem Aufprall ist auf die Reduktion der kinetischen Energie E_{kin} zurückzuführen.

3.4 Verringerung der kinetischen Energie

Die Verringerung der kinetischen Energie hat ihre Ursachen in den bereits erläuterten irreversiblen Energietransformationen.

Ein weiterer Ansatz für die Energieverluste findet sich bei Illyés [12]. Er geht davon aus, dass sich die kinetische Energie E_{kin} aus der translatorischen Energie E_l und der rotatorischen Energie E_r zusammensetzt. Für die translatorische Energie ist die fortschreitende Bewegung der Partikel verantwortlich. Sie ist eine Funktion der Partikelmasse m und der linearen Geschwindigkeit v :

$$E_l = \frac{1}{2} m v^2\tag{3.11}$$

Die Rotationsenergie E_r der Partikel ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$E_r = \frac{1}{2} \Theta \omega^2\tag{3.12}$$

wobei Θ das Massenträgheitsmoment der Partikel und ω die Winkelgeschwindigkeit der Partikel angibt. Diese beiden Größen sind von den Holzspänen unbekannt, aber auf den

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sind teilweise Rotationsbewegungen der Späne zu erkennen. Der Span trifft nicht mit seiner ganzen Fläche gleichzeitig auf die Wand auf, sondern etwas versetzt, das wiederum zu einer Rotationsbewegung nach dem Stoß führt.

Da zudem die Spanmasse nicht bekannt ist, ist eine Aufstellung und Berechnung der Energiebilanz nicht möglich. Es kann vereinfacht aber folgende Annahme getroffen werden. Vor dem Aufprall besitzt der Span nur kinetische Energie E_{kin1} . Durch den Aufprall wird ein Teil dieser kinetischen Energie irreversibel umgewandelt und als Verlustenergie E_v bezeichnet. Der andere Teil bleibt erhalten, der Span bewegt sich nach dem Stoß mit der Geschwindigkeit u weiter. Er besitzt also die kinetische Energie E_{kin2} . Formel (13) soll diesen Zusammenhang darstellen :

$$E_{kin1} = E_{kin2} + E_v \quad (3.13)$$

Die kinetische Energie des Spanes vor dem Stoß ist nach der Energieformel

$$E_{kin1} = \frac{1}{2} m_s v^2 \quad (3.14)$$

nach dem Stoß

$$E_{kin2} = \frac{1}{2} m_s u^2 \quad (3.15)$$

Wenn beim Aufprall kein Spanbruch stattfindet, ist die Spanmasse m_s vor und nach dem Stoß gleich groß. Dann kann der Verlust an kinetischer Energie durch den Aufprall als Verhältnis E_{kin2} / E_{kin1} angegeben werden. Die unbekannte m_s kürzt sich bei der Verhältnisbildung E_{kin2} zu E_{kin1} heraus.

$$\frac{E_{kin2}}{E_{kin1}} = \frac{\frac{1}{2} m_s u^2}{\frac{1}{2} m_s v^2} = \frac{u^2}{v^2} \quad (3.16)$$

Das Verhältnis der Geschwindigkeiten u / v gibt den prozentualen Anteil der Geschwindigkeit u von v an.

4 Versuchsaufbau

4.1 Maschine und Werkzeug

Die Versuche wurden auf einer Bänderle Tischfräsmaschine durchgeführt. Die Tischfräsmaschine besitzt eine senkrechte Spindel, die eine stufenlose Höhenverstellung aufweist. Auf der Tischfräsmaschine werden vorwiegend Leisten und Kanten bearbeitet, wozu die Maschine mit einem Anschlag ausgestattet ist, an dem die Werkstücke geradlinig entlanggeführt werden. [13] Um die Montage des Anschlags, des Leitelements und der Auffangvorrichtung für die entstehende Späne flexibel und ohne zusätzliche Bohrungen anbringen zu können, wurde eine Spanplatte auf die Tischfläche als Zwischenlage montiert.

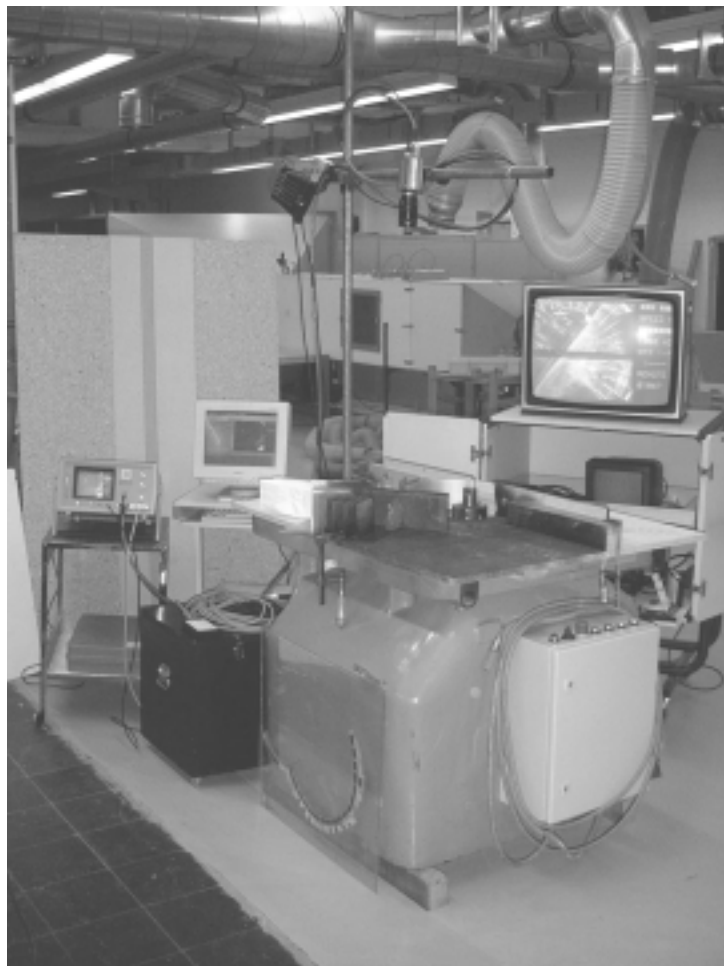


Bild 4.1: Aufbau Maschine

Als Werkzeug wurde der im Bild 4.2 abgebildete Fräser eingesetzt. Durch die, den zwei Schneiden gegenüberliegenden Spandickenbegrenzer, wird die Spanabnahme an jeder

Schneide begrenzt. Damit wird erreicht, dass keine Schneide zu tief in das Holz eindringen kann und die Gefahr eines Werkstückrückschlag vermindert wird. Die Spandickenbegrenzung hängt von der Differenz zwischen dem Radius des Schneidenflugkreises und dem Radius des Abweiserflugkreises ab. [14]. In diesem Fall beträgt die Differenz 1,1 mm, das Werkzeug ist somit für den Handvorschub zugelassen.



Bild 4.2: Fräswerkzeug

Der Werkzeugdurchmesser beträgt 130 mm, die ermittelte Drehzahl liegt bei 6000 Umdrehungen pro Minute und die Zerspanung erfolgt im Gegenlauf.

4.2 Aufbau der Versuchseinrichtung

Die für die Versuche gefertigte Versuchseinrichtung ist in Bild 4.3 dargestellt. Durch das Leitelement wird der Spänestrahls gebündelt und umgelenkt, so dass er auf die Prallplatte auftrifft. Die reflektierten Späne sammeln sich in den einzelnen Fächern. Die an die Fächer angesteckten Papiertüten dienen zur Aufbewahrung des Spanguts.

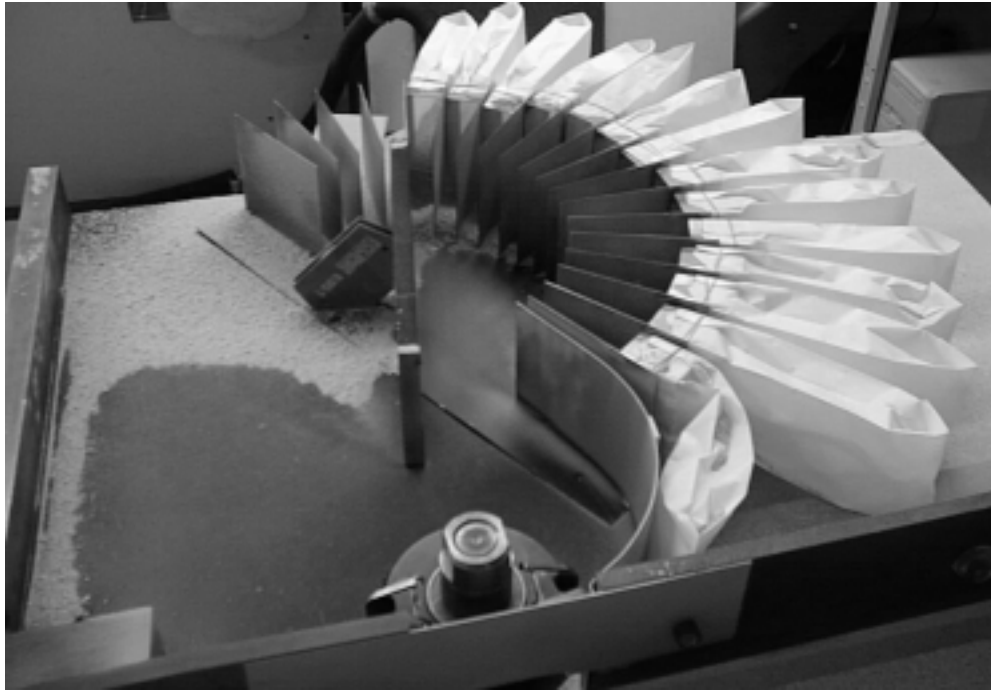


Bild 4.3: Aufbau der Versuchseinrichtung

Die einzelnen Elemente wie Anschlag, Umlenklech, Auffangelement und Prallplatte werden nachfolgend beschrieben.

4.2.1 Anschlag

Die beiden Anschläge dienen zur Führung der Werkstücke vor und nach dem Werkzeugeingriff. Da die zur Maschine gehörenden Anschläge für die Durchführung der Versuche nicht geeignet waren, mussten dafür geeignete neue Anschläge hergestellt werden. Zwei Kunststoffplatten 650mm x 110mm x 12 mm wurden dazu an einen Winkel aus Buchebretter bzw. Kantholz angeschraubt. Die Fixierung der Anschläge auf der Spanplatte erfolgte durch verschrauben bzw. durch festklemmen mit einer Schraubzwinde. Diese Variante lässt eine schnelle Verstellung des Anschlages zu.

Aus Sicherheitsgründen wurde ein Schutzblech im oberen Bereich des Werkzeuges zwischen die beiden Anschlagleisten angebracht, um ein unbeabsichtigtes Eingreifen in das Werkzeug zu verhindern.

4.2.2 Umlenblech

Zur Umlenkung und zum Bündeln des Spänestrahls wird ein Aluminiumblech (110 mm x 1,5 mm) verwendet. Es wurde in einem Winkelbereich von ca. 90° auf den Durchmesser 250 mm gebogen und dann tangential ca. 150 mm weitergeführt. Da keine exakten Angaben über die Position vorliegen, an der die Späne den Spanraum des Werkzeuges verlassen, wurde auf Erfahrungswerte aus Vorversuchen zurückgegriffen. Zur genauen Positionierung des Leitelementes wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen herangezogen, auf denen die Flugrichtung der Späne zu erkennen ist. Die mit doppelseitigem Klebeband auf der Rückseite fixierten Laschen wurden mit Holzschrauben an der Spanplatte (Arbeitsplatte) befestigt.

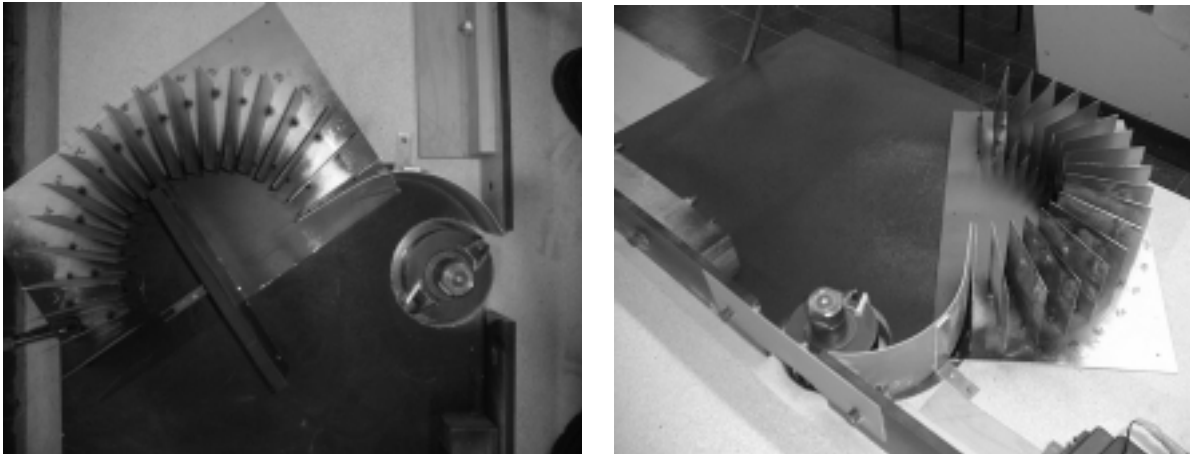


Bild 4.4: Umlenblech, Auffangelement und Prallplatte in Position

4.2.3 Auffangelement

Der an der Prallplatte reflektierte Spänestrahls teilt sich nach der Aufprallstelle auf und soll aufgefangen werden. Dazu sind in ausreichendem Abstand angeordnete Auffangfächer nötig. Diese sind im Bereich von 0° bis 180° in 10° – Schritten halbkreisförmig angebracht. Als Material für die Grundplatte (500 mm x 350 mm), sowie für die Fachwände (110 mm x 150 mm) wurde 1 mm dickes Stahlblech verwendet, da es relativ dünn ist und somit den abgeprallten Spänen einen möglichst kleinen Widerstand entgegensetzt. Außerdem lässt es sich ohne Probleme schweißen, so dass dies als die ideale Verbindungsart ausgewählt wurde.

Anhand von Zerspanversuchen wurde die Grundplatte mit den darauf verschweißten Fächer so ausgerichtet, dass der Spänestrahl nach Verlassen des Leitelements geradlinig an der Außenwand des ersten Faches (180°) entlangflog. So positioniert wurde das Auffangelement ebenfalls auf der Spanplatte verschraubt. Diese Anordnung zeigt Bild 4.5.

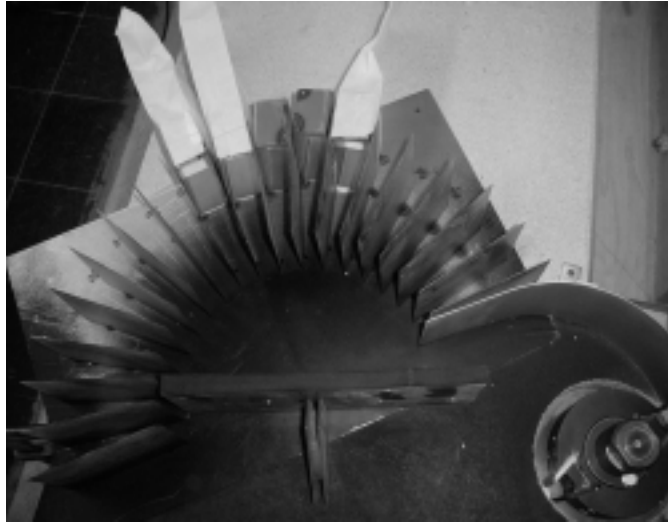


Bild 4.5: Versuchseinrichtung von oben

Die anfallenden Späne in den einzelnen Fächern sollen bis zur Auswertung mittels Siebanalyse in Papiertüten aufgefangen und aufbewahrt werden. Die Papiertüten erwiesen sich schon in vorhergehenden Untersuchungen als eine geeignete Aufbewahrungsmöglichkeit. Hier kommt es zu keiner statischen Aufladung im Vergleich zu Plastiktüten. Werden die Papiertüten nach dem Befüllen mit einem Klebestreifen verschlossen, so kommt es zu keinem messbaren Verlust von Spänen bzw. Holzstaub.

Dazu ist eine effiziente Art zum Anbringen und Befüllen der Tüten notwendig. Als hilfreich erwiesen sich rechteckige Blechrahmen, deren Umfang dem Tütenumfang entspricht und die in die Fächer eingesteckt werden konnten. Die Papiertüten wurden über die Rahmen gestülpt und mit Gummiringen gegen Abrutschen gesichert. Siehe Bild 4.6.

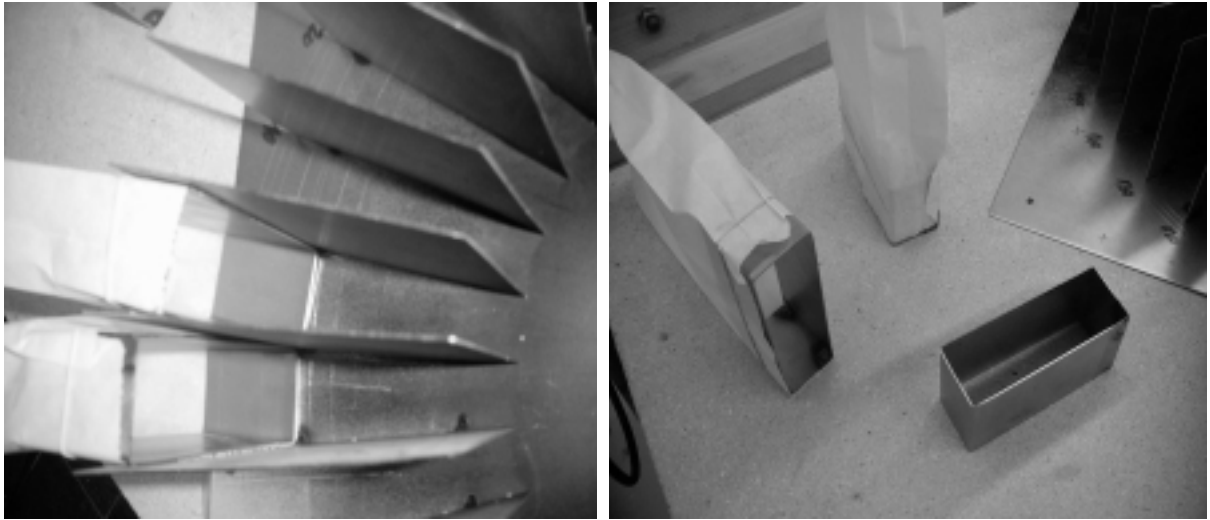


Bild 4.6: Blechrahmen mit aufgesteckten Papiertüten im Auffangelement

4.2.4 Prallplatte

Als Prallplatte, auf die die Späne auftreffen, wurde eine Stahlplatte (110 mm x 240 mm x 12 mm) aus St 37-2 verwendet. Zum Abdichten der nach oben abschließende Plexiglasplatte wurde ein Schaumstoffband auf die Plattenoberseite aufgeklebt. Um die Prallplatte auf die verschiedenen Auftreffwinkel einstellen zu können, wurde diese nicht montiert. Die Fixierung erfolgte durch zwei Magnetwinkel, die zwischen der Plattenrückseite und der Grundplatte eingesetzt wurden.

4.2.5 Kamerahalterung

Die zur graphischen Auswertung aufgenommenen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden mit einer Weinberger Speedcam lite durchgeführt. Die Kamera wurde dazu senkrecht über der Arbeitsplatte in 0,75 m Höhe angebracht. Für diese Position ist der Einsatz eines Fotostativs nicht geeignet, das Fotostativ würde die Sicht auf die Versuchseinrichtung verdecken. Es musste für die Kamerahalterung eine geeignete „Galgenkonstruktion“ hergestellt werden.



Bild 4.7: „Galgenkonstruktion“ –Kamerabefestigung

Die verwendeten Stahlrohre (32 mm x 2 mm) sind in einem Rohrkreuz zusammengesteckt und mit Flügelschrauben geklemmt. Das Rohrkreuz besteht aus zwei rechtwinklig zueinander verschweißten Vierkantstahlrohren. Die Rohre sind 150 mm lang, 40 mm breit und haben eine Wandstärke von 4 mm, so dass das verwendete Stahlrohr (Außendurchmesser 32 mm) exakt geführt wird. Die Kamera ist ebenfalls mit einem solchen Vierkantrohr auf der horizontalen Achse aufgesteckt. Das vertikale Ständerrohr ist an der Spanplatte verschraubt und somit fixiert. Zur genauen Positionierung der Kamera kann der horizontale Ausleger in der Höhe verstellt, sowie um die vertikale Achse gedreht werden. Die Kamera kann auf dem horizontalen Ausleger verschoben und in der horizontale Achse gedreht werden. Die Fixierung erfolgt über eine Klemmschraube.

Zusätzlich ist an dem Rohrkreuz ein Halogenstrahler angebracht, der zum Ausleuchten der Versuchsvorrichtung für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen benötigt wird.

4.3 Verwendete Hochgeschwindigkeitskamera

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden mit einer Weinberger Speedcam Lite 500 durchgeführt. Die schnellen Bewegungsabläufe werden dabei per CCD-Kamera aufgezeichnet und in einem digitalen Halbleiter-Ringspeicher gespeichert. Aufgenommene Szenen lassen sich beliebig langsam auf dem Videomonitor betrachten. Der aktuelle Aufnahmezustand des Kamerasystems wird in einem Teilbereich des Monitors angezeigt, siehe Bild 4.8. Der Bediener erhält Informationen über den jeweiligen Betriebszustand, wie Aufnahme­frequenz, Auflösung, Triggerstellung und den Record-Play-Live-Modus. Die Bildfrequenz bei der Aufnahme ist von der gewählten Auflösung abhängig und beträgt bei dieser Kamera maximal 10000 Bilder pro Sekunde. Dabei wird das System von einem internen Quarz synchronisiert und läuft mit der von der Auflösung abhängigen Frequenz. Daneben kann das System auch mit beliebigen anderen Frequenzen betrieben werden, dazu muß es aber von außen extern synchronisiert werden. Bild 4.9 zeigt die verwendete Hochgeschwindigkeitskamera.

Der Bildspeicher, der als Ringspeicher ausgelegt ist, wird im RECORD-Modus permanent überschrieben. Der Aufnahmezeitpunkt kann durch die Triggerfunktion gewählt werden. Bei der Einstellung als Pretrigger werden die folgenden 2 Sekunden, bei der Einstellung als Posttrigger werden die vorangegangenen 2 Sekunden gespeichert. Dazwischen sind Mittelwerte in 25% Schritten möglich.

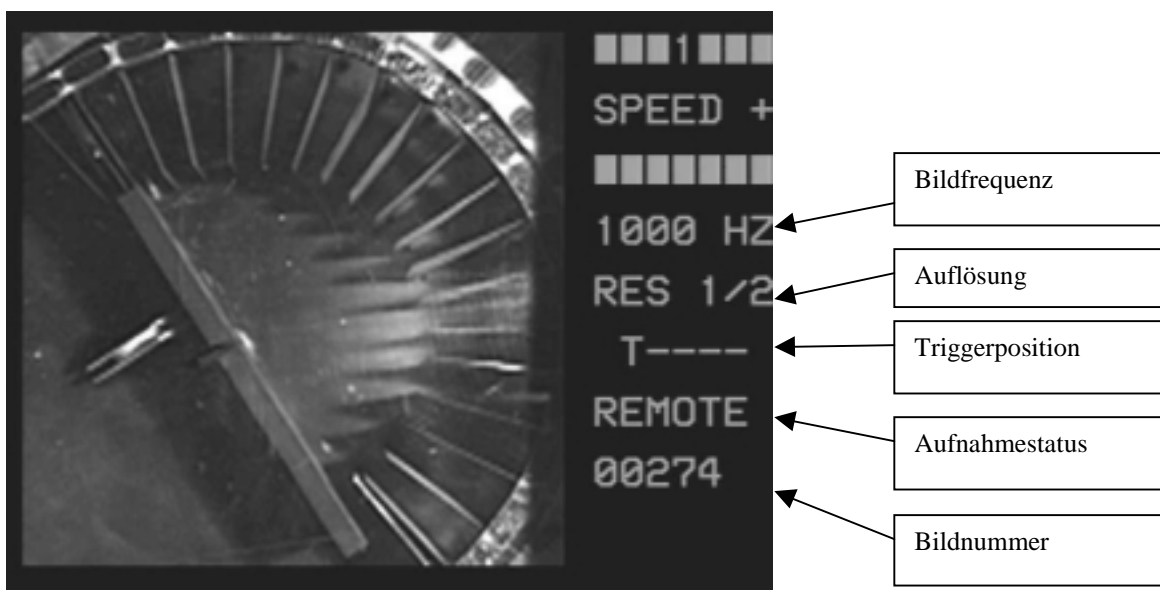


Bild 4.8: Monitorauschnitt mit Erläuterungen



Bild 4.9: Verwendete Hochgeschwindigkeitskamera

Für die durchgeführten Aufnahmen wurde für eine optimale Bildqualität und Bildgröße die Auflösung RES 1/2 mit einer Bildfrequenz von 1000 Bilder pro Sekunde gewählt. Dies bedeutet, dass jedes Bild einer Millisekunde (0,001 s) entspricht. Damit kann das Berechnen von Geschwindigkeiten über die zurückgelegte Strecke ohne Schwierigkeiten erfolgen.

4.4 Verwendete Holzarten und Holzwerkstoffe

Die Versuche wurden mit den Holzarten Buche und Fichte als Repräsentanten der Massivhölzer und mit Spanplatte (FPY) und mitteldichter Faserplatte (MDF) als Stellvertreter der Holzwerkstoffe durchgeführt. Bild 4.10 zeigt die verwendeten Werkstücke.

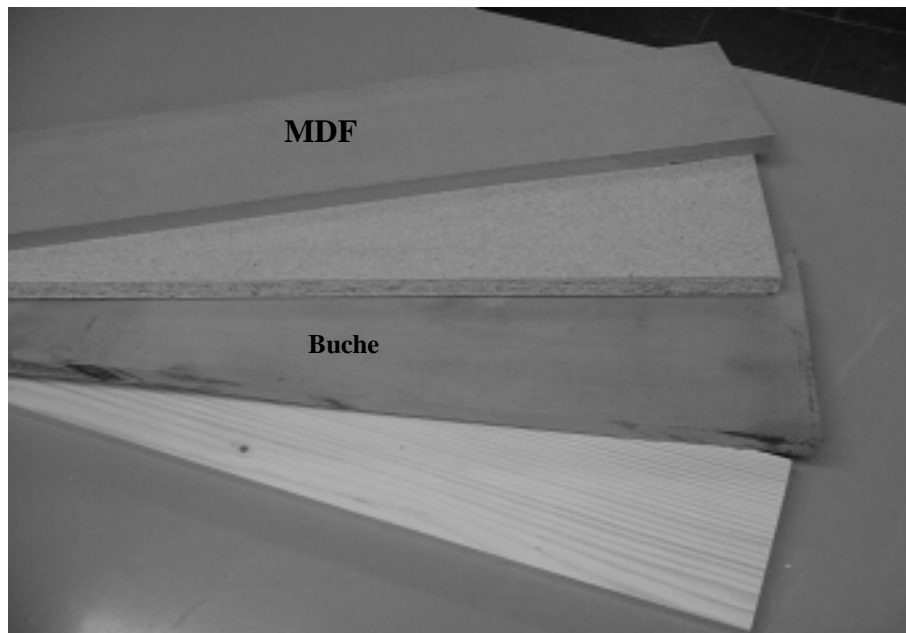


Bild 4.10: Verwendete Holzwerkstoffe und Massivhölzer

4.4.1 Massivhölzer

Die Massivhölzer werden in Nadelhölzer und Laubhölzer unterteilt. Vereinfacht kann gesagt werden, dass die Laubhölzer als Harthölzer und die Nadelhölzer als Weichholz angesehen werden.

4.4.1.1 Buche

Buche (Kurzzeichen **BU** nach DIN 4076, Teil 1) steht als Repräsentant der Harthölzer. Buche hat eine Rohdichte von $0,66 \text{ g/cm}^3$ bei einer Holzfeuchte von 15 %. Buchenholz wird mit den Eigenschaften hart, schwer und fest beschrieben. Es ist gut zu bearbeiten und ermöglicht eine gute Oberflächenbehandlung. Es gehört zu den Laubhölzern. Hauptanwendung findet Buchenholz in der Möbelindustrie, als Biegeholz, im Treppenbau und immer häufiger als Fuß- und Parkettboden.

4.4.1.2 Fichte

Fichte (Kurzzeichen **FI** nach DIN 4076, Teil 1) steht als Vertreter der Weichhölzer. Fichte gehört zu den Nadelhölzern und hat eine Rohdichte von $0,47 \text{ g/cm}^3$ bei einer Holzfeuchte von 15 %. Fichte ist heller als Buche und weist die Eigenschaften weich bis mittelhart, mäßig

leicht, elastisch und fest auf. Fichte ist leicht zu bearbeiten und findet Verwendung bei Tischler- und Bautischlerarbeiten als Holzwerkstoff, als Industrieholz und in der Papierherstellung.

4.4.2 Holzwerkstoffe

Die Holzwerkstoffe werden durch Verpressen von unterschiedlich großen Holzteilen wie Bretter, Stäbe, Furniere, Furnierstreifen, Spänen und Fasern mit Klebstoff oder mineralischen Bindemitteln hergestellt. Dabei werden auch Holzreste, die keine andere stoffliche Verwendung finden können, genutzt. Auf Grund der Herstellungstechnologie erfolgt eine deutliche Aufwertung des Ausgangsmaterials. Die Holzfehler wie z.B. Äste, Risse und Drehwuchs, die bei naturgewachsenem Holz unvermeidbar sind und die Festigkeit des Holzes deutlich herabsetzen, haben bei den Holzwerkstoffen keine bzw. nur eine untergeordnete Bedeutung. Dadurch weisen die Holzwerkstoffe eine Homogenität auf, die eine nur kleine Streuung der Platteneigenschaften bewirkt. Durch gezielte Anordnung der einzelnen Holzbestandteile kann die Belastbarkeit in einer bestimmten Richtung beeinflusst werden.

Das Quellen und Schwinden der Holzwerkstoffe ist in der Regel deutlich kleiner als bei Massivholz. [15]

Zum Verkleben von kunstharzgebundenen Holzwerkstoffen werden Harnstoff-Formaldehydharze, Melamin-Formaldehydharze, modifizierte Melamin-Formaldehydharze, Phenol-Formaldehydharze, Phenolresorcin-Formaldehydharz und polymere Diphenylurethan-Diisocyanaten verwendet.

4.4.2.1 Spanplatte / Flachpressplatte FPY

Flachpressplatten werden durch Verpressen von relativ kleinen Holzspänen mit Klebstoffen hergestellt, wobei die Späne vorzugsweise parallel zur Plattenebene liegen. Flachpressplatten zeigen im Querschnitt einen unterschiedlichen Schichtaufbau. Sie werden in der Regel mehrschichtig (lose Mittelschicht und zwei dichtere Deckschichten) oder mit stetigem Übergang in der Struktur ausgebildet. Als Klebstoffe werden Harnstoffharze (nur Plattentyp V20), modifizierte Melaminharze und alkalisch härtende Phenolharze sowie polymere Diphenylmethan-Diisocyanate verwendet.

Anwendung finden diese Platten hauptsächlich in der Möbelindustrie, sowie als mittragende und aussteifende Beplankung bei hölzernen Wänden, Böden und Decken im Innenausbau.[16]

4.4.2.2 Mitteldichte Holzfaserverplatten MDF

Mitteldichte Holzfaserverplatten (medium density fiberboards) werden durch Verpressen von verholzten Fasern mit (Trockenverfahren MDF) oder ohne Klebstoff (Naßverfahren, HFM) hergestellt. Wenn Klebstoffe eingesetzt werden, werden z. Zt. hauptsächlich Harnstoff- oder Phenolharze verwendet.

Diese im Faseraufbau feine, nahezu homogene Platte mit einer Dichte von $0,6 - 0,85 \text{ g/cm}^3$ wird im Möbelbau anstelle von Spanplatte verwendet.

Ihr Vorteil gegenüber der Spanplatte liegt in der Möglichkeit, die Kante sowie die Flächen gut profilieren zu können.[16]

5 Versuchsdurchführung

5.1 Durchführung der Versuche

Mit den Versuchen sollen Erkenntnisse über das Reflexionsverhalten von Holzspänen beim Aufprallen an einer festen Wand (z.B. Haubenwand, Spanraum des Werkzeuges usw.) gewonnen werden. Dabei soll der Abprallwinkel und der eventuell auftretende Streubereich des reflektierten Spänestrahls in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel untersucht werden. Der Auftreffwinkel soll von 10° bis 90° in 10° -Schritten variiert werden. Dazu wird die Prallplatte in die entsprechende Position gebracht und mit Magnetwinkeln gehalten.

Die bei der Zerspanung entstehenden Späne verlassen in einem Bereich bis ca. 30° tangential das Werkzeug und werden durch das gekrümmte Leitelement zu einem Spänestrahls gebündelt. Der pulsierende Strahl trifft auf die Platte auf und wird dann umgelenkt bzw. gestreut. Die erkennbare Pulsation wird durch die jeweilige sich im Eingriff befindende Schneiden erzeugt.

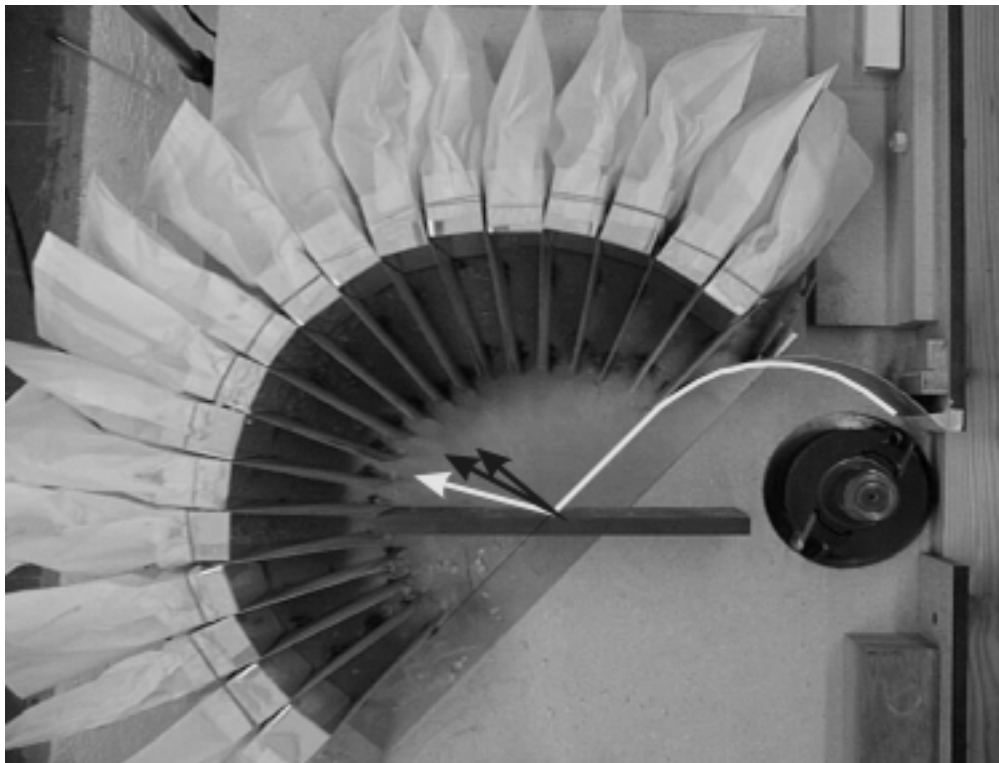


Bild 5.1: Prinzipbild der Spanreflexion an der Versuchsvorrichtung

Nach dem Wandkontakt prallen die Späne in verschiedenen Winkeln ab und sammeln sich in den dafür vorgesehenen Fächern. Dies soll in der Prinzipskizze in Bild 5.1 verdeutlicht werden. Ist die erzeugte Spanmenge für die weitere Auswertung groß genug, werden die Späne mit einem Pinsel in die zuvor beschrifteten und auf die Steckrahmen aufgespannten Papiertüten gefegt. Die Tüten werden mit Gummiringen auf den Steckrahmen gehalten. Um eine Abdichtung der Auffangeinrichtung nach oben und die Sicht auf die Prallstelle zu gewährleisten, wurde eine Plexiglasplatte zum Abdecken verwendet.

Das so aufgefangene Spangut wird für die später durchgeführte Siebanalyse aufbewahrt. Durch diese Analyse wird die Spangrößenverteilung innerhalb eines Rasters ermittelt. Zudem erhält man durch das Auswiegen der in den Tüten aufgefangenen Späne eine Massenverteilung über den Streubereich des Reflexionswinkels.

Als weitere Größe soll die Geschwindigkeitsdifferenz einzelner Späne vor und nach dem Stoß an der Wand ermittelt werden. Dadurch kann weiterhin eine Aussage zum Verlust der kinetischen Energie E_{kin} einzelner Späne durch das Prallverhalten gemacht werden. Zudem soll das Prallverhalten der Späne visualisiert werden.

Dies erfordert das Sichtbarmachen des schnell ablaufenden Stoßvorganges an der Prallwand. Der ankommende Span, der Aufprall und die Reflexion laufen innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde ab und ist mit dem bloßen Auge nicht zu verfolgen.

5.2 Visualisierung des Stoßverhaltens und des Späneflugs

Das zu untersuchende Reflexionsverhalten läuft für das menschliche Auge viel zu schnell ab. Eine Aufzeichnung der Sequenz mit einer Videokamera würde nicht den gewünschten Erfolg erbringen. Darüber hinaus können durch solche Aufnahmen auch keine Geschwindigkeiten bestimmt werden.

Durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeitskamera ist es nun möglich, einen bestimmten Span vom Verlassen des Leitelementes über den Aufprall an der Wand und seine weitere Flugbahn bis zum Erreichen eines Faches des Auffangelements zu beobachten. Dabei kann aus der zurückgelegten Strecke und der dafür benötigte Zeit, welche sich aus der Differenz der Bildzahl ergibt, die Geschwindigkeit des Spans vor und nach den Stoß berechnet werden.

Eine genaue Aussage über das Verhalten des Spans und den Reflexionswinkels, unter dem der Span die Prallplatte verlässt, ist auf den Aufnahmen deutlich zu erkennen. Zudem sind

Zusammenstöße der Späne untereinander nach oder an der Aufprallstelle deutlich erkennbar, ebenso das daraus entstehende Flugverhalten.

Das aufgenommene Bildmaterial muß zur Dokumentation und weiteren Auswertung auf Video überspielt werden, da die Hochgeschwindigkeitskamera nicht über den nötigen Speicherplatz verfügt. Die Verteilung der liegengebliebenen Späne wurde mit einer digitalen Fotokamera aufgenommen.

5.3 Siebanalyse

Die Siebanalyse dient zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung des aufgefangenen Spanguts in jeder Tüte. Das Spangut setzt sich aus verschiedenen großen Spänen und Holzstaub zusammen, das mittels dieser Methode aufgeschlüsselt werden kann. Dadurch kann die Abhängigkeit des Reflexionsverhaltens bezüglich der Spangröße ermittelt werden.

5.3.1 Analyse der Spangrößenverteilung mittels Siebanalyse nach DIN 66 165

Die Siebanalyse wird mit einer Vibrationssiebmaschine der Firma RETSCH durch Siebung mit bewegtem Siebsatz in gasförmigem, ruhendem Fluid nach DIN 66 165 durchgeführt. (siehe Bild 5.2)



Bild 5.2: Vibrationssiebmaschine

Bei der Siebanalyse kommen Siebe der Größe 0,063 mm; 0,125 mm; 0,25 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 2,0 mm; 4,0 mm; 8,0 mm Nennmaschenweite und die Auffangwanne, in der sich Partikel $< 0,063$ mm sammeln, nach DIN ISO 3310, Teil 1 aus der Hauptreihe R20/3 zum Einsatz. Die Siebe der Größe 4,0 und 8,0 mm werden nur bei den Massivhölzern angewendet, da hier Späne dieser Größe erwartet werden können. Bei den Holzwerkstoffen FPY und MDF stellt das Sieb der Größe 2mm die Obergrenze. Dadurch ist der Siebsatz kleiner und die maximale Siebамplitude muss dementsprechend geringer (FPY 70% und MDF 50%) gewählt werden. Das liegt an der veränderten Eigenfrequenz des Siebsatzes, bei 100% Amplitude würde die Siebmaschine unzulässig starke Vibrationen erzeugen. Der Siebsatz würde am Gehäuse der Vibrationsmaschine aufschlagen. Eine Durchführung der Siebanalyse wäre nicht möglich.

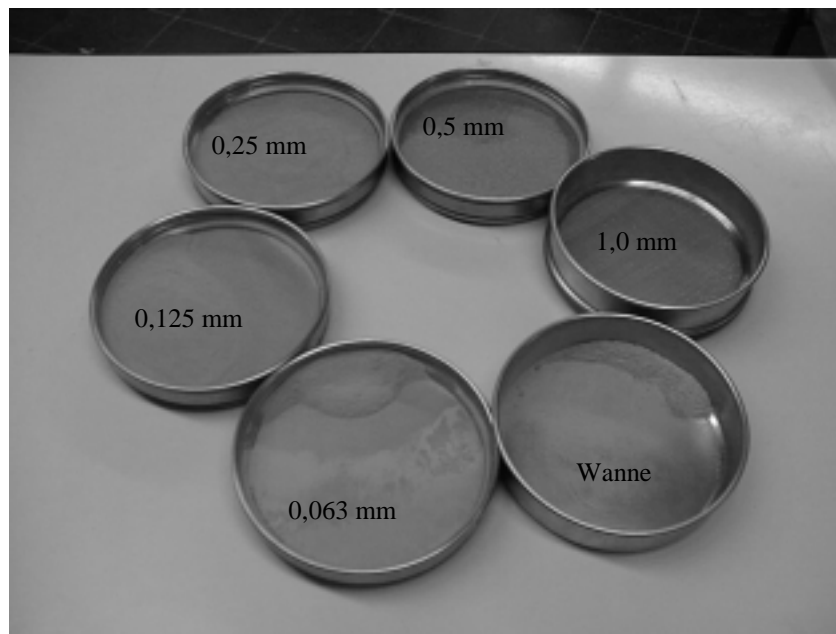


Bild 5.3: Siebe mit MDF-Spänen

Bild 5.3 zeigt die Siebe der Größe 0,063 – 1,0 mm, sowie die Auffangwanne. Darin befinden sich die Späne des Werkstoffes MDF, die das Sieb mit der kleinsten Siebmaschenweite von 0,063 mm passiert haben. Im Sieb der Größe 1,0 mm sind keine Späne enthalten, d.h. bei der Zerspanung von MDF sind nur Späne kleiner 1mm entstanden.

Zum Auswiegen der einzelnen Siebe und Spanmassen wurde eine Analysewaage SARTORIUS Excellence E 12000 S (Bild 5.4) verwendet.



Bild 5.4: Analysewaage mit Siebsatz Fichtenspäne

Nachdem die Leermasse der Einzelsiebe bestimmt bzw. kontrolliert wurde, wurden sie der Größe nach geordnet (Wanne unten, größtes Sieb oben) zu einem Siebsatz aufeinandergesetzt. Die zuvor bestimmte und dokumentierte Aufgabemasse einer Tüte wurde in das oberste Sieb gegeben und mit der entsprechend bestimmten Siebzeit ausgesiebt. Nach dem Siebdurchgang wurde jedes Einzelsieb ausgewogen und durch die Differenz zur bekannten Leermasse die Partikelmasse der jeweiligen Spänefraktion bestimmt und in einer Tabelle dokumentiert. Die Tabellen für die komplette Versuchsreihen befinden sich im Anhang.

5.3.2 Bestimmung der notwendigen Siebzeit

Die Qualität der Siebanalyse hängt wesentlich von der Siebdauer ab. Den einzelnen Partikeln muss genügend Zeit verbleiben, durch die entsprechenden Siebmaschen zu fallen. Nach Vorgabe der DIN 66 165 ist die erforderliche Siebzeit der Aufgabemasse erreicht, wenn pro Minute weniger als 0,1 % der Aufgabemasse durch das betrachtete Sieb fällt.

Die Siebzeit für die unterschiedlichen Werkstoffe wurden in Vorversuchen bestimmt. Dazu wurden von jeder Materialsorte Proben von 10, 20, 30, 40 und 50 Gramm untersucht. Die Proben wurden jeweils 10 Minuten gesiebt und die Einzelsiebe ausgewogen. Die Differenz der Siebmasse zum vorherigen Durchgang wird in einer Tabelle festgehalten. Entspricht der erreichte Wert der Vorgabe oder liegt darunter, so ist die Siebzeit erreicht. Bild 5.5 zeigt diesen Zusammenhang für die Probe Fichte 30 g.

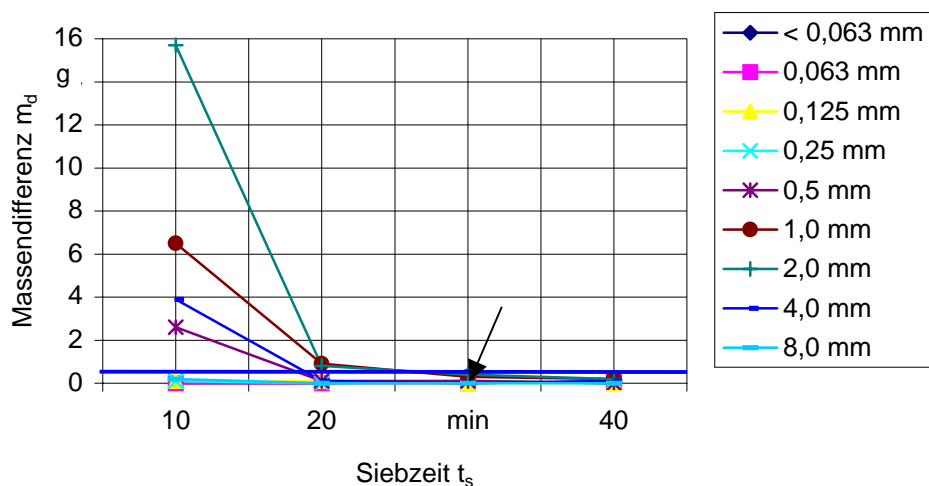


Bild 5.5: Abnahme der Massendifferenz über Siebzeit für Fichte 30 g

Bei einer Aufgabemasse von 30 g darf bei einem Siebintervall von 10 min die maximale Massendifferenz 0,3 g betragen. In dem in Bild 5.5 dargestellten Diagramm unterschreiten alle Kurven diesen Grenzwert bei 30 min (siehe Pfeil).

Zeitintervalle unter 10 Minuten sowie Proben unter 10 Gramm können aufgrund der Wiegegenauigkeit von 0,1 Gramm der verwendeten Waage nicht sinnvoll ausgewertet werden. Die so bestimmten Mindestsiebzeiten werden in ein Diagramm übertragen, aus dem für jede beliebige Spanmasse die erforderliche Siebzeit zu entnehmen ist.

5.3.2.1 Buche

Die Tabellen der einzelnen Probeversuchen sind im Anhang enthalten. Es wurden Siebe bis zur Größe 8,0 mm Nennmaschenweite verwendet, da bei der Massivholzerspanung Späne dieser Größe vorhanden waren. Daraus ergab sich durch den großen Siebturm eine Siebamplitude von 100% bei Intervallbetrieb. Wie auch aus dem Diagramm in Bild 5.6 zu

entnehmen ist, ergab sich unabhängig von der Aufgabemasse eine Siebzeit für alle Proben von 10 Minuten. Die sich nach 10 Minuten sieben einstellende Massenverteilung zwischen den Einzelsieben hat sich nach weiteren 10 Minuten (Gesamtsiebzeit 20 Minuten) nicht über die nach DIN 66 165 vorgeschriebene Massendifferenz hinausbewegt.

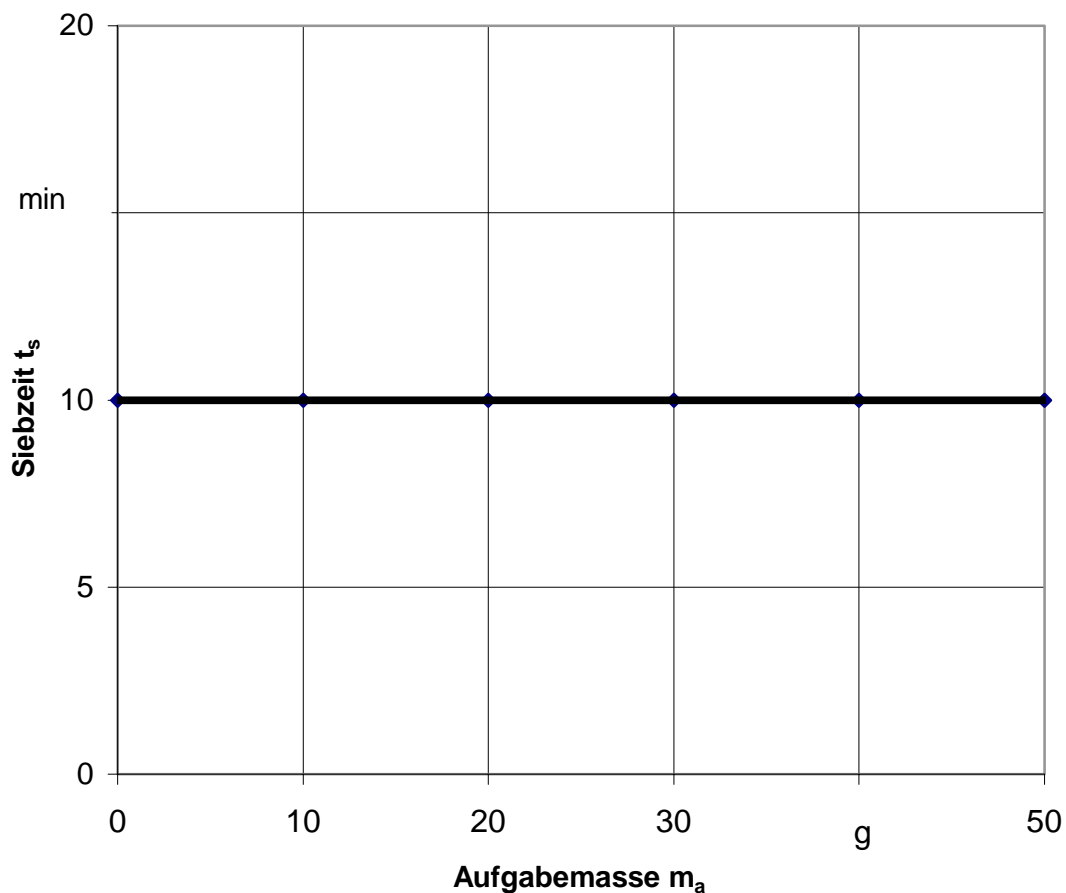


Bild 5.6: Diagramm Siebzeit Buche

5.3.2.2 Fichte

Für die Siebzeit von Fichtenspäne ergibt sich der in Bild 5.7 dargestellte Zusammenhang. Für die Aufgabemasse bis zu 10 g ergibt sich eine Siebzeit von 10 min. Für die Aufgabemassen zwischen 10 g und 50 g stellt sich ein linearer Anstieg der Siebzeit von 10 min bis 50 min ein. Bei der Analyse des Spanguts über 60 g ist die maximale Siebzeit von 60 min zu verwenden.

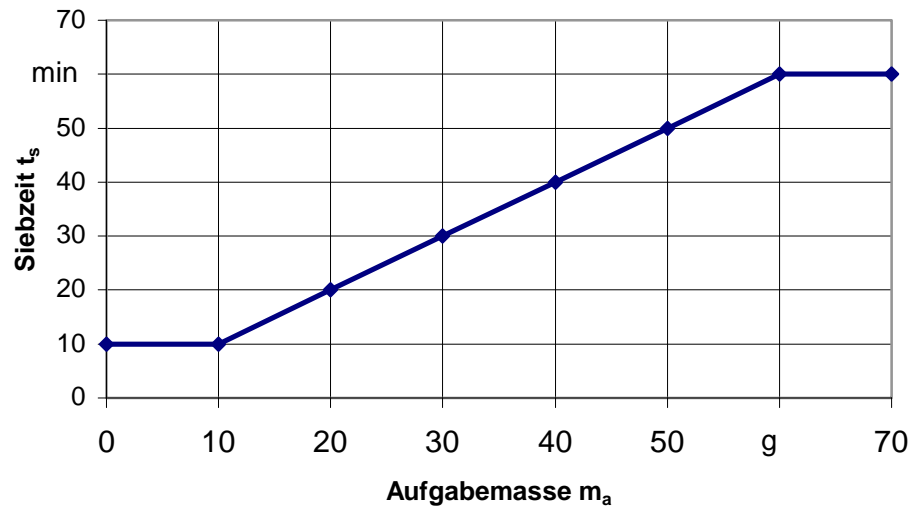


Bild 5.7: Diagramm Siebzeit Fichte

5.3.2.3 MDF

Für MDF ergab sich aus den Vorversuchen eine einheitliche Siebzeit von 30 min. Dies ist auch in Bild 5.8 dargestellt.

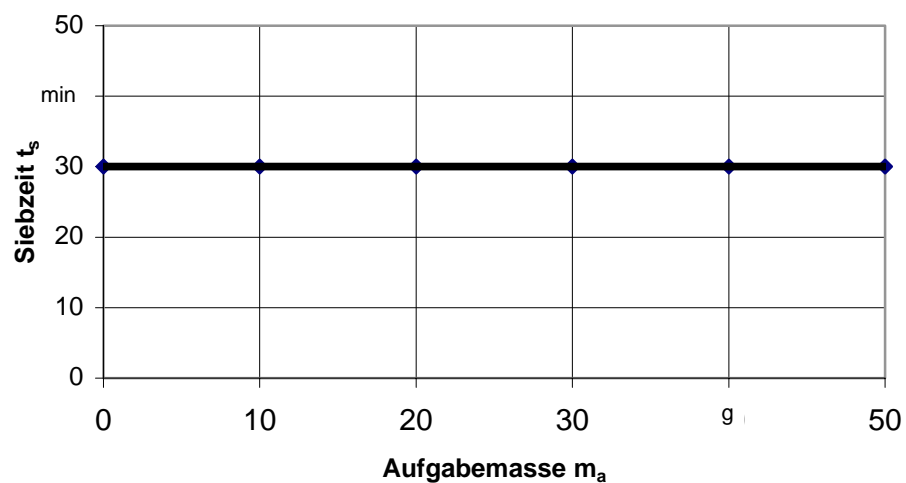


Bild 5.8: Diagramm Siebzeit MDF

5.3.2.4 FPY

Die Siebzeit für FPY wurde bereits in einer früheren Arbeit bestimmt. [17]

Die Siebzeit ist in Bild 5.9 dargestellt.

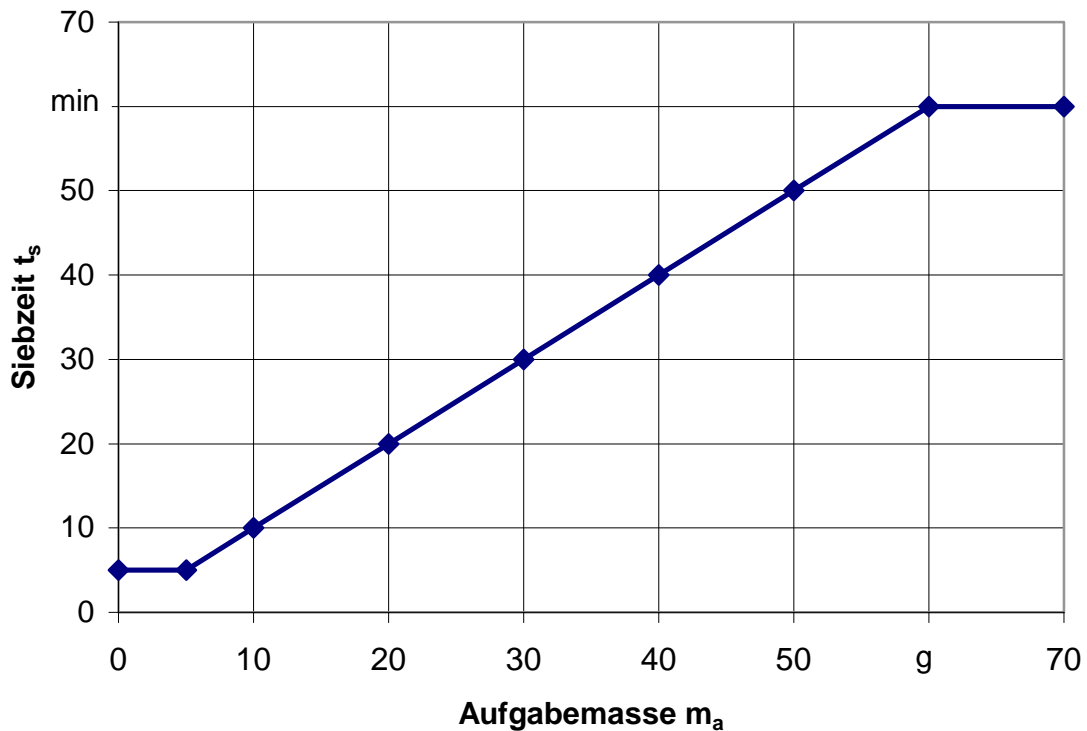


Bild 5.9: Diagramm Siebzeit FPY

Die Siebzeit für FPY liegt bei einer Spanmasse unter 5 g bei 5 min. Im Bereich zwischen 5 g und 60 g steigt die Siebzeit linear auf einen Wert von 60 min an. Dies ist die maximale Siebzeit, auch Proben größer 60 g werden nicht länger ausgesiebt.

5.4 Bestimmung der Werkzeugdrehzahl

Die Werkzeugdrehzahl wurde mit dem Ministoboskop testo 475 durchgeführt. Dabei wurde das rotierende Werkzeug mit der max. Frequenz angeblitzt. Die Frequenz des Stoboskops wurde dann über die Einstelltasten manuell reduziert. Das erste sich einstellenden stehenden Bild vom Werkzeug stellt die Drehzahl dar. Zur Kontrolle wurde eine Farbmarkierung am Werkzeuggrundkörper angebracht. Diese Markierung darf nur einmal zu sehen sein. Die gemessene Drehzahl beträgt 6000 U/min.

5.5 Bestimmung der Vorschubgeschwindigkeit beim Handvorschub

Die Handvorschubgeschwindigkeit wurde ebenfalls mit der Hochgeschwindigkeitskamera ermittelt. Das Werkstück mit aufgezeichnetem Maßstab wurde entlang des Anschlags geführt. Dabei könnte an einer Positionsmarke die zurückgelegte Strecke abgelesen werden. Die Ziffern geben die Länge in cm an. Die benötigte Zeit für die sich aus der Markierung ergebenden Strecke erhält man wiederum aus der Bilddifferenz.

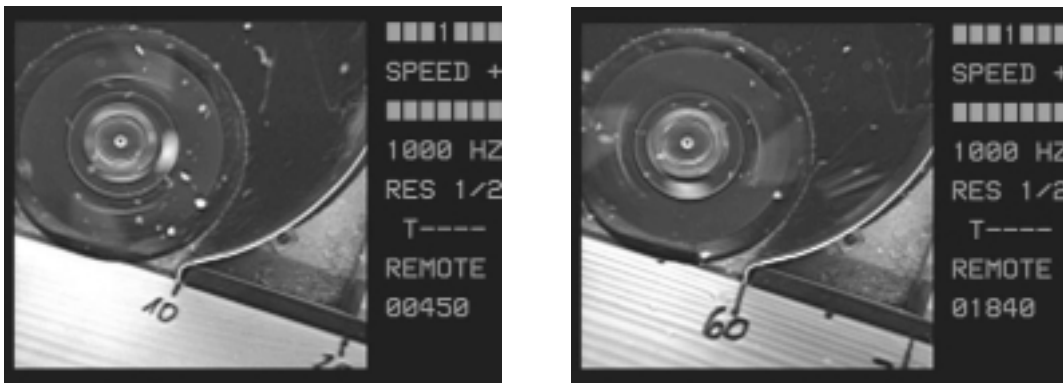


Bild 5.10: Bild Handvorschub

Wie aus Bild 5.11 zu entnehmen ist, beträgt die für die Strecke von 0,5 m benötigte Zeit 1390 ms. Die Berechnung erfolgte in einer Excel-Tabelle. Sie ist in Bild 5.11 angegeben.

Handvorschubgeschwindigkeiten			
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Länge 1	10	10	10
Länge 2	60	60	60
Strecke in m	0,5	0,5	0,5
Bildnr. 1	515	300	450
Bildnr. 2	1855	1860	1840
Zeit t	1,34	1,56	1,39
v_f in m/s	0,37	0,32	0,36
v_f in m/min	22,39	19,23	21,58
Mittelwert $v_f=21$ m/min			

Bild 5.11: Tabelle Vorschubgeschwindigkeiten

Um ein genaueres Ergebnis der Vorschubgeschwindigkeit v_f zu erhalten, wurden noch zwei weitere Versuche durchgeführt. Alle Ergebnisse sind in der Tabelle in Bild 5.11 zusammengestellt. Der Mittelwert aus den drei Versuchen ergibt eine Vorschubgeschwindigkeit von 21 m/min.

6 Versuchsauswertung

6.1 Versuchsauswertung Siebanalyse

Mittels der Siebanalyse soll das Reflexionsverhalten verschiedener Späne untersucht werden. Dazu wurden die Ergebnisse der Siebanalyse in Exceltabellen zusammengestellt und in Diagramme ausgewertet. Es wurde der Reflexionswinkel β in Abhängigkeit von Auftreffwinkel α ermittelt, des Weiteren das Reflexionsverhalten von Spänen einer Partikelklasse (Partikelgröße) unter dem Auftreffwinkel $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. Die absolute Massenverteilung in den verschiedenen Einzelfächer wurden in Prozentanteile umgerechnet (siehe Tabelle Bild 6.1) um sie untereinander vergleichen zu können. Die vollständigen Tabellen und Diagramme sind im Anhang enthalten, im Textteil sollen nur die für die Auswertung notwendigen und interessanten Auszüge dargestellt werden. Gleichmaßen wird mit dem zur Auswertung gemachten Bildmaterial verfahren.

Fichte $\alpha = 20$														
Fachnr.	Aufgabemasse		0,125 mm		0,25 mm		0,5 mm		1,0 mm		2,0 mm		4,0 mm	
β	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
10°	40,3	64,4	0,1	50,0	0,7	46,7	2,0	43,5	6,4	50,8	18,2	65,5	12,5	82,2
20°	13,3	21,2	0,1	50,0	0,4	26,7	1,1	23,9	3,5	27,8	6,1	21,9	2,1	13,8
30°	2,9	4,6	0,0	0,0	0,1	6,7	0,4	8,7	1,0	7,9	1,2	4,3	0,2	1,3
40°	1,5	2,4	0,0	0,0	0,1	6,7	0,2	4,3	0,5	4,0	0,6	2,2	0,1	0,7
50°	0,9	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	0,3	2,4	0,3	1,1	0,1	0,7
60°	0,6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	0,2	1,6	0,2	0,7	0,1	0,7
70°	0,6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	0,2	1,6	0,2	0,7	0,1	0,7
80°	0,5	0,8	0,0	0,0	0,1	6,7	0,1	2,2	0,1	0,8	0,2	0,7	0,0	0,0
90°	0,5	0,8	0,0	0,0	0,1	6,7	0,1	2,2	0,1	0,8	0,2	0,7	0,0	0,0
100°	0,4	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	0,1	0,8	0,2	0,7	0,0	0,0
110°	0,4	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	0,1	0,8	0,2	0,7	0,0	0,0
120°	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0
130°	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0
140°	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
150°	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
160°	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe:	62,6	100,0	0,2	100,0	1,5	100,0	4,6	100,0	12,6	100,0	27,8	100,0	15,2	100,0
%-Anteil			0,3		2,4		7,3		20,1		44,4		24,3	

Bild 6.1: Tabelle Siebanalyse für Fichte $\alpha = 20^\circ$

In der Tabelle in Bild 6.1 ist neben der durch die Siebanalyse erhaltene Partikelgrößenverteilung die Massenverteilung der aufgefangenen Partikel für jedes Fach dargestellt. Jedes Fach deckt dabei einen Bereich von 10° ab. Unter der Aufgabemasse steht die Masse in g der aufgefangenen Späne pro Fach. Der prozentuale Anteil bezieht sich dabei auf die Gesamtmasse von 62,6 g.

Unter den einzelnen Fachnummern ist dargestellt, wie sich die Masse für dieses Fach auf die verschiedenen Partikelklassen verteilt. Der dabei angegebene prozentuale Anteil bezieht sich auf die Gesamtmasse der Partikelklasse und nicht auf die Gesamtmasse des Fachs.

Der grau unterlegte %-Anteil für jede Partikelklasse bezieht sich wiederum auf die Gesamtmasse von 62,6 g. Daraus erhält man die Partikelgrößenverteilung für den jeweiligen Versuch. Für jede Materialsorte und jeden Auftreffwinkel wurde eine identische Tabelle erstellt. Die Auswertung erfolgt für alle vier verwendeten Werkstoffe. Dabei wird kein direkter Vergleich untereinander durchgeführt.

6.1.1 Kurventypen und Verteilung

Vor der Auswertung der folgenden Diagramme sollen die verschiedenen Kurventypen kurz vorgestellt werden. Im unterstehenden Diagramm 6.2 sind alle drei Kurventypen, wie sie auch in späteren Diagrammen ähnlich vorkommen, aufgezeigt.

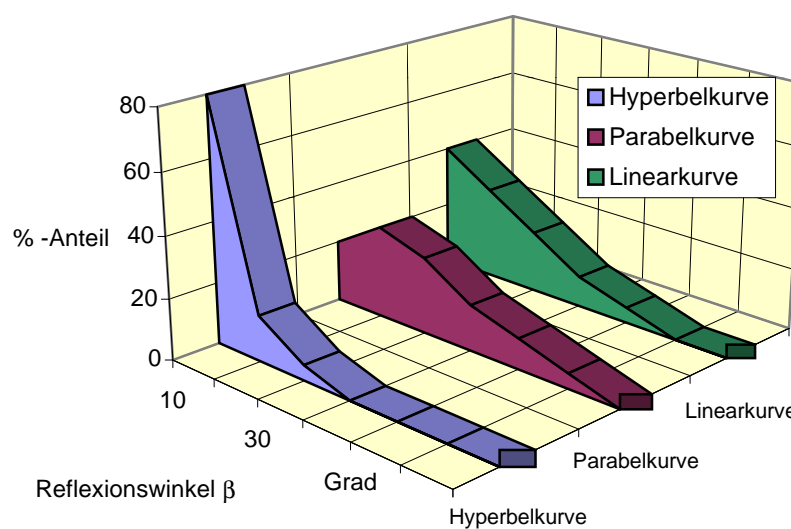


Bild 6.2: Kurventypen

Die „Hyperbelkurve“ hat ihr absolutes Maximum am Anfang. Danach ist der weitere Verlauf durch einen starken Abfall gekennzeichnet. Relativ bald sind die Werte an der Nulllinie. Das Maximum entspricht einer Spitze, Werte links, soweit vorhanden, und rechts sind deutlich geringer.

Bei der „Parabelkurve“ ist das Maximum nicht an erster Stelle, sondern an zweiter oder dritter. Links wie rechts des Maximums liegen ähnlich hohe Werte, es kann somit als ein „weiches“ Maximum gekennzeichnet werden. Im weiteren Verlauf fällt die Kurve langsam auf den Wert „Null“ ab.

Mit „Linearkurve“ sollen Kurven mit linear abfallendem Verlauf beschrieben werden. Ihr Maximum befindet sich an erster Stelle, eventuell auch an den ersten beiden Stellen, danach fällt die Kurve „linear“ bis zu ihrem Minimum ab, welches als letzter Funktionswert den Wert „Null“ hat.

6.1.2 Kontrollversuche

Um die Allgemeingültigkeit der einzelnen Versuche zu überprüfen, wurde für jede Versuchsreihe ein zusätzlicher Kontrollversuch gefahren. Stimmt dessen Ergebnis bezüglich des Reflexionsverhaltens mit dem entsprechenden Versuch aus der Versuchsreihe überein, kann davon ausgegangen werden, dass eine ausreichend große Spannmenge verwendet wurde und ein repräsentativer Mittelwert erreicht ist. Die Folge ist eine sehr geringe Versuchsstreuung. Dazu wurde bei jedem untersuchten Werkstoff der Versuch mit 50° Aufprallwinkel zwei Mal gefahren (siehe Bild 6.3). Der Auftreffwinkel 50° wurde deshalb gewählt, da er der mittlere Auftreffwinkel im Bereich zwischen $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ ist.

6.1.2.1 Kontrollversuch Buche

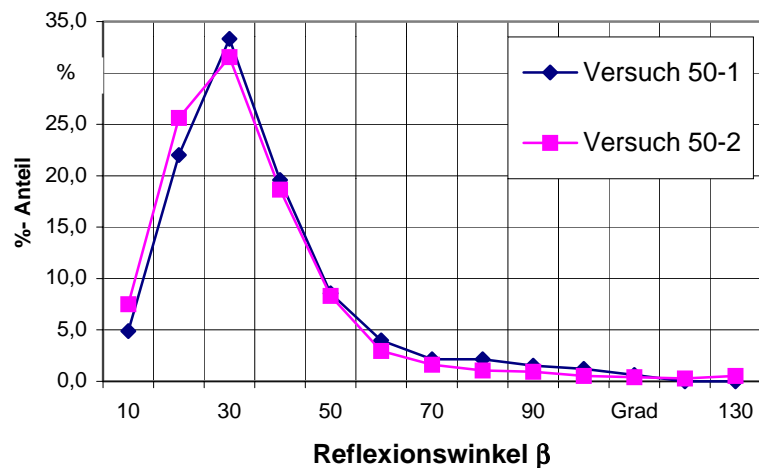


Bild 6.3: Vergleich Buche 50-1 / 50-2

Aus Diagramm in Bild 6.3 geht hervor, dass sich die beiden Versuche Buche 50-1 und Buche 50-2 nicht wesentlich unterscheiden. Das Reflexionsmaximum liegt in beiden Fällen bei Reflexionswinkel $\beta = 30^\circ$. Der übrige Kurvenverlauf beider Kurven stimmt sehr gut überein. Zur weiteren Auswertung wird der Versuch Buche 50-2 herangezogen, da die hier reflektierte Spanmasse den anderen Versuchen der Versuchsreihe entspricht.

6.1.2.2 Kontrollversuch Fichte

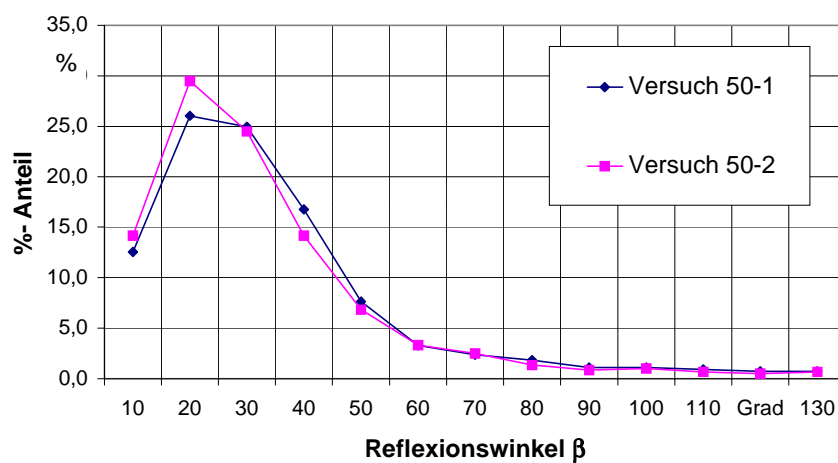


Bild 6.4: Vergleich Fichte 50-1 / 50-2

Der Kurvenverlauf beider Versuche im Diagramm in Bild 6.4 bestätigt das gleiche Reflexionsverhalten des Kontrollversuchs. Das Maximum liegt bei beiden Versuchen bei $\beta = 20^\circ$, über den weitere Verlauf stimmen beide Kurven gut überein.

6.1.2.3 Kontrollversuch FPY

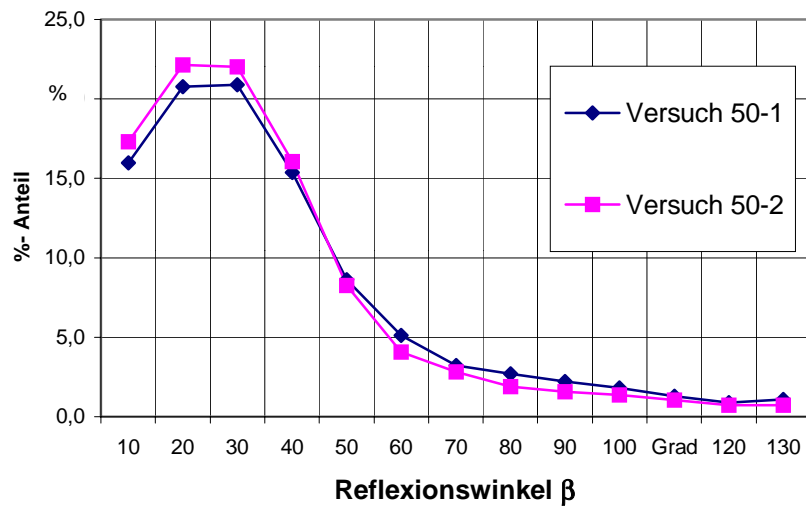


Bild 6.5: Vergleich FPY 50-1 / 50-2

Auch der in Bild 6.5 dargestellte Kurvenverlauf von FPY 50-1 entspricht dem von FPY 50-2. Dies belegt die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche.

6.1.2.4 Kontrollversuch MDF

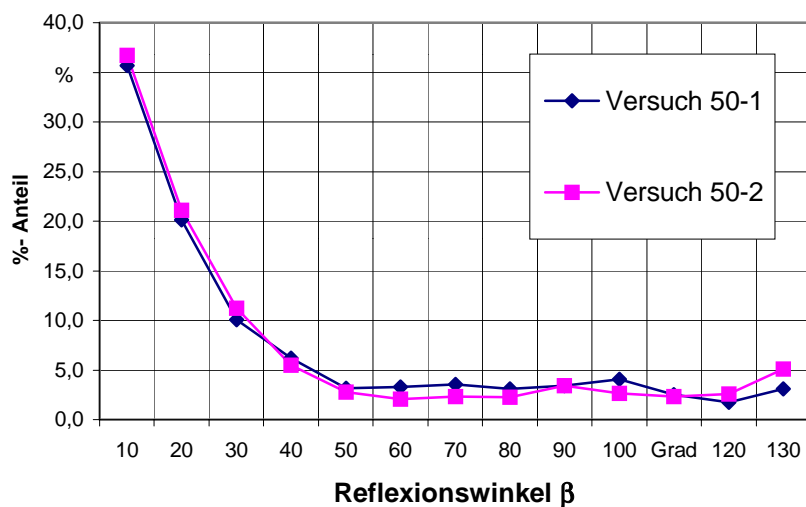


Bild 6.6: Vergleich MDF 50-1 / 50-2

Keine wesentliche Abweichung der Kurvenverläufe von MDF 50 und MDF 50-2 sind in Diagramm 6.5 zu erkennen. Auch hier wird zur weiteren Auswertung der Versuch MDF 50 ° verwendet.

6.1.3 Auswertung Buche

6.1.3.1 Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten bei Buche

Im Diagramm in Bild 6.7 Reflexionsverhalten Buchenspäne ist der prozentuale Massenanteil der reflektierten Späne über dem Auftreffwinkel α und dem sich einstellenden Reflexionswinkel β aufgetragen.

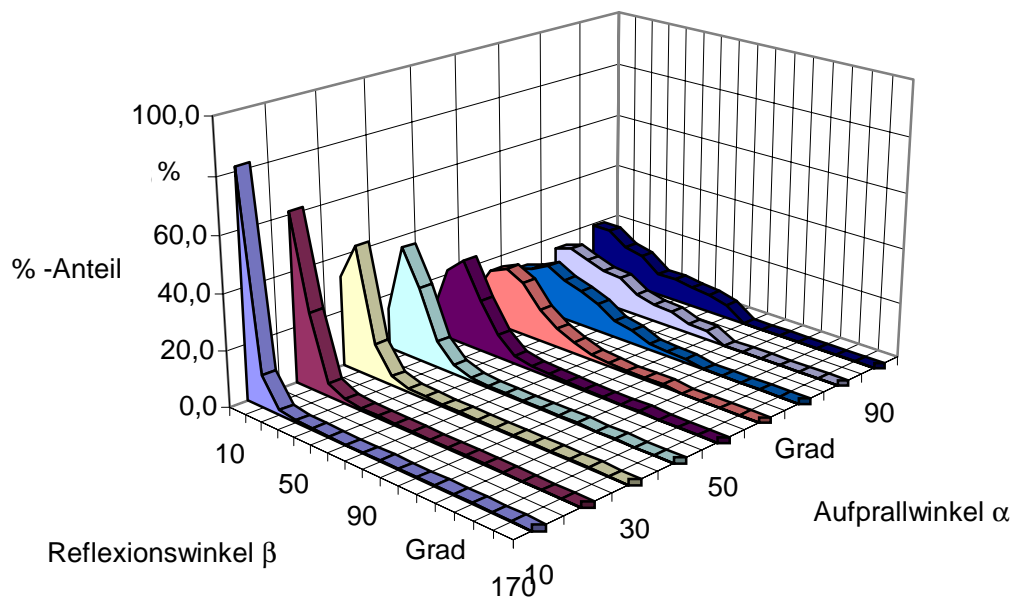


Bild 6.7: Reflexionsverhalten Buchenspäne

Bei den Aufprallwinkeln $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 20^\circ$ stellt sich ein Reflexionswinkel β mit einer ausgeprägten Spitze von 10° ein. Ab einem Reflexionswinkel $\beta > 20^\circ$ bzw. 30° werden fast keine Späne (prozentualer Anteil $< 2,0\%$, ab $\beta = 30^\circ < 1,0\%$) mehr aufgefangen.

Bei den Aufprallwinkeln $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 40^\circ$ ist der Reflexionswinkel bei 20° , wobei der prozentuale Massenanteil der unter diesem Winkel reflektierten Späne unter 50% liegt. Ab $\beta > 50^\circ$ liegt der Anteil der reflektierten Späne $< 1,5\%$.

Unter größer werdendem Auftreffwinkel ($50^\circ < \alpha < 70^\circ$) stellt sich der Reflexionswinkel β bei 30° ein. Hier werden die reflektierten Späne breiter gestreut. Ein Reflexionsmaximum ist gegeben, jedoch sind die benachbarten Fächer ähnlich stark gefüllt. Man kann hier von einer sogenannten „Parabelkurve“ oder „Parabelverteilung“ im Gegensatz zur „Hyperbelkurve bzw. „Hyperbelverteilung“ bei Auftreffwinkeln $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 20^\circ$ sprechen.

Das Reflexionsmaximum bei $\alpha = 80^\circ$ nimmt wieder ab und liegt bei $\beta = 20^\circ$. Im Bereich 10° und 30° liegt es ähnlich hoch wie beim Maximum, so dass man auch hier von einer Parabelverteilung sprechen kann.

Bei $\alpha = 90^\circ$ verteilt sich das Reflexionsmaximum auf den Bereich 10° und 20° , es werden hier gleich viel (jeweils 19 %) Späne in Fach 1 und 2 reflektiert. Anschließend fällt die Kurve gleichmäßig ab. Man kann hier von einer Linearkurve sprechen.

Die Darstellung der Reflexionsmaxima ist in Bild 6.8 für alle Auftreffwinkel aufgetragen.

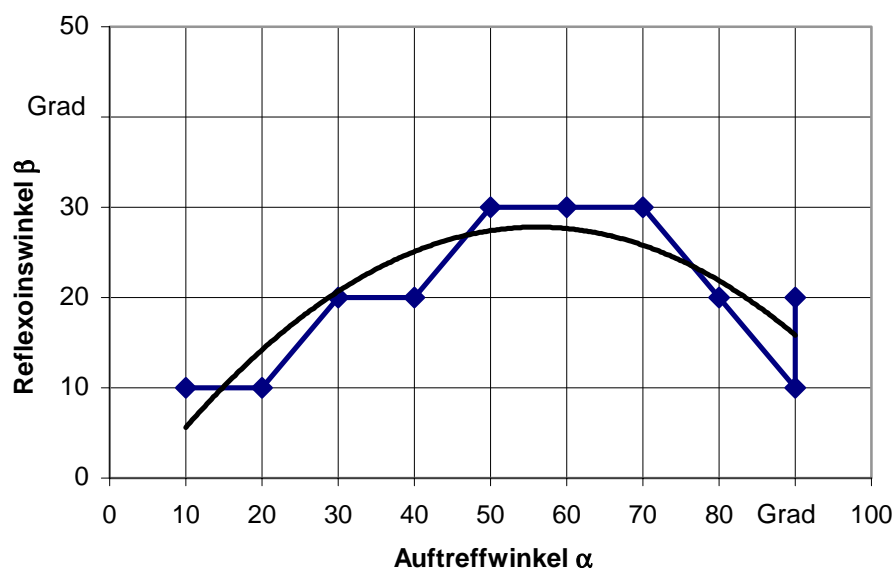


Bild 6.8: Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α bei Buche

Der Reflexionswinkel β nimmt mit steigendem Auftreffwinkel α zu, erreicht im Bereich $\alpha=50^\circ$ bis $\alpha=70^\circ$ sein Maximum bei $\beta = 30^\circ$ und fällt anschließend wieder ab. Bei $\alpha = 90^\circ$ liegt das Reflexionsmaximum zwischen $\beta = 10^\circ$ und $\beta = 20^\circ$.

6.1.3.2 Visualisierung des Reflexionsverhalten bei Buche

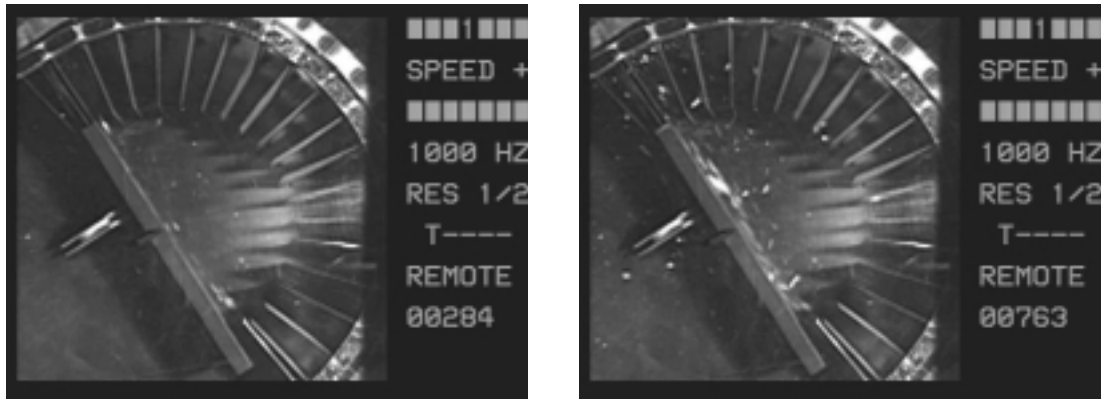


Bild 6.9: Flugverhalten Buche bei $\alpha = 10^\circ$

In Bild 6.9 ist das Reflexionsverhalten mehrerer Buchespäne unter dem Auftreffwinkel $\alpha = 10^\circ$ deutlich zu erkennen. Sie werden unter einem Winkel von 10° reflektiert und fliegen in Richtung des ersten Fachs.



Bild 6.10: Reflexionsverhalten Buche bei $\alpha = 50^\circ$

Bild 6.10 zeigt, wie Buchespäne unter $\alpha = 50^\circ$ auftreffen und nach dem Wandkontakt unter $\beta = 30^\circ$ reflektiert werden.



Bild 6.11: Versuchsaufbau bei Buche $\alpha = 10^\circ$

Die bei der Zerspanung entstandenen Späne sind unter $\alpha = 10^\circ$ auf die Prallwand getroffen. Bei dieser Einstellung wurden die meisten Partikel in das erste Fach reflektiert, es stellt den Reflexionswinkel $\beta = 10^\circ$ dar.

Bild 6.12 zeigt bei $\alpha = 20^\circ$ wie sich die Fächer gefüllt haben. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass sich die meisten Späne im ersten Fach sammeln. Ab dem dritten Fach sind kaum noch Späne in den Fächern vorzufinden.

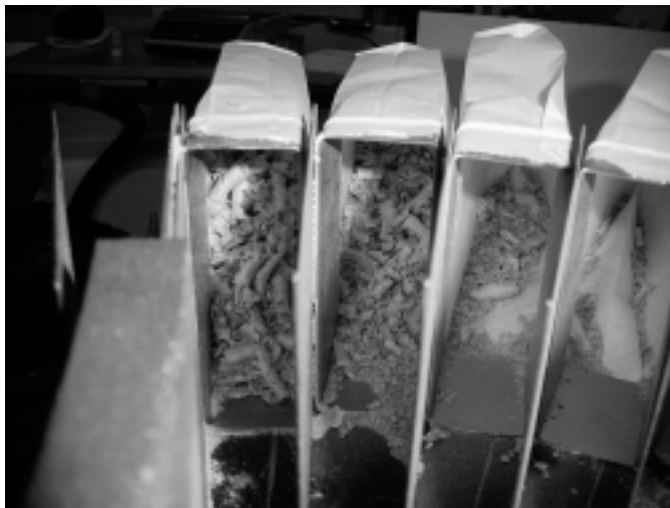


Bild 6.12: Versuchsaufbau bei Buche $\alpha = 20^\circ$



Bild 6.13: Versuchsaufbau bei Buche $\alpha = 40^\circ$

Auf Bild 6.13 sieht man den größer werdenden Streubereich der reflektierten Partikel. Hier handelt es sich um den Aufprallwinkel $\alpha = 40^\circ$. Der Streubereich liegt ebenfalls in diesem Bereich. Ab $\beta = 40^\circ$ fällt die Anzahl der reflektierten Späne stark ab.

6.1.3.3 Partikelgrößenverteilung Buche

Die Siebanalyse ergab die in Bild 6.14 dargestellte Tabelle, woraus sich die Partikelgrößenverteilung in % ergibt.

	Wanne	0,063	0,125	0,25	0,5	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
	Partikelklasse								
α	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10°	0,0	0,3	0,9	2,1	4,4	14,8	27,8	47,1	2,0
20°	0,0	0,1	0,7	2,4	4,7	14,5	27,8	46,9	2,0
30°	0,0	0,1	0,9	2,6	4,8	13,6	26,8	47,7	1,8
40°	0,0	0,0	0,6	2,4	5,3	13,2	23,7	51,9	2,7
50°	0,0	0,0	0,8	2,8	6,0	14,4	21,2	51,4	2,6
60°	0,0	0,0	0,4	3,2	6,2	19,1	29,9	38,8	1,3
70°	0,0	0,0	1,2	3,2	6,2	18,4	27,4	41,2	2,2
80°	0,0	0,0	0,6	3,4	7,3	19,5	28,7	38,6	1,3
90°	0,0	0,0	1,1	4,1	7,3	18,1	26,8	37,1	4,3
Mittelwert	0,0	0,1	0,8	2,9	5,8	16,2	26,7	44,5	2,2

Bild 6.14: Tabelle Partikelgrößenverteilung für Buche

Partikel der Größe 4,0 mm stellen mit durchschnittlich 44,5 % den Hauptanteil der Buchespäne dar. An zweiter Stelle stehen Partikel der Größe 2,0 mm mit durchschnittlich 26,7 %. Mit 16,2 % ist Spangröße 1,0 mm am Dritthäufigsten vertreten. Danach folgen Partikel der Größenklasse 0,5 mm mit 5,8 % und 0,25 mm mit 2,9 % knapp vor 8,0 mm mit 2,2 %. Späne mit 0,125 mm und 0,063 mm sind mit unter 1,0 % nicht relevant, <0,063 mm sind nicht vorhanden.

Das Diagramm Partikelgrößenverteilung in Bild 6.15 stellt diesen Zusammenhang graphisch dar.

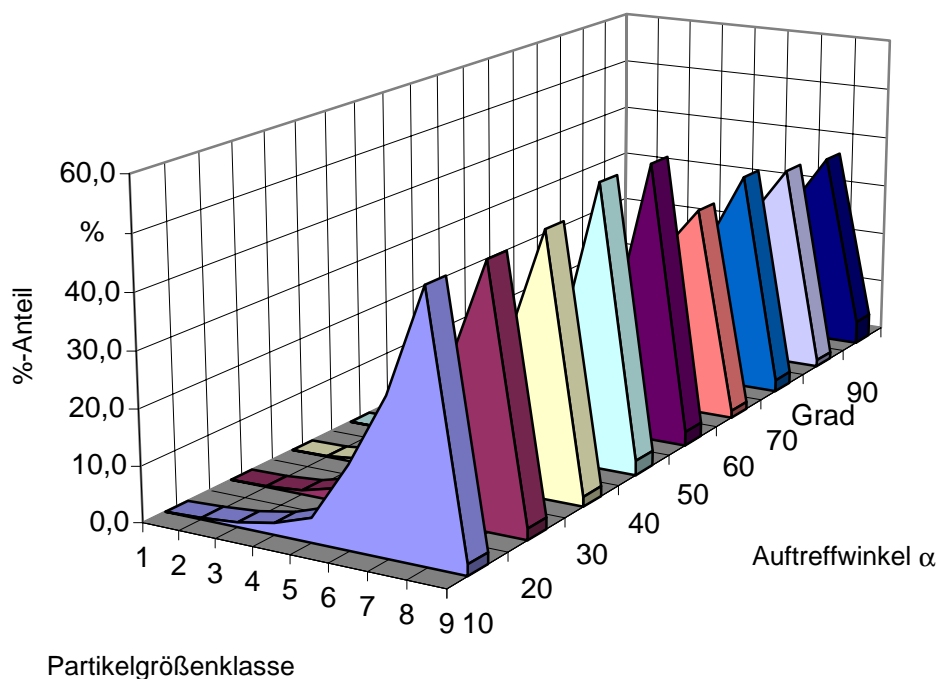


Bild 6.15: Partikelgrößenverteilung Buche

6.1.3.4 Ausgewählte Beispiele

Buchespäne der Größe 4,0 mm stellen den Hauptanteil der untersuchten Spanmasse. Deshalb soll an dieser Stelle die Verteilung von Buche 4,0 mm in Bild 6.16 entsprechend Diagramm 6.7 verdeutlicht werden.

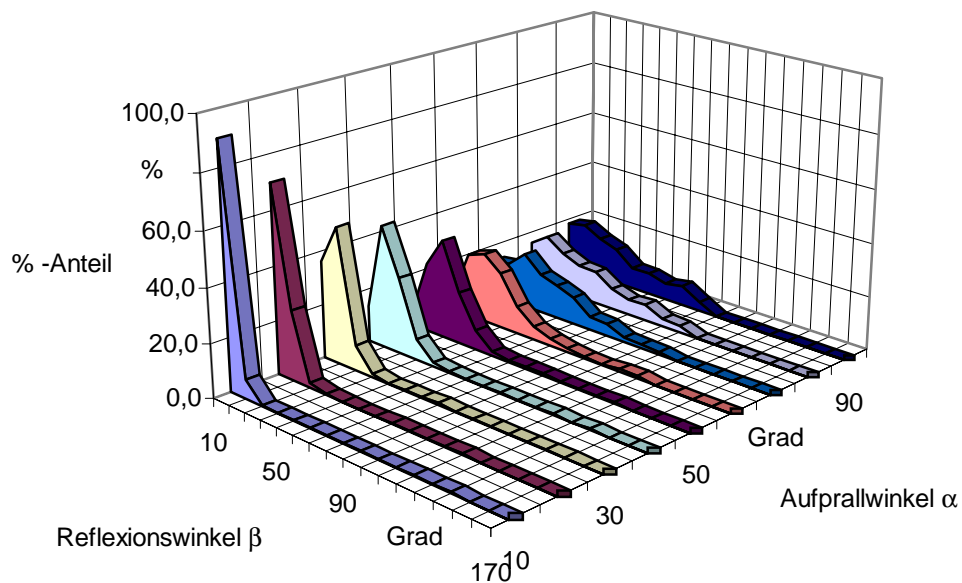


Bild 6.16: Buche 4,0 mm

Die Reflexionsmaxima der Partikelgröße 4,0 mm entsprechen genau den Werten der Gesamtverteilung. Auch die anderen charakteristischen Eigenschaften entsprechen denen der Gesamtverteilung. So sind auch hier für kleine Auftreffwinkel die sogenannten Hyperbelkurven, für mittlere Auftreffwinkel der Übergang von der Hyperbelkurve bis zur Parabelkurve und für die großen Auftreffwinkel eine Linearkurve charakteristisch.

Ähnlich verhalten sich auch die Verteilungen in Diagramm 6.17 Buche 1,0 mm. Die Reflexionsmaxima entsprechen ebenfalls denen der Gesamtverteilung und somit denen der von Buche 4,0 mm. Mit durchschnittlich 16,2 % stellen sie den größten Teil im Bereich der kleinen Späne der Gesamtmasse dar.

Die Verteilung der Spangrößen 0,25 mm, 0,5 mm und 2,0 mm verhalten sich ähnlich. Späne der Größe 0,063 mm, 0,125 mm und 8,0 mm sind für die Auswertung aufgrund ihres geringen Anteils nicht relevant.

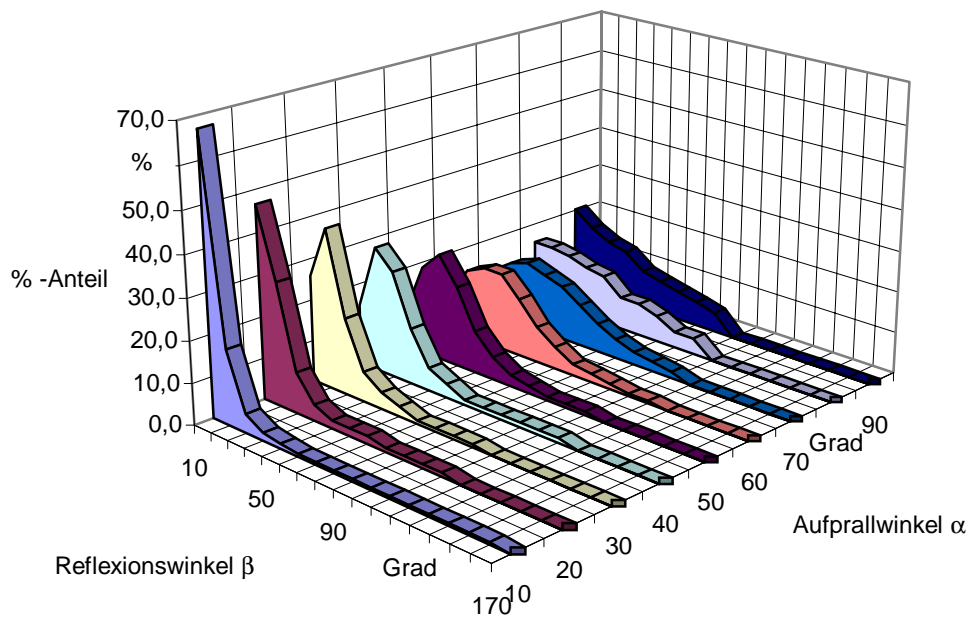


Bild 6.17: Buche 1,0 mm

6.1.4 Auswertung Fichte

6.1.4.1 Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten bei Fichte

Im Diagramm in Bild 6.18 Reflexionsverhalten Fichtespäne ist der prozentuale Massenanteil der reflektierten Späne über dem Auftreffwinkel α und dem sich einstellenden Reflexionswinkel β aufgetragen.

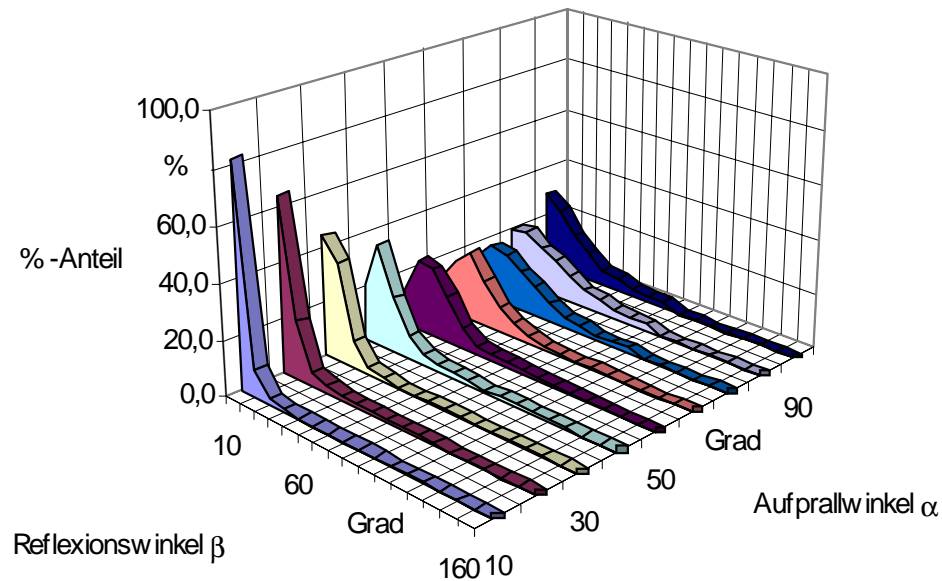


Bild 6. 18: Reflexionsverhalten Fichtespäne

Bei den Aufprallwinkeln $\alpha = 10^\circ$, 20° und 30° stellt sich ein Reflexionswinkel β von 10° ein. Dieser ist bei $\alpha = 10^\circ$ und 20° als alleiniger Spitzenwert vorhanden. Bei $\alpha = 30^\circ$ ist neben dem Reflexionsmaximum bei $\beta = 10^\circ$ schon ein deutlicher Anteil bei $\beta = 20^\circ$ zu erkennen. Bis zu diesem Bereich ($10^\circ < \alpha < 30^\circ$) kann man von einer Hyperbelverteilung sprechen. Ab dem Auftreffwinkel $\alpha = 40^\circ$ hat das Reflexionsmaximum einen Wert unter 40 %. Im Bereich des Auftreffwinkels zwischen 40° und 70° ist ein immer deutlicherer Übergang zur Parabelverteilung festzustellen. Für $\alpha = 40^\circ$ und 50° ist das Maximum von β bei 20° , bei $\alpha = 60^\circ$ bei 30° und bei $\alpha = 70^\circ$ wieder bei 20° .

Diese Abnahme des Reflexionswinkel ist auch bei Werten von $\alpha = 80^\circ$ und 90° zu erkennen. Der Reflexionswinkel β liegt bei $\alpha = 80^\circ$ bei 20° und für $\alpha = 90^\circ$ bei 10° . Hier kann wie bei der Betrachtung der Gesamtverteilung von Buche von einer Linearverteilung gesprochen werden. Auffallend ist jedoch auch hier das Zurückgehen des Reflexionswinkels für höhere Auftreffwinkel. Der Zusammenhang der Reflexionsmaxima über dem Auftreffwinkel ist im Diagramm in Bild 6.19 dargestellt.

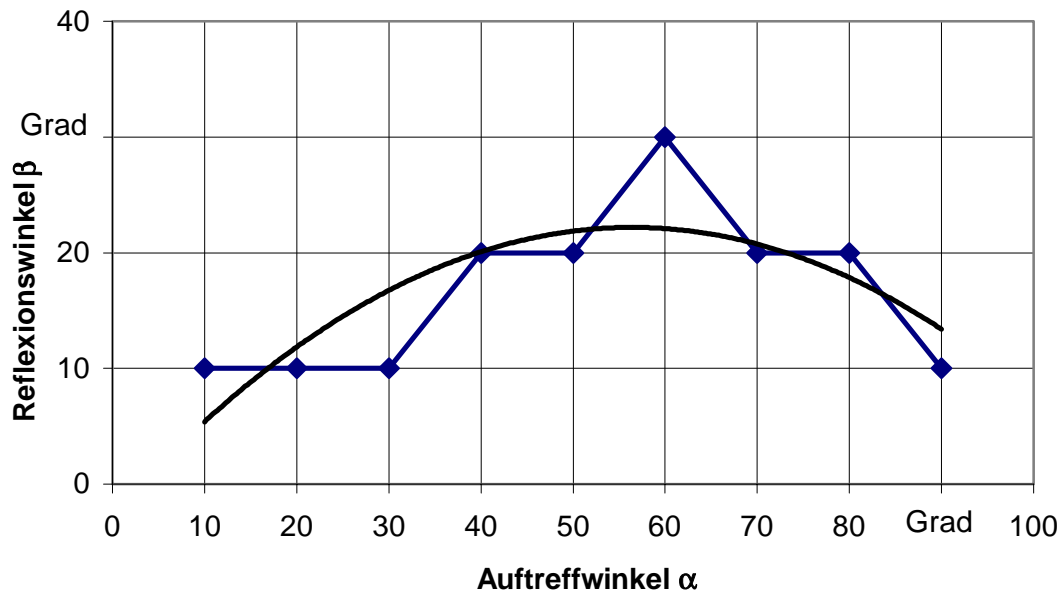


Bild 6.19: Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α für Fichte

Anhand dieses Diagramms kann man gut erkennen, dass der Reflexionswinkel mit größer werdendem Auftreffwinkel bis $\alpha = 60$ ebenfalls zunimmt, danach mit weiter steigenden Auftreffwinkeln jedoch wieder abfällt. Im ganzen Bereich ist der Reflexionswinkel jedoch stets kleiner als der Auftreffwinkel (Ausnahme $\alpha = 10^\circ \rightarrow \beta = 10$).

6.1.4.2 Visualisierung des Reflexionsverhaltens bei Fichte

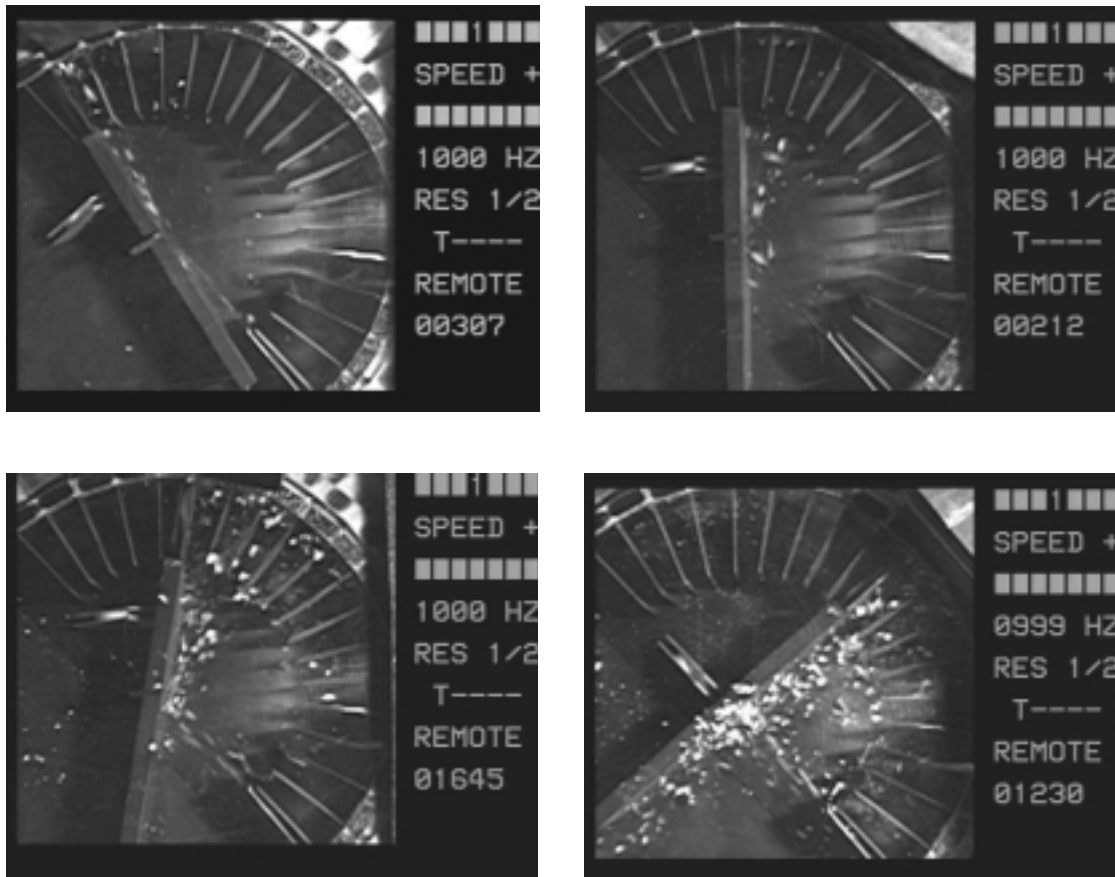


Bild 6.20: Sequenz von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für Fichte bei $\alpha = 10^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ und 90°

Die vier Hochgeschwindigkeitsbilder in Bild 6.20 zeigen das Reflexionsverhalten von Fichtespänen. Auf Bildausschnitt 307 sind Späne zu sehen, die unter 10° auf die Prallplatte stoßen und anschließend reflektiert werden. Der Reflexionswinkel beträgt ebenfalls 10° , die Späne fliegen alle in Richtung des ersten Fachs. Auf Bildausschnitt 212 ist das Reflexionsverhalten unter 40° Auftreffwinkel zu sehen. Die meisten Späne prallen unter 30° von der Wand ab. Bildausschnitt 1645 zeigt den Reflexionsbereich zwischen 10° und 30° bei einem Auftreffwinkel von 50° . Der vierte Bildausschnitt 1230 zeigt die Einstellung $\alpha = 90^\circ$. Die Partikel werden an der Prallplatte stark abgebremst und zerstreuen sich nach links und rechts optisch gleich stark. Dieses Verhalten war zu erwarten. Ein Auftreffwinkel von 90° bedeutet, dass die Partikel genau senkrecht auf die Prallplatte auftreffen. Von den Aufgefangenen Spänen, die nach rechts reflektiert wurden, sammelten sich die Meisten im Bereich $\beta = 10^\circ$ und $\beta = 20^\circ$.

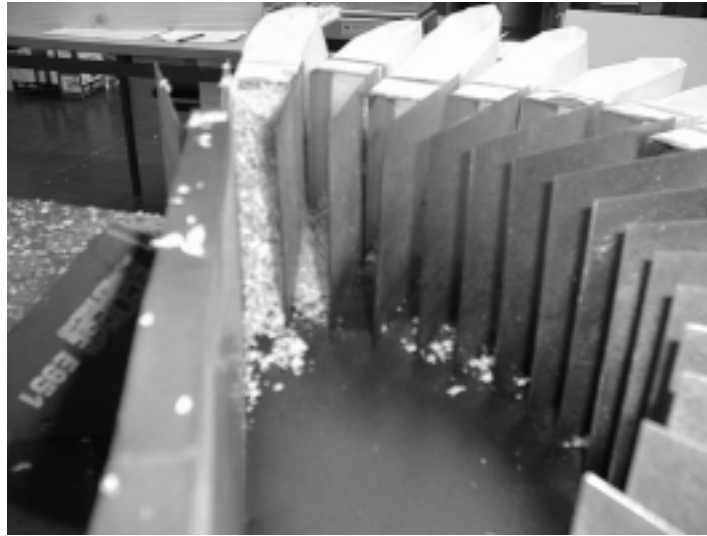


Bild 6.21: Reflektierte Fichtespäne bei $\alpha = 10^\circ$

Die reflektierten Fichtespäne unter $\alpha = 10^\circ$ (siehe Bild 6.21) sammeln sich zu knapp 82 % im ersten Fach. Deutlich weniger sind im zweiten Fach vorhanden. Weitere Fächer sind kaum noch mit Spänen gefüllt. Bild 6.22 zeigt, dass bei einem Auftreffwinkel von $\alpha = 30^\circ$ eine Verteilung der reflektierten Partikel hauptsächlich in den ersten drei Fächern einstellt.

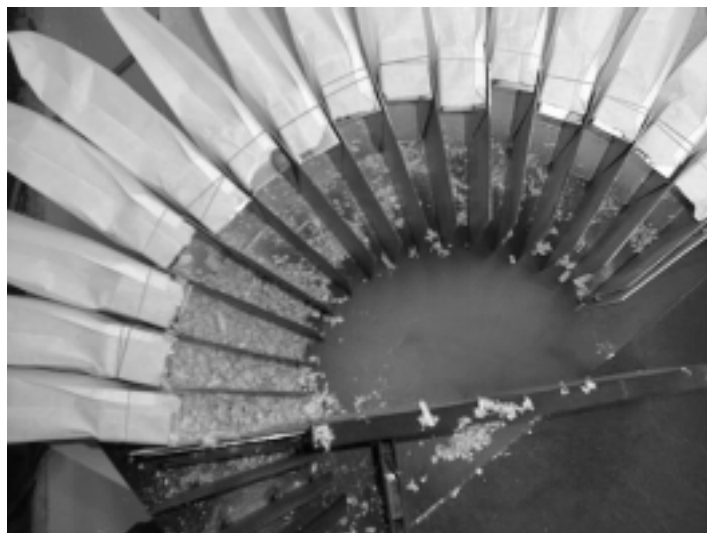
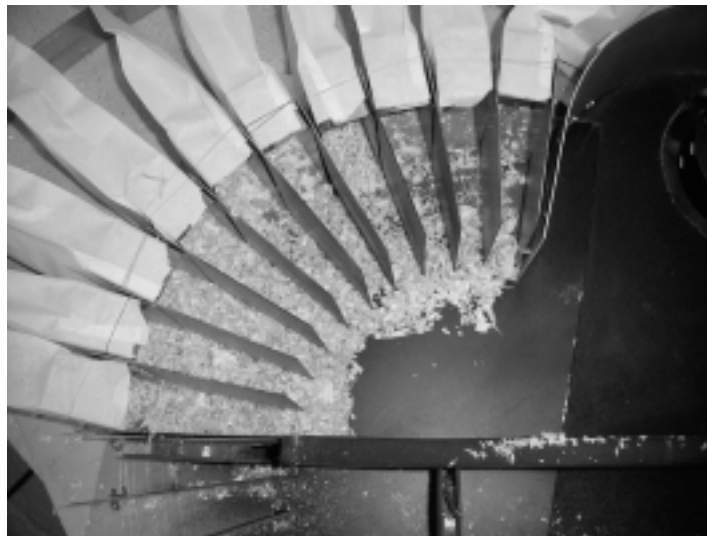


Bild 6.22: Fichte $\alpha = 30^\circ$

Bild 6.23: Fichte $\alpha = 80^\circ$

Ein deutlich größerer Streubereich der reflektierten Späne ist in Bild 6.23 zu erkennen. Die unter 80° auftreffenden Späne werden im Bereich zwischen 10° und 50° reflektiert.

6.1.4.3 Partikelgrößenverteilung Fichte

Die Partikelgrößenverteilung, bestimmt durch die Siebanalyse, ergab folgende Verteilung, die in der Tabelle in Bild 6.24 wiedergegeben ist:

	Wanne	0,063	0,125	0,25	0,5	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
	Partikelklasse								
α	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10°	0,0	0,0	0,5	1,8	5,6	20,1	38,9	31,3	0,5
20°	0,0	0,0	0,3	2,4	7,3	20,1	44,4	24,3	0,0
30°	0,0	0,0	0,2	1,7	5,7	17,2	41,3	31,6	1,2
40°	0,0	0,0	0,4	2,5	5,6	17,1	42,2	30,9	0,5
50°	0,0	0,0	0,0	2,2	6,0	17,7	43,0	29,1	1,3
60°	0,0	0,0	0,4	2,7	8,5	23,9	48,8	15,4	0,2
70°	0,0	0,0	0,2	2,3	7,7	21,9	47,1	20,0	0,0
80°	0,0	0,0	0,0	1,7	5,3	19,1	41,3	30,7	1,0
90°	0,0	0,0	0,0	1,9	5,4	18,3	39,7	34,2	0,0
Mittelwert	0,0	0,0	0,2	2,1	6,3	19,5	43,0	27,5	0,5

Bild 6.24: Tabelle Partikelgrößenverteilung für Fichte

Der Hauptanteil an den reflektierten Spänen ist mit durchschnittlich 43,0 % der Größe 2,0 mm zuzuordnen. Den zweitgrößte Anteil mit 27,5 % stellten Späne der Größe 4,0 mm, gefolgt von Spangröße 1,0 mm mit 19,5 %. Mit 6,3 % sollen Späne mit 0,5 mm und mit 2,1 % Späne mit 0,25 mm noch betrachtet werden. Spangröße 8,0 mm und kleiner 0,125 mm sind nicht relevant. Partikel < 0,063 mm und 0,063 mm große Späne sind bei der Holzart Fichte nicht angefallen.

Diesen Zusammenhang stellt das Diagramm in Bild 6.25 dar. Hier sind die Verteilungen in Prozentwerten der verschiedenen Partikelklassen über dem Auftreffwinkel aufgetragen.

Zur weiteren Erläuterung des Reflexionsverhaltens werden aufgrund dieser Auswertung die Partikelgrößen 2,0 mm und 0,5 mm herangezogen.

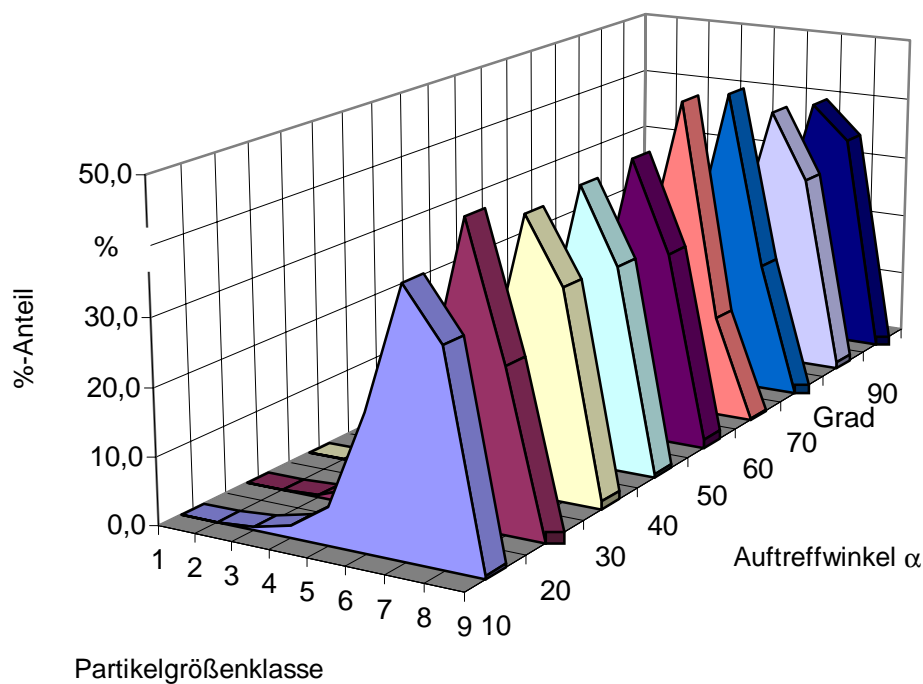


Bild 6.25: Partikelgrößenverteilung Fichte

6.1.4.4 Ausgewählte Beispiele für Fichte

Fichtenspäne der Größe 2,0 mm stellen den Hauptanteil der anfallenden Späne bei den durchgeführten Versuchen dar. Die Verteilung entsprechend der Gesamtverteilung ist im Diagramm in Bild 6.26 gegeben.

Die Reflexionsmaxima der Partikelgröße 2,0 mm entsprechen genau den Werten der Gesamtverteilung. Ebenso ist der Verteilungstyp der unterschiedlichen Auftreffwinkel mit denen der Gesamtverteilung identisch. Dies ist auch für Partikelgröße 1,0 mm und 4,0 mm der Fall.

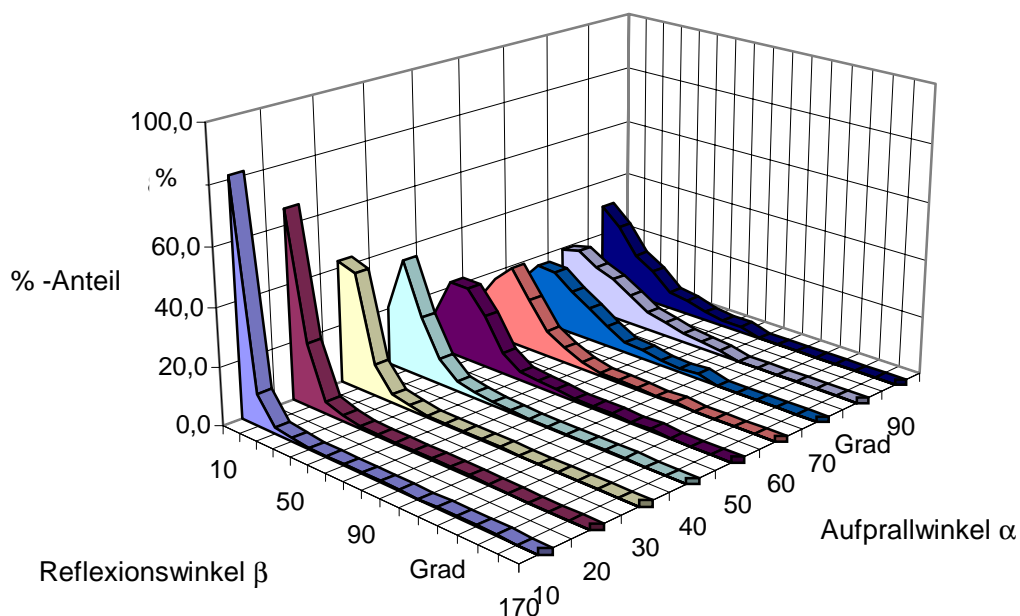


Bild 6.26: Verteilung Fichte 2,0 mm

Als weiteres Beispiel soll die Verteilung Fichte 0,5 mm herangezogen werden. Die Verteilung ist im Diagramm in Bild 6.27 dargestellt. Für Fichtespäne mit 0,5 mm Größe stellt sich für die Auftreffwinkel $\alpha = 10^\circ$ und 20° wie bisher der Reflexionswinkel β von 10° als Spitzenwert ein. Bei $\alpha = 30^\circ$ ist der Übergang zur Parabelkurve festzustellen. Das Reflexionsmaximum liegt zwischen 10° und 20° , liegt aber bereits unter 40 %. Ein deutliches Reflexionsmaximum bei 20° liefert auch der Auftreffwinkel $\alpha = 40^\circ$.

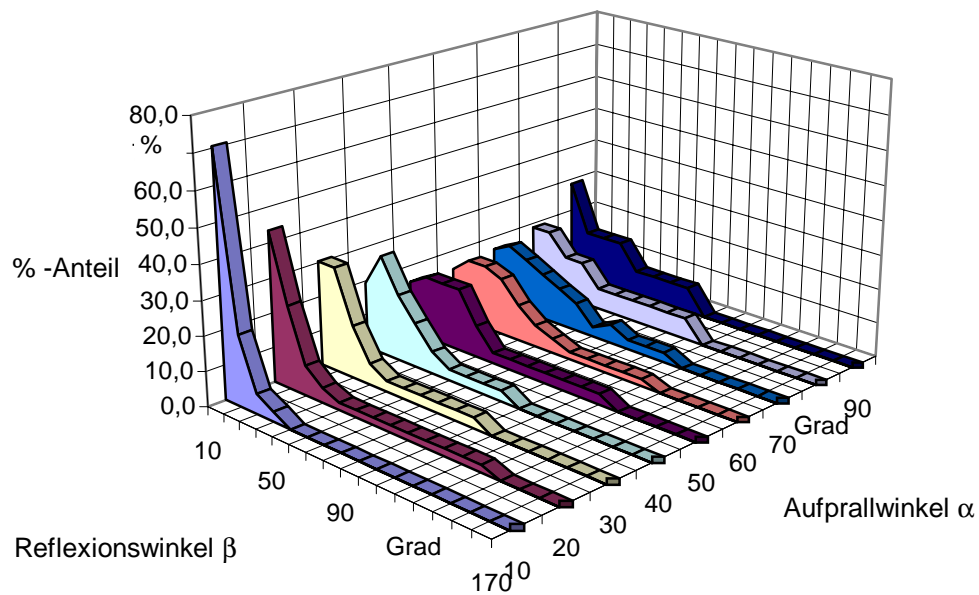


Bild 6.27: Verteilung Fichte 0,5 mm

Bei $\alpha = 50^\circ$ ergibt sich kein einzelner Reflexionswinkel, sondern im Bereich zwischen 20° und 40° werden jeweils ca. 18 % reflektiert. Unter 10° werden ca. 15 % reflektiert, anschließend fällt der Anteil der reflektierten Späne stark ab.

Eine schöne Parabelverteilung stellt sich bei $\alpha = 60^\circ$ und 70° ein. Bei $\alpha = 60^\circ$ liegt ebenfalls kein ausgeprägtes Maximum vor, sondern es liegt im Bereich zwischen 20° und 30° . Das Reflexionsmaximum für $\alpha = 70^\circ$ liegt bei 20° . Ab diesem Auftreffwinkel wird der Reflexionswinkel wieder kleiner. Dies entspricht auch der Gesamtverteilung. Die Linearverteilung für $\alpha = 80^\circ$ und 90° verläuft nicht linear, sondern stufenförmig. Das Maximum für β liegt für $\alpha = 80^\circ$ bei 10° und 20° mit knapp unter 20 %, fällt dann auf 12 % bei 30° und 40° ab und verläuft dann gleichmäßig bei 6 %. Eine ausgeprägte Spitze von rund 29 % ergibt der Auftreffwinkel $\alpha = 90^\circ$. Terrassenförmig fällt er auf 14 % und dann auf 7 % ab.

6.1.5 Auswertung FPY

6.1.5.1 Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten bei FPY

Im untenstehenden Diagramm Reflexionsverhalten FPY in Bild 6.28 ist der prozentuale Massenanteil der reflektierten FPY-Partikel über dem Aufprallwinkel und dem Reflexionswinkel angegeben.

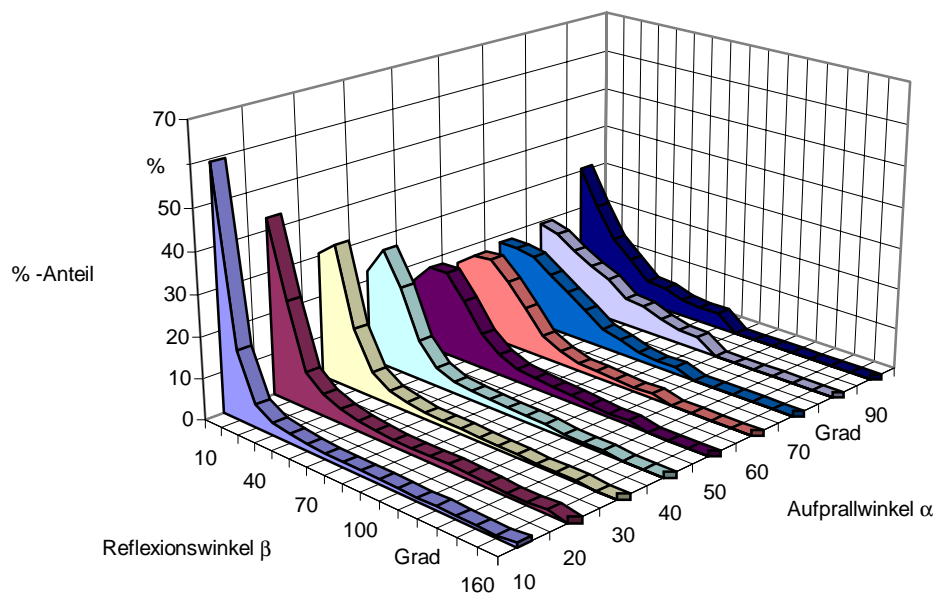


Bild 6.28: Reflexionsverhalten FPY- Späne

Das Reflexionsmaximum liegt für $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 20^\circ$ bei 10° . Beide Kurven haben dort eine ausgeprägte Spitze. Für $\alpha = 10^\circ$ werden knapp 60 % und für $\alpha = 20^\circ$ 42,8 % in diesem Bereich reflektiert. Danach fallen die Werte stark ab. Der Kurvenverlauf kann als Hyperbelkurve bezeichnet werden.

Für die Auftreffwinkel $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 40^\circ$ geht dieser Verlauf langsam in den Bereich der Parabelkurve über. Die Hochpunkte beider Funktionen liegen bei 20° , sind aber keine absoluten Spitzenwerte mehr, sondern die angrenzenden Bereiche liegen schon ähnlich hoch.

Noch deutlicher ist dies in den Kurvenverläufen $\alpha = 50^\circ$ bis $\alpha = 70^\circ$ zu erkennen. Dort existiert kein absolutes Maximum, bei $\alpha = 50^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ liegt das Hochplateau im Bereich zwischen 20° und 30° , bei $\alpha = 70^\circ$ bei 10° und 20° . Man kann in allen drei Fällen von Parabelkurven sprechen, deren Hochpunkte allerdings mit steigendem Auftreffwinkel in

Richtung kleinere Reflexionswinkel wandert. Der prozentuale Anteil der reflektierten Späne in diesem Bereich liegt bei ca. 20 %.

Der Kurvenverlauf für den Auftreffwinkel $\alpha = 80^\circ$ entspricht dem der Linearkurve. Sie startet bei $\beta = 10^\circ$ mit ihrem Maximum von 19,3 % und fällt dann kontinuierlich ab. Bei $\alpha = 90^\circ$ verhält sich die Kurve zwischen den Verläufen einer Hyperbelkurve und einer Linearkurve. Ihr ausgeprägtes Maximum ist bei $\beta = 10^\circ$ mit über 30 %, fällt dann schnell ab bis $\beta = 40^\circ$ und verläuft dann fast waagrecht bei ca. 4 % bis zum Ende.

Das Diagramm in Bild 6. 29 stellt den Reflexionswinkel über dem Aufprallwinkel dar.

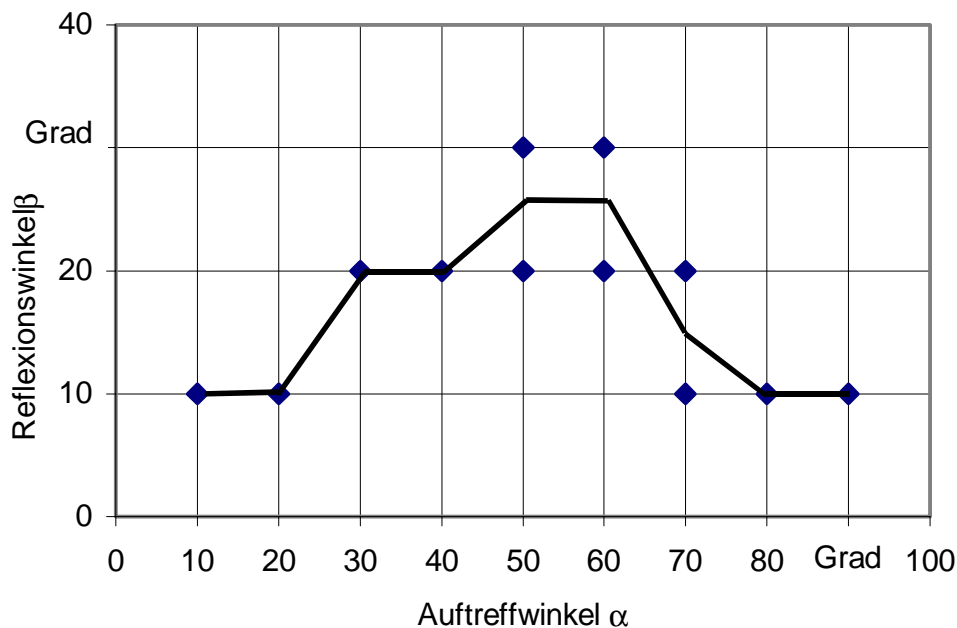


Bild 6.29: Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α für FPY

Der Reflexionswinkel nimmt auch bei FPY mit steigendem Auftreffwinkel bis 50° und 60° zu, hier erreicht er sein Maximum zwischen 20° und 30° und fällt dann bis zu $\beta = 10^\circ$ bei $\alpha = 90^\circ$ wieder ab. Der Reflexionswinkel ist auch hier wieder stets kleiner als der Auftreffwinkel (Ausnahme: $\alpha = 10^\circ \rightarrow \beta = 10^\circ$).

Anzumerken ist, dass bei $\alpha = 50^\circ$ und 60° das Maximum des Reflexionswinkels zwischen $\beta = 20^\circ$ und 30° liegt, ebenso bei $\alpha = 70^\circ$, dort ist β zwischen 10° und 20° .

6.1.5.2 Visualisierung des Reflexionsverhalten bei FPY

In Bild 6.30 sind zwei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von FPY beim Aufprall an der Wand abgebildet. Bildausschnitt 730 zeigt dies für $\alpha = 10^\circ$, Bildausschnitt 1346 für $\alpha = 50^\circ$.

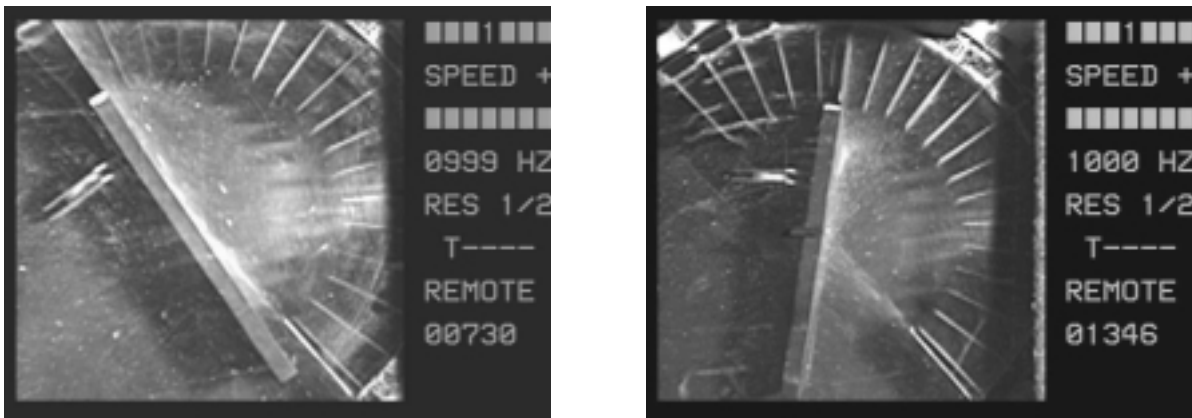


Bild 6.30: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen FPY für $\alpha = 10^\circ$ und 50°

Bei $\alpha = 10^\circ$ stellte sich der Reflexionswinkel bei 10° ein. Bei $\alpha = 50^\circ$ ist der Reflexionswinkel zwischen 20° und 30° . In Bildausschnitt 1346 ist dieser Streubereich mit seinem Kern zu erkennen.



Bild 6.31: FPY $\alpha = 10^\circ$ von oben

In Bild 6.31 ist zu erkennen, dass bei dem flachen Aufprallwinkel von $\alpha = 10^\circ$ sich die Mehrheit der Späne in den ersten Fächern sammeln. Bei steileren Aufprallwinkeln werden die Partikel in alle Fächer verteilt. Bild 6.32 zeigt das Beispiel für $\alpha = 90^\circ$.



Bild 6.32: FPY $\alpha = 90^\circ$ von oben

6.1.5.3 Partikelgrößenverteilung FPY

Die Tabelle in Bild 6.33 6.4 und das Diagramm in Bild 6.34 geben die Partikelgrößenverteilung für FPY wieder.

	Wanne	0,063	0,125	0,25	0,5	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
α	Partikelklasse								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1,3	7,4	20,1	33,2	27,9	9,3	0,4	0,0	0,0
20	0,7	7,2	20,7	32,8	26,1	8,6	1,1	0,0	0,0
30	0,5	5,4	16,8	32,9	31,3	11,2	0,6	0,0	0,0
40	0,6	5,2	16,7	32,8	32,0	11,5	0,6	0,0	0,0
50	0,6	6,1	19,7	33,4	28,3	9,8	0,5	0,0	0,0
60	0,4	4,6	17,5	33,5	31,0	11,5	0,9	0,0	0,0
70	0,7	5,1	17,2	32,8	31,6	11,8	0,6	0,0	0,0
80	0,6	6,2	18,7	33,4	29,0	10,3	1,0	0,0	0,0
90	0,6	5,6	17,8	34,2	30,6	10,0	0,3	0,0	0,0
Mittelwert	0,7	5,9	18,3	33,2	29,8	10,4	0,7	0,0	0,0

Bild 6.33: Tabelle Partikelgrößenverteilung FPY

Die Spangröße 0,25 mm stellt mit durchschnittlich 33,2 % über alle Auftreffwinkel den Hauptanteil. Mit 29,8 % folgt der Anteil von Spänen der Größe 0,5 mm. Partikelgröße 0,25 mm gehört mit 18,3 % ebenfalls zu den häufig vorhandenen. 1,0 mm große FPY Späne sind mit 10,4 % vertreten. Partikel 0,063 mm mit 5,9 %. Mit 0,7 % sind die Späne der Größe 2,0 mm und die in der Wanne aufgefangenen Partikel $< 0,063$ mm sind für die weitere Auswertung nicht relevant. Späne der Größe 4,0 mm und 8,0 mm sind nicht vorhanden.

Zur weiteren Auswertung sollen die Diagramme FPY 0,25 mm und 0,063 mm angeführt werden.

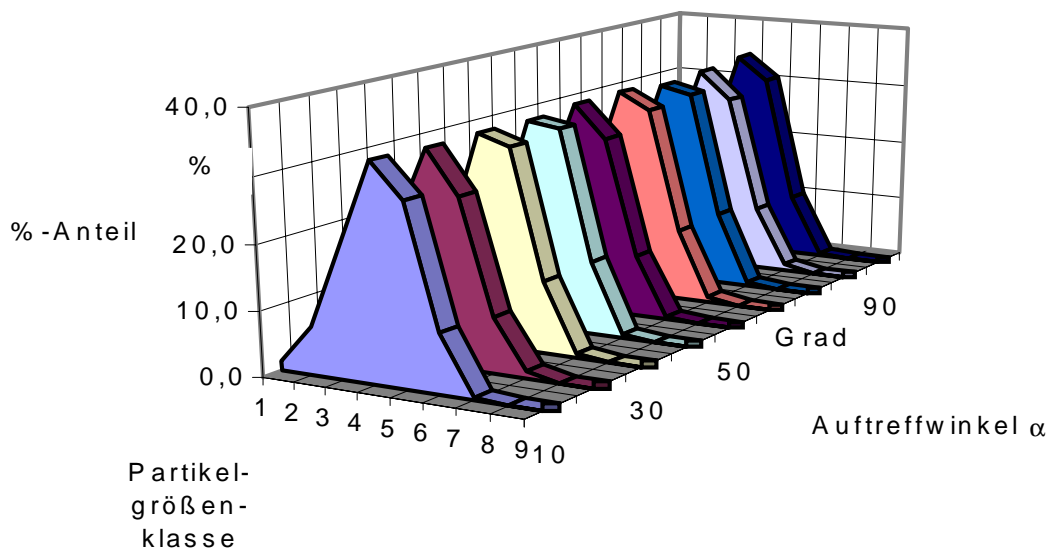


Bild 6.34: Partikelgrößenverteilung für FPY

6.1.5.4 Ausgewählte Beispiele für FPY

Die Späne FPY 0,25 mm stellen mit 33,2 % den Hauptanteil dar. Deshalb soll das Reflexionsverhalten dieser Partikelklasse genauer untersucht werden. Das Reflexionsverhalten dieser Partikel entspricht in Bezug auf Reflexionswinkel und Streubereich der Gesamtverteilung, siehe Bild 6.35. Anzumerken ist jedoch, dass sich Partikel der Klasse 0,5 mm und 1,0 mm ähnlich verhalten.

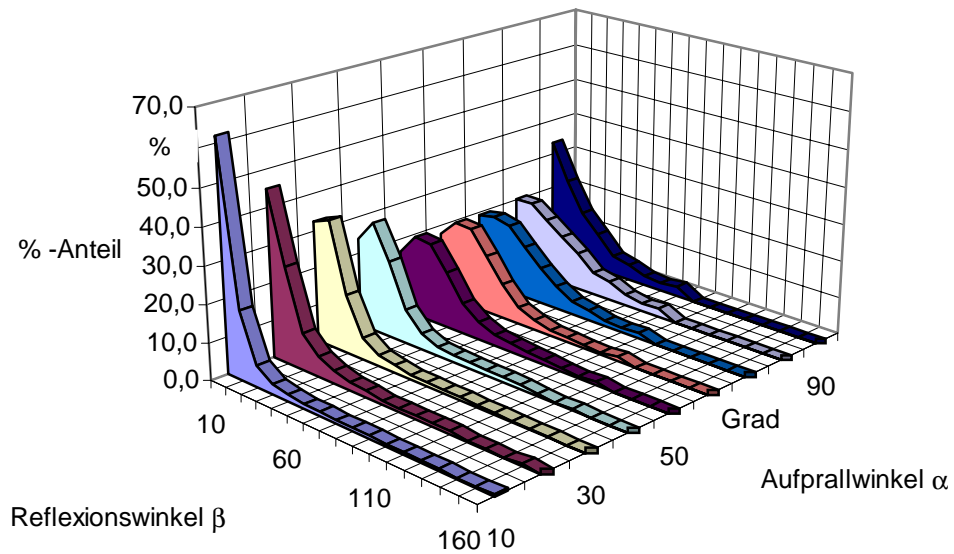


Bild 6.35: FPY 0,25 mm

Eine Ausnahme im Bereich der FPY –Partikel ist das Verhalten der Partikelklasse 0,063 mm. Auch Partikel mit 0,125 mm verhalten sich ähnlich. Insgesamt stellen diese beiden Partikelgrößen zusammen knapp 25 % dar. Wie aus dem Diagramm in Bild 6.36 zu erkennen ist, liegt das Reflexionsmaximum über alle Auftreffwinkel bei 10°. Eine weitere Besonderheit stellt die Verteilungsart dar. Man kann im gesamten Bereich von einer Hyperbelverteilung sprechen, welche nicht dem Reflexionsverhalten der anderen Spanklassifikationen entspricht.

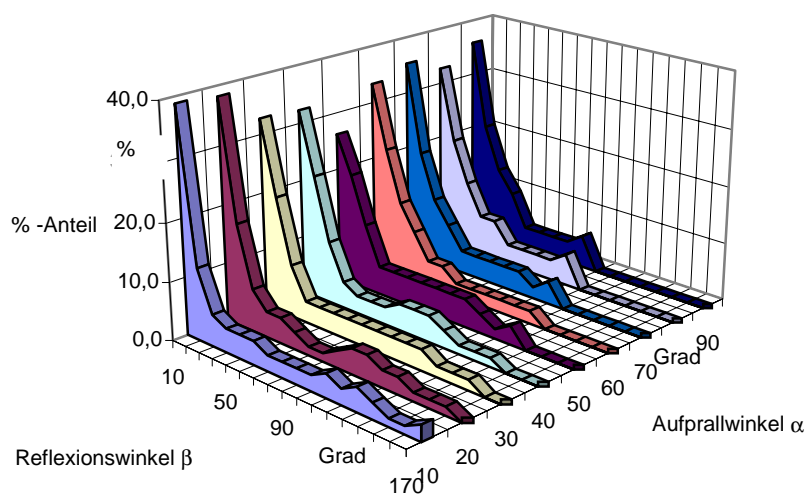


Bild 6.36: FPY 0,063 mm

6.1.6 Auswertung MDF

6.1.6.1 Gesamtverteilung und Reflexionsverhalten MDF

Im untenstehenden Diagramm in Bild 6.37 Reflexionsverhalten MDF ist der prozentuale Massenanteil der reflektierten FPY-Partikel über dem Auftreffwinkel und dem Reflexionswinkel angegeben.

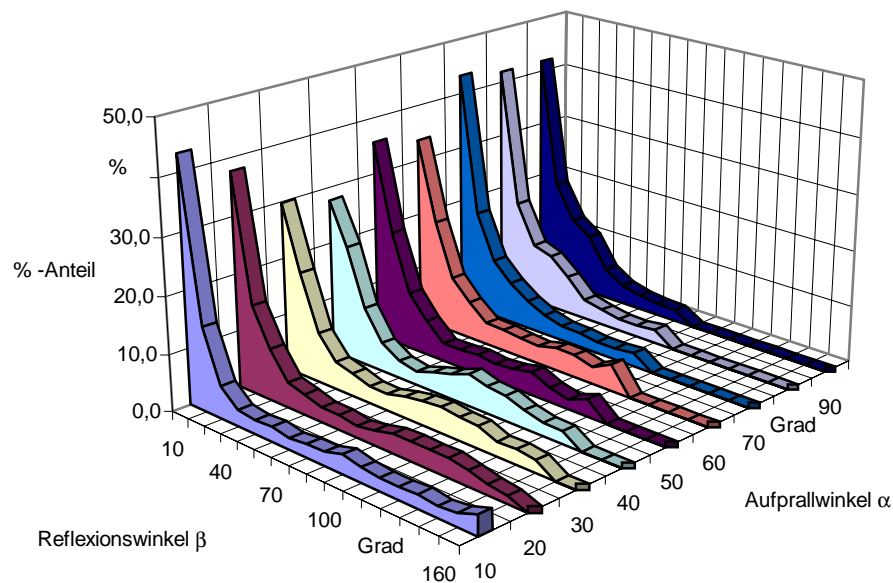


Bild 6.37: Reflexionsverhalten MDF

Das Reflexionsmaximum liegt für alle Auftreffwinkel bei 10° . Danach fallen die Werte stark ab. Der Kurvenverlauf aller Verteilungen kann als Hyperbelkurve bezeichnet werden. Das Reflexionsmaximum liegt mit Ausnahme von $\alpha = 30^\circ$ und 40° bei ca. 40 %. Für die Auftreffwinkel $\alpha = 30^\circ$ und 40° liegt das Maximum bei ca. 30 %.

Bild 6.38 stellt den Reflexionswinkel über dem Auftreffwinkel dar. Beim Reflexionsverhalten von MDF stellte sich dabei ein konstanter Reflexionswinkel von 10° über alle Auftreffwinkel ein. Dies kann auf die vorwiegend kleinen Partikel des Spanguts zurückgeführt werden.

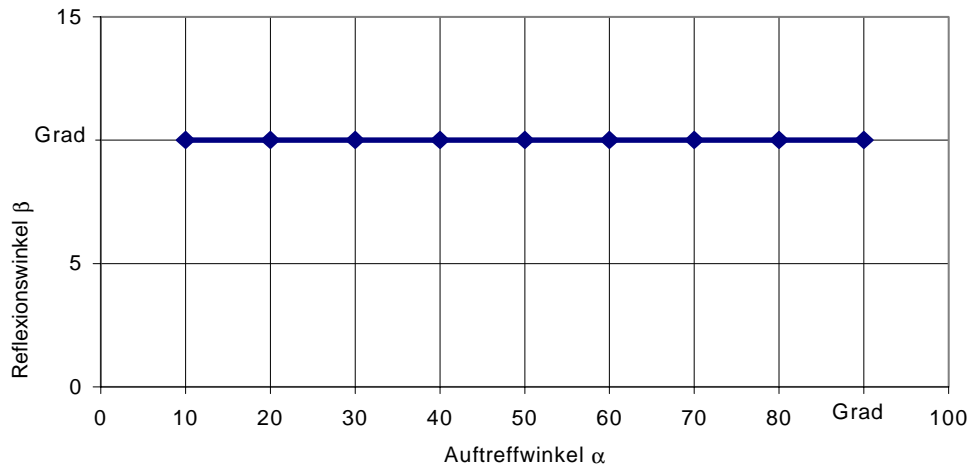


Bild 6.38: Reflexionswinkel β über Auftreffwinkel α für MDF

6.1.6.2 Visualisierung des Reflexionsverhalten bei MDF

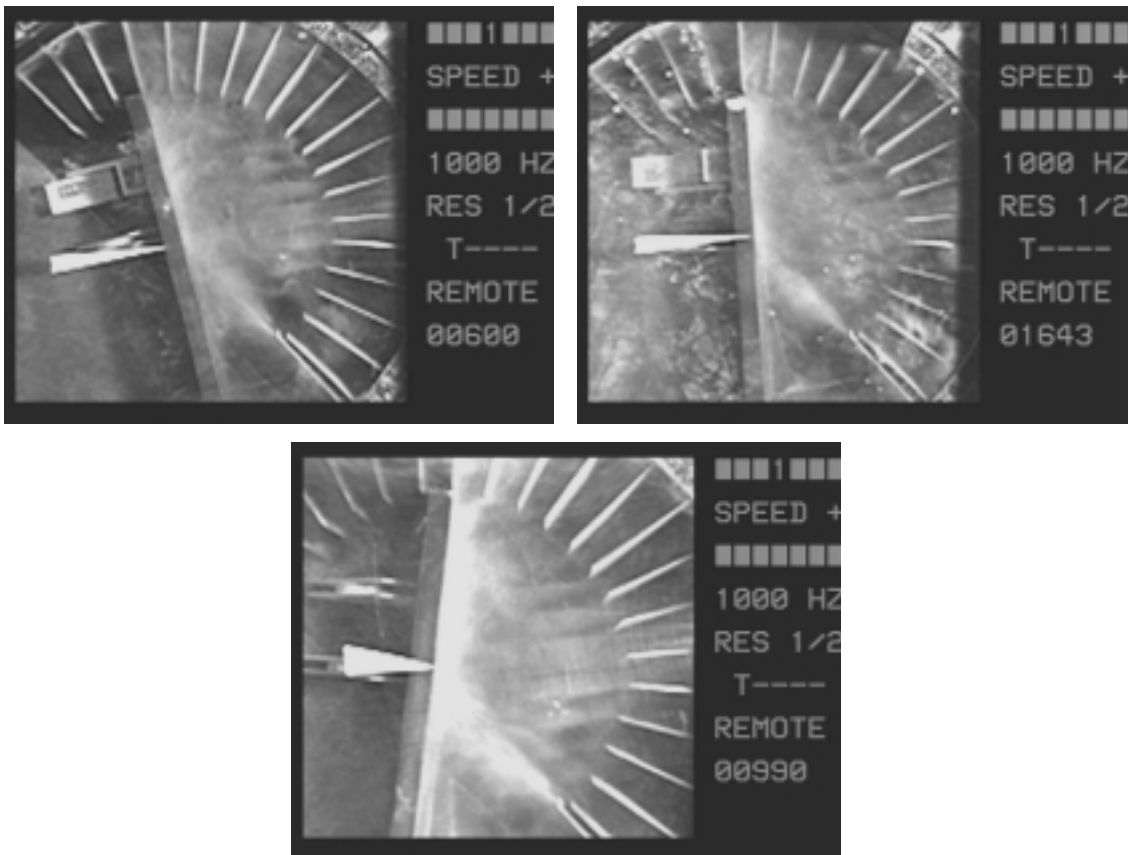


Bild 6.39: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen MDF unter $\alpha = 30^\circ$, 40° und 50°

Bild 6.39 zeigt drei Hochgeschwindigkeitsbilder. In Bildausschnitt 600 trifft der Spänestrahl unter 30° auf die Prallplatte und wird nur schwach reflektiert. Die meisten MDF-Partikel sammeln sich im ersten Fach. Dies ist auch auf Bildausschnitt 1643 und Bildausschnitt 990 zu erkennen. Hier trifft der MDF-Strahl unter 40° bzw. 50° auf die Prallplatte, doch eine Reflektion vergleichbar mit Fichte oder Buche findet nicht statt. Zudem sind bei diesen Aufnahmen keine einzelnen Späne zu erkennen. Die hellen Bereiche entlang der Prallplatte sind auf eine Staubwolke zurückzuführen.

Bild 6.40 zeigt die Verteilung der reflektierten MDF-Partikel. Die unter $\alpha = 20^\circ$ aufgetroffenen Partikel wurden hauptsächlich in das erste Fach reflektiert.

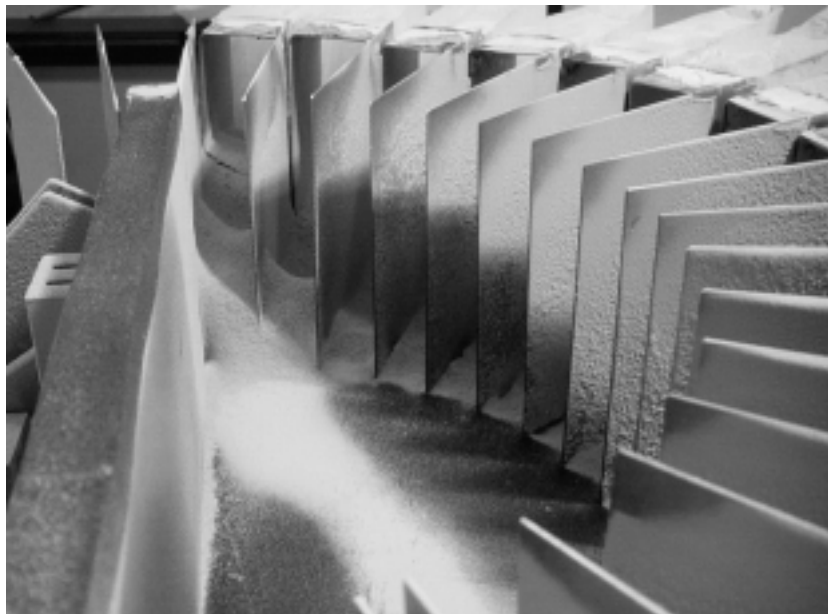


Bild 6.40: MDF $\alpha = 20^\circ$

Diesen Sachverhalt zeigt auch Bild 6.41. Hier sind die Partikel unter 60° auf die Wand aufgetroffen. Das erste Fach ist am Stärksten gefüllt. In den folgenden Fächern sammeln sich immer weniger Partikel.

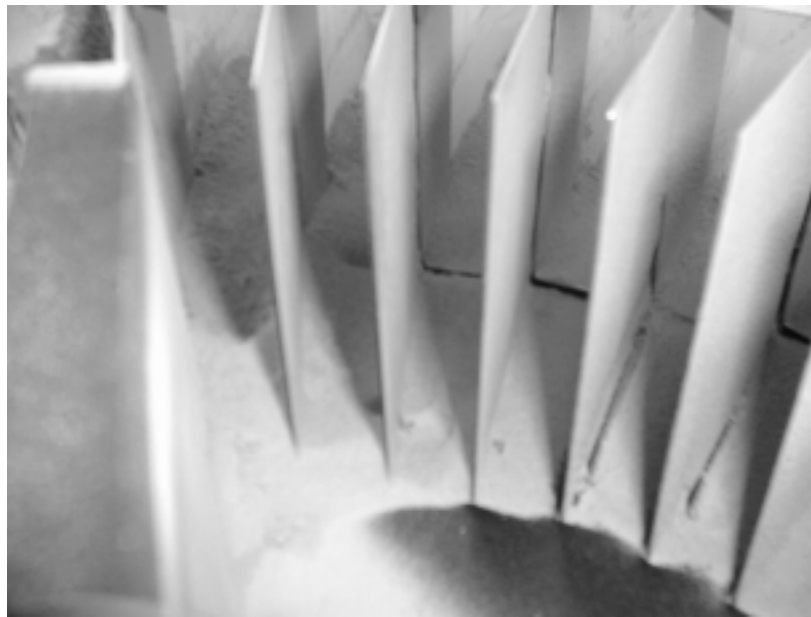


Bild 6.41: MDF $\alpha = 60^\circ$

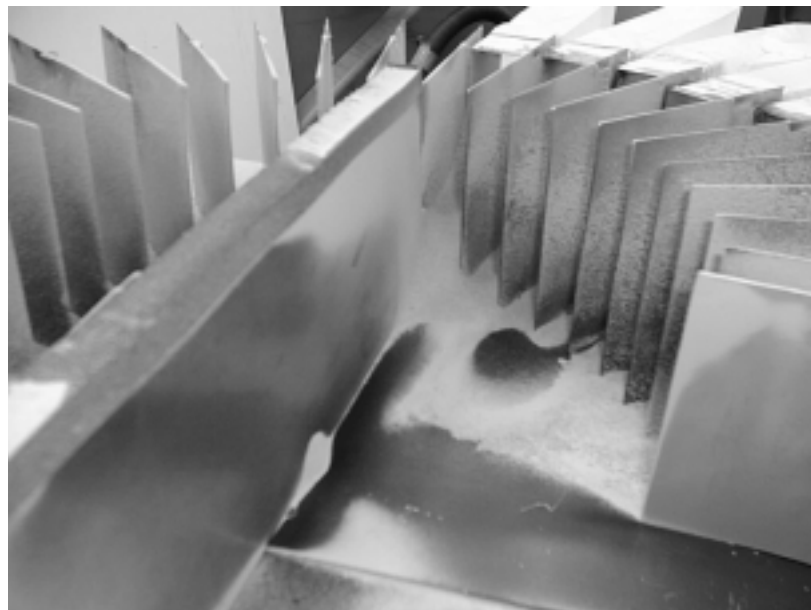


Bild 6.42: MDF $\alpha = 90^\circ$

Bild 6.42 zeigt die Reflexionsverteilung für den Auftreffwinkel $\alpha = 90^\circ$. Neben Fach eins und zwei wurden hier die Späne auch in die Fächer fünf bis neun reflektiert.

6.1.6.3 Partikelgrößenverteilung MDF

Die Tabelle in Bild 6.43 und das Diagramm in Bild 6.44 geben die Partikelgrößenverteilung für MDF wieder.

	Wanne	0,06	0,125	0,25	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	4,0 mm	8,0 mm
	Partikelklasse								
α	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10°	22,4	26,7	27,9	19,0	2,5	1,7	0,0	0,0	0,0
20°	21,3	23,3	26,9	23,5	2,8	0,5	0,0	0,0	0,0
30°	24,3	22,4	27,0	22,2	2,6	0,2	0,0	0,0	0,0
40°	20,4	19,7	25,2	27,1	6,9	0,6	0,0	0,0	0,0
50°	20,6	21,6	27,5	25,0	4,1	0,4	0,0	0,0	0,0
60°	23,8	23,0	29,3	21,1	2,3	0,6	0,0	0,0	0,0
70°	21,7	18,2	26,2	27,6	5,7	0,2	0,0	0,0	0,0
80°	18,8	18,0	23,9	30,4	7,5	0,6	0,0	0,0	0,0
90°	13,4	14,0	17,9	35,0	19,0	0,7	0,0	0,0	0,0
Mittelwert	20,8	20,8	25,8	25,7	5,9	0,6	0,0	0,0	0,0

Bild 6.43: Tabelle Partikelgrößenverteilung MDF

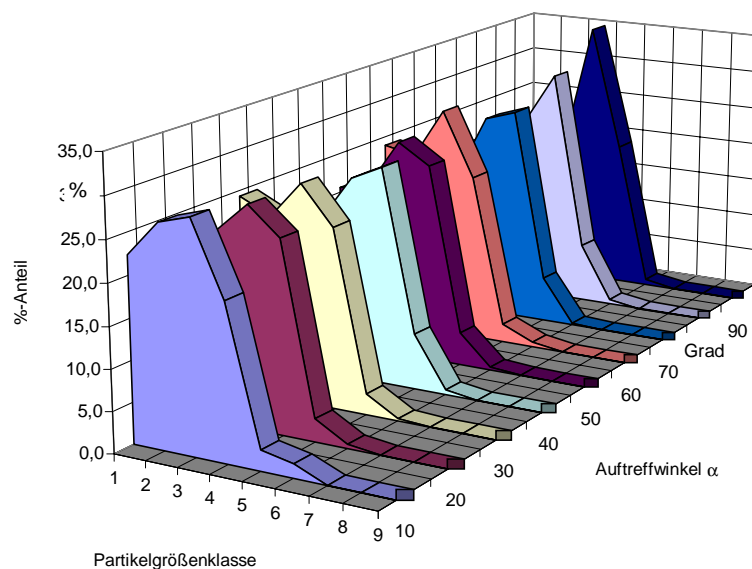


Bild 6.44: Diagramm Partikelgrößenverteilung MDF

Die Spangröße 0,125 mm stellt mit durchschnittlich 25,8 % neben der Spangröße 0,25 mm mit 25,7 % den Hauptanteil. Partikelklasse 0,125 mm sind dabei bei Auftreffwinkel $\alpha = 10^\circ$, 20° , 30° , 50° und 60° , Partikelklasse 0,25 mm bei $\alpha = 40^\circ$, 70° , 80° und 90° prozentual am Häufigsten vertreten.

Späne der Größe 0,063 mm und der in der Wanne enthaltene Partikel $< 0,063$ mm sind mit jeweils 20,8 % gleich häufig vorhanden. Partikelklasse 0,5 mm mit 5,9 %, 1,0 mm mit 0,6 % nicht mehr relevant. Späne der Größe 2,0 mm, 4,0 mm und 8,0 mm sind nicht vorhanden.

6.1.6.4 Ausgewählte Beispiele für MDF

Das in Bild 6.45 dargestellte Diagramm zeigt das Verteilungsverhalten von MDF-Partikel der Größe 0,125 mm. Dies entspricht dem der Gesamtverteilung. Über alle Auftreffwinkel stellt sich eine Hyperbelverteilung des Reflexionsmaxima bei 10° ein. Entsprechend verhalten sich auch Partikel der Klasse 0,063 mm, 0,25mm und Partikel $< 0,063$ mm.

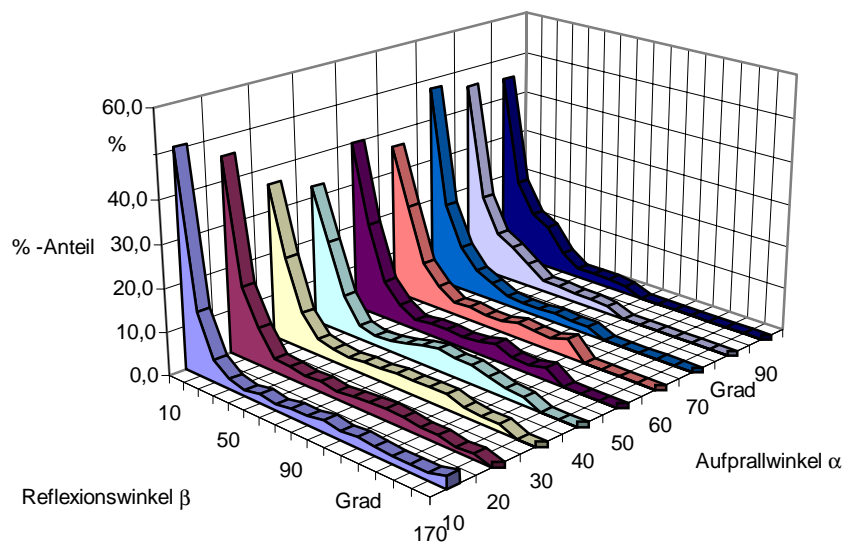


Bild 6.45: Diagramm MDF 0,125 mm

Im Diagramm in Bild 6.46 ist bei den mittleren Auftreffwinkeln (α im Bereich 30° bis 60°) eine Parabelverteilung zu erkennen. Dies ist aber nur bei Spänen der Größe 0,5 mm zu beobachten, die einen Anteil von nur 5,9 % ausmachen.

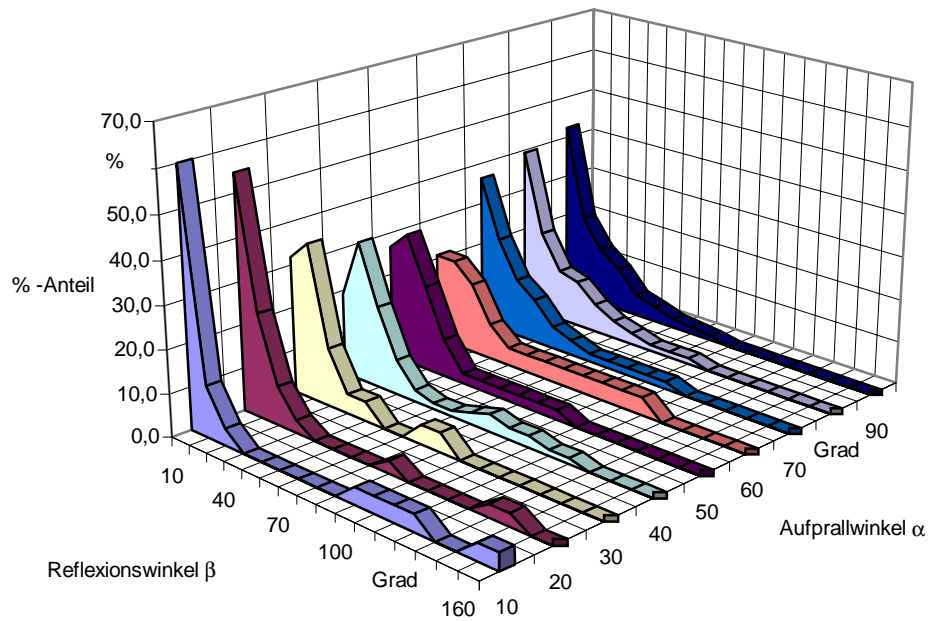


Bild 6.46: Diagramm MDF 0,5 mm

6.2 Partikelgeschwindigkeiten

In diesem Abschnitt soll die theoretische Partikelgeschwindigkeit, die Geschwindigkeit der Partikel nach Verlassen des Leitelements und der Geschwindigkeitsverlust der Späne infolge des Aufpralls an der Wand untersucht werden. Dazu werden zur Auswertung die mit der Hochgeschwindigkeitskamera gemachten Bilder herangezogen.

6.2.1 Theoretische Partikelgeschwindigkeit

Die Späne verlassen theoretisch mit der Umfangsgeschwindigkeit v_u das Werkzeug. Der Span wird nach dem Abtrennen vom Werkstück mit der Schneide auf die Werkzeugdrehzahl beschleunigt. Die Umfangsgeschwindigkeit v_u berechnet sich nach der Formel

$$v_u = \pi D n. \quad (6.1)$$

Dabei beträgt der Durchmesser D des Werkzeuges 130 mm und die Drehzahl 6000 min^{-1} . Für die Umfangsgeschwindigkeit erhält man nach diesem Zusammenhang $v_u = 40,8 \text{ m/s}$. Diese Geschwindigkeit entspricht theoretisch der Partikelgeschwindigkeit.

6.2.2 Partikelgeschwindigkeit v_p nach Verlassen des Leitelements

Die Spanpartikel treffen nach dem Verlassen des Werkzeuges auf das Leitelement auf, durch welches sie zu einem Spänestrahls gebündelt werden. Dabei gleiten sie an der Wandung des Leitelements entlang und verlieren an Geschwindigkeit. Nach Verlassen des Leitelements behalten sie Flugrichtung und Geschwindigkeit bei. Die Partikelgeschwindigkeit v_p wird anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für Buche, Fichte und FPY bestimmt. Auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für MDF sind keine einzelnen Späne zu erkennen, sondern nur ganze Spanwolken. Dadurch ist eine Auswertung für MDF nicht möglich.

Zur Bestimmung der Spangeschwindigkeiten nach dem Leitelement wird anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen die Zeit bestimmt, die der Span für das Zurücklegen der Strecke zwischen Leitelement und Fachkante benötigt. Durch die größere Strecke, die bei der Bestimmung der Geschwindigkeit dabei herangezogen wird, ergeben sich genauere Werte. Aus dem Versuchsaufbau ist die Länge dieser Strecke bekannt, sie beträgt 0,24 m. Die dafür

benötigte Zeit ergibt sich aus der Differenz der Bildnummer. Die Kamera wurde dabei mit einer Bildfrequenz von 1000 Hz betrieben, das bedeutet eine Zeitdauer von einer ms pro Bild. In Bild 6.47 ist eine solche Sequenz abgebildet. Im Bildausschnitt 178 der Hochgeschwindigkeitskamera verlässt der Span das Leitelement. Auf Bildausschnitt 188 ist der fliegende Span zwischen den Fächern zu erkennen. Bildausschnitt 193 zeigt, wie der Span auf der Kante des ersten Fachs auftrifft.



Bild 6.47: Spanflugsequenz ohne Prallwand

Die auf diese Weise bestimmten Daten werden für mehrere Späne in eine Excel-Tabelle eingegeben und die Partikelgeschwindigkeit nach der Formel

$$v = s / t \quad (6.2)$$

berechnet. Bild 6.48 zeigt eine solche Tabelle für Buchespäne.

Partikelgeschwindigkeit Buche				
Anfangsbild	Endbild	Zeit	Strecke	Partikelgeschwindigkeit
		t	s	v_p
		s	m	m / s
157	171	0,014	0,24	17,14
178	193	0,015	0,24	16,00
199	216	0,017	0,24	14,12
218	233	0,015	0,24	16,00
337	353	0,016	0,24	15,00
397	415	0,018	0,24	13,33
805	819	0,014	0,24	17,14
885	901	0,016	0,24	15,00
1323	1336	0,013	0,24	18,46
1722	1737	0,015	0,24	16,00
Mittelwert Partikelgeschwindigkeit Buche				15,82

Bild 6.48: Tabelle Partikelgeschwindigkeit Buche

In der Spalte „Anfangsbild“ wurde die Bildnummer der Hochgeschwindigkeitskamera eingetragen, auf dem der Span das Leitelement verlässt. Unter „Endbild“ stehen die Bildnummern, bei denen der Span die Strecke zwischen den Fächern zurückgelegt hat. Aus der Differenz der Bildnummern ergibt sich dann die dafür benötigte Zeit in ms. Mit der bekannten Länge der Strecke kann die Geschwindigkeit berechnet werden. Für Buchepartikel ergeben sich Geschwindigkeiten zwischen 13,33 m/s und 18,46 m/s. Die mittlere Geschwindigkeit nach dem Leitelement beträgt 15,82 m/s. Die grau hinterlegte Zeile stellt das in Bild 6.48 angeführte Beispiel dar.

Entsprechen wird für Fichtepartikel und FPY-Späne verfahren. Bild 6.49 stellt die Tabelle für Fichtepartikel dar.

Partikelgeschwindigkeit Fichte				
Anfangsbild	Endbild	Zeit	Strecke	Partikelgeschwindigkeit
		t	s	v_p
		s	m	m / s
317	329	0,012	0,24	20,00
345	362	0,017	0,24	14,12
357	370	0,013	0,24	18,46
359	379	0,02	0,24	12,00
715	735	0,02	0,24	12,00
730	749	0,019	0,24	12,63
756	773	0,017	0,24	14,12
1130	1143	0,013	0,24	18,46
1526	1543	0,017	0,24	14,12
1930	1945	0,015	0,24	16,00
Mittelwert Partikelgeschwindigkeit Fichte				15,19

Bild 6.49: Tabelle Partikelgeschwindigkeit Fichte

Die Geschwindigkeit der Fichtespäne liegt zwischen 20,0 m/s und 12 m/s. Die mittlere Partikelgeschwindigkeit der Fichtespäne nach dem Verlassen des Leitelements beträgt 15,19 m/s und ist somit etwas langsamer als die Partikelgeschwindigkeit für Buchespäne. Da die Einzelgeschwindigkeiten zwischen Buchepartikel und Fichtepartikel in der gleichen Größenordnung liegen, kann die Partikelgeschwindigkeit für Fichte und Buche als gleich groß angesehen werden.

Für die Auswertung der Partikelgeschwindigkeit nach dem Leitelement für FPY-Späne konnten nur fünf Späne herangezogen werden, da auf dem aufgenommenen Bildmaterial keine weiteren auswertbaren Späne enthalten waren. In Bild 6.50 ist die Tabelle für die Partikelgeschwindigkeit für FPY dargestellt.

Partikelgeschwindigkeit FPY				
Anfangsbild	Endbild	Zeit	Strecke	Partikelgeschwindigkeit
		t	s	v_p
		s	m	m / s
153	174	0,021	0,24	11,43
162	185	0,023	0,24	10,43
182	203	0,021	0,24	11,43
222	243	0,021	0,24	11,43
816	839	0,023	0,24	10,43
Mittelwert Partikelgeschwindigkeit FPY				11,03

Bild 6.50: Tabelle Partikelgeschwindigkeit FPY

Die Werte für die Partikelgeschwindigkeit FPY liegen zwischen 10,43 m/s und 11,43 m/s. Daraus ergibt sich ein Mittelwert von 11,03 m/s für die Partikelgeschwindigkeit von FPY nach dem Leitelement. Dieser Wert liegt deutlich unter denen für Fichte und Buche mit ca. 15,5 m/s. Eine mögliche Erklärung für die niedrigere Spangeschwindigkeit bei FPY kann die kleinere Anfangsgeschwindigkeit der FPY-Partikel nach Verlassen des Werkzeugs sein. Im Gegensatz zu den Spänen der Massivhölzer prallen die Späne von FPY auf die gegenüberliegende Seite des Spanraums des Werkzeugs auf und verlieren dabei einen Teil ihrer Geschwindigkeit. Somit verlassen FPY-Partikel bereits mit einer geringeren Geschwindigkeit das Werkzeug und werden durch das Leitelement weiter abgebremst.

6.2.3 Geschwindigkeitsverlust der Partikel durch den Aufprall an der Wand

Durch den Stoßvorgang der Späne an der festen Wand kommt es zu einer Energietransformation, bei der die Späne an kinetischer Energie verlieren. Dieser Verlust an kinetischer Energie kann aufgrund der unbekanntenen Spanmasse nicht berechnet werden, es können allerdings die Spangeschwindigkeiten v vor dem Stoß und u nach dem Stoß anhand

der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen nach dem bereits in 6.2.2 beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Setzt man diese beiden Geschwindigkeiten ins Verhältnis zueinander, so erhält man den prozentualen Anteil der Geschwindigkeit u von der Geschwindigkeit v . Durch quadrieren dieses Verhältnisses erhält man das Verhältnis der kinetischen Energie der Späne vor und nach dem Stoß.

In der folgenden Sequenz der drei Hochgeschwindigkeitsbilder in Bild 6.51 ist das Reflexionsverhalten eines Fichtespans aufgenommen. Der unter 60° ankommende Span wird nach dem Aufprall unter 30° reflektiert.

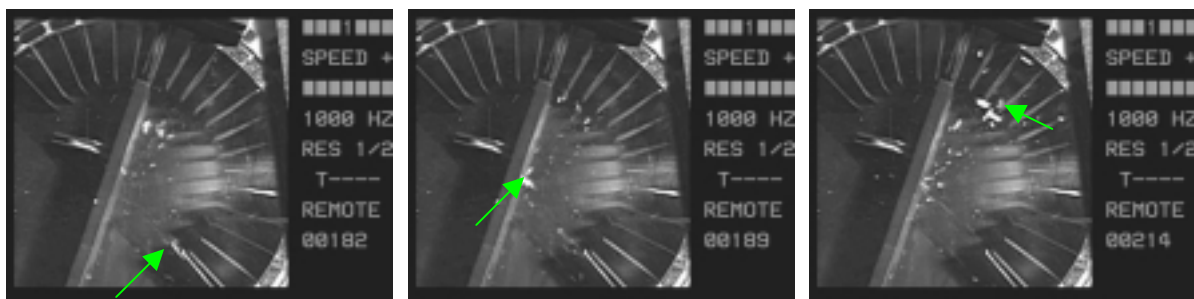


Bild 6.51: Spanflugsequenz Fichte $\alpha = 60^\circ$

Auf dem Bildausschnitt 182 ist der Span beim Verlassen des Leitelements zu erkennen. Bis zum Auftreffen an der Prallplatte, das in Bildausschnitt 189 zu sehen ist, legt der Span einen Strecke von 0,12 m zurück. Nach dem Aufprall fliegt der Span in Richtung des dritten Fachs weiter, dies entspricht einem Reflexionswinkel von 30° . Der zweite Streckenabschnitt beträgt ebenfalls 0,12 m. Wiederum kann aus der Differenz der Hochgeschwindigkeitsbildnummer die benötigte Zeit berechnet werden. Die Kamera wurde mit einer Bildfrequenz von 1000 Hz betrieben. Die Bildnummern für das Ablösen des Spans am Leitelement (Anfangsbild), für den Aufprall an der Wand (Bild Wand) und für das Erreichen der Fächer (Bild Fach) wurden für die Werkstoffe Buche, Fichte und FPY in Excel-Tabellen eingegeben. Die sich daraus ergebende Zeit für die beiden zurückgelegten Strecken von jeweils 0,12 m wurde mit t_1 und t_2 bezeichnet. In der Tabelle ist neben dem Auftreffwinkel α auch der Reflexionswinkel β angegeben. Damit lässt sich neben den Geschwindigkeiten der Partikel v vor dem Stoß und u nach dem Stoß deren Zerlegung in die x- und y-Komponente berechnen. In der letzten Spalte steht das Verhältnis der Partikelgeschwindigkeiten u / v . Für dieses Verhältnis, der Geschwindigkeit v und der Geschwindigkeit u wird der Mittelwert der in der Tabelle aufgeführten Späne berechnet und in der untersten Zeile angegeben. Die Tabelle in

Bild 6.52 steht als Beispiel für die im Anhang aufgeführten Tabellen. Es handelt sich hierbei um Fichtespäne, die unter $\alpha = 60^\circ$ auf die Prallplatte treffen.

Auf-treff-winkel	Reflex-ions-winkel	An-fangs-bild	Bild Wand	Bild Fach	Zeit 1	Zeit 2	Geschwindigkeit v			Geschwindigkeit u			Ver-hält-nis u / v
α	β				t1	t2	v	v _x	v _y	u	u _x	u _y	u / v
Grad	Grad				s	s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	%
60°	40°	109	117	149	0,008	0,032	15,00	7,50	12,99	3,75	2,87	2,41	25,00
60°	30°	182	189	214	0,007	0,025	17,14	8,57	14,85	4,80	4,16	2,40	28,00
60°	30°	593	602	625	0,009	0,023	13,33	6,67	11,55	5,22	4,52	2,61	39,13
60°	20°	162	169	190	0,007	0,021	17,14	8,57	14,85	5,71	5,37	1,95	33,33
60°	20°	235	245	263	0,01	0,018	12,00	6,00	10,39	6,67	6,26	2,28	55,56
60°	30°	255	264	292	0,009	0,028	13,33	6,67	11,55	4,29	3,71	2,14	32,14
Mittelwert Fichte 60°							14,66			5,07			35,53

Bild 6.52: Tabelle Spangeschwindigkeiten für Fichte $\alpha = 60^\circ$

Die grau hinterlegte Zeile bezieht sich auf das in Bild 6.51 dargestellte Beispiel. Für die mittlere Geschwindigkeit der Partikel vor dem Aufprall ergibt sich 14,66 m/s, nach dem Aufprall von 5,07 m/s. Dies bedeutet, die Geschwindigkeit u beträgt im Mittel nur noch 35,53 % der Geschwindigkeit v, d.h. es geht durch den Aufprall unter 60° rund 65 % der Geschwindigkeit der Späne verloren.

Dieses Verhältnis u / v soll in dem Diagramm in Bild 6.53 veranschaulicht werden.

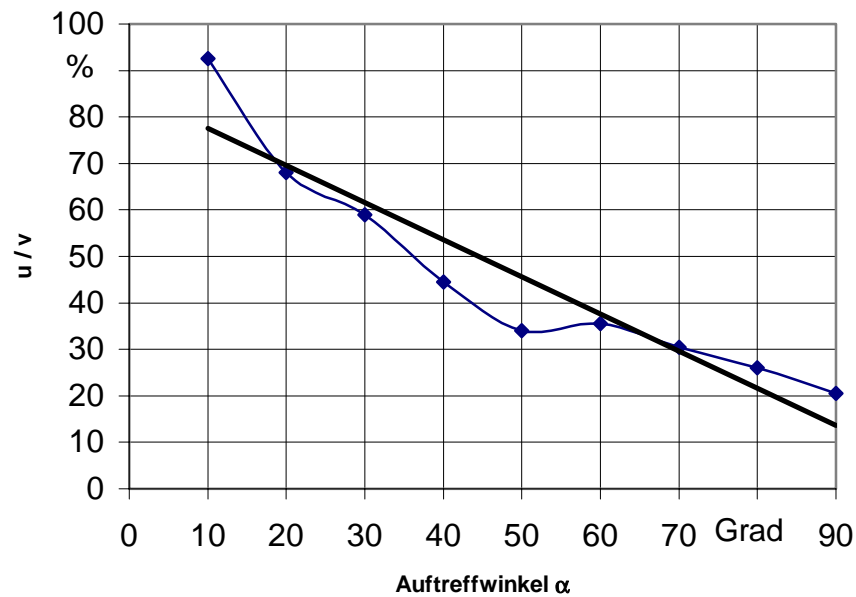
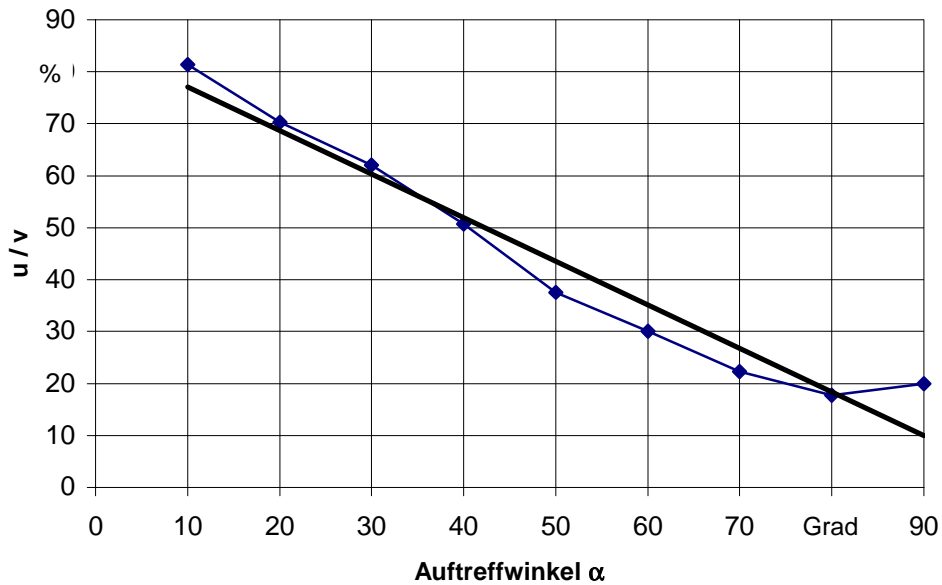


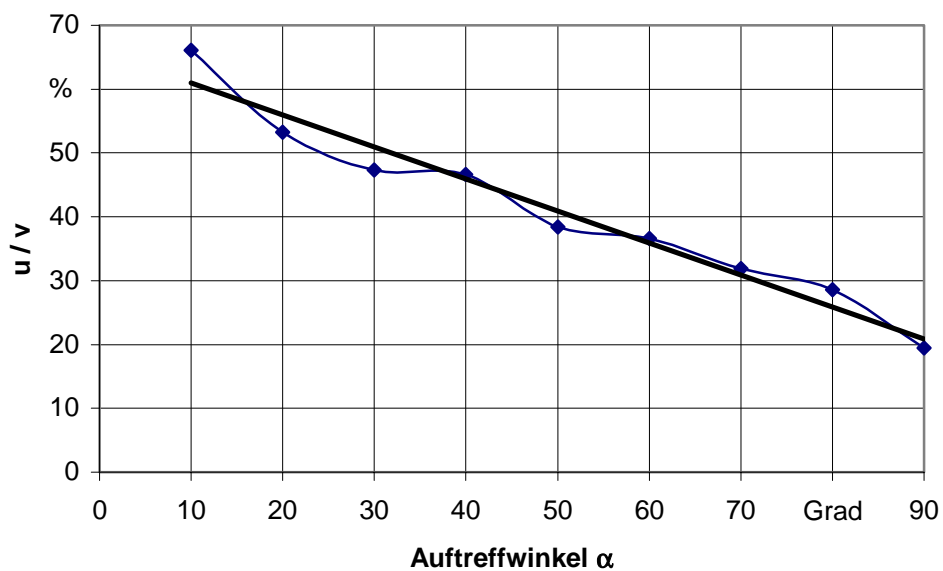
Bild 6.53: Diagramm u / v für Fichte

In diesem Diagramm in Bild 6.53 ist zu erkennen, dass bei einem flachen Auftreffwinkel $\alpha = 10^\circ$ der Span durch den Aufprall wenig Geschwindigkeit verliert. Die Geschwindigkeit u nach dem Stoß beträgt 92,5 % der ursprünglichen Geschwindigkeit v vor dem Stoß. Mit größer werdendem Auftreffwinkel nimmt der Geschwindigkeitsverlust zu, d.h. die Geschwindigkeit u beträgt bei einem Auftreffwinkel von $\alpha = 90^\circ$ nur noch 20,5 % der Anfangsgeschwindigkeit v. Die lineare Ausgleichsgerade im Diagramm zeigt das lineare Verhalten der Kurve.

Das lineare Abnehmen der Geschwindigkeit u im Verhältnis zu v ist im Diagramm in Bild 6.54 für Buche noch deutlicher.

Bild 6.54: Diagramm u/v für Buche

Im Diagramm in Bild 6.54 nimmt die Geschwindigkeit u im Verhältnis zur Geschwindigkeit v linear ab. Bei $\alpha = 10^\circ$ beträgt das Verhältnis 81,5 %, bei Auftreffwinkel $\alpha = 80^\circ$ und 90° liegt es bei rund 20 %.

Bild 6.55: Diagramm u/v für FPY

Der lineare Zusammengang ist auch in Bild 6.55 für FPY zu erkennen. Hier liegt der Prozentwert von u für $\alpha = 10^\circ$ bei 66 % und fällt dann linear ab, bis auf 20 % bei $\alpha = 90^\circ$. Eine lineare Ausgleichsgerade soll den Verlauf der Kurve qualitativ verdeutlichen.

Anzumerken ist, dass sich bei FPY-Partikel ein prozentualer Geschwindigkeitsverlust bei $\alpha = 10^\circ$ einstellt, der bei Buche bzw. Fichtepartikel erst bei einem Auftreffwinkel zwischen 20° und 30° eintritt.

7 Diskussion der Versuchsergebnisse

Beim Vergleich des Reflexionsverhaltens der Partikel der untersuchten Werkstoffe ergab die Analyse der Gesamtverteilung, dass das Verhalten der Holzarten Buche, Fichte und FPY ähnlich ist. Die Gesamtverteilung der Partikel dieser Werkstoffe war mit der Verteilung der am häufigsten vorkommenden Spangröße übereinstimmend.

Bei MDF stellte sich eine andere Verteilung ein. Dies kann auf die Partikelgrößenverteilung nach dem Stoß zurückgeführt werden. Hier lag der Hauptanteil der entstandenen Späne bei der Größe 0,125 mm (vgl. Fichte 2,0 mm, Buche 4,0 mm und FPY 0,25 mm). Daraus ist zu erkennen, dass sich kleinere Späne durchaus anders als große Späne verhalten. Die kleineren MDF-Partikel sammeln sich, auch bei großen Auftreffwinkeln, vorwiegend in den ersten Fächer. Partikel der entsprechenden Größe von Buche und Fichte verhalten sich dennoch ähnlich der Gesamtverteilung dieser Werkstoffe.

Bei den Werkstoffen Buche, Fichte und FPY steigt das Reflexionsmaximum der Späne mit größer werdendem Auftreffwinkel bis $\alpha = 60^\circ$ auf den Wert 30° . Danach fällt es wieder ab. Dies ist bei allen drei erwähnten Werkstoffen gleich. Bei MDF dagegen stellt sich das Reflexionsmaximum konstant bei 10° ein, dies ist auch bei steilen Auftreffwinkeln der Fall.

Das Sichtbarmachen des Reflexionsverhaltens durch die Hochgeschwindigkeitskamera lieferte für die Massivhölzer gute Ergebnisse. Auf den Aufnahmen konnten die einzelnen Späne gut erkannt und verfolgt werden. Bei FPY war dies nur für einzelne größere Späne möglich. Der hohe Anteil von kleinen Spänen lies sich auf den Aufnahmen nur als Spanwolke erkennen. Eine Auswertung der Geschwindigkeiten konnte somit nur für größere FPY-Partikel erfolgen. Einzelne MDF-Partikel waren auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen nicht zu erkennen. Der reflektierte Spänestrahle war nur als Staubwolke sichtbar, eine Tendenz des Reflexionswinkels konnte jedoch deutlich erkannt werden.

Weiter konnte festgestellt werden, dass bei allen Werkstoffen der Geschwindigkeitsverlust in Folge des Aufpralls mit steigendem Auftreffwinkel größer wurde. Dieses Verhalten der Partikel würde für die Auslegung von Absaughauben einen Auftreffwinkel der Späne an der Haubenwand idealerweise bis 90° nötig machen, damit die Späne stark abgebremst und von der Absaugluftströmung möglichst vollständig erfasst und abgeführt werden können.

Diesem Ergebnis widerspricht aber das Prallverhalten der Partikel. Bei einem Auftreffwinkel im 90° Bereich an der Prallplatte reflektieren die Späne sehr stark. Eine Umlenkung der Flugbahn wäre nicht gewährleistet. Die stark abgebremsten Späne könnten sogar eventuell vom Werkzeug wieder eingezogen werden.

Für eine gezielte Umlenkung des Spänestrahls ohne Reflexion an Leitelementen wäre ein Auftreffwinkel kleiner 30° sinnvoll. Der Hauptanteil der Partikel würde sich dann ohne Streuung umlenken lassen (in einem Reflexionswinkel kleiner 10°).

Bei einem Auftreffwinkel von 60° wurde bei Buche, Fichte und FPY der größte Reflexionswinkel von 30° festgestellt. Damit die dadurch entstehende breite Streuung in diesem Bereich zu vermeiden, soll der Spänestrahls in der Absaughaube nicht unter diesem Winkel auf eine Wand oder ein Umlenkelement treffen. Für MDF ergab sich das Reflexionsmaximum bei allen Auftreffwinkeln bei 10° , hier würde ein steilerer Auftreffwinkel also keinen wesentlichen Einfluss auf das Streuverhalten haben.

Es gilt also sowohl das Reflexionsverhalten, als auch den Geschwindigkeitsverlust zu beachten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Konzeption eines Simulationsprogramms für die Auslegung von Absaughauben von Holzbearbeitungsmaschinen wurde in dieser Arbeit das Reflexionsverhalten eines Spänestrahls an einer festen Wand untersucht.

Mit einer für diese Untersuchung angefertigten Versuchseinrichtung wurden die bei der Zerspanung entstehenden Späne zu einem Spänestrahls gebündelt. Durch eine verstellbare Prallwand wurden die Auftreffwinkel von 10° bis 90° in 10° -Schritten eingestellt. Die an der Prallplatte reflektierenden Späne wurden in entsprechenden Fächern aufgefangen. Diese Fächer sind in 10° -Schritten halbkreisförmig um die Prallstelle angeordnet. Durch auswiegen der sich in den Fächern angesammelten Späne konnte die absolute und prozentuale Verteilung des reflektierten Spanguts bestimmt werden. Diese Gesamtverteilung wurde in Excel-Tabellen eingetragen und in Diagramme ausgewertet. Daraus kann für jeden Auftreffwinkel der sich einstellende Reflexionswinkel abgelesen werden. Da die Späne aber nicht ausschließlich unter einem Winkel reflektieren, sondern einen Streubereich aufweisen, ist dieser ebenfalls in Diagrammen dargestellt. Als Reflexionswinkel ergibt sich demnach der Winkel, unter dem der prozentual größte Anteil der Späne reflektiert wurde. Der Zusammenhang des Reflexionswinkels in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel wurde für jeden Werkstoff in einem Diagramm dargestellt. Untersucht wurde Buche, Fichte und als Vertreter der Holzwerkstoffe Spanplatte und MDF.

In der mit den aufgefangenen Spänen durchgeführten Siebanalyse wurde die Partikelgrößenverteilung nach dem Wandkontakt bestimmt. Damit konnte das Reflexionsverhalten der Partikel in Abhängigkeit der Spangröße untersucht, und in Diagrammen dargestellt werden.

Durch den Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera konnte das Reflexionsverhalten sichtbar gemacht werden. Anhand der gemachten Aufnahmen wurde die Spangeschwindigkeit vor und nach dem Aufprall bestimmt. Durch den analysierten Geschwindigkeitsverlust der Späne durch den Stoßvorgang kann eine Aussage über den Verlust der kinetischen Energie der Späne gemacht werden.

Um die gewonnenen Ergebnisse auf andere Hölzer übertragen zu können, wären weitere Versuche, auf der Basis, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurden mit anderen Holzarten nötig. Diese Versuche wären auch in Hinblick auf die Ergebnisse dieser Arbeit wichtig. Da so

feststellbar ist, ob für Hartholz und Weichholz ein ähnliche Verhalten wie für Buche und Fichte gilt.

Durch die Umlenkung der Späne am Leitelement haben diese an Geschwindigkeit verloren. Ihre Aufprallgeschwindigkeit ist deutlich geringer als unter realen Bedingungen in der Absaughaube. Es wäre also noch zu untersuchen, ob sich das Reflexionsverhalten bei einer höheren Spangeschwindigkeit entscheidend verändert.

Bei der Versuchsreihe MDF konnte teilweise eine Ablenkung des Spänestrahls nach Verlassen des Leitelements beobachtet werden. Dies kann auf die eventuell vom Werkzeug verursachte Luftströmung innerhalb der Versuchseinrichtung zurückgeführt werden. Bei den Versuchsreihen Fichte, Buche und FPY konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden. Daher ist die Ablenkung vermutlich auf die sehr kleinen Partikel bei der Zerspanung von MDF zurückzuführen. Diese Vermutung könnte mit einer strömungstechnischen Untersuchung der Versuchseinrichtung (ob eine Strömung entlang der Prallwand vorherrscht) belegt werden.

Als Prallplatte wurde eine 12 mm dicke Stahlplatte verwendet. Die zum Einsatz kommenden Absaughauben werden jedoch aus dünnerem Blech oder Aluminiumguss hergestellt. Die Hauben anderer Hersteller werden aus Kunststoff gefertigt. Aus diesem Grund wäre es interessant, das Reflexionsverhalten der Späne auch mit diesen Werkstoffen zu untersuchen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Weiss, E.: Untersuchung der Einflußgrößen auf die Bestimmung der Staubemission bei der maschinellen Holzbearbeitung. Universität Stuttgart, Dissertation 1998.

- [2] Bolm-Audorf, U.; Vogel, C.; Woitowitz, H.-J.: Berufliche und außerberufliche Risikofaktoren von Nasen-Rachentumoren Staub-Reinhaltung der Luft 49 Springer.1989, S.389-393.

- [3] Koengeter, B.: Gesundheitsgefährdung durch Staub. Frauenhofer Gesellschaft FhG. Stuttgart: IRB-Verlag 1994.

- [4] TRGS 553: Holzstaub. Ausgabe September 1992. Veröffentlicht im Bundesarbeitsblatt 9/1992, S.45ff..

- [5] Niemeyer, W.-H.; Schröder, D.: Leistungssteigerung der Zerspanwerkzeuge durch optimale Absaugtechnik. In: Holz- und Kunststoffverarbeitung HK 30 (1995),Nr.5, S.598-597.

- [6] Niemeyer, W.-H.: Kostenreduzierung durch innovative Absaugtechnik. In: Bau – und Möbelschreiner BM 49 (1994), Nr.8, S.58-62.

- [7] Heisel, U.; Tröger, J.; Haag, M., Dressler, M.: Spänestrahl gezielt leiten. Neue Wege zur Verbesserung der Späneerfassung in Holzbearbeitungsmaschinen (1). In: Holz- und Kunststoffverarbeitung HK 34 (1999), Nr.7-8,S. 74-76.

- [8] Heisel, U.; u.a.: Analyse des Partikelstrahlverhaltens ist Basis für effiziente Späneerfassung. In: Maschinenmarkt MM 106 (2000), Nr.8, S. 60-63.
- [9] Heisel, U.; Tröger, J.; Haag, M.; Dressler, M.: Spänestrahl gezielt leiten. Neue Wege zur Verbesserung der Späneerfassung in Holzbearbeitungsmaschinen (2). In: Holz – und Kunststoffverarbeitung HK 34 (1999), Nr.9, S. 74-77.
- [10] Heisel, U.; Tröger, J.; Haag, M.; Dressler, M.: Spänestrahl gezielt leiten. Neue Wege zur Verbesserung in Holzbearbeitungsmaschinen: Späneerfassung am Bildschirm (Schluß). In: Holz - und Kunststoffverarbeitung HK 34 (1999), Nr.10, S.78-81.
- [11] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. 5. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995, S. 52 – 57.
- [12] Illyes, A.; Bauer, H.: Die Energiewandlung bei ein- und mehrmaligem Stoß einer Partikel gegen eine feste Wand. In: VDI- Forschungsheft 640, (1987).
- [13] Heisel, U.: Grundlagen der Werkzeugmaschinen, Teil 2. Universität Stuttgart, Vorlesungsmanuskript, 1996.
- [14] Estrich, J.: Maschinenwerkzeuge für die Holzbearbeitung. 2. Aufl. Landsberg: moderne industrie,1992.
- [15] N.N.: Fachkunde für Schreiner.14. Aufl. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel 1990,
- [16] Arbeitsgemeinschaft Holz.
http://www.argeholz.de/holzwerkstoffe_ifo/grundlagen.html. (Februar 2000)

- [17] Dressler, M.: Ermittlung des Zusammenhangs zwischen theoretischem und realem Spanflug. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1996