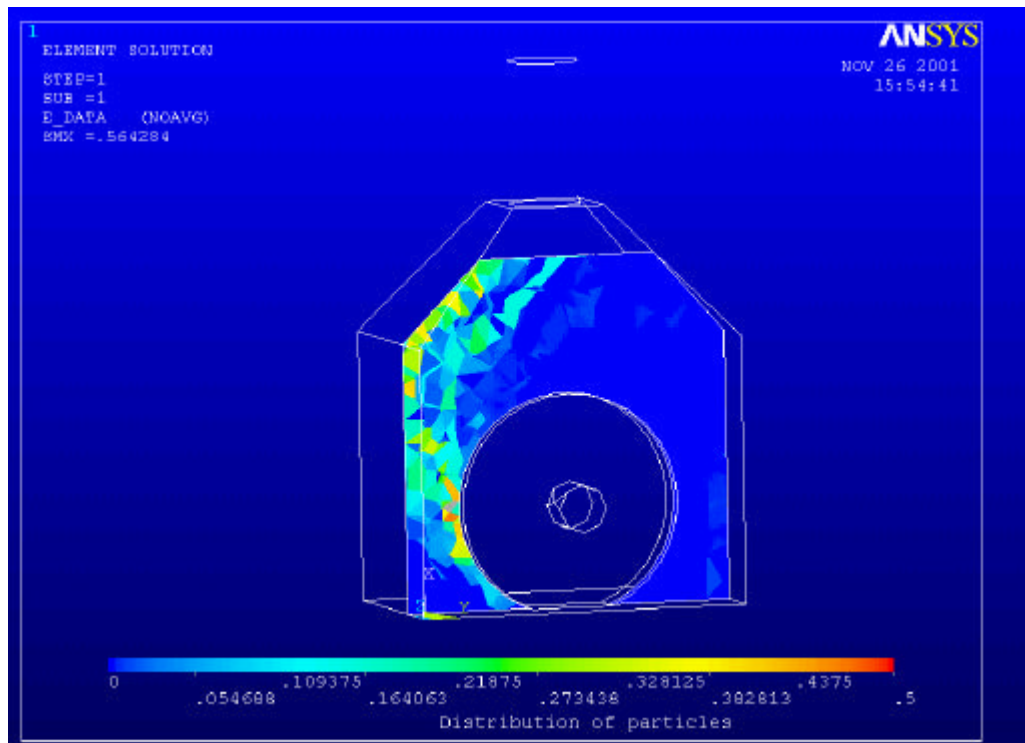


Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

Auslegung von Absaughauben bezüglich der Späneerfassung durch Simulationsrechnung



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

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung und Problemstellung	6
2. Stand der Technik	7
3. Spangrößenverteilung bei unterschiedlichen Werkstoffen	9
3.1 Versuchsaufbau	9
3.2 Auswertung der Siebergebnisse	10
3.3 Ersetzen der Spangrößenverteilung durch eine Gauß'sche Normalverteilung	11
3.3.1 Klasseneinteilung	12
3.3.2 Berechnung des arithmetischen Mittelwertes	13
3.3.3 Berechnung der Varianz	14
3.3.4 Berechnung der Gauß'schen Normalverteilung	15
3.4 Versuchsreihe	16
3.4.1 Holzwerkstoffe	16
3.4.2 Massivhölzer	16
3.5 Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von Spanplatte	16
3.5.1 Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit (Zahnvorschub)	17
3.5.2 Einfluß von Gleich- und Gegenlauf	18
3.5.3 Geradengleichung des gewichteten Mittelwertes	20
3.5.4 Varianz der Spangrößenverteilung	21
3.5.5 Zusammenfassung Spanplatte	22
3.6 Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von Massivholz Buche	23
3.6.1 Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung	24
3.6.2 Gleich- und Gegenlauf bei Massivholz	25
3.6.3 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit (mittlere Spanungsdicke)	26
3.6.4 Geradengleichung des gewichteten Mittelwerts	27
3.6.4.1 Geradengleichung für die Gleichlaufbearbeitung	27
3.6.4.2 Geradengleichung für die Gegenlaufbearbeitung	28
3.6.5 Varianz der Spangrößenverteilung	28
3.7 Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von Massivholz Fichte	29
3.7.1 Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung	29
3.7.2 Gleich- und Gegenlauf	30

3.7.3	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit (mittlere Spanungsdicke)	30
3.7.4	Geradengleichung des gewichteten Mittelwerts	31
3.7.4.1	Geradengleichung für die Gleichlaufbearbeitung	31
3.7.4.2	Geradengleichung für die Gegenlaufbearbeitung	32
3.7.5	Varianz der Spangrößenverteilung	32
3.8	Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von MDF	33
3.8.1	Kurvenverlauf der Spangrößenverteilung	33
3.8.1.1	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit (mittlere Spanungsdicke)	33
3.8.1.2	Gleich- und Gegenlauf	34
3.8.2	Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung	34
3.8.2.1	Veränderte Korrekturmechanismen	34
3.8.2.2	Geradengleichung des gewichteten Mittelwerts	35
3.8.2.3	Varianz der Spangrößenverteilung	37
3.8.2.4	Geradengleichung für kleine Spangrößen	37
3.8.2.5	Fehlerabschätzung	39
3.8.3	Gleichungsermittlung über die mittlere Spanungsdicke	40
4	Späneauswurf bei unterschiedlich gestalteten Spanräumen	45
4.1	Grundüberlegungen	45
4.2	Versuchsanordnung	46
4.2.1	Horizontale Erfassungseinrichtung	46
4.2.2	Vertikale Erfassungseinrichtung	47
4.2.3	Installierte Fächer in horizontaler und vertikaler Richtung	48
4.3	Partikelgrößenverteilung der ausgeworfenen Späne	48
4.4	Auswurfzeitpunkt und Auswurfmasse	50
4.5	Erfassungsgrade	52
4.6	Stichversuche zur Spananfangsgeschwindigkeit an der Schneide	53
4.7	Bewertung der Spangeschwindigkeit an der Schneide	55
5	Lüfterwirkung des Werkzeugs	56
6	Ermittlung der c_w -Werte bei Spänen aus Holzwerkstoffen und Massivhölzern	67
6.1	Grundüberlegungen	67
6.2	Versuchsaufbau	68
6.3	Untersuchte Werkstoffe und Bearbeitungsverfahren	69
6.4	Versuchsergebnisse	70
6.4.1	Partikelgrößenverteilungen	70

6.4.2	Endgeschwindigkeit als weitere Unterteilung der Spanformen	71
6.4.3	Einfluss des durchschnittlichen Spangewichtes	75
6.4.4	Querschnittsfläche der Späne	76
6.4.5	Ermittelter c_w -Wert	78
7	Reflexion der Späne an einer ebenen Wand	80
7.1	Grundüberlegungen	80
7.2	Versuchsaufbau	80
7.3	Theoretischer Stoß	81
7.4	Versuchsergebnisse	83
7.4.1	Spangrößenklassen	83
7.4.2	Reflexionswinkel	84
7.4.3	Praktische Auswirkungen für den Bau von Hauben	86
7.4.4	Kontrollversuche	86
8	Konzept der Programmierung	88
8.1	Grundlage des Strömungsberechnungsprogramm	88
8.2	Grundlage des Flugberechnungstool	89
8.3	Konzept der Programmierung	90
8.3.1	Spanmassenfaktor	90
8.3.2	Startrichtung der Späne	91
8.3.3	Startgeschwindigkeit der Späne (primäre Startpunkte)	92
8.3.4	Startpunkte der Späne	92
8.3.5	Luftwiderstand der Späne	93
8.3.6	Stoß der Späne an der Haubenwand (sekundäre Startpunkte)	94
8.3.6.1	Echte Reflexion	94
8.3.6.2	Unechte Reflexion	95
8.3.7	Darstellung der Ergebnisse	96
9	Programms	98
9.1	Musterhaube	98
9.2	Eingearbeitete Versuchsergebnisse	100
9.2.1	Spangrößenverteilung	100
9.2.2	Spanverteilung um das Werkzeug	100
9.2.3	Berechnung der Partikelbahnen	100
9.2.4	Generierung des Anfangswertproblems	102
9.2.5	Berechnete Spananzahl	103

9.3	Berechnungsergebnisse der Hauben	103
9.3.1	Haubenmodelle	103
9.3.2	Darstellung der Berechnungsergebnisse	107
9.4	Versuchsordnung	112
9.5	Vergleich der Messungen mit den Berechnungen	113
10	Zusammenfassung	115
11	Literaturverzeichnis	116

1 Einleitung und Problemstellung

Für die Erfassung und Entsorgung von Holzstäuben und –spänen in Holzbearbeitungsmaschinen gibt es eine große Zahl an unterschiedlich gestalteten Absaughauben mit mehr oder weniger guter Erfassungswirkung [1]. Da für die verschiedenen Bearbeitungsfälle sehr unterschiedliche Anforderungen an die Konstruktion der Absaughaube gestellt werden, kann es keine allgemeingültige Aussage über eine ideale Haube geben. Vielmehr ist jede Haube entweder ein Kompromiss zwischen verschiedenen Bearbeitungsfällen oder sie ist eine sehr individuell angepasste Lösung für einen speziellen Bearbeitungsfall. Der Extremfall für verschiedene Bearbeitungsfälle ist das Bearbeitungszentrum, bei welchem in einer Haube alle Bearbeitungsarten stattfinden müssen. Bei Speziallösungen wie der Fußbodenpaneelbearbeitung hingegen kann eine exakt auf diesen Fall angepasste Lösung realisiert werden.

Für die Konstruktion dieser Vielzahl von Absaughauben für die unterschiedlichsten Anwendungen steht dem Konstrukteur bisher kein adäquates Hilfsmittel zur Verfügung, mit welchem er die Funktion der Haube erkennen und abschätzen kann. Er muss sich bislang rein auf seine Erfahrung und Intuition verlassen. Allenfalls kann er auf die allgemeinen Grundlagen der Strömungsberechnung und der Strömung in Rohren zurückgreifen [2-4]. Da die Dimensionen der Haube zur Erfassung des kompakten Spänestrahls ausschließlich mittels der Luftströmung bei weitem nicht ausreichen, reicht dieser Ansatz nicht aus, eine gut funktionierende Haube zu entwerfen. Zudem verursachen Stäube und Späne, die nicht von der Absauganlage erfasst werden, Betriebsstörungen. Sie erhöhen die Ausschussquote und sind für teure, manuelle Reinigungsarbeiten verantwortlich. Eine schlecht funktionierende Absaughaube gefährdet jedoch nicht nur das Arbeitsergebnis, es treten zudem noch Ausbrüche in Bereichen der Werkzeugschneide auf, in denen nachweislich nicht zerspannt wurde. Solche Ausbrüche sind höchstwahrscheinlich auf Stöße mit umlaufenden, nicht erfassten Spänen bzw. silikatischen Partikeln zurückzuführen.

Führt die realisierte Konstruktion nicht zu einem befriedigenden Absaugergebnis, so zieht dies in der Regel kostenintensive Nacharbeiten seitens des Maschinenherstellers nach sich. Die Hauben müssen oft unter extremem Zeitdruck, da die Anlage sich bereits in Betrieb befindet, angepasst werden, bis eine zufriedenstellende Späneerfassung erreicht ist. Zudem ist der Wirkungsgrad einer Späneabsaugung bisher nicht vor der Inbetriebnahme einer Anlage zu bestimmen. Im Dauerbetrieb jedoch zeigen sich die Unzulänglichkeiten der Absaugung dann deutlich.

2 Stand der Technik

Es gibt viele verschiedene Untersuchungen, die sich mit der pneumatischen Förderung von Partikeln der unterschiedlichsten Art beschäftigen. Jedoch handelt es sich dabei meist um die kontinuierliche Förderung von Partikeln in vorgegebenen Rohrleitungen [4-26], um Untersuchungen über den Luftwiderstand [28-42] oder den Druckverlust der Strömung durch die Partikelbeladung in Rohren [43,44]. Die Verhältnisse in Absaughauben unter dem Einfluss von rotierenden Werkzeugen mit Geschwindigkeitssenken durch die Absaugung wurden bisher noch nicht untersucht.

Der Flug von Spänen und Staubpartikeln wird zwischen der Entstehungsstelle und dem Absaugstutzen der Absauganlage von den unterschiedlichsten Einflussgrößen bestimmt. Daneben gibt es noch den sogenannten c_w -Wert zu bestimmen, in welchem die übrigen, nur sehr schwer zu erfassenden Parameter, die zur Reibung zwischen den Partikeln und der Luft beitragen, wie beispielsweise die Oberflächenrauigkeit der Partikel, einfließen. Die Einflussfaktoren auf den Flug des Partikels sind:

- Korngrößenverteilung der Partikel
- Spezifisches Gewicht der Partikel
- c_w -Wert der Partikel
- Anfangsgeschwindigkeit der Partikel
- Winkel des Spänestrahls
- Erzeugte Spanmenge pro Zeiteinheit
- Verteilung der Partikelklassen im Spänestahl
- Stoßverhalten der Partikel mit der Wand
- Lüfterwirkung des Werkzeugs
- Geschwindigkeitsprofil im Absaugstutzen
- Absauggeschwindigkeit

Inzwischen gibt es Programme, die auf einem gut ausgestatteten PC Strömungsberechnungen, sowohl mit 2D- als auch mit 3D-Modellen bewältigen. Es kann dabei zwischen verschiedenen Turbulenzmodellen ausgewählt werden.

Am Institut für Werkzeugmaschinen wurden Vorarbeiten zur Bestimmung des Partikelfluges in einfachen Fällen durchgeführt [45]. Es wurde eine Zerspanungsvorrichtung, bestehend aus

einer Kreissäge, konstruiert, die die erzeugten Späne in den freien Raum schleudert. Am Ende der Flugbahn wurden die Partikel in einem Raster aufgefangen und durch Wägung und Siebanalyse weiter untersucht. Durch die Siebanalyse der Rasterfelder konnte ermittelt werden, welche Flugweiten die einzelnen Partikelklassen erreichen. Die Abfluggeschwindigkeit der einzelnen Partikel wurde direkt an der Entstehungsstelle mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Es gibt am Institut eine verbesserte Messmöglichkeit der Spangeschwindigkeit durch eine synchronisierte Stroboskopanordnung.

Weiter wurden im Vorfeld Simulationsberechnungen für verschiedene Absaugelemente wie Hauben und Kabinen sowie Bauteile von Absaughauben durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse können bislang nur zu einer strömungsgünstigeren Haubengestaltung verwendet werden. Dies führt zwar zu einer Verbesserung der Absaugwirkung, doch lässt sich über die tatsächlich erzielte oder erzielbare Verbesserung der Partikelerfassung wenig aussagen, da die Partikelerfassung nicht ausschließlich von der strömungsgünstiger ausgeführten Haube abhängt.

3 Spangrößenverteilung bei unterschiedlichen Werkstoffen

Ein möglichst universell einsetzbares Programm ist dadurch gekennzeichnet, dass durch die Eingabe einiger weniger Schnittwerte die entstehende Spangrößenverteilung durch das Programm selbstständig ermittelt werden kann.

3.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden mit einer Homag Durchlaufmaschine mit mechanischem Werkstückvorschub und zweiseitigen Versuchswerkzeugen durchgeführt. Das folgende Bild 3.1 zeigt den Versuchsaufbau.

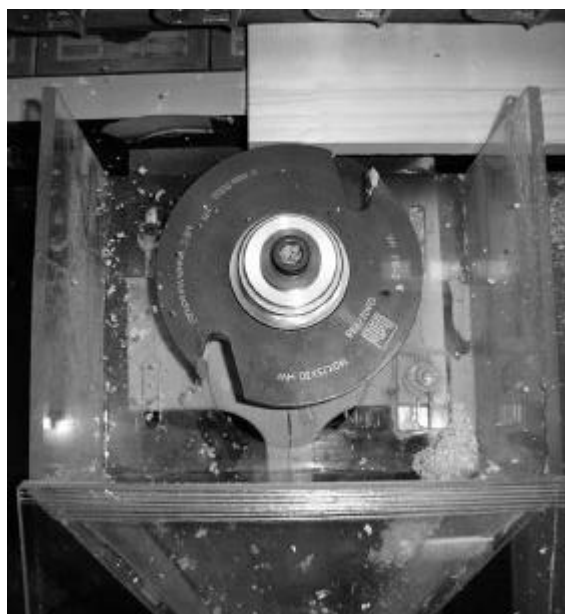


Bild 3.1: Versuchsaufbau

Auf der Maschine wurden Versuche im Gleich- und Gegenlauf durchgeführt. Bei Massivhölzern wurden zudem verschiedene Schnittrichtungen untersucht. In Stichversuchen wurde der Einfluß der Schnittbreite untersucht. Die entstehenden Späne wurden mit einem Industrie-Hochdrucksauger aus der einfachen Acrylglasshaube abgesaugt. Dabei wurde das Werkstück vor und nach der Bearbeitung gewogen, so dass mit den aufgefangenen Spänen ein Erfassungsgrad der Versuchseinrichtung ermittelt werden konnte. Die gemessenen Erfassungsgrade sind im Bild 3.2 angegeben. Der Staubsauger wurde nach jedem Versuch vollständig entleert und die aufgefangenen Späne einer Siebanalyse unterzogen.

Bearbeitungsart:	Werkstoff:	Erfassungsgrad in %:
Gleichlauf	Buche	98,3 - 100
Gleichlauf	Fichte	96,2 - 100
Gleichlauf	Spanplatte	79,3 - 92,5
Gleichlauf	MDF	82 - 91
Gegenlauf	Buche	96,2 - 98,3
Gegenlauf	Fichte	95,5 - 100
Gegenlauf	Spanplatte	90,3 - 92,9
Gegenlauf	MDF	87 - 90,3

Bild 3.2: Erfassungsgrade bei verschiedenen Werkstoffen und Bearbeitungsoperationen

3.2 Auswertung der Siebergebnisse

Die Ergebnisse der Siebanalyse werden in die grünen Felder des in Bild 3.3 dargestellten Datenblatts eingetragen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Datenblatt:	Buche Gegenlauf 10 m/min Vorschub								
2										
3	Verfahren:			Spanmasse der Probe:			119,2	Schnittbreite: 19 mm		
4	Werkzeug:	Loitz / tief		Werkstoff:			Buche			
5	Vorschubgeschwindigkeit:	10 m/min		Zahnvorschub:			1,667mm	h _{min} :	0,199mm	
6	Zahnezahl Werkzeug:	2		Werkzeugdurchmesser:			140mm	h _{max} :	0,396mm	
7										
8										
9	Spangrößenklasse:	Wanne	0,063 mm	0,125 mm	0,25 mm	0,5 mm	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
10	Körzeneinheitsnummer:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	Spanmasse in g:	0,8	2,7	6,4	9,8	15,2	40,5	43	0,8	0
12	Spanmasse in %:	0,7	2,3	5,4	8,2	12,8	34,0	36,1	0,7	0,0
13	Gauß'sche Normalverteilung	0,05	0,56	3,44	12,17	24,86	29,28	19,89	7,78	1,76
14	Gauß'sche Fehlerquadrate	23,01	14,42	7,82	3,23	0,64	0,04	1,45	4,85	10,26
15	gewichtete Fehlerquadrate	15,44	32,65	42,00	26,65	8,10	1,40	52,21	3,26	0,00
16										
17	gewichteter Mittelwert μ :	5,79697987								
18	Varianz σ^2 :	1,82								
19	Standardabweichung (σ):	1,3476518								
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										

Bild 3.3: Formular zur Auswertung der Versuchsergebnisse

Aus den einzelnen Siebfractionen wird durch Aufsummieren die Gesamtspanmasse nach Gleichung (3.1) ermittelt.

$$m_{ges} = \sum \Delta m_i \quad (3.1)$$

Aus der Gesamtspanmasse m_{ges} und der Masse der einzelnen Siebfractionen Δm ergibt sich die prozentuale Spanmasse der einzelnen Spangrößenklasse $\Delta m_{\%}$ aus Gleichung (3.2).

$$\Delta m_{\%} = \frac{100 \cdot \Delta m_i}{m_{ges}} \quad (3.2)$$

Trägt man diesen prozentualen Anteil über den Spangrößenklassen beispielsweise für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten bei der Bearbeitung von Spanplatte im Gegenlauf auf, so ergibt sich das folgende Bild 3.4.

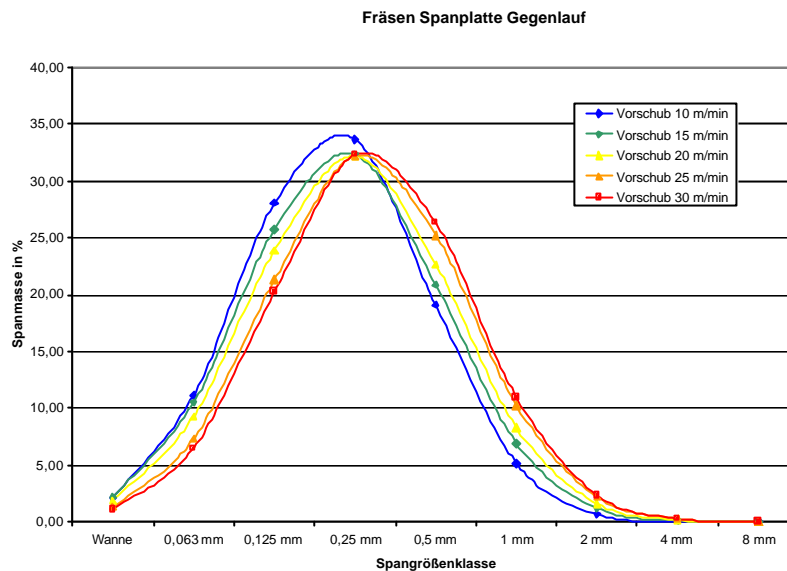


Bild 3.4: Spangrößenverteilung beim Fräsen von Spanplatte im Gegenlauf

3.3 Ersetzen der Spangrößenverteilung durch eine Gauß'sche Normalverteilung

Die prozentuale Massenverteilung der verschiedenen Spangrößenklassen legt einen Vergleich mit einer Gauß'schen Normalverteilung nahe (Bild 3.5).

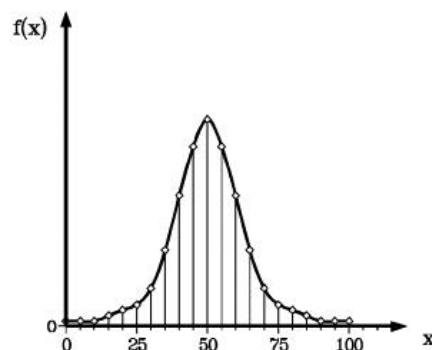


Bild 3.5: Gauß'sche Normalverteilung

3.3.1 Klasseneinteilung

Eine Gauß'sche Normalverteilung ist in der Regel die Auswertung einer Häufigkeitsverteilung der Meßwerte von Stichproben. Dazu wird das Intervall, in dem alle Meßwerte liegen, in gleich große Teilintervalle (die sogenannten Klassen) eingeteilt. Sie werden hier als Spangrößenklassen bezeichnet.

Die Klasseneinteilung geschieht nach folgenden Regeln:

- Die Klassenintervalle sind gleich lang.
- Die Klassenmitten sollen möglichst einfache Zahlen sein.
- Der Wert, der genau auf einen Punkt zwischen 2 Intervallen fällt, wird in beiden Intervallen zur Hälfte gerechnet. Dies ist aber durch die Auswahl der Intervalle möglichst zu vermeiden.

Die Spangrößenklassen entsprechen jedoch in mehreren Punkten nicht den obigen Klasseneinteilungsregeln. Dies läßt sich jedoch lösen, indem die Spangrößenklassen durchnummeriert werden (Bild 3.6).

Spangrößenklasse	Wanne	0,063 mm	0,125 mm	0,25 mm	0,5 mm	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
Klassennummern:	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Bild 3.6: Ersetzen der Spangrößenklassen durch eine fortlaufende Nummerierung

Die y-Werte der Normalverteilung sind üblicherweise die Summe der Meßwerte aus der Stichprobe, die sich in einer Klasse befinden. Bei der hier festgelegten Spangrößenverteilung sind die Werte der verschiedenen Klassen jedoch Prozentzahlen der Gesamtspanmasse. Um damit eine Normalverteilung berechnen zu können, werden diese Werte in fiktive Häufigkeiten von Stichproben umgewandelt. Hierzu geht man davon aus, dass die Prozentanteile der jeweiligen Spangrößenklassen die Anzahl von Proben darstellen, die in im jeweiligen Teilintervall (Klasse) liegen. So sind in der nachfolgenden Tabelle 2 nicht 18,7% der Spanmasse in der Größenklasse 1 mm, sondern 18,7 Proben (von 100 Proben) liegen in der Klasse 6 (vergleiche Bild 3.7). Dass bei dieser Vorgehensweise keine ganzzahligen Proben entstehen ist nicht problematisch, da entsprechend den definierten Regeln zur Klasseneinteilung, diejenigen Werte, die direkt auf einer Klassengrenze liegen, jeder Klasse zur Hälfte zugeteilt werden).

Spangrößenklasse	Wanne	0,063 mm	0,125 mm	0,25 mm	0,5 mm	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
Klassennummern:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Buche Kreissägen	0,3%	4,1%	17,0%	26,5%	24,5%	18,7%	8,8%	0,0%	0,0%

Bild 3.7: Prozentuale Spanmassenverteilung einer Siebprobe

Um nun eine Gauß'sche Normalverteilung berechnen zu können, die dann mit dem Diagramm der Versuchsauswertung verglichen werden kann, sind grundsätzlich zwei charakteristische Maßzahlen notwendig. Diese sind:

- Arithmetischer Mittelwert
- Varianz (Angabe über die Streuung der Werte)

3.3.2 Berechnung des arithmetischen Mittelwertes

Wichtig ist hier klarzustellen, dass es sich beim arithmetischen Mittelwert nicht um den Mittelwert der Prozentwerte der Verteilung auf die Spangrößenklassen handelt, sondern um den Mittelwert der Proben. Da die Prozentwerte der Spangrößenverteilung gleich der Probenanzahl gesetzt und die Spangrößenklasse durch eine Klassennummer ersetzt wurde, ist zu bedenken, dass jetzt 18,7 Proben den Wert 6 haben (in Bild 3.8 nochmals dargestellt).

Probenanzahl:	0,3	4,1	17	26,5	24,5	18,7	8,8	0	0
Meßwert der Probe	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Bild 3.8: Umsetzung für die Berechnungen zur Normalverteilung

Dies kann nun in die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts nach folgender Formel (3.3) eingesetzt werden.

$$m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.3)$$

Dabei sind:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ = Meßwerte der Stichproben

n = Anzahl der Stichproben

Dabei muß die Aufsummierung durch eine andere Form ersetzt werden (Formel (3.4)), da nicht 18,7 Versuche mit dem Wert 6 addierbar sind. Hier wird jede mittlere Klassengröße mit

ihrer Klassenhäufigkeit multipliziert. Dies wird als Bildung eines gewichteten Mittelwertes bezeichnet.

$$\mathbf{m} = \frac{a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_9 \cdot x_9}{n} \quad (3.4)$$

Dabei sind:

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_9$ = Anzahl der Stichproben (= Prozentwerte der Spangrößenklassen)

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_9$ = Meßwerte der Klassen (= Klassennummern 1 – 9)

$n = 100$

3.3.3 Berechnung der Varianz

Als Maß für die Streuung werden die kleinsten Gauß'schen Fehlerquadrate eingesetzt. Dies ist die Summe der Quadrate der Einzelabweichungen. Geteilt durch die Anzahl der Stichproben ergibt sich schließlich nach Formel (3.5) die Varianz.

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mathbf{m})^2 \quad (3.5)$$

Auch hier wird, aus den gleichen Gründen wie bei der Berechnung des Mittelwertes (gewichteter Mittelwert) wieder auf die Klassengröße und Klassenhäufigkeit zurückgegriffen und die Formel (3.5) in die folgende (gewichtete) Form (Formel (3.6)) umgestellt.

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot [a_1 \cdot (x_1 - \mathbf{m})^2 + a_2 \cdot (x_2 - \mathbf{m})^2 + \dots + a_9 \cdot (x_9 - \mathbf{m})^2] \quad (3.6)$$

Die Standardabweichung wiederum ergibt sich aus der Wurzel der Varianz (Formel (3.7)):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3.7)$$

3.3.4 Berechnung der Gauß'schen Normalverteilung

Die Formel für die Gauß'sche Normalverteilung lautet folgendermaßen (Formel (3.8)):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2p \cdot s^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{s} \right)^2} \quad (3.8)$$

In diese Formel werden nun der gewichtete Mittelwert μ und die Varianz s^2 bzw. die Standardabweichung s eingesetzt. Der Funktionswert ergibt, da mit relativen Häufigkeiten gearbeitet wurde, immer einen Wert zwischen 0 und 1. Soll die berechnete Kurve nun mit den Prozentwerten der Spangrößenklassen aus den Versuchen vergleichbar sein, so muß die Formel mit dem Faktor 100 multipliziert werden (Formel (3.9)).

$$f(x) = \frac{100}{\sqrt{2p \cdot s^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{s} \right)^2} \quad (3.9)$$

Das folgende Bild 3.9 zeigt exemplarisch die Abweichungen zwischen gemessener Spangrößenverteilung und durch Gauß'sche Normalverteilung berechneter Spangrößenverteilung für den Werkstoff Spanplatte bei 10 m/min Vorschubgeschwindigkeit. Die Bearbeitung fand im Gleichlauf statt.

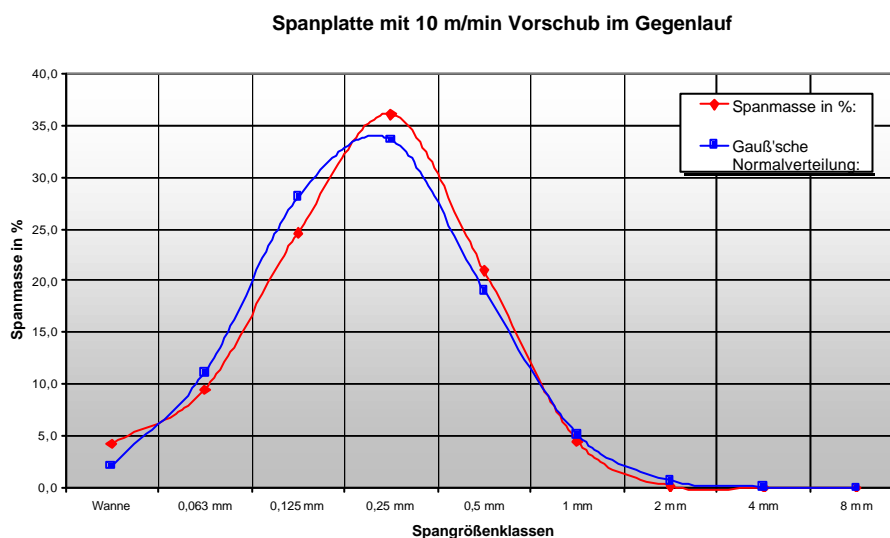


Bild 3.9: Vergleich der Meßwerte und der Gauß'schen Normalverteilung beim Fräsen von Spanplatte im Gegenlauf

3.4 Versuchsreihe

3.4.1 Holzwerkstoffe

Bei den Holzwerkstoffen (Spanplatte, MDF) wurden 19 mm dicke Platten an ihrer Schmalfäche bearbeitet. Im Gleich- und Gegenlauf wurde die gesamte Plattenstärke mit 2 mm Schnitttiefe zwischen 10 m/min und 30 m/min Vorschub mit einem zweiseidigen Werkzeug (Durchmesser 140 mm) abgearbeitet. Als Stichversuch wurde bei 20 m/min Vorschub und ansonsten gleichen Schnittbedingungen die halbe Plattenbreite abgespannt. Dadurch kann der Einfluss der Schnittbreite auf das Spangrößenkollektiv ermittelt werden.

3.4.2 Massivhölzer

Es wurde ein Weichholz (Fichte) und ein Hartholz (Buche) unter den gleichen Schnittbedingungen wie die Holzwerkstoffe bearbeitet. Dabei wurden Schnitte längs und quer zur Faser sowie unter 45° sowohl im Gleich- als auch im Gegenlauf durchgeführt. Auch der Einfluß der Schnittbreite auf die Spangrößenverteilung wurde mit einem Bearbeitungsvorgang der halben Plattenstärke untersucht.

3.5 Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von Spanplatte

Charakteristisch beim ermittelten Spankollektiv der Spanplattenbearbeitung ist die sehr gute Übereinstimmung mit einer Gauß'schen Normalverteilung. Dies ist aus dem folgenden Bild 3.10, der Bearbeitung mit 15 m/min Vorschubgeschwindigkeit im Gleich- und Gegenlauf ersichtlich.

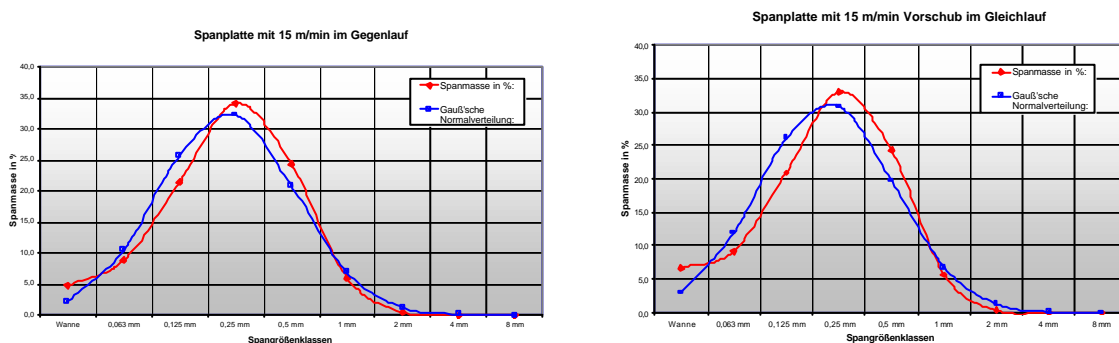


Bild 3.10: Spangrößenverteilung im Gleich- und Gegenlauf bei der Bearbeitung von Spanplatte

3.5.1 Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit (Zahnvorschub)

Betrachtet man die ermittelten Kurvenverläufe der Spangrößenverteilungen über der Vorschubgeschwindigkeit, so ist eine Verschiebung der Verteilung zu größeren Partikelgrößen bei höheren mittleren Spannungsdicken erkennbar (Bild 3.11).

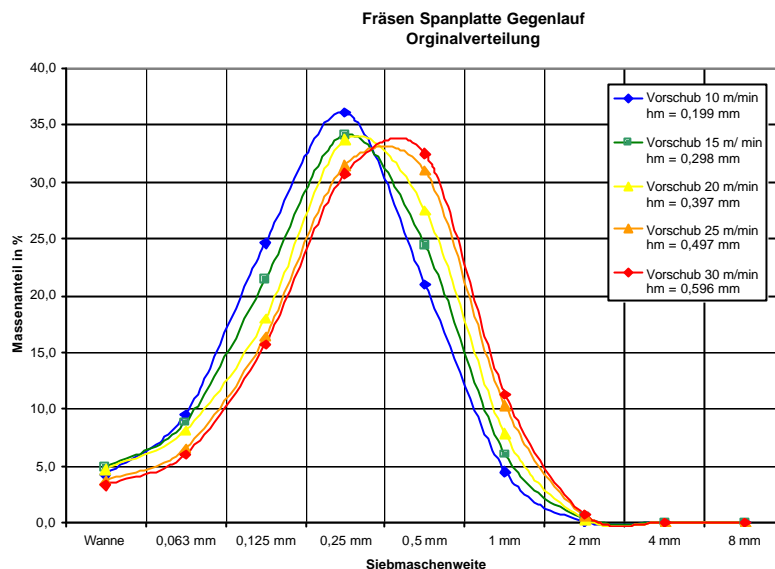


Bild 3.11: Kurvenverlauf aus Versuchsergebnissen

Auch aus der Kurvenschaar der durch die Gauß'sche Normalverteilung mathematisch angenäherten Spangrößenverteilungen ist diese Verschiebung zu größeren Spangrößen bei größerer mittlerer Spannungsdicke wiederum ersichtlich (Bild 3.12).

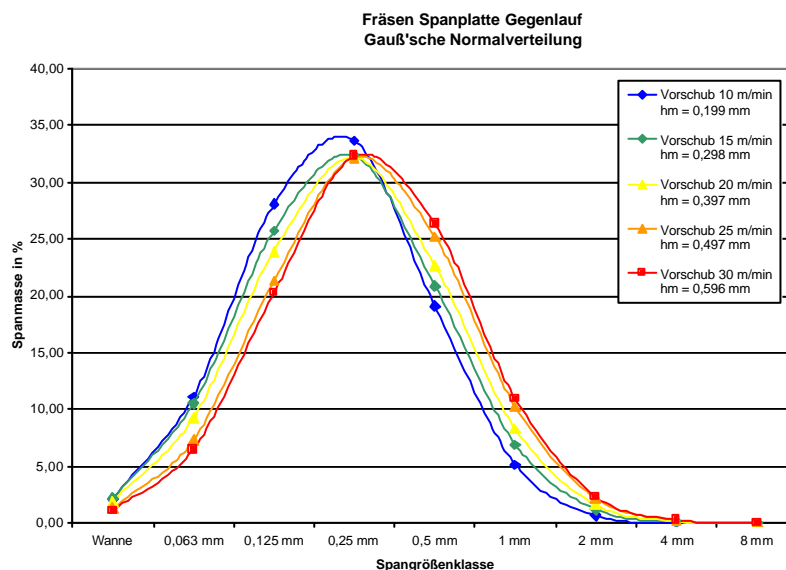


Bild 3.12: Näherung der Spangrößenverteilung durch Gauß'sche Normalverteilungen

Die Verschiebung der Spangrößenverteilungskurve muss sich auf den gewichteten Mittelwert der Gauß'schen Normalverteilung auswirken. Trägt man nun diesen gewichteten Mittelwert der einzelnen Kurven in einem Diagramm über den Vorschubgeschwindigkeiten auf, so erhält man einen Verlauf, der sich sehr genau durch eine Gerade annähern lässt (Bild 3.13). Zur Verdeutlichung: Die einzelnen Siebmaschenweiten wurden für die Approximation der versuchstechnisch ermittelten Kurven durch eine Gauß'sche Normalverteilung durchnummeriert. Der gewichtete Mittelwert von 4 entspricht beispielsweise der Siebmaschenweite 0,25 mm.

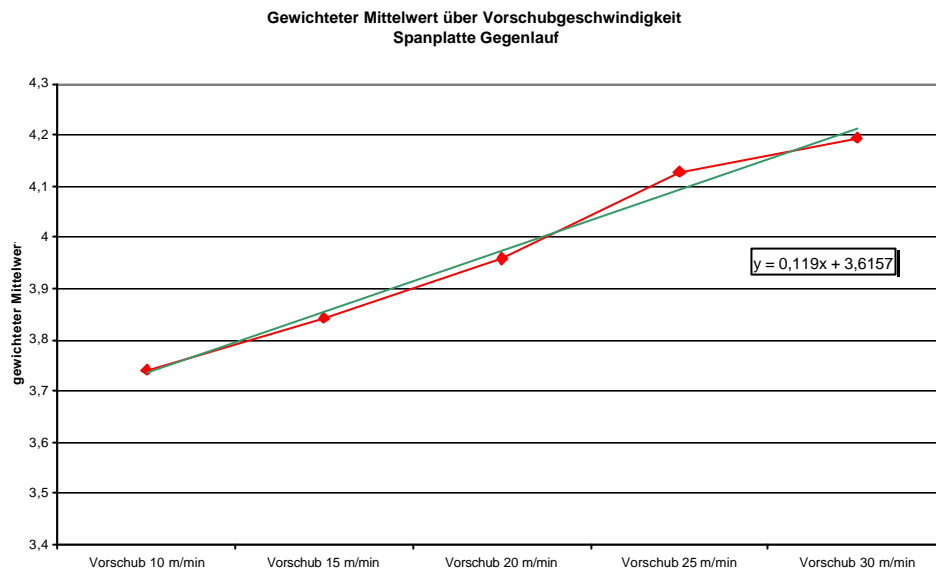


Bild 3.13: Ersetzen des gewichteten Mittelwerts durch eine Geradengleichung

3.5.2 Einfluß von Gleich- und Gegenlauf

Bereits der Vergleich der Diagramme in Bild 3.10 läßt erkennen, dass die Spangrößenverteilungen im Gleich- und Gegenlauf sehr ähnlich verlaufen. Trägt man alle Kurven der Bearbeitung im Gleich- und Gegenlauf in einem Diagramm (Bild 3.14) auf, so zeigt sich, dass es keinen augenscheinlichen Unterschied für die Spangrößenverteilung macht, ob die Spanplatte im Gleich- oder Gegenlauf bearbeitet wird. Man erkennt, dass die Kurven gleicher Vorschubgeschwindigkeiten sehr nahe beieinander liegen. Auch die Spangrößenverteilung in der nur die halbe Plattenbreite der Spanplatte bearbeitet wurde, liegt eng neben den Spangrößenverteilungen der Gleich- und Gegenlaufbearbeitungen mit der gleichen Vorschubgeschwindigkeit. Dadurch wird nachgewiesen, dass die Schnittbreite bei der Bearbeitung von Spanplatten keinen Einfluß auf die Spangrößenverteilung des entstehenden Spankollektivs hat.

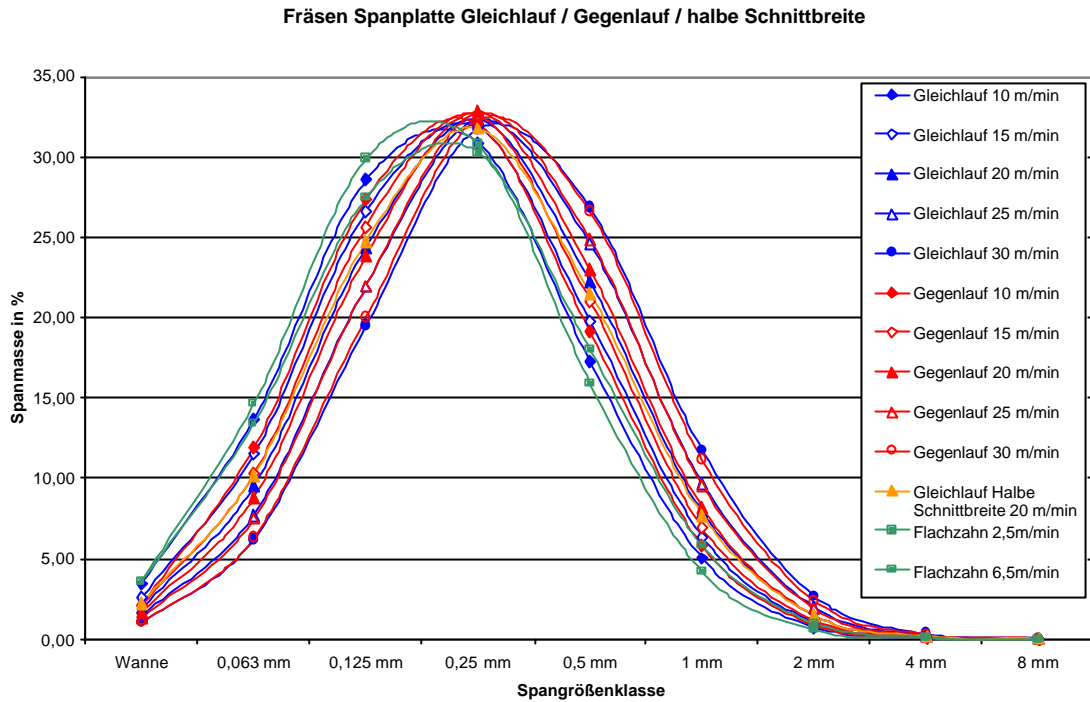


Bild 3.14: Spangrößenverteilungen im Gleich- und Gegenlauf

Noch deutlicher lässt sich dies am Diagramm der gewichteten Mittelwerte aufzeigen. Hier wird deutlich, dass die ermittelten Geradengleichungen sehr nahe beieinander liegen (Bild 3.15).

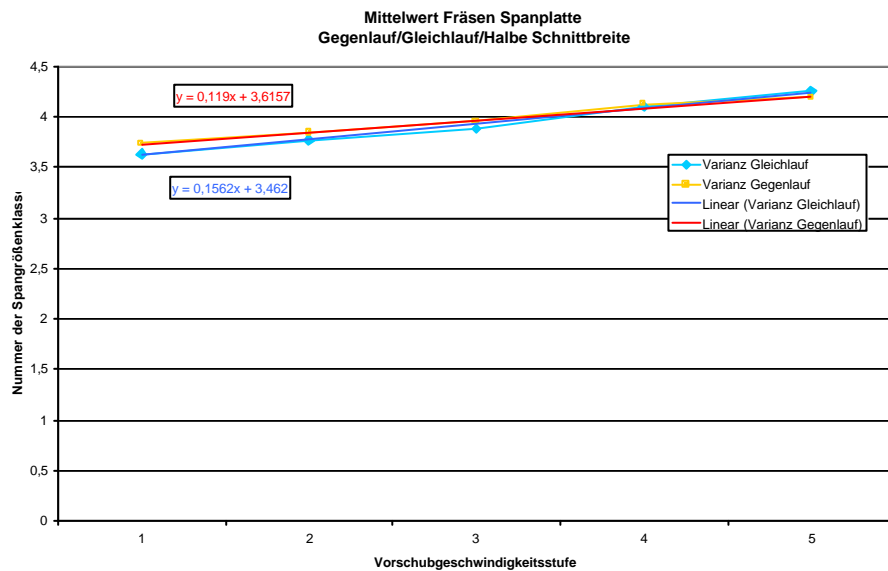


Bild 3.15: Gleichung der gewichteten Mittelwerte beim Gleich- und Gegenlauf

3.5.3 Geradengleichung des gewichteten Mittelwertes

Die Geradengleichung ist prinzipiell wie folgt (Formel (3.10)) aufgebaut:

$$y = ax + b \quad (3.10)$$

Dabei ist:

a = Steigung der Geraden

b = Verschiebung der Geraden in y-Richtung

x = Variable (Vorschubgeschwindigkeitsstufe)

Da beide Geraden in Bild 3.15 eine fast identische Steigung und eine ebenfalls fast gleiche Verschiebung aufweisen, werden für die Gleichung der gewichteten Mittelwerte die Mittelwerte der Steigung und der Verschiebung für die Geradengleichung verwendet.

Damit ergibt sich folgende Geradengleichung (3.11) bei der Bearbeitung von Spanplatte sowohl im Gleich- als auch im Gegenlauf für den gewichteten Mittelwert in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeitsstufe:

$$m = 0,1376x + 3,5388 \quad (3.11)$$

Trägt man die mittlere Spannungsdicke über der Vorschubgeschwindigkeitsstufe auf, so erhält man eine Geradengleichung für die Abhängigkeit der mittleren Spannungsdicke von der Vorschubgeschwindigkeitsstufe x . Aus dem folgenden Diagramm (Bild 3.16) kann also die Geradengleichung für die Abhängigkeit der mittleren Spannungsdicke h_m von der Laufvariable x entnommen werden. Die Vorschubgeschwindigkeitsstufen wurden dabei folgendermaßen numeriert:

- 10 m/s = 1
- 15 m/s = 2
- 20 m/s = 3
- 25 m/s = 4
- 30 m/s = 5

Diese etwas aufwendige Vorgehensweise ist notwendig, da im verwendeten Datenauswertungs-Programm die Geradengleichungen nicht in Abhängigkeit der x-Achsenwerte angege-

ben werden. Die nachfolgend ermittelte Geradengleichung (3.12) ist für alle nachfolgenden Versuche identisch gültig, da immer die gleichen Schnittwerte gefahren wurden.

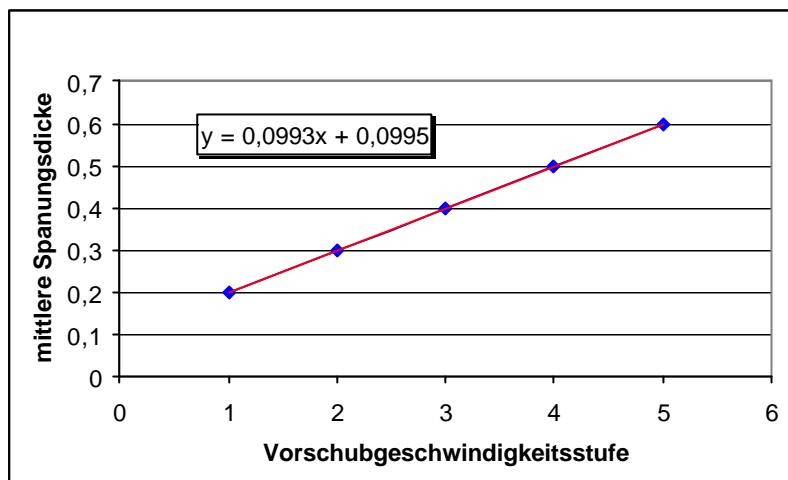


Bild 3.16: Geradengleichung der mittleren Spannungsdicke in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeitsstufe x

Die Umformung der Gleichung 3.12 nach x ergibt:

$$\begin{aligned} h_m &= 0,0993x + 0,0995 \\ x &= 10,0705h_m - 1,002 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Wird Gleichung (3.12) in Gleichung (3.11) eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwertes der Gauß'schen Normalverteilung für die Spangröße von der mittleren Spannungsdicke h_m für die Spanplattenbearbeitung:

$$m = 1,7724h_m + 3,401 \quad (3.13)$$

3.5.4 Varianz der Spangrößenverteilung

Die Varianz s^2 stellt die Breite der Normalverteilung dar. Auf dem folgenden Bild 3.17 ist ersichtlich das sie bei den ermittelten Kurven schwankt ohne eine eindeutige Tendenz zu zeigen. Deshalb wird für die Varianz bei der mathematischen Approximation der Mittelwert der einzelnen Varianzwerte bestimmt. Er gilt dann als Wert der Varianz für alle Kurven dieser Bearbeitungsart. Speziell für die Zerspanung von Spanplatte zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen Gleich- und Gegenlauf.

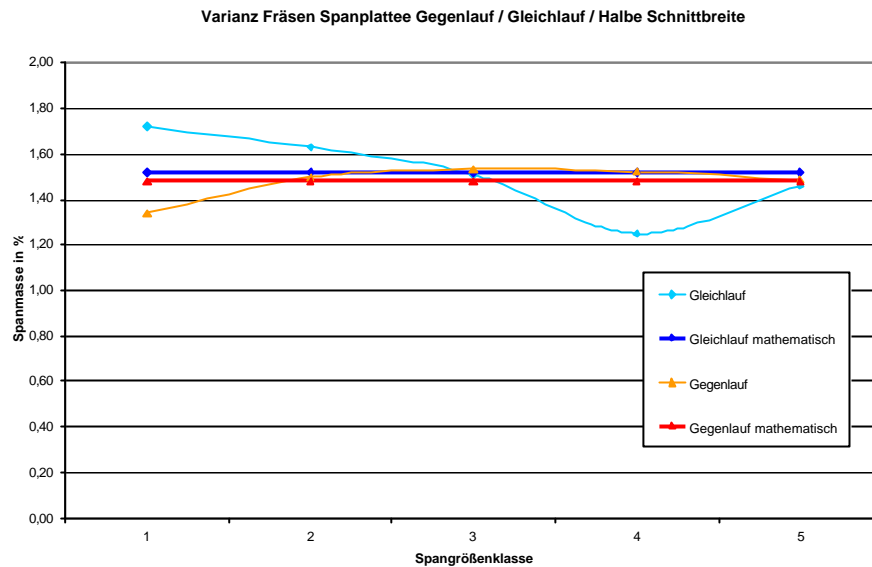


Bild 3.17: Varianz bei der Zerspangung von Spanplatte im Gleich- und Gegenlauf

Die Varianz wird somit für die Zerspangung von Spanplatten im Gleich- und Gegenlauf auf $s^2 = 1,5$ festgelegt.

3.5.5 Zusammenfassung Spanplatte

Bei der Zerspangung von Spanplatten spielt es im Hinblick auf die hier betrachtete Thematik offenbar keine Rolle, ob im Gleich- oder im Gegenlauf geschnitten wird. Auch spielt die Schnittbreite bis hinunter zu Sägeblattstärke keine Rolle. Lediglich die Erhöhung des Zahnvorschubes bewirkt eine minimale Vergrößerung der Spangröße. Dies läßt sich mit guter Näherung durch Gleichung 3.13, d.h. dem Verhältnis des gewichteten Mittelwerts zur mittleren Spandicke, darstellen. Es wäre hier aber sogar noch zulässig eine gemittelte Spangrößenverteilung bei der Spanplattenbearbeitung ganz allgemein zu verwenden.

Die einheitliche Spangrößenverteilung bei der Spanplattenverarbeitung läßt sich mit dem folgenden Bild 3.18 eines Fräasers bei der Bearbeitung einer Spanplattenschmalfläche erklären. Bei unterschiedlichen Schnittbedingungen kann nur dann eine einheitliche Spangrößenverteilung entstehen, wenn diese von den eigentlichen Schnittbedingungen unabhängig ist. Dies würde bedeuten, die Spangrößenverteilung hängt nicht von den Schnittbedingungen ab, sondern von der Zusammensetzung der Spanplatte. Dies wiederum bedeutet, dass die Partikel, aus denen sich die Platte zusammensetzt, in den allermeisten Fällen nicht geschnitten, sondern lediglich aus dem Spanplattenverbund herausgebrochen werden. Das heißt, es findet bei der Zerspangung von Spanplatten kein Schnittvorgang im eigentlichen Sinne statt, sondern allenfalls eine Zerstörung der Plattenstruktur durch die Schneide.

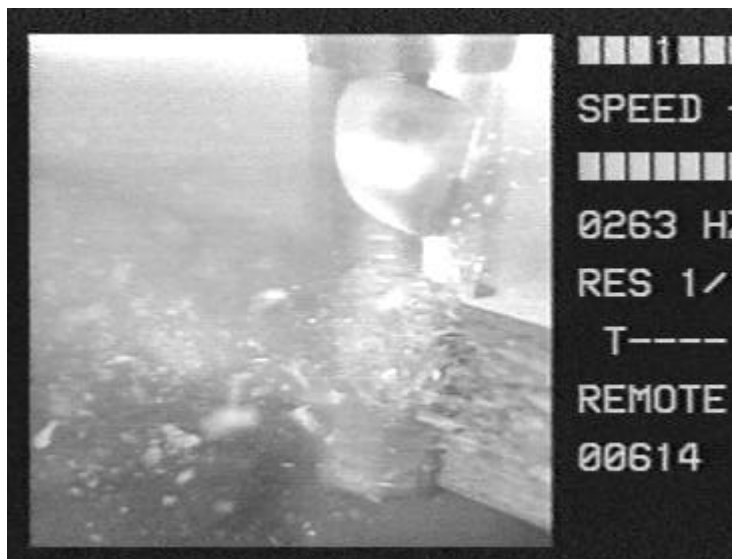


Bild 3.18: Schafffräser bei der Spanplattenbearbeitung

3.6 Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von Massivholz Buche

Bei der Bearbeitung von Massivhölzern ergibt sich eine deutlich schlechtere Übereinstimmung zwischen der ermittelten Spangrößenverteilung und der Gauß'schen Normalverteilung. Dies wird aus Bild 3.19 ersichtlich, in dem die Spangrößenverteilung bei Bearbeitung einer Buchenholzplatte längs zur Faser mit 20 m/min Vorschubgeschwindigkeit im Gleichlauf dargestellt ist.

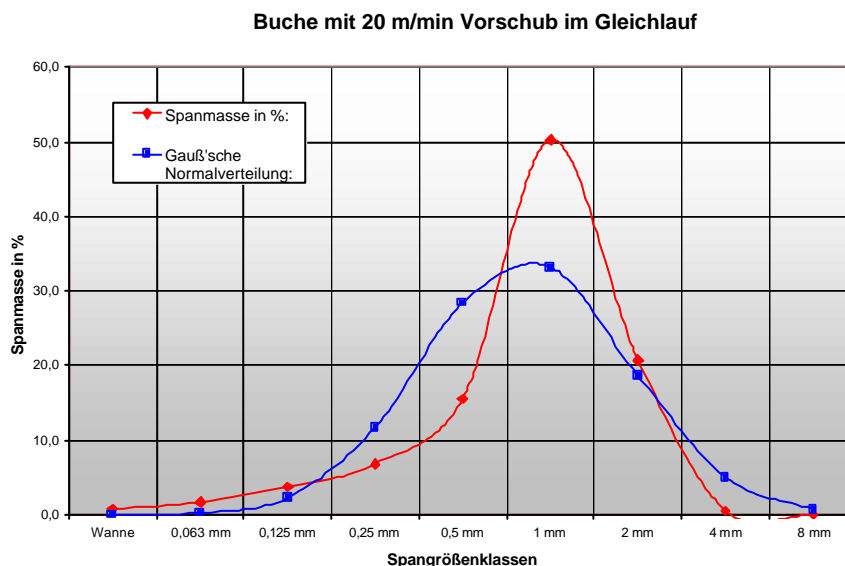


Bild 3.19: Ermittelte Spangrößenverteilung und Gauß'sche Normalverteilung

Bei allen Spangrößenverteilungskurven fällt die Gauß'sche Normalverteilung zu flach aus. Gerade in den Größenklassen, in denen große prozentuale Anteile anfallen, ergibt sich eine

große Abweichung zum gemessenen Wert. Dies liegt vor allem daran, dass die Spangrößenstreuung der Massivhölzer breiter ist. D. h. es gibt von allen Spangrößen entsprechend große Anteile, die in der Gauß'schen Normalverteilung nicht vernachlässigt werden. Für die Berechnung der Spangrößenverteilung und deren Einsatz in einem Berechnungsprogramm für Absaughauben ist es aber besonders wichtig, die stark vertretenen Späneklassen gut abzubilden. Späneklassen, die beispielsweise 5% und weniger Massenanteil an der Gesamtspanmasse aufweisen, werden sich nicht so gravierend auf das Berechnungsergebnis auswirken.

3.6.1 Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung

Es wurde für die Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung somit die folgende Festlegung getroffen:

- Alle Spangrößenklassen der Messungen, die kleiner als 5% der Gesamtmasse sind, werden zu Null gesetzt.

Somit werden in der Gauß'schen Normalverteilung nur noch die wirklich relevanten Spangrößenklassen berücksichtigt, was eine deutlich bessere Übereinstimmung der gemessenen Spangrößenkurve mit der mathematisch angenäherten Kurve im relevanten Spangrößenbereich ergibt (siehe Bild 3.20). Dies bedeutet aber nicht, daß in der mathematischen Verteilung alle Spangrößenklassen unter 5% komplett entfallen. Somit wird der Fehler an dieser Stelle meist kleiner als 5% der Spanmasse sein.

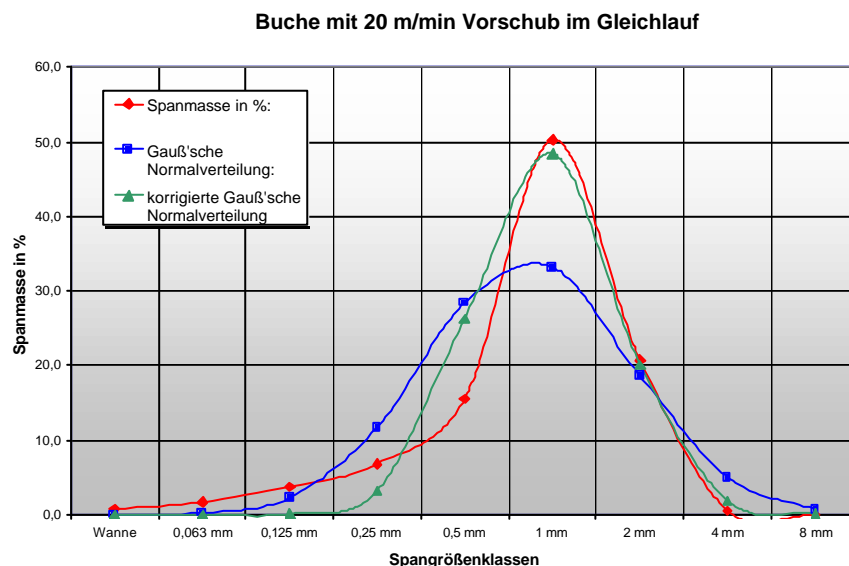


Bild 3.20: Korrigierte und nicht korrigierte Spangrößenverteilungskurve

3.6.2 Gleich- und Gegenlauf bei Massivholz

Wie im nachfolgenden Bild 3.20 zu erkennen ist, verlaufen die Spangrößenverteilungskurven zwischen Gleichlauf- und Gegenlaufbearbeitung bei Buche Massivholz nicht so deckungsgleich wie bei der Spanplattenbearbeitung.

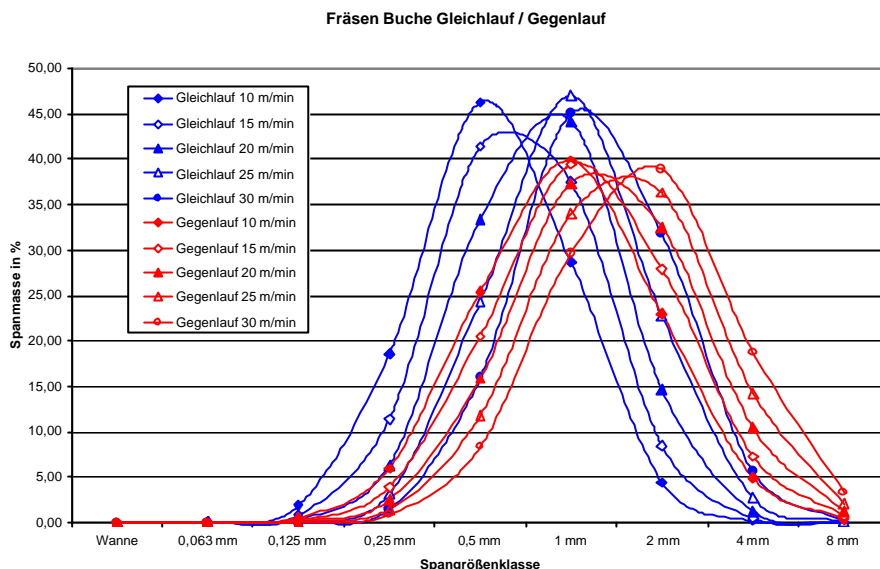


Bild 3.20: Kurvenverlauf im Gleich- und Gegenlauf

Die Spangrößenverteilungen, deren Auswertungen in Bild 3.20 dargestellt sind, wurden aus Schnitten parallel zur Holzfaser ermittelt. Im Gegensatz zur Spanplatte bestehen die Massivholzwerkstücke nicht aus einer Vielzahl kleiner Holzpartikel, die relativ locker aneinander gebunden sind und sich durch die eindringende Schneide leicht lösen lassen. Bei der Massivholzerspannung muss die Schneide das Holzgefüge trennen. Dadurch lässt sich auch die unterschiedliche Spangrößenverteilung erklären.

Wird der Werkstoff mit der Faser im Gleichlauf geschnitten, so dringt die Schneide am dicken Ende des kommaförmigen Spans in den Werkstoff ein und trennt Späne mit definierter Größe ab. Es bilden sich Verteilungen, die der Gauß'schen Normalverteilung sehr ähnlich sind. Dies ist aus den gemessenen Kurvenverläufen im Gleich- und Gegenlauf in Bild 3.21 ersichtlich.

Beim Gleichlaufräsen kann ein Brechen oder Vorspalten mit der Faser nur in den Span hinein und somit begrenzt auf die Spandicke geschehen (Bild 3.22). Dadurch entstehen kleinere Spanpartikel.

Wird der Span mit den gleichen Schnitt- und Vorschubwerten im Gegenlauf geschnitten, so kann das Holz in den noch nicht zerspannten Werkstoff hinein brechen (Bild 3.22). Dadurch können tendenziell größere Spanpartikel entstehen, so dass die gemessene Verteilung nicht

mehr ganz so gut der Gauß'schen Normalverteilung entspricht. Sie ist in Richtung größerer Späne verschoben (Bild 3.21).

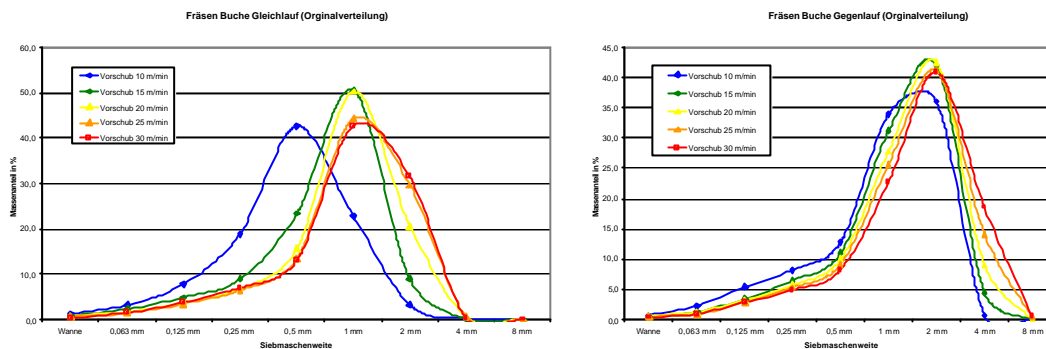


Bild 3.21: Vergleich der gemessenen Verteilungen im Gleich- und Gegenlauf

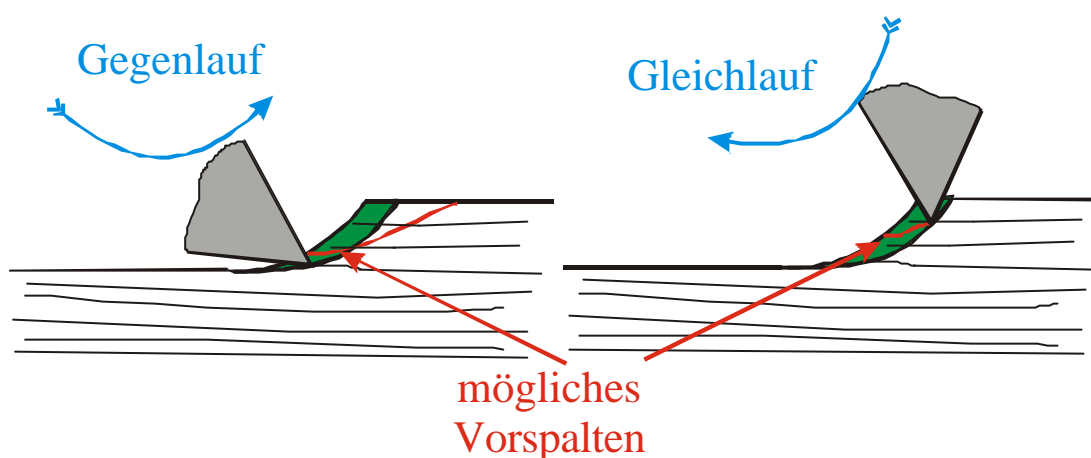


Bild 3.22: Auswirkung von Gleich- und Gegenlauf auf die Spangrößenverteilung

3.6.3 Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit (mittlere Spanungsdicke)

Auch bei der Massivholzbearbeitung läßt sich eine Verschiebung der Kurvenschar zu größeren Partikelgrößen bei höherem Zahnvorschub erkennen. Dies ist an den gemessenen Kurven und den korrigierten Kurven in Bild 3.23 dargestellt.

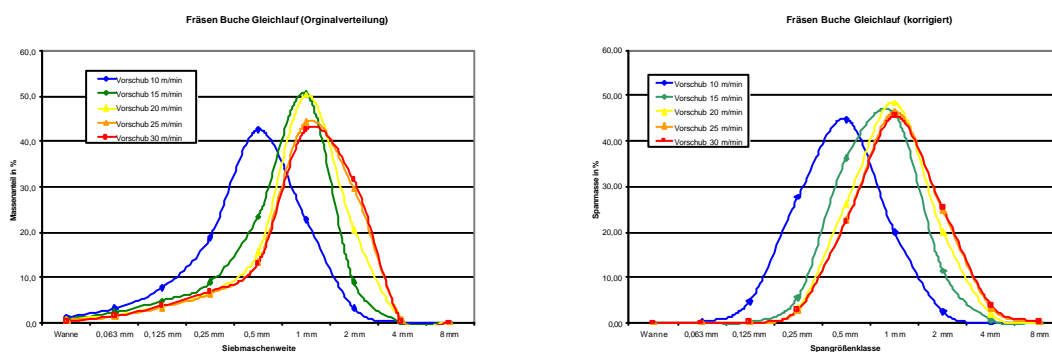


Bild 3.23: Gemessene Spangrößenverteilung und korrigierte Gauß'sche Normalverteilung

Die Verschiebung der Kurve zu größeren Spangrößenklassen zeigt sich auch hier wiederum in einer ansteigenden Gerade des gewichteten Mittelwerts der Normalverteilungen. Im übrigen läßt sich auch durch die Verschiebung der Geraden nach oben erkennen, dass im Gegenlauf größere Spangrößen entstehen (Bild 3.24).

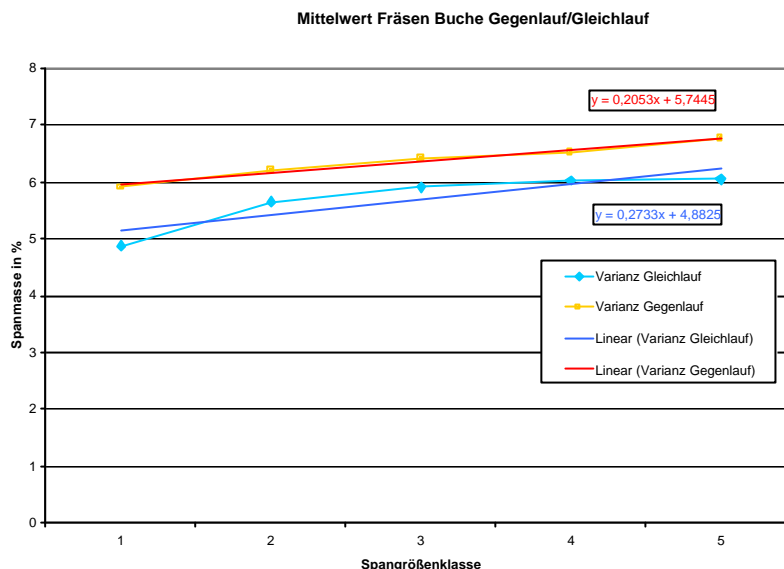


Bild 3.24: Gewichteter Mittelwert beim Fräsen von Buche (massiv) im Gleich- und Gegenlauf

3.6.4 Geradengleichung des gewichteten Mittelwerts

Wie aus Bild 3.24 ersichtlich kann bei der Zerspanung von massivem Buchenholz längs zur Faser keine gemittelte Geradengleichung für den Gleich- und den Gegenlauf verwendet werden.

3.6.4.1 Geradengleichung für die Gleichlaufbearbeitung

Für die Gleichlaufbearbeitung ergibt sich die folgende Gleichung (3.14) für die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts von der Vorschubgeschwindigkeitsstufe:

$$m = 0,2733x + 4,8825 \quad (3.14)$$

Wird nun Gleichung (3.12) in Gleichung (3.14) eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts der Gauß'schen Normalverteilung für die Spangröße von der mittleren Spannungsdicke h_m (Gleichung (3.15)) für die Gleichlaufbearbeitung von Buche längs zur Faser:

$$m = 2,7523h_m + 4,1563 \quad (3.15)$$

3.6.4.2 Geradengleichung für die Gegenlaufbearbeitung

Für die Gegenlaufbearbeitung ergibt sich die folgende Gleichung (3.16) für die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts von der Vorschubgeschwindigkeitsstufe:

$$m = 0,2053x + 5,7445 \quad (3.16)$$

Wird nun Gleichung (3.12) in Gleichung (3.16) eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts der Gauß'schen Normalverteilung für die Spangröße von der mittleren Spannungsdicke h_m (Gleichung 3.17)) für die Gegenlaufbearbeitung von Buche längs zur Faser:

$$m = 2,0675h_m + 4,9478 \quad (3.17)$$

3.6.5 Varianz der Spangrößenverteilung

Die Varianz s^2 , also die Breite der Normalverteilung, ist wie bei der Spanplattenbearbeitung ebenfalls Schwankungen ohne eindeutige Tendenz unterworfen (Bild 3.25). Als Approximation wird wiederum der Mittelwert der einzelnen Varianzwerte berechnet. Es ergibt sich somit:

$$\text{Gleichlauf: } s^2 = 0,72$$

$$\text{Gegenlauf: } s^2 = 1$$

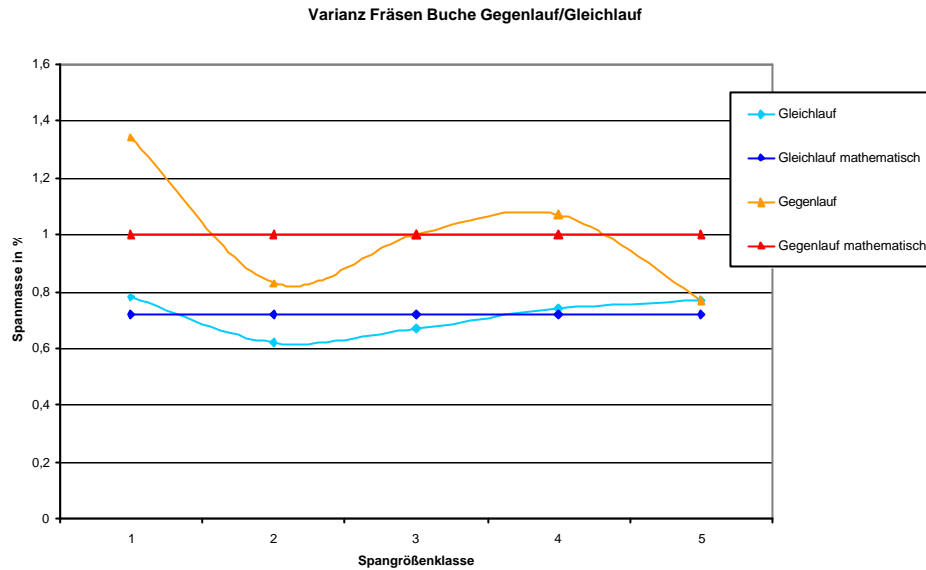


Bild 3.25: Varianz bei der Zerspanung von Buche längs zur Faser im Gleich- und Gegenlauf

3.7 Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von Massivholz Fichte

Dieser Abschnitt kann relativ kurz gehalten werden, da die Vorgehensweise bei der Korrektur der Kurven, der Interpretation der Versuchsergebnisse usw. analog zur Betrachtung von Buche ist.

3.7.1 Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung

Die Gauß'sche Normalverteilung wird in gleicher Weise korrigiert wie bei der Bearbeitung von Buche. Ein Beispiel der erreichbaren Verbesserungen ist nachfolgend in Bild 3.26 dargestellt.

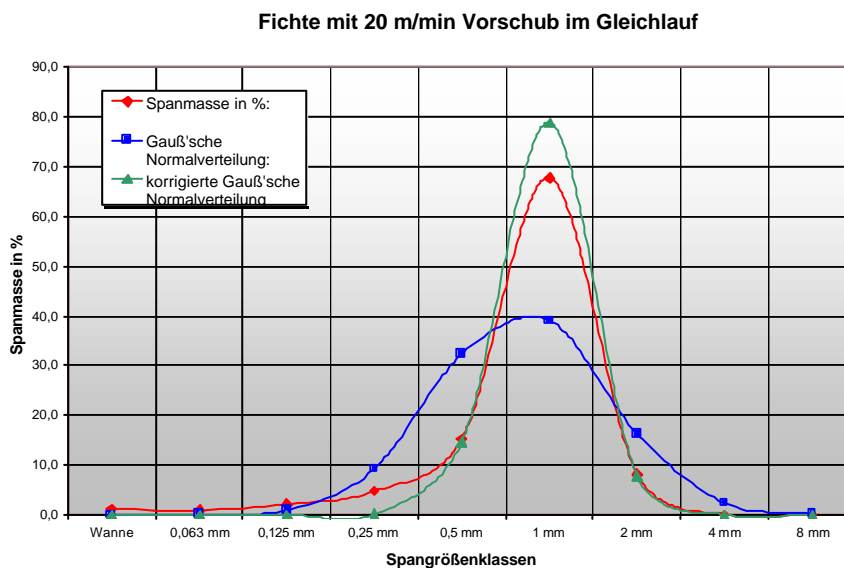


Bild 3.26: Korrigierte und nicht korrigierte Spangrößenverteilungskurve

3.7.2 Gleich- und Gegenlauf

In Bild 3.27 ist zu erkennen, dass sich die Spangrößenverteilungen der Fichtespäne zwischen der Gleich- und Gegenlaufbearbeitung deutlich unterscheiden. Es ergeben sich jedoch wie bei der Bearbeitung von Buche bei der Gleichlaufbearbeitung kleinere Späne.

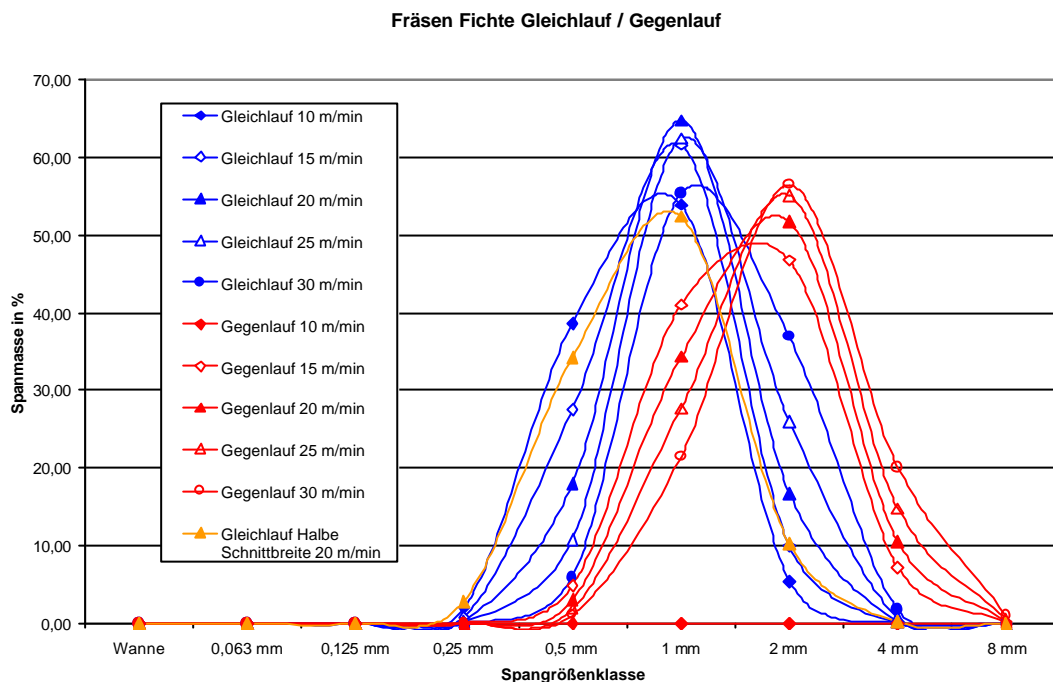


Bild 3.27: Kurvenverlauf im Gleich- und Gegenlauf

3.7.3 Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit (mittlere Spannungsdicke)

Auch bei der Bearbeitung von Fichte längs zur Faser verschiebt sich die Spangröße bei höherer Vorschubgeschwindigkeit in Richtung größerer Partikelgrößen. Dies zeigt Bild 3.28 für den Gleich- und Gegenlauf.

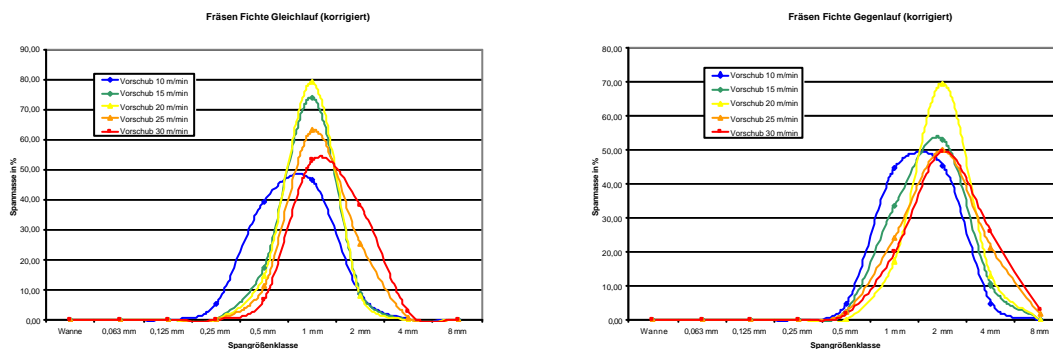


Bild 3.28: Unterschiedliche Spangrößenverteilungen bei verschiedenen Vorschüben

Wiederum läßt sich die Verschiebung der gewichteten Mittelwerte der Normalverteilungen zu größeren Spangrößen durch eine ansteigende Gerade darstellen (Bild 3.29).

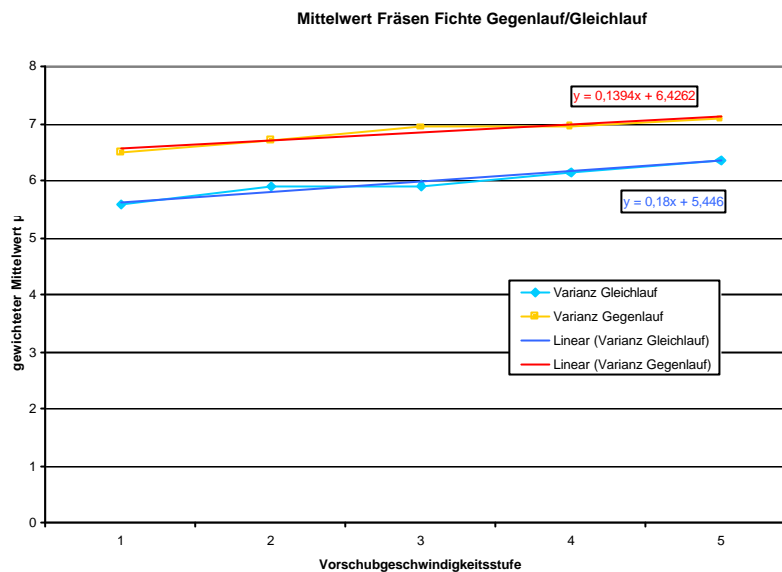


Bild 3.29: Gewichteter Mittelwert beim Fräsen von Fichte (massiv) im Gleich- und Gegenlauf

3.7.4 Geradengleichung des gewichteten Mittelwerts

Die Geradengleichungen werden analog der Vorgehensweise bei Buche ermittelt.

3.7.4.1 Geradengleichung für die Gleichlaufbearbeitung

Für die Gleichlaufbearbeitung ergibt sich die folgende Gleichung (3.18) für die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts von der Vorschubgeschwindigkeitsstufe:

$$m = 0,18x + 5,446 \quad (3.18)$$

Wird nun Gleichung (3.12) in Gleichung (3.18) eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts der Gauß'schen Normalverteilung für die Spangröße von der mittleren Spannungsdicke h_m (Gleichung 3.19)) für die Gleichlaufbearbeitung von Fichte längs zur Faser:

$$m = 1,812h_m + 5,2656 \quad (3.19)$$

3.7.4.2 Geradengleichung für die Gegenlaufbearbeitung

Für die Gegenlaufbearbeitung ergibt sich die folgende Gleichung (3.20) für die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts von der Vorschubgeschwindigkeitsstufe:

$$m = 0,1394x + 6,4262 \quad (3.20)$$

Wird nun Gleichung (3.12) in Gleichung (3.20) eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts der Gauß'schen Normalverteilung für die Spangröße von der mittleren Spannungsdicke h_m (Gleichung 3.21) für die Gegenlaufbearbeitung von Fichte längs zur Faser:

$$m = 1,4038h_m + 6,2865 \quad (3.21)$$

3.7.5 Varianz der Spangrößenverteilung

Die Varianz wird nach Bild 3.30 wie folgt als Mittelwert festgelegt:

$$\text{Gleichlauf: } s^2 = 0,38$$

$$\text{Gegenlauf: } s^2 = 0,5$$

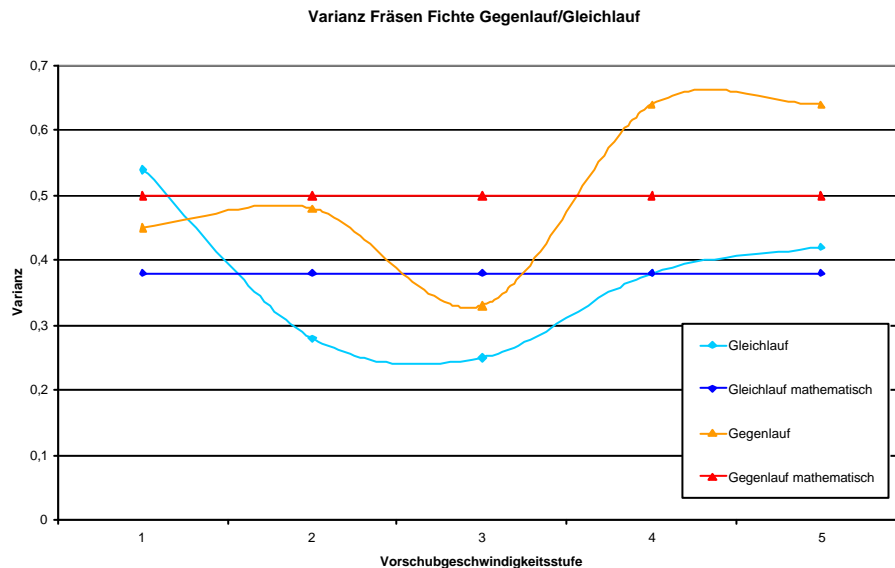


Bild 3.30: Varianz der Zerspanung von Fichte längs zur Faser im Gleich- und Gegenlauf

3.8 Spangrößenverteilung bei der Bearbeitung von MDF

Für den Werkstoff MDF wurden analoge Untersuchungen im Gleich- und Gegenlauf durchgeführt. Es ergeben sich jedoch im Vergleich zu den übrigen untersuchten Werkstoffen signifikante Unterschiede, die nachfolgend erläutert werden sollen.

3.8.1 Kurvenverlauf der Spangrößenverteilung

Bei allen Kurven der MDF-Bearbeitung nimmt der Feinstaubanteil nach einem deutlichen Abfall der Kurve nochmals stark zu. Der Kurvenverlauf bei größeren Spangrößenklassen entspricht wieder einer Gauß'schen Normalverteilung bevor er im Bereich kleiner Spangrößenklassen nochmals deutlich auf 20 – 30 % Massenanteil ansteigt.

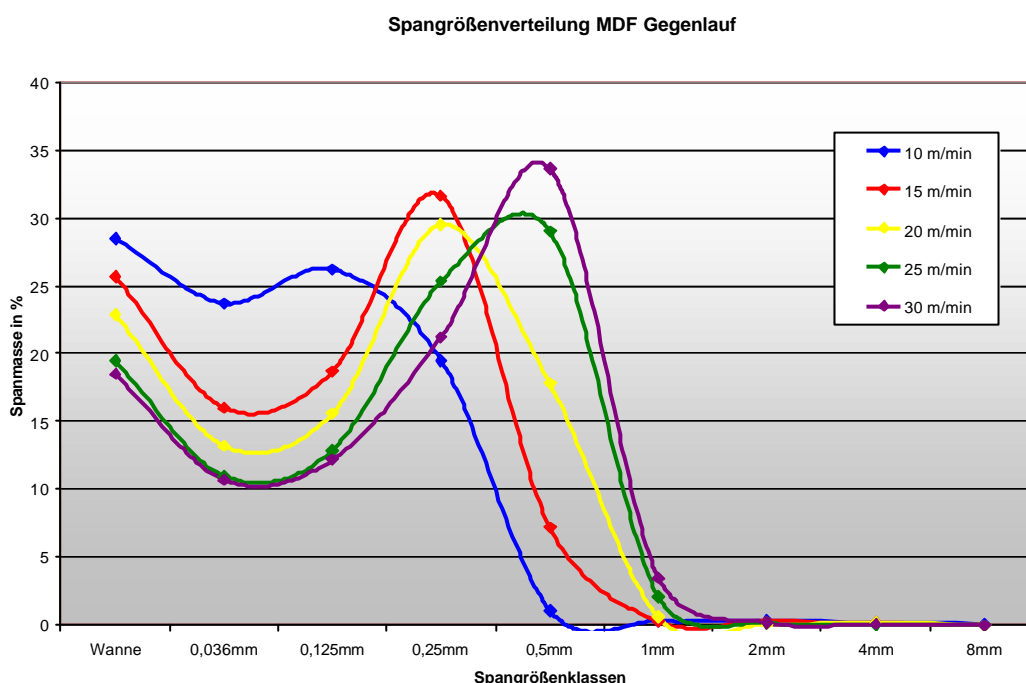


Bild 3.31: Spangrößenverteilung bei der MDF-Bearbeitung

3.8.1.1 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit (mittlere Spanungsdicke)

Ähnlich wie bei der Massivholzbearbeitung zeigt sich bei der Bearbeitung von MDF ein deutlicher Einfluss der mittleren Spanungsdicke auf die Spangrößenverteilung. Je größer der Vorschub gewählt wird, desto größer werden auch die Späne. Zurückzuführen ist dies, im Gegensatz zur Bearbeitung von Spanplatte, bei welcher sich kein Einfluss der mittleren Spanungsdicke erkennen lässt, auf MDF-Späne die aus dem Plattenwerkstoff nicht herausgerissen, sondern geschnitten werden. Bei der Zerspaltung von MDF ist also nicht ein Versagen der Klebebindung zwischen den einzelnen Holzpartikeln hauptsächlich für die Spanbildung verantwort-

lich sondern eine Mischung aus Schnittbewegung und Versagen der Verbindung der einzelnen Holzpartikel.

3.8.1.2 Gleich- und Gegenlauf

Im folgenden Bild 3.32 zeigt sich, dass bei der Bearbeitung von MDF kaum ein Unterschied zwischen der Gleich- und der Gegenlaufbearbeitung bei der Spangrößenverteilung auftritt. Die Kurven der einzelnen Spangrößenklassen verlaufen, bis auf eine gewisse Streuung kongruent. Dies kann hauptsächlich auf die Homogenität des Werkstoffes der mitteldichte Faserplatte (MDF) zurückgeführt werden.

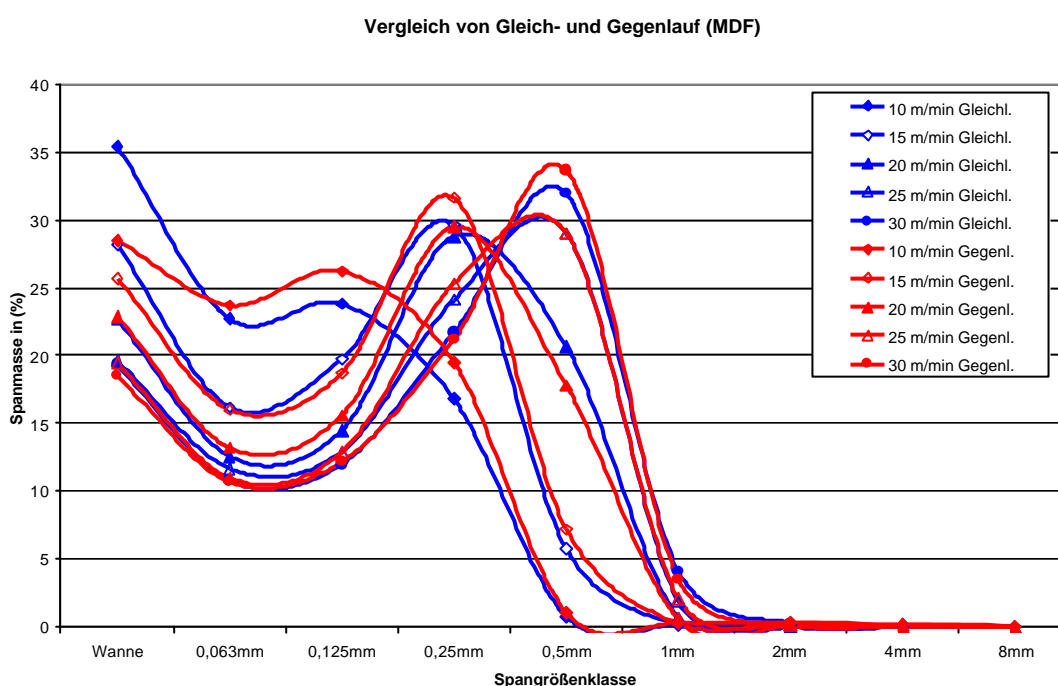


Bild 3.32: Kurvenverlauf im Gleich- und Gegenlauf

8.3.2 Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung

Zuerst wird, analog zu den anderen untersuchten Werkstoffen, eine Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung angesetzt.

8.3.2.1 Veränderte Korrekturmechanismen

Der Kurvenverlauf der Spangrößenverteilung von MDF-Spänen erlaubt nicht die gleichen, einfachen Korrekturen wie dies bei den oben untersuchten Werkstoffen möglich war. Zwar kann der Bereich größerer Spangrößen noch durch eine Gauß'sche Normalverteilung abgebildet werden, der Bereich kleinerer Spangrößen, speziell der erneute Anstieg der Kurve beim Feinstaub lässt sich nicht mehr durch eine Gauß-Kurve darstellen.

Aus diesen Gründen wird eine erweiterte Korrektur der Kurve durchgeführt. Die Gauß'sche Normalverteilung wird nur für den Kurvenverlauf von 0,063 mm Spangröße bis 8 mm Spangröße angewandt. Der Bereich kleinerer Spangrößen wird durch eine Gerade approximiert. Dabei beginnt die Gerade am Kurvenende der Gauß'schen Normalverteilung bei 0,063mm Spangröße und endet auf einem näherungsweise ermittelten Wert für die Feinstaubmenge. Dies ist im nachfolgenden Bild 3.33 durch die grüne Kurve exemplarisch dargestellt.

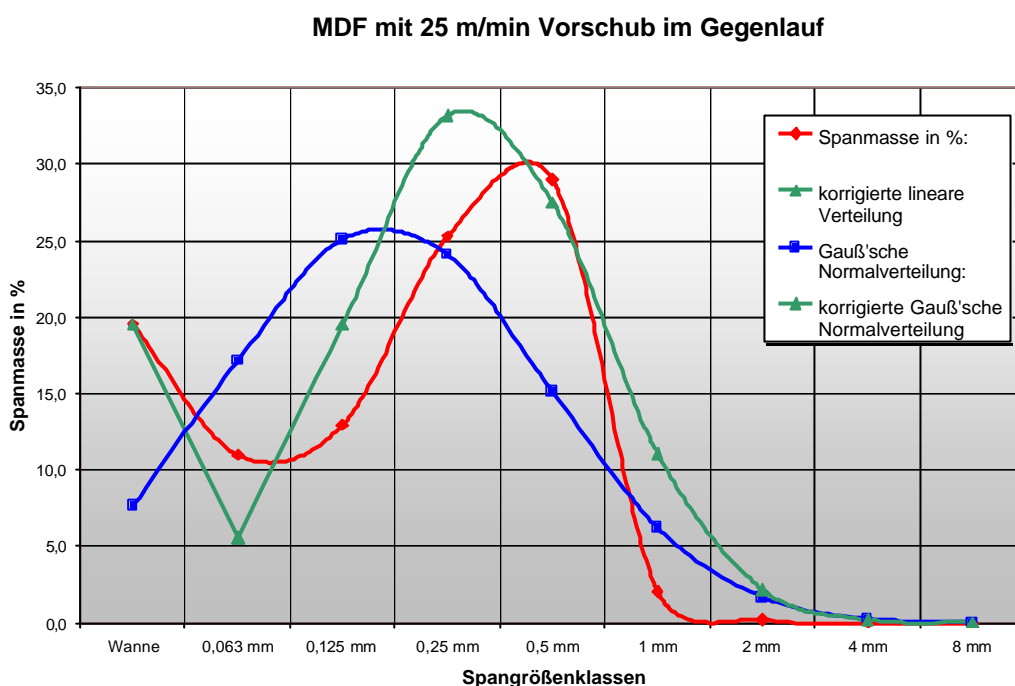


Bild 3.33: Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung durch ein zusätzliches Geradenstück

3.8.2.2 Geradengleichung des gewichteten Mittelwerts

Wird nun zuerst nur der Gauß'sche Kurvenanteil betrachtet, so ergibt sich durch die Verschiebung der Kurve hin zu größeren Spangrößenklassen bei Vergrößerung der mittleren Spannungsdicke eine Verschiebung des gewichteten Mittelwertes zu größeren Werten hin. Die analog zur oben angewandten Vorgehensweise ermittelten, gewichteten Mittelwerte für die Gleich- und Gegenlaufbearbeitung sind im folgenden Bild 3.34 dargestellt. An dem recht steilen Geradenverlauf lässt sich die deutliche Verschiebung des Kurvenmaximums bei unterschiedlichen Vorschüben und somit unterschiedlichen mittleren Spannungsdicken erkennen.

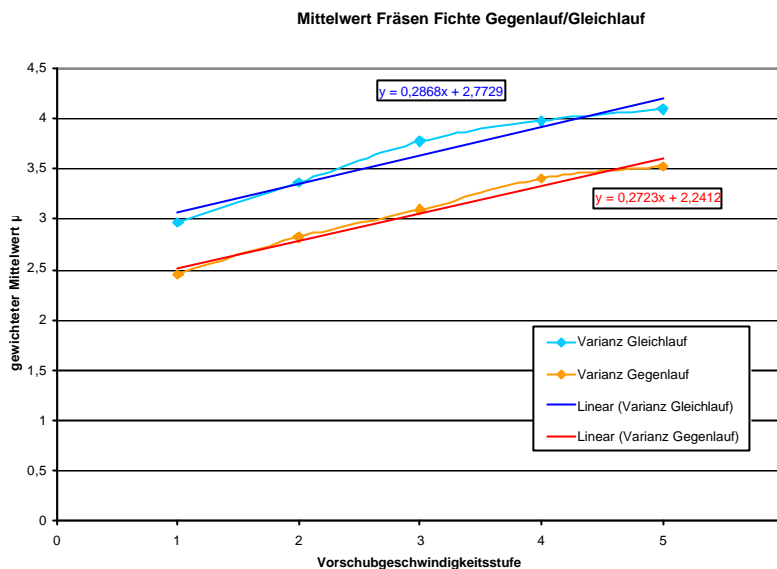


Bild 3.34: Gewichteter Mittelwert beim Fräsen von MDF im Gleich- und Gegenlauf

Gleichlauf

Für die Gleichlaufbearbeitung ergibt sich die folgende Gleichung (3.22) für die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts von der Vorschubgeschwindigkeit:

$$m = 0,2868x + 2,7729 \quad (3.22)$$

Wird nun Gleichung (3.12) in Gleichung (3.22) eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts der Gauß'schen Normalverteilung für die Spangröße von der mittleren Spannungsdicke h_m nach folgender Gleichung (3.23) bei der Gleichlaufbearbeitung von MDF:

$$m = 2,8882h_m + 2,4855 \quad (3.23)$$

Gegenlauf

Für die Gegenlaufbearbeitung ergibt sich die folgende Gleichung (3.24) für die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts von der Vorschubgeschwindigkeit:

$$m = 0,2723x + 2,2412 \quad (3.24)$$

Wird nun Gleichung (3.12) in Gleichung (3.24) eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit des gewichteten Mittelwerts der Gauß'schen Normalverteilung für die Spangröße von der mittleren Spannungsdicke h_m nach folgender Gleichung (3.25) für die Gegenlaufbearbeitung von MDF:

$$m = 2,7422h_m + 1,9684 \quad (3.25)$$

3.8.2.3 Varianz der Spangrößenverteilung

Die Varianz wird nach Bild 3.35 wie folgt als Mittelwert festgelegt:

$$\text{Gleichlauf: } s^2 = 1,81$$

$$\text{Gegenlauf: } s^2 = 1,44$$

Dadurch ergibt sich, wie bei den vorangegangenen Werkstoffen, kein großer Fehler. Allerdings lässt sich die Varianz der Gauß-Kurve bei der MDF-Bearbeitung auch sehr schön durch eine Gerade approximieren. Dann muss dazu die Formel aus dem folgenden Bild 3.35 entnommen werden und Gleichung (3.12) wiederum eingesetzt werden.

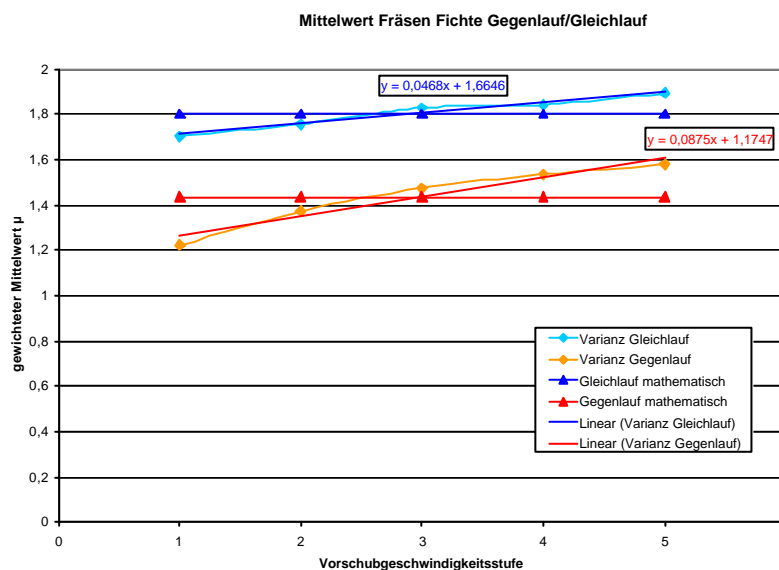


Bild 3.35: Varianz der Zerspanung von MDF im Gleich- und Gegenlauf

3.8.2.4 Geradengleichungen für kleine Spangrößen

Zur Berechnung der Geradenendpunkte in Abhängigkeit von der mittleren Spannungsdicke h_m werden sowohl die Werte der Gauß'schen Normalverteilung bei der 0,063mm Spangrößenklasse, als auch die gemessenen Werte der Auffangwanne, welche dem Feinstaub entsprechen, in einem Diagramm aufgetragen (siehe Bild 3.36). Zum Vergleich wurden in diesem

Diagramm auch die tatsächlich bei der 0,063mm Spangrößenklasse gemessenen Werte aufgetragen. Durch alle diese Kurven lassen sich Exponentialfunktionen legen, die die Kurvenverläufe gut wiedergeben.

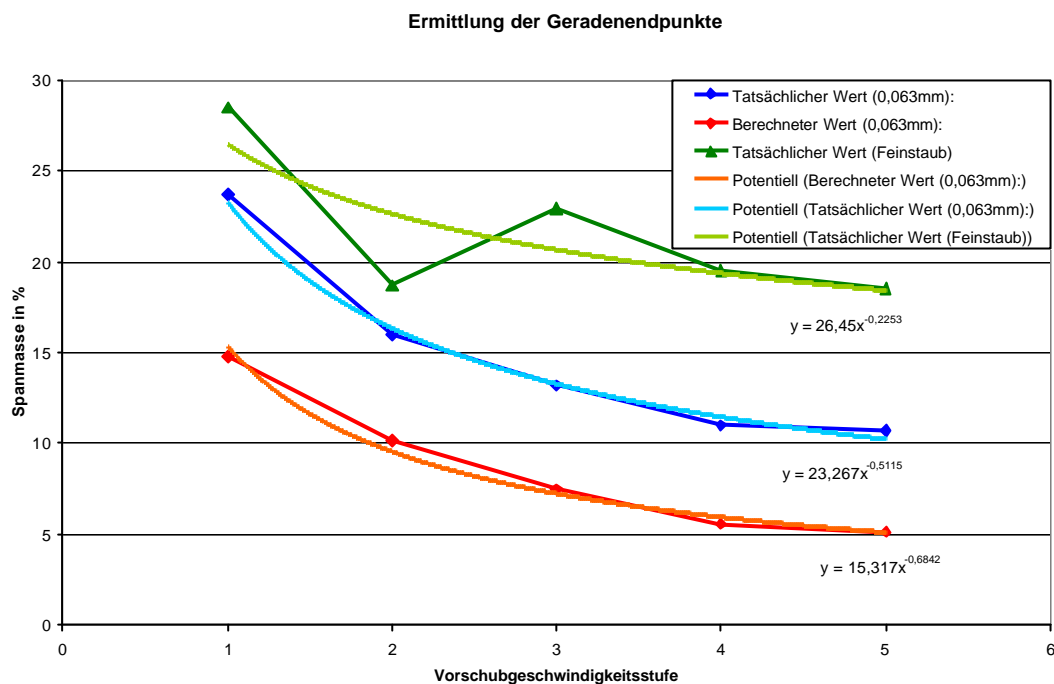


Bild 3.36: Diagramm der Geradenendpunkte

Bei der Spangrößenklasse von 0,063mm lässt sich sowohl der, durch die Gauß'sche Normalverteilung errechnete Wert, als auch der tatsächlich gemessene Wert durch eine Exponentialfunktion darstellen. Der Vorteil bei der Verwendung der genaueren, gemessenen Werte liegt in einer besseren Approximation der Messwerte durch das erzeugte Geradenstück. Jedoch ergeben sich in der Gesamtkurve meist deutliche Sprünge. Bei der Verwendung des berechneten Wertes für die Spangrößenklasse von 0,063mm schließt sich die Gerade beinahe nahtlos an die Gauß'sche Normalverteilung an. Beide Vorgehensweisen bergen also sowohl Vor- als auch Nachteile in sich.

Damit ergeben sich folgende Näherungen für die Geradenendpunkte in Abhängigkeit von der mittleren Spannungsdicke h_m :

Geradenendpunkt (gemessen) für Feinstaub:

$$y = 26,45 \cdot (10,0705h_m - 1,002)^{-0,2253} \quad (3.26)$$

Geradenendpunkt (gemessen) für die Spangrößenklasse 0,063mm:

$$y = 23,267 \cdot (10,0705h_m - 1,002)^{-0,5115} \quad (3.27)$$

Geradenendpunkt (berechnet) für die Spangrößenklasse 0,063mm:

$$y = 15,317 \cdot (10,0705h_m - 1,002)^{-0,6842} \quad (3.28)$$

3.8.2.5 Fehlerabschätzung

Wie im vorangegangenen Bild 3.33 zu sehen ist, kann durch die Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung zwar eine Verbesserung der Übereinstimmung von berechnetem und gemessenem Kurvenverlauf erzielt werden, es sind aber trotz allen Bemühungen noch deutliche Abweichungen festzustellen. Dies zeigt auch ein Vergleich des gesamten Versuchsumfangs in dreidimensionaler Darstellung (siehe Bild 3.37). Das obere Diagramm zeigt die gemessene originale Verteilung, das untere Diagramm die berechnete korrigierte Gauß-Verteilung.

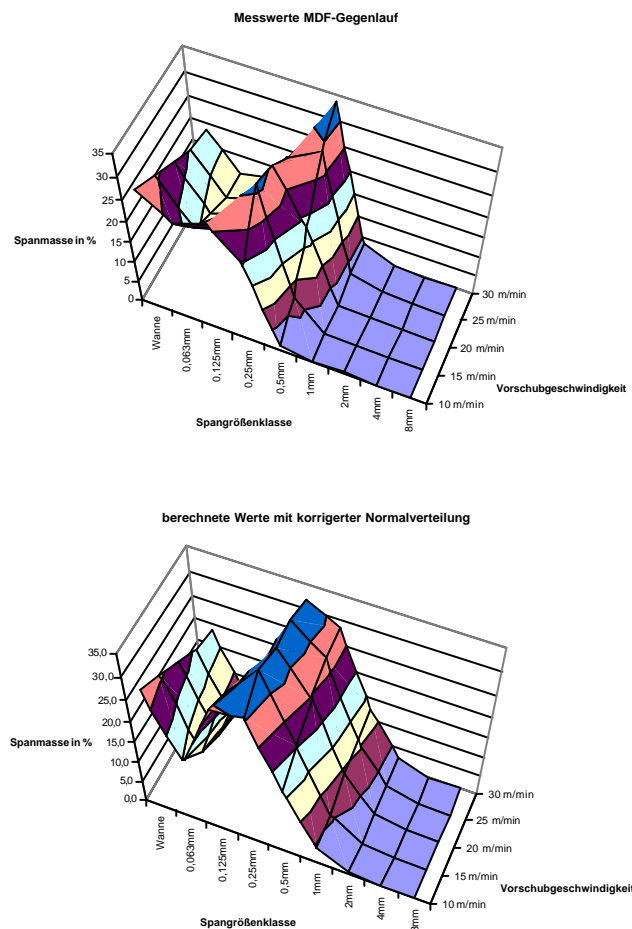


Bild 3.37: Komplette Spangrößenverteilungen bei MDF-Gegenlaufbearbeitung

Noch deutlicher werden die Fehler, die mit einer berechneten Spangrößenverteilung nach der korrigierten Gauß'schen Normalverteilung gemacht werden, wenn man den prozentualen Fehler im dreidimensionalen Diagramm aufträgt (Bild 3.38). Es ist erkennbar, dass besonders im Bereich um die Spangrößenklasse 0,063 mm die Fehler besonders groß sind, die durch die Rechnung gemacht werden. In vielen Vorschubbereichen (mittleren Spannungsdicken) sind die Fehler nahe oder über der 100%-Marke. Ein weiterer Bereich in dem große Abweichungen des berechneten Wertes zum tatsächlich gemessenen Wert der Spangrößenverteilung auftreten liegt zwischen 0,5 mm und 8 mm Spanggröße. Dieser Bereich ist jedoch, speziell bei der MDF-Bearbeitung kaum relevant, da sehr wenig Späne dieser Größenordnung entstehen und somit schon kleine Abweichungen der berechneten Werte zu großen prozentualen Fehlern führen.

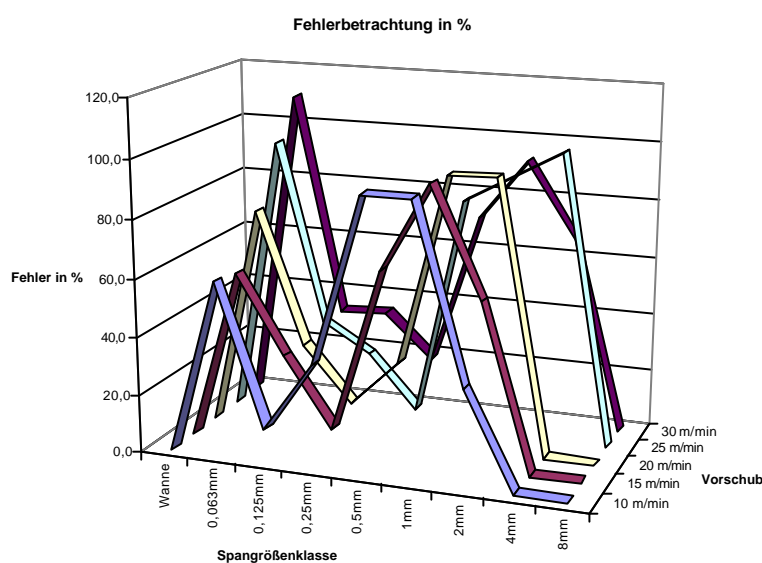


Bild 3.38: Fehlerbetrachtung bei korrigierter Gauß-Verteilung bei Gegenlaufbearbeitung von MDF

Addiert man alle prozentualen Fehler der einzelnen Messpunkte auf und teilt sie durch die Anzahl der betrachteten Messpunkte, bildet also einen relativen Fehler, so liegt der ermittelte Wert bei 48 %. Durchschnittlich liegen also alle berechneten Werte um beinahe 48 % falsch. Auch bei der Gleichlaufbearbeitung ergeben sich keine signifikanten Unterschiede der auftretenden Fehler.

3.8.3 Gleichungsermittlung über die mittlere Spannungsdicke

Da sich die Korrektur der Gauß'schen Normalverteilung für die Bearbeitung von MDF sowohl im Gleich- als auch im Gegenlauf nicht befriedigend erweisen, soll im folgenden ein weiterer Ansatz die Spangrößenverteilung zu berechnen, dargestellt werden. Hierbei wird nicht die

Spangrößenverteilung einer mittleren Spannungsdicke (Vorschubgeschwindigkeit) versucht in eine Funktion umzusetzen, sondern, es werden die Kurven der Spangrößenverteilung über eine Spangrößenklasse in Abhängigkeit von den mittleren Spannungsdicken h_m in Funktionen umgesetzt. Bei dieser Vorgehensweise können keine Gauß'sche Normalverteilungen angewandt werden. Auch werden sehr unterschiedliche Funktionstypen für die verschiedenen Kurvenverläufe benötigt, die einzelnen Funktionen geben jedoch die Spangrößenverteilung sehr genau wieder (siehe Bild 3.39).

Die Spangrößenklassen von Feinstaub bis zu 0,125 mm Spangröße werden durch Potentialfunktionen approximiert. Es folgt die am schwierigsten darzustellende Spangrößenklasse von 0,25 mm Korndurchmesser. Sie wird durch eine Funktion vierter Ordnung angenähert. Die Spangrößenklassen von 0,5mm Korndurchmesser und größer werden schließlich durch Geraden approximiert.

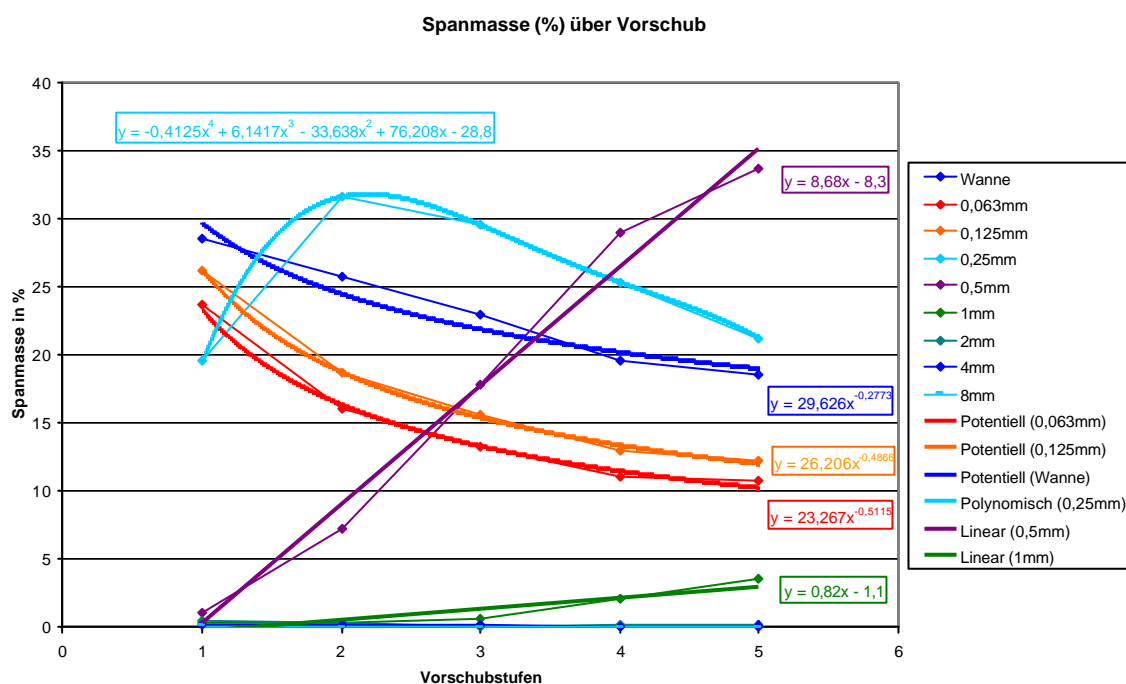


Bild 3.39: Funktionen der Spanmasse über der Spangrößenklasse

Es ergeben sich für die untersuchten Spangrößenklassen folgende Formeln die für die Bearbeitung von MDF im Gegenlauf gültig sind. Um von den Vorschubgeschwindigkeitsstufen x auf die mittlere Spannungsdicke h_m umzurechnen, muss wie immer Gleichung (3.12) in die folgenden Formeln eingesetzt werden.

Gleichung für den Feinstaub:

$$y = 29,626 \cdot x^{-0,2773} \quad (3.29)$$

$$y = 29,626 \cdot (10,0705h_m - 1,002)^{-0,2773} \quad (3.30)$$

Gleichung für Korngröße 0,063 mm:

$$y = 23,267 \cdot x^{-0,5115} \quad (3.31)$$

$$y = 23,267 \cdot (10,0705h_m - 1,002)^{-0,5115} \quad (3.32)$$

Gleichung für Korngröße 0,125 mm:

$$y = 26,206 \cdot x^{-0,4866} \quad (3.33)$$

$$y = 26,206 \cdot (10,0705h_m - 1,002)^{-0,4866} \quad (3.34)$$

Gleichung für Korngröße 0,25 mm:

$$y = -0,4125x^4 + 6,1417x^3 - 33,638x^2 + 76,208x - 28,8 \quad (3.35)$$

$$y = -4242,5609h_m^4 + 7961,0291h_m^3 - 5535,7229h_m^2 + 1649,3204h_m - 139,5275 \quad (3.36)$$

Gleichung für Korngröße 0,5 mm:

$$y = 8,68x - 8,3 \quad (3.37)$$

$$y = 87,4119h_m - 16,9974 \quad (3.38)$$

Gleichung für Korngröße 1 mm:

$$y = 0,82x - 1,1 \quad (3.39)$$

$$y = 8,2578h_m - 1,9216 \quad (3.40)$$

Im folgenden Bild 3.40 lässt sich deutlich erkennen, dass die Übereinstimmung zwischen der berechneten Spangrößenverteilung und der gemessenen Spangrößenverteilung deutlich verbessert wurde. Vor allem der Übergangsbereich, in dem die Spanmasse nochmals zu sehr kleinen Korngrößen hin ansteigt, wird deutlich genauer wiedergegeben. Dies rührt aus der Tatsache, dass die Funktionen über eine Spangrößenklasse hier die tatsächlichen Verhältnisse wesentlich genauer beschreiben. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass für dieses Verfahren mehr und unterschiedliche Gleichungstypen benötigt werden.

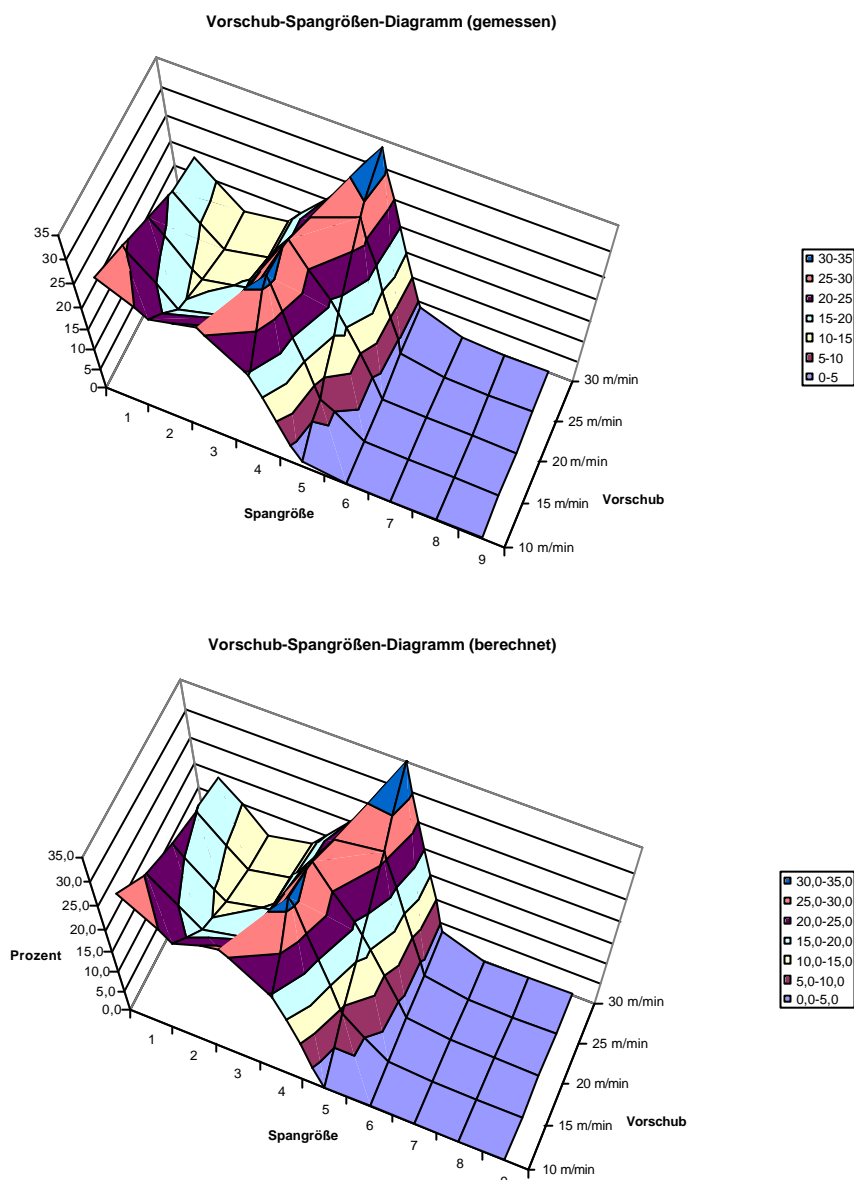


Bild 3.40: Berechnete und gemessene Spangrößenverteilung

Betrachtet man wieder den Fehler, der mit der Approximation der gemessenen Spangrößenverteilungen durch die eingesetzten Formeln begangen wird (Bild 3.41), so ergibt sich hierbei ein weit genaueres Ergebnis als bei der Berechnung der Spangrößenverteilung durch eine korrigierte Gauß'sche Näherungsverteilung. Besonders auffällig im Diagramm sind die beiden sehr hohen Fehlerwerte. Bei diesen Werten ist jedoch zu beachten, dass sie in Bereichen der Spangrößenverteilungen liegen, die nur sehr kleine Anteile an der gesamten Spanmasse repräsentieren. Durch eine kleine Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten kann hier ein sehr großer prozentualer Fehler entstehen.

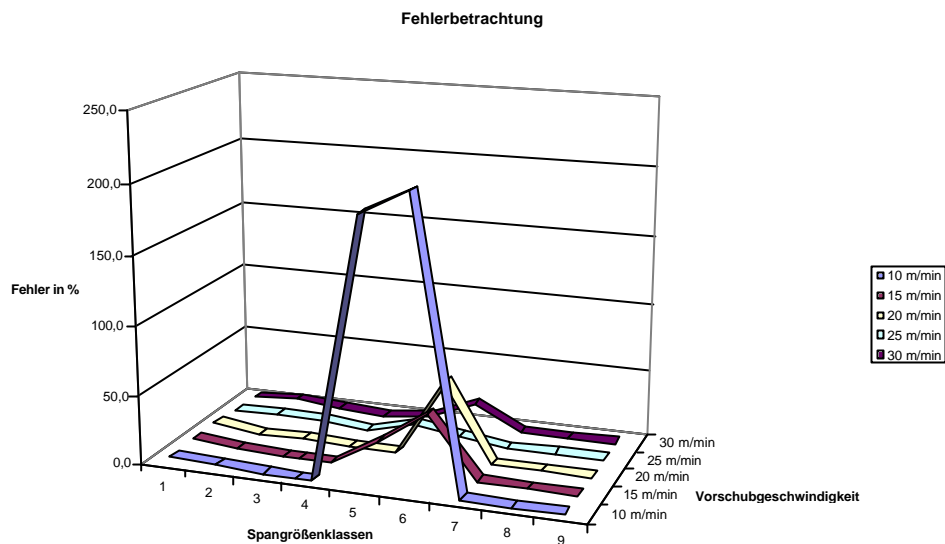


Bild 3.41: Fehlerbetrachtung

Addiert man wiederum alle prozentualen Fehler auf und dividiert sie durch die Anzahl der betrachteten Messpunkte, so ergibt sich ein relativer Fehler von 19,7 %. Dies ist weniger als die Hälfte des relativen Fehlers der korrigierten Gauß-Kurven. Betrachtet man schließlich nur den wichtigen, da mit hohen Spanmassenanteilen belegten Bereich des Diagramms, d. h. die kleinsten vier Spangrößen, so ergibt sich ein relativer Fehler von nur 2 %.

4 Späneauswurf bei unterschiedlich gestalteten Spanräumen

4.1 Grundüberlegung

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen beschrieben, wie stark das Werkzeug bzw. der Spanraum des Werkzeuges den Auswurf der erzeugten Späne beeinflusst. Dazu wurden zwei verschiedene Werkzeuge mit unterschiedlichen Spanraumgeometrien untersucht (Bild 4.1).

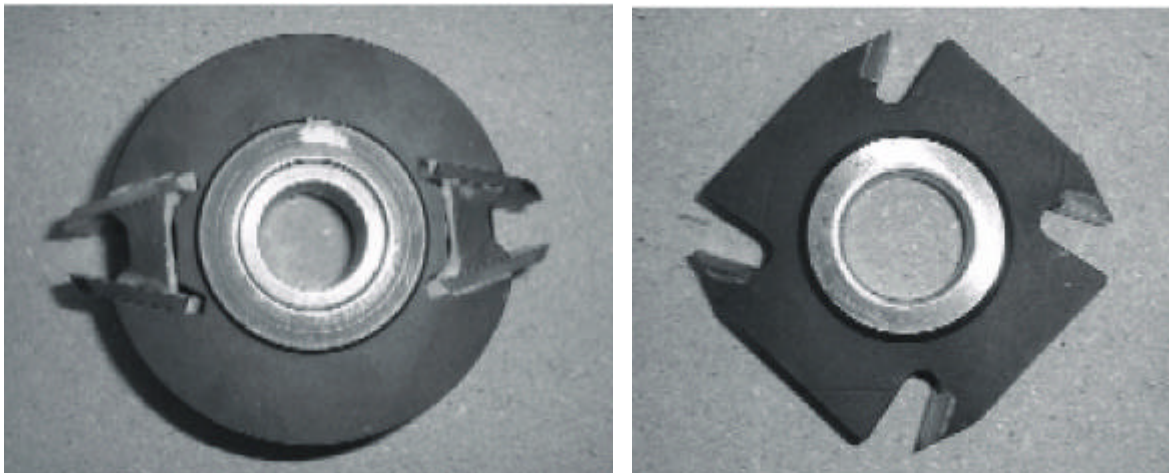


Bild 4.1: Untersuchte Werkzeuge

Beide Werkzeuge haben eine gerade, parallel zur Werkzeugachse verlaufende Schneide. Das Werkzeug 1 (Bild 4.1 links) hat eingesetzte Schneiden aus HSS, das Werkzeug 2 (Bild 4.1 rechts) eingelötete Schneiden aus Hartmetall.

Die Spanräume beider Werkzeuge sind sehr unterschiedlich gestaltet. Werkzeug 1 hat einen klammerförmigen Spanraum, der sich nach außen verengt, Werkzeug 2 hat einen nach außen weiter werdenden Spanraum (Bild 4.2).



Bild 4.2: Schematische Darstellung der Spanräume der verwendeten Werkzeuge

4.2 Versuchsanordnung

Die Versuche wurden auf einer Bänderle-Tischfräsmaschine durchgeführt. Die Aufnahmen des Zerspanprozesses erfolgten mit einer von einem Frequenzgenerator angesteuerten Speedcam lite+ Hochgeschwindigkeitskamera der Fa. Weinberger (Bild 4.3).

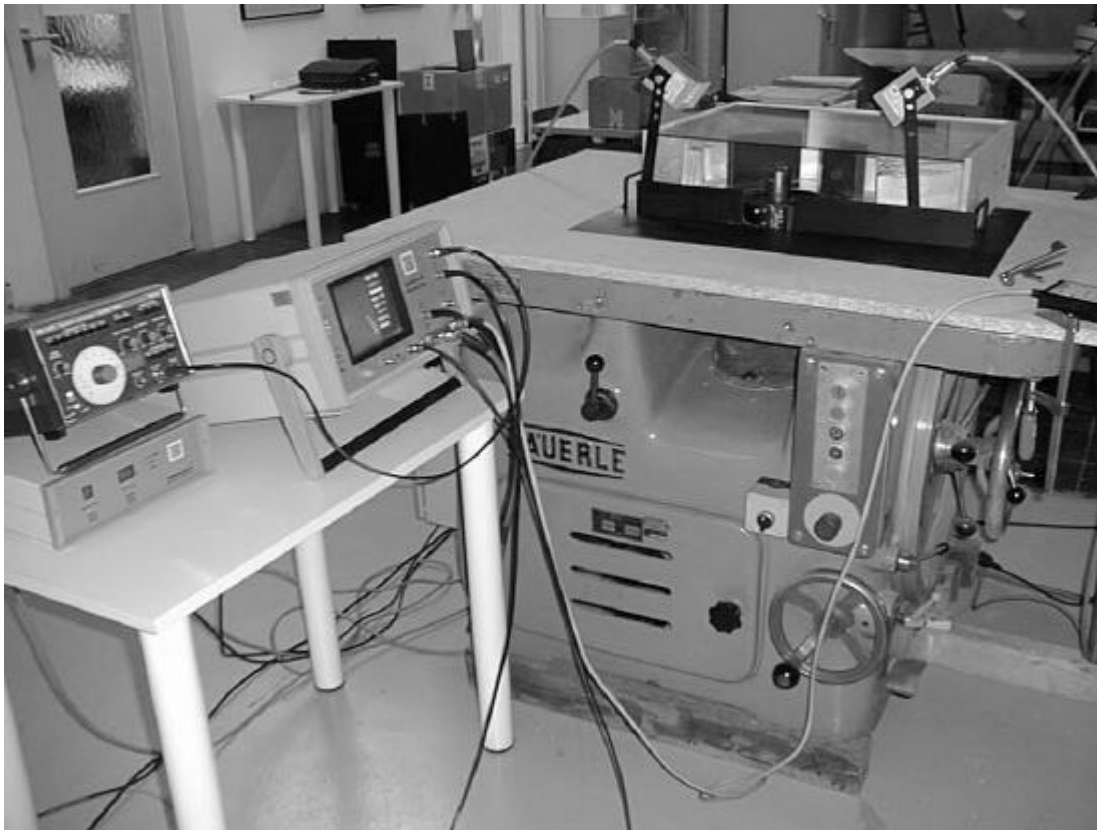


Bild 4.3: Gesamtansicht des Versuchsaufbaus

4.2.1 Horizontale Erfassungseinrichtung

Auf dem Maschinentisch befindet sich eine Auffangvorrichtung zur Erfassung der Späne, die aus dem Spanraum des Werkzeugs horizontal ausgeworfen werden. Die Erfassungseinrichtung besteht

aus Fächern, die mit dünnen, tangential am Werkzeugumfang fluchtenden Blechstreifen in der Höhe des Werkzeugs begrenzt sind. Am Ende der jeweiligen Fächer befinden sich Papiertüten zur Aufnahme der Späne (Bild 4.3). In den horizontalen Aufnahme­fächern sollen alle Späne, die das Werkzeug an seiner Umfangshüllfläche verlassen, aufgefangen werden. Die Fachteilung beträgt 15 Grad.

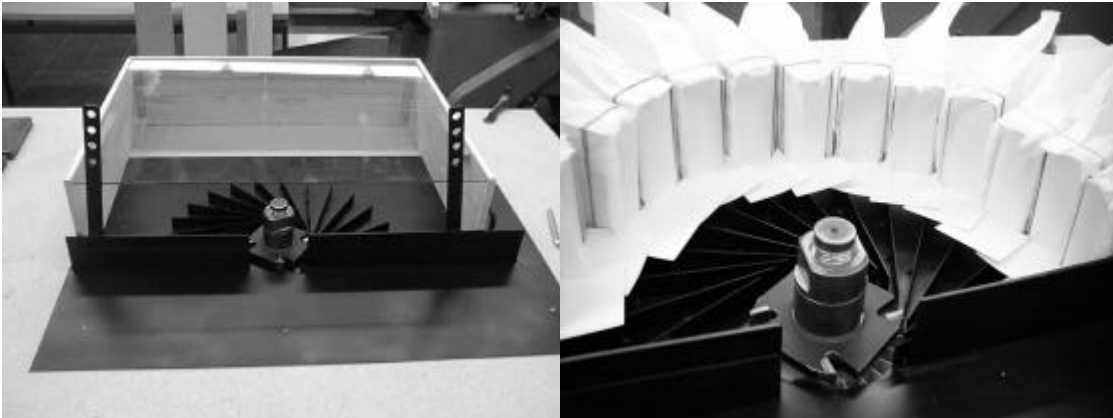


Bild 4.3: Horizontale Aufnahmeelemente

4.2.2 Vertikale Erfassungseinrichtung

Alle Späne, die das Werkzeug an seiner Stirnhüllfläche an der Werkzeugunterseite verlassen, werden in der vertikalen Erfassungseinrichtung, bestehend aus einer topfförmigen Konstruktion, die ebenfalls in Fächer mit 15 Grad-Winkel unterteilt ist, aufgefangen (Bild 4.4). Die Erfassungseinrichtung ist unter dem Werkzeug um die Spindel herum angebracht und mit dem Maschinentisch verschraubt.



Bild 4.4: Vertikale Erfassungseinrichtung

4.2.3 Installierte Fächer in horizontaler und vertikaler Richtung

Die horizontalen und vertikalen Fächer wurden so montiert, dass die Fachbegrenzungen genau übereinander liegen. Dadurch werden die aufgefangenen Spanmengen in horizontaler und vertikaler Richtung direkt vergleichbar (Bild 4.5).



Bild 4.5: In Versuchsmaschine integrierte Späneerfassungselemente

4.3 Partikelgrößenverteilung der ausgeworfenen Späne

Betrachtet man die Partikelgrößenverteilung der einzelnen Fächer, so ergibt sich keine nennenswerte Änderung der Partikelgrößenverteilung bei unterschiedlichen Auswurfswinkeln (Bild 4.6)

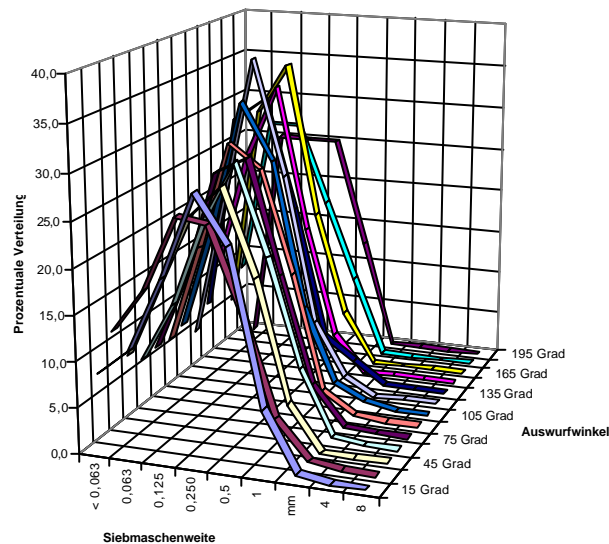


Bild 4.6: Partikelgrößenverteilung (Werkzeug 1, Spanplatte)

Die einzige Ausnahme bilden hier die Massivhölzer. Hier enthalten die drei ersten Fächer (15 – 45 Grad Auswurfwinkel) weniger große Späne (0,5 bis 2 mm). Dies zeigte sich bei beiden Werkzeugen, wobei es bei Buchespänen deutlich ausgeprägter als bei Fichtespänen verlief (Bild 4.7).

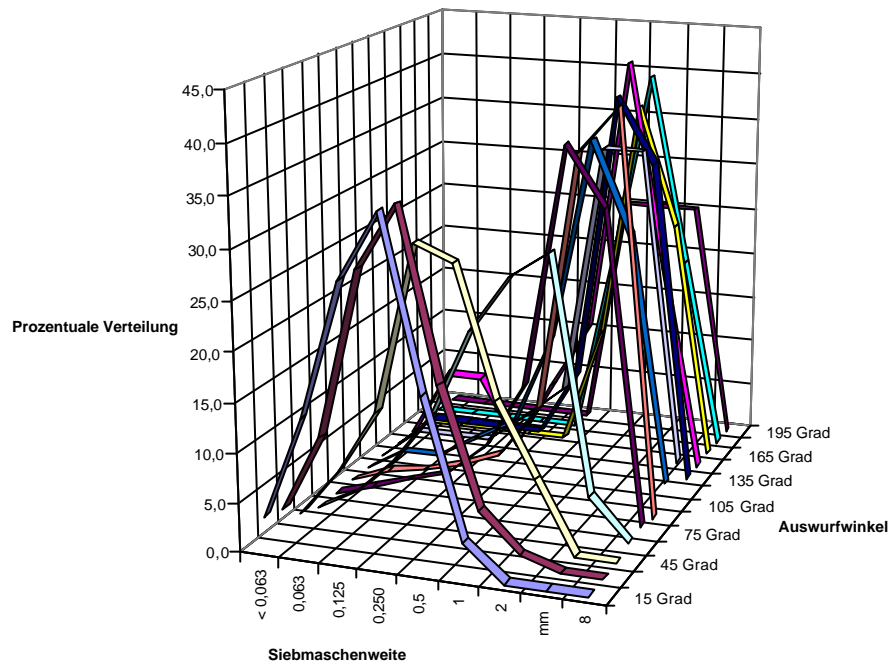


Bild 4.7: Partikelgrößenverteilung (Werkzeug 1, Buche)

Ein Vergleich der beiden Werkzeuge macht deutlich, dass sich die Partikelgrößenverteilung nicht wesentlich ändert (Bild 4.8). Deutlich ist jedoch zu erkennen, dass das Werkzeug mit der breiteren Schneide (Werkzeug 1 mit Schneidenbreite 20mm) im Vergleich zum Werkzeug mit kürzerer Schneide (Werkzeug 2 mit Schneidenbreite 12 mm) auch größere Späne erzeugt. So verschiebt sich die Spangrößenverteilung zwischen den blauen und roten Kurven in Bild 4.8 um durchschnittlich eine Spangrößenklasse.

Zu beachten ist hierbei, dass auch die Schneidenschärfe (Werkzeug 1 war stumpf und Werkzeug 2 arbeitsscharf) sowie die unterschiedlichen Schneidwerkstoffe und Winkel (Werkzeug 1 HSS, Werkzeug 2 HM) einen Einfluß auf die Partikelgrößenverteilung ausüben können. Vertiefende Untersuchungen zur Schneidenbreite müssen hier weitere Klarheit bringen.

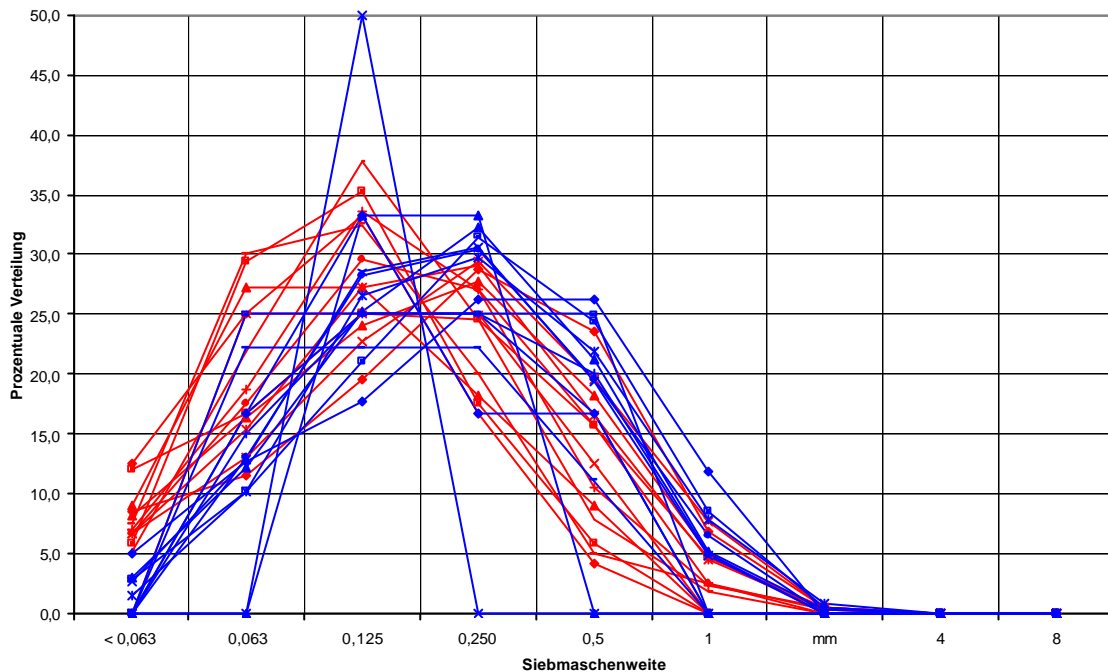


Bild 4.8: Partikelgrößenverteilung Spanplatte (blau: Werkzeug 1, rot: Werkzeug 2)

4.4 Auswurfzeitpunkt und Auswurfmasse

Werden die absolut ausgeworfenen Spanmassen pro Fach (aufgegliedert in Spangrößen) in einem Diagramm aufgetragen, so erhält man ein realistisches Bild über der Hauptspäneauswurf des Werkzeugs (Bild 4.9). Aus beiden Diagrammen für den Werkstoff Buche ist deutlich zu erkennen, dass die Hauptauswurfrichtung des Werkzeug 1 bei 75° (rote Kurve) liegt, während die Hauptauswurfrichtung des Werkzeugs 2 sich zwischen 45° - 60° (gelbe und grüne Kurve) befindet.

Ebenso verhält es sich beim Werkstoff Fichte. Hier liegt die Hauptauswurfrichtung von Werkzeug 1 zwischen 15° und 75° , während die Hauptauswurfrichtung bei Werkzeug 2 zwischen 15° und 60° liegt.

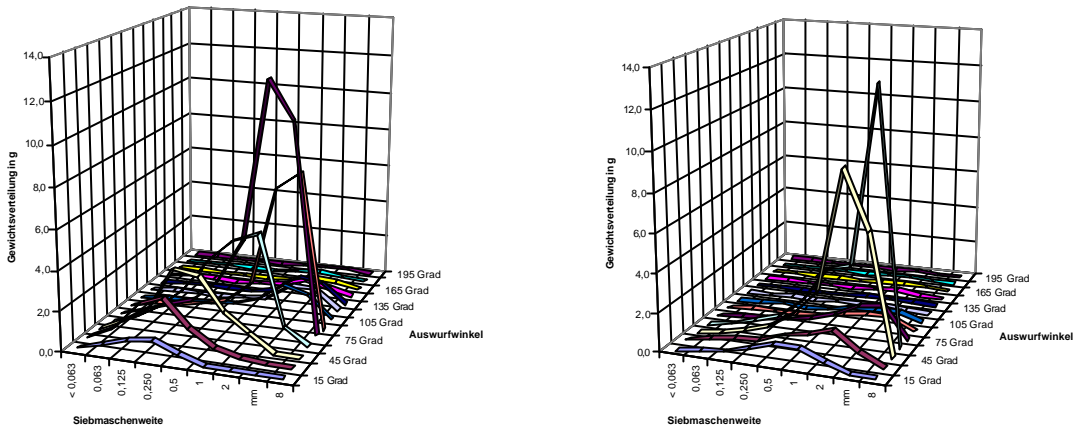


Bild 4.9: Spanmassenverteilung Buche

In Bild 4.10 sind die aufaddierten Spanmassen pro Siebmaschenweite für beide Werkzeuge nochmals aufgetragen. Die blaue Kurve entspricht dabei Werkzeug 1 und die rote Kurve Werkzeug 2. Bemerkenswert ist hierbei, dass bei Werkzeug 1 die Massivhölzer früher als die Holzwerkstoffe, bei Werkzeug 2 dagegen die Holzwerkstoffe früher als die Massivhölzer ausgeworfen werden. Das bedeutet, die Verhältnisse der Verweildauer der Späne im Spanraum zwischen Massivholz und Holzwerkstoffen kehren sich gerade um.

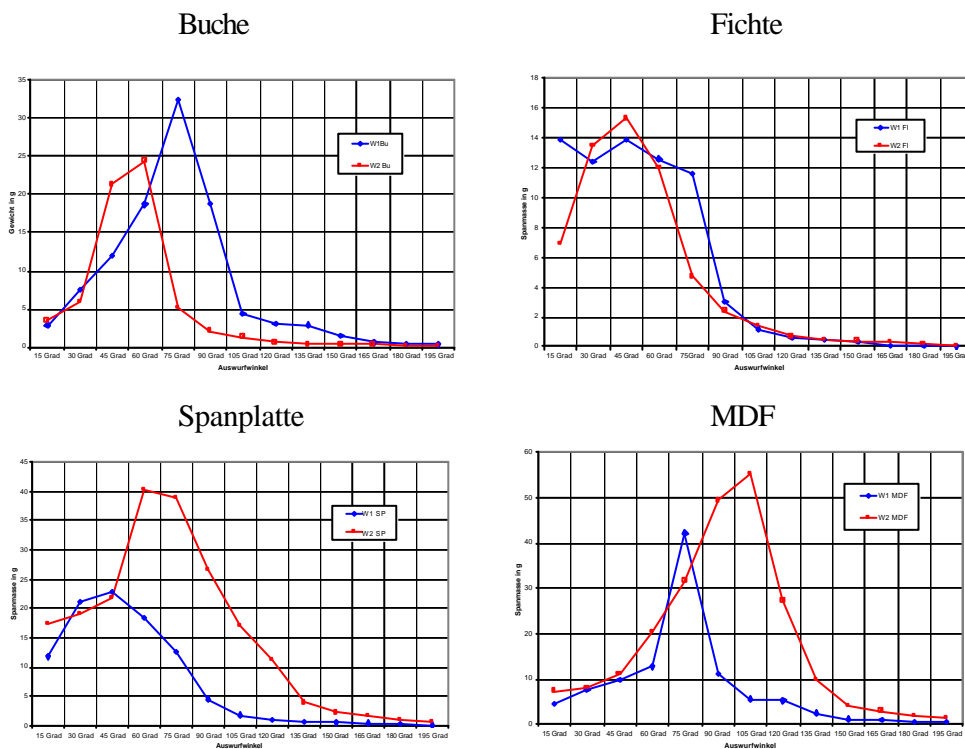


Bild 4.10: Auswurfzeitpunkt der Späne aus dem Werkzeug

Aus den folgenden zwei Diagrammen (Bild 4.11) ist erkennbar, dass der vertikale Auswurf aus dem Werkzeug später geschieht als der horizontale Auswurf. Jedoch ist die Spanmenge, die im Erfassungselement unter dem Werkzeug aufgefangen wurde, deutlich geringer als die horizontal ausgeworfene Spanmenge. Die Spanmengen im Erfassungselement bewegen sich im Bereich um 0,1 Gramm, haben also eine eher untergeordnete Rolle.

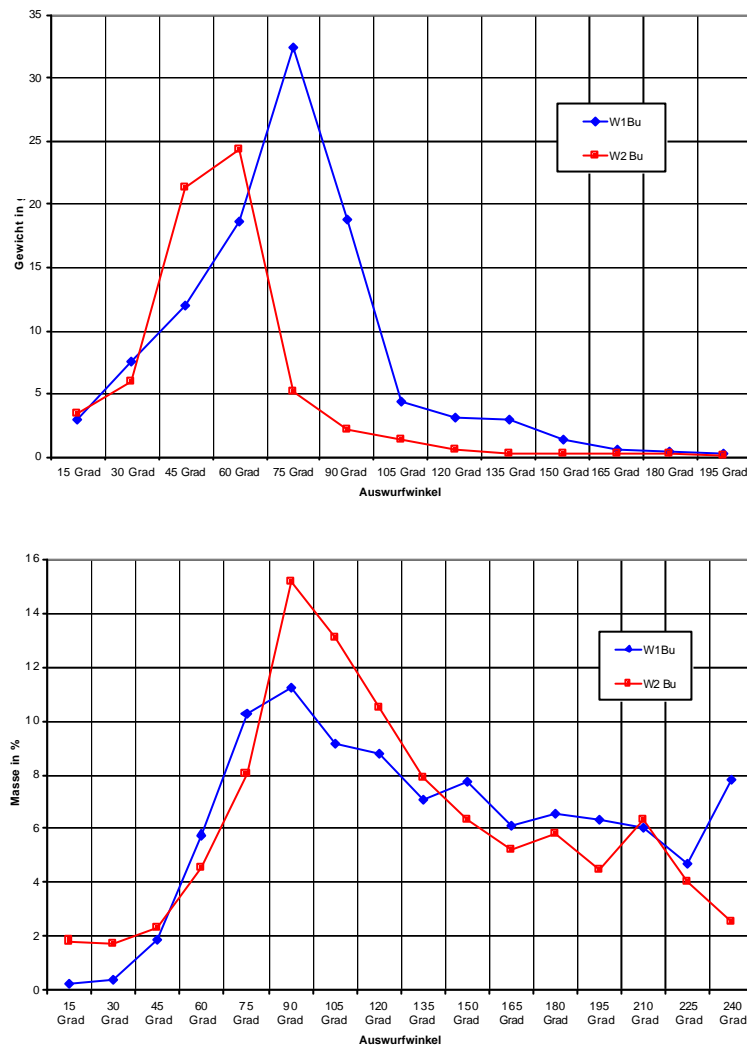


Bild 4.11: Horizontaler und vertikaler Spanauswurf

4.5 Erfassungsgrade

Bei den durchgeführten Versuchen wurde jeweils der Erfassungsgrad der Zerspanungsoperation gemessen. Dazu wurde das Probewerkstück vor und nach der Bearbeitung gewogen. Die dabei ermittelte Massendifferenz entspricht der gesamt zerspannten Masse. Der Erfassungsgrad setzt

sich nun aus der Summe der aufgefangenen Späne in den horizontalen und den vertikalen Fächern zusammen. Die Differenz zur gesamten zerspannten Masse ergibt die Verlustmasse. Da nur ein vertikaler Aufnehmer unter dem Werkzeug angebracht wurde, wurde für die Ermittlung des Gesamterfassungsgrades die Spanmasse des Erfassungselements verdoppelt, da bei allen Versuchen symmetrische Werkzeuge zum Einsatz kamen, die bei Vernachlässigung der Schwerkraft die gleiche Masse an Spänen nach oben und unten emittieren müssten.

Im Bild 4.12 ist weiter zu erkennen, dass der Erfassungsgrad der Späne bei kleiner werdenden Spangrößen (vornehmlich MDF) abnimmt. Je größer die Späne waren, desto mehr von ihrer Gesamtmasse konnte in der Versuchseinrichtung aufgefangen werden.

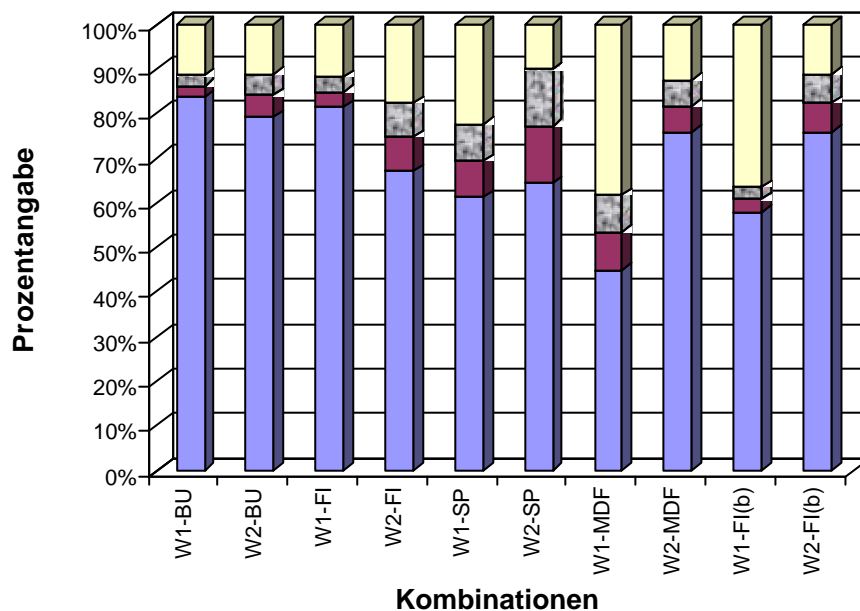


Bild 4.12: Erfassungsgrad der Versuchseinrichtung

4.6 Stichversuche zur Spananfangsgeschwindigkeit an der Schneide

Es wurde bei beiden Werkzeugen ein rotierendes kartesisches Koordinatensystem in die Ebene der Spanfläche gelegt. Die y-Achse verläuft dabei entlang der Spanfläche, die x-Achse entsprechend im rechten Winkel von der Schneidenspitze in Schnittrichtung gerichtet. Die Koordinaten sind auf dem folgenden Bild 4.13 für die beiden Werkzeuge ersichtlich.

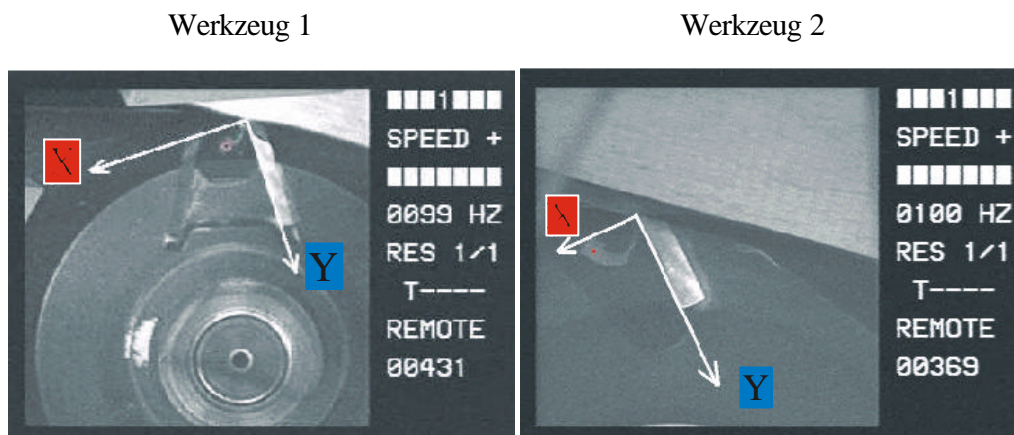


Bild 4.13: Koordinaten in den beiden Werkzeugen

Als eine erste Abschätzung wurde aus den Aufnahmen im jeweiligen Mittelpunkt des Spans oder der Spanwolke bei Holzwerkstoffen die Geschwindigkeit der Partikel zu diesem Koordinatensystem ermittelt. Sie sind im folgenden Bild 4.14 dargestellt.

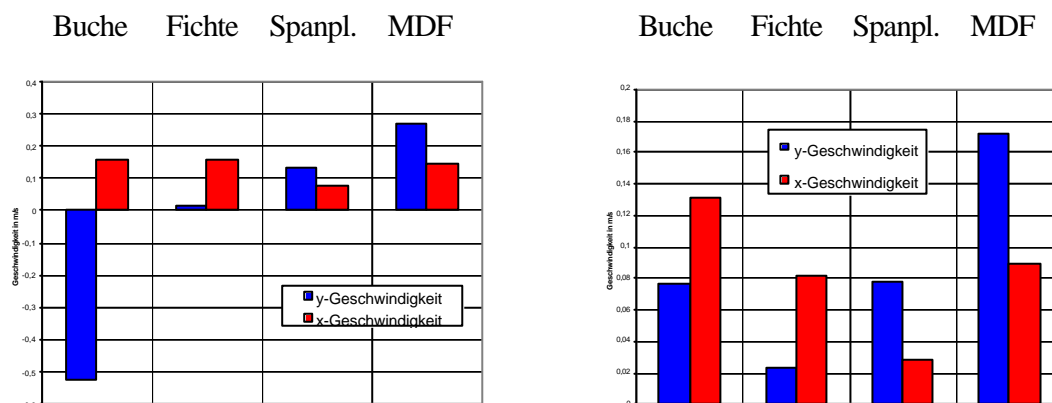


Bild 4.14: Anfangsgeschwindigkeiten der Späne (Links: Werkzeug 1; rechts: Werkzeug 2)

Bei der Spangeschwindigkeit in y -Richtung fällt besonders auf, dass die Holzwerkstoffe im Gegensatz zu den Massivhölzern mit deutlich höherer Geschwindigkeit in den Spanraum hinein fliegen. Die Geschwindigkeit der Späne in x -Richtung ergibt keine eindeutige Tendenz.

Aus den Geschwindigkeiten ergeben sich schließlich die Winkel unter denen der Span bzw. die Spanwolke die Schneide verläßt. Diese sind im folgenden Bild 4.15 näher dargestellt. Dabei wird der Winkel im Koordinatensystem von der x - auf die y -Achse angegeben.

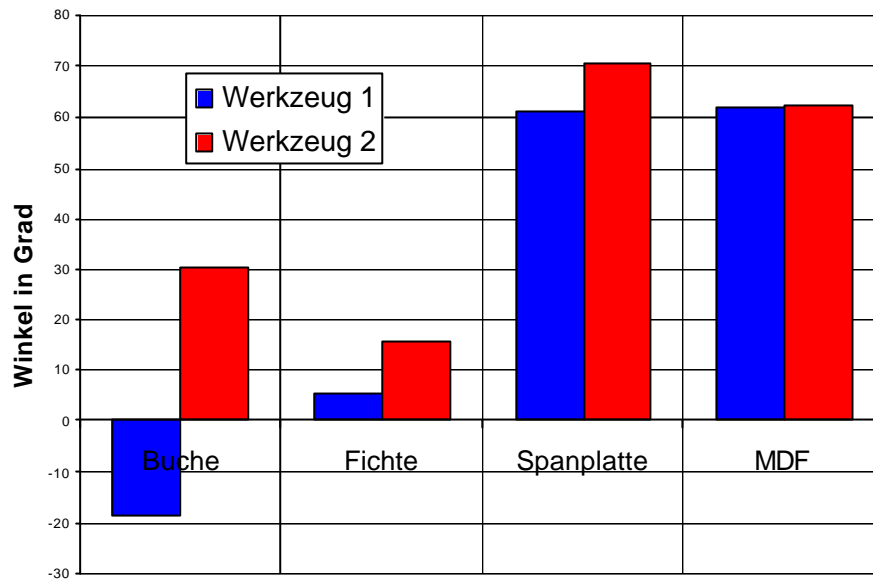


Bild 4.15: Winkel zur x-Achse für die verschiedenen Werkstoffe und Werkzeuge

4.7 Bewertung der Spangeschwindigkeit an der Schneide

Die Untersuchung der Abfluggeschwindigkeit und des Abflugwinkels des Spanes von der Schneide stellt so nur eine erste stichprobenartige Untersuchung dar. Für eine allgemeingültigere Aussage über die Spanbewegungen im Spanraum sind vertiefende Untersuchungen notwendig.

5 Lüfterwirkung des Werkzeugs

Ein Fräskopf mit 6 verschiedenen Schneidengeometrien wurde hinsichtlich seiner Lüfterwirkung auf einer Tischfräse untersucht. An der Tischfräse wurden dabei alle Anbauten wie Spanabsaughauben etc. entfernt. Dadurch ergab sich ein freies Strömungsfeld um das Werkzeug. Alle Versuche wurden mit einer Drehzahl von 3.000 min^{-1} durchgeführt.

Die Messung der Luftgeschwindigkeiten, die durch das rotierende Werkzeug verursacht werden, erfolgte mit einem Pitot-Rohr jeweils in tangentialer und radialer Richtung zum Werkzeug. Dabei wurde das Pitot-Rohr in unterschiedlichen Abständen zur Werkzeugschneide mit einem Magnethalter aufgestellt. Ermittelt wurden jeweils die Durchschnittswerte der Momentangeschwindigkeiten über 1 Minute Meßzeit. Es wurde entweder in der Profilmitte der Schneide oder am größten Flugkreisdurchmesser (Bild 5.1 am Beispiel der Schneidengeometrie 1) des Profils gemessen. In den Bildern 5.2 bis 5.7 sind jeweils die gemessenen tangentialen und radialen Strömungsgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Abständen zum Werkzeug sowie zur besseren Vergleichbarkeit die jeweiligen Strömungsfelder (maßstäblich in Richtung und Geschwindigkeit) für die untersuchten Schneidengeometrien dargestellt.

Bei den Versuchen wurden radiale Luftgeschwindigkeiten von 5,4 bis 20 m/s und tangentiale Luftgeschwindigkeiten von 5,5 bis 12,4 m/s gemessen.

Weiter wurden drei Kantenbearbeitungswerkzeuge (Vorfräser und Radienfräser mit Schneidplatten untersucht. Die Darstellung der ermittelten tangentialen und radialen Strömungsgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Abständen zum Werkzeug sowie der Strömungsfelder (maßstäblich in Richtung und Geschwindigkeit) für die untersuchten Kantenbearbeitungswerkzeuge erfolgt in der oben beschriebenen Vorgehensweise (Bilder 5.8 bis 5.10). Dabei konnte bisher kein einfacher Zusammenhang zwischen Spanraumgeometrie und erzeugter Luftgeschwindigkeit gefunden werden.

Meßaufbau Tischfräse 1

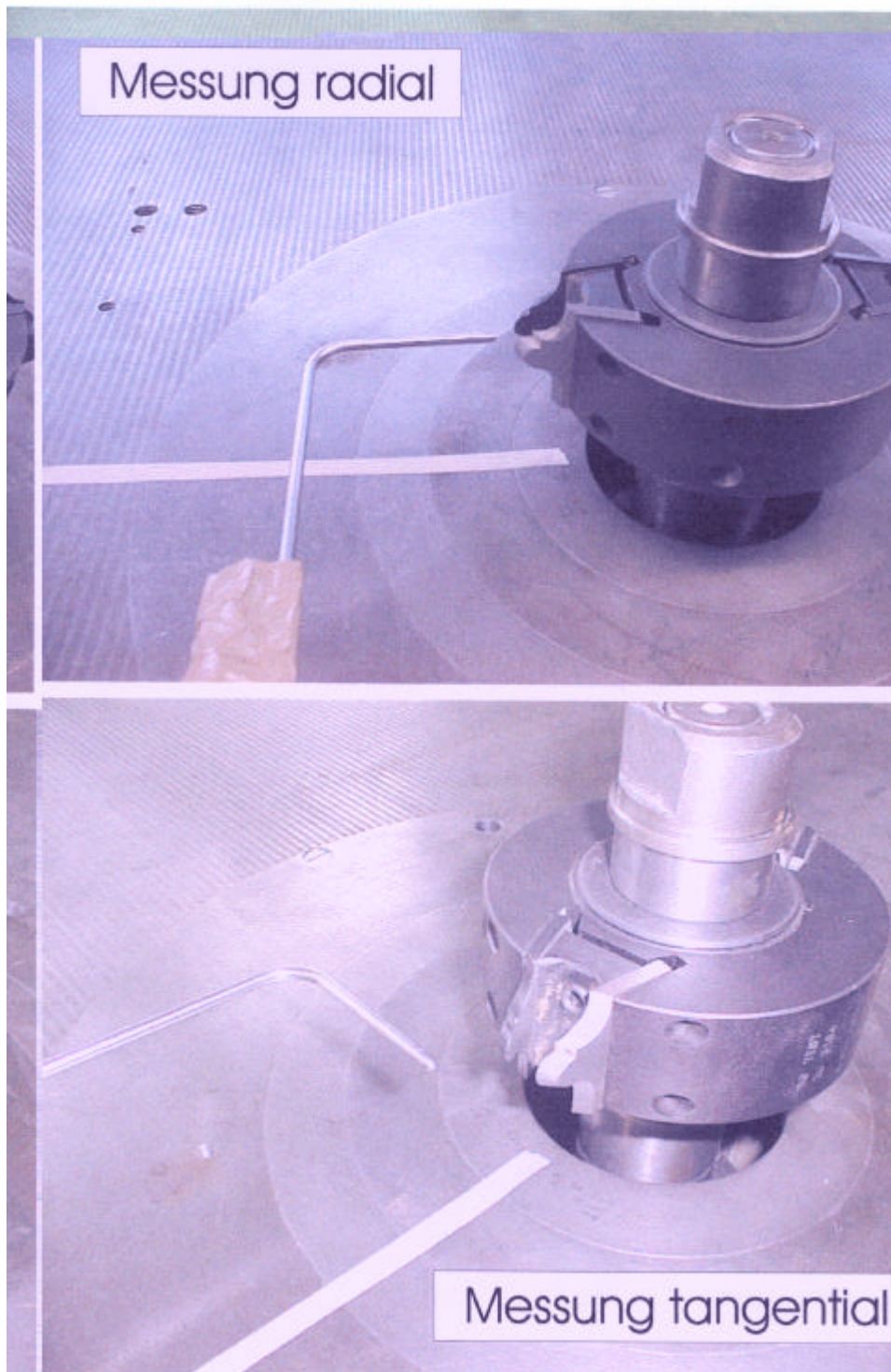
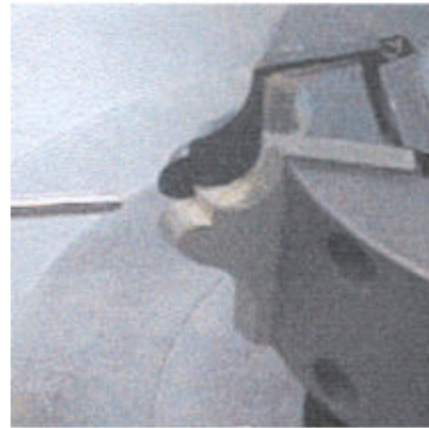
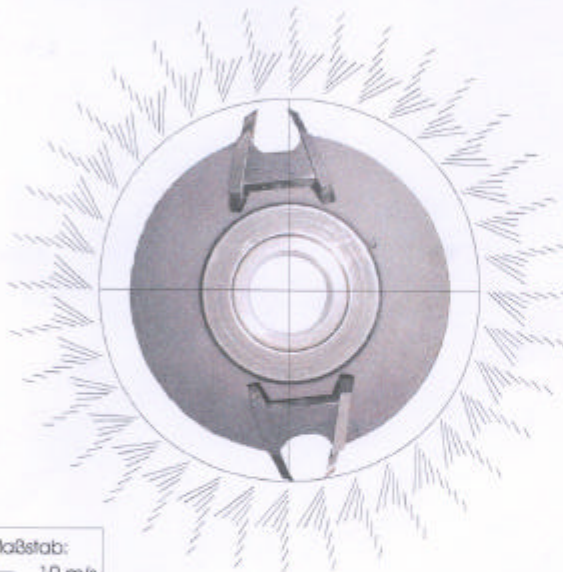


Bild 5.1: Anordnung des Pitot-Rohrs zur Messung der radialen und tangentialen Strömungsgeschwindigkeiten (am Beispiel der Schneidengeometrie 1)

Datenblatt
Werkzeugumströmung
Schneidengeometrie 1



Darstellung der Umströmung



Daten

Wirbelströmung um Tischfräse 1
Abstand vom Werkzeug tang. Richtung rad. Richtung

Abstand vom Werkzeug	tang. Richtung	rad. Richtung
3 mm	12,4	13,4
5 mm	9,5	11,6
7 mm	5,9	10,0
10 mm	4,2	8,4
15 mm	2,7	6,6
20 mm	2,4	5,4
25 mm	2,4	4,4
30 mm	2,1	3,7

Radiale und tangentielle Strömung um Tischfräse 1

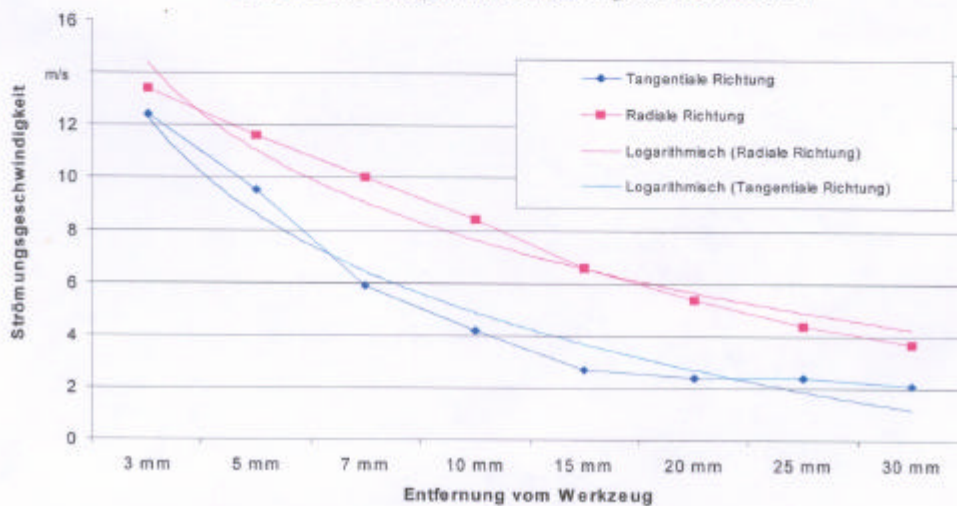


Diagramm der Umströmung

Bild 5.2: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Schneidengeometrie 1

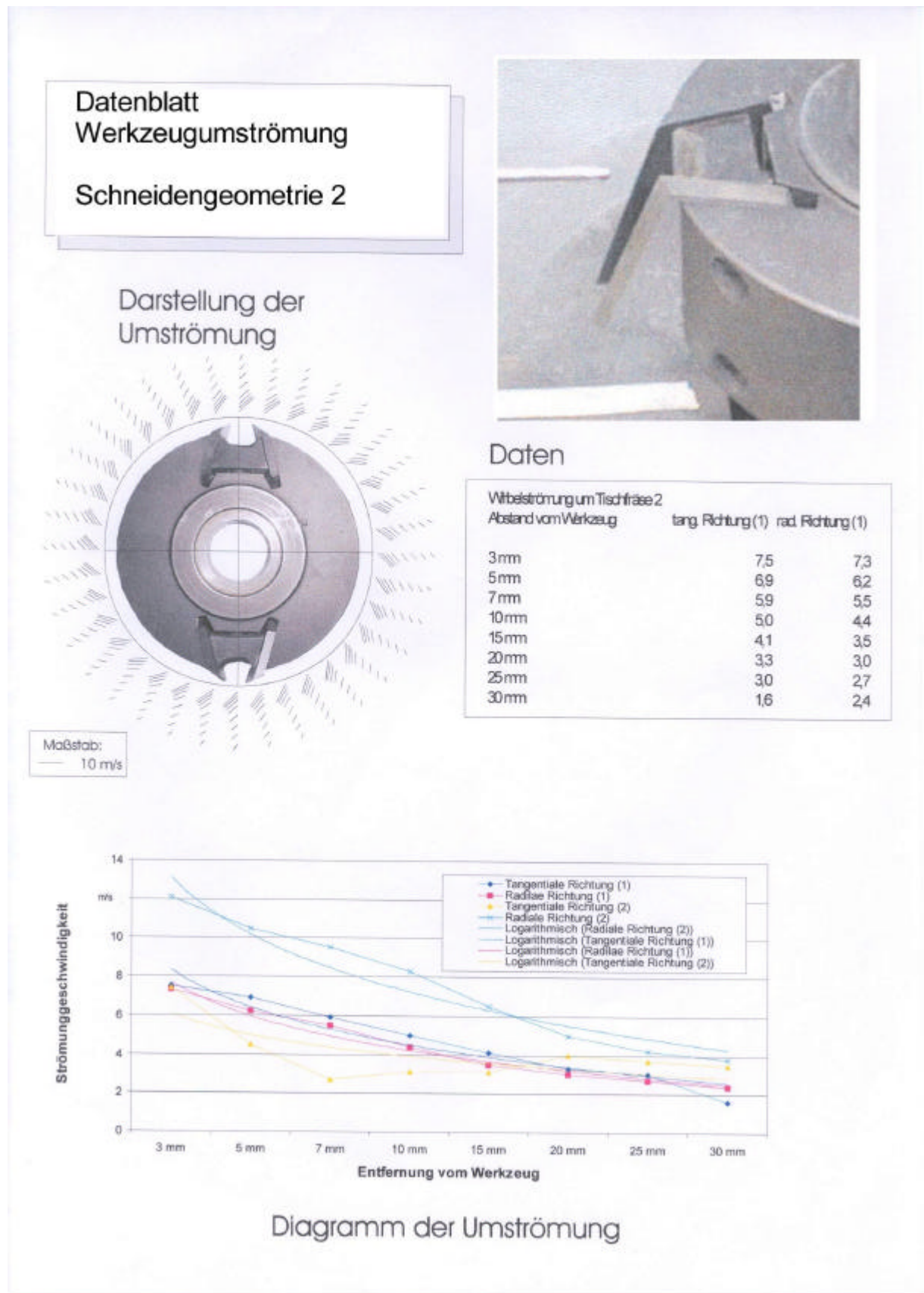


Bild 5.3: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Schneidengeometrie 2

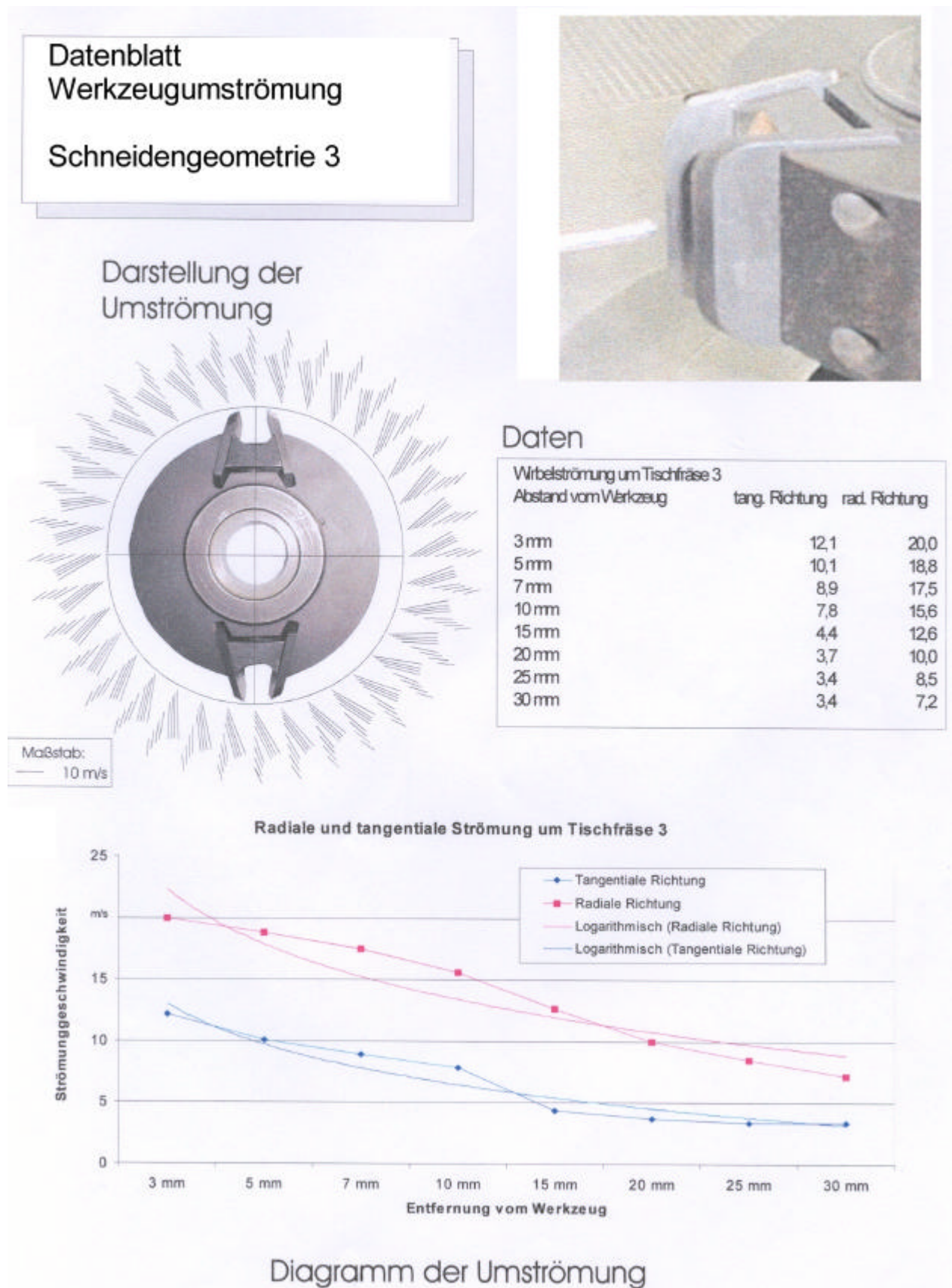
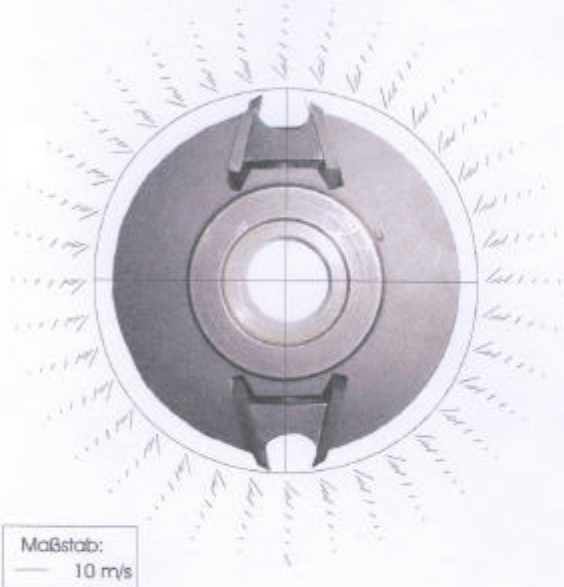


Bild 5.4: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Schneidengeometrie 3

Datenblatt
Werkzeugumströmung
Schneidengeometrie 4



Darstellung der Umströmung



Daten

Wirbelströmung um Tischfräse 4

Abstand vom Werkzeug	tang. Richtung	rad. Richtung
3 mm	5,5	5,4
5 mm	2,1	4,3
7 mm	1,3	3,4
10 mm	3,0	2,7
15 mm	3,0	1,8
20 mm	1,8	1,7
25 mm	1,4	0,3
30 mm	1,1	0,0

Radiale und tangentielle Strömung um Tischfräse 4

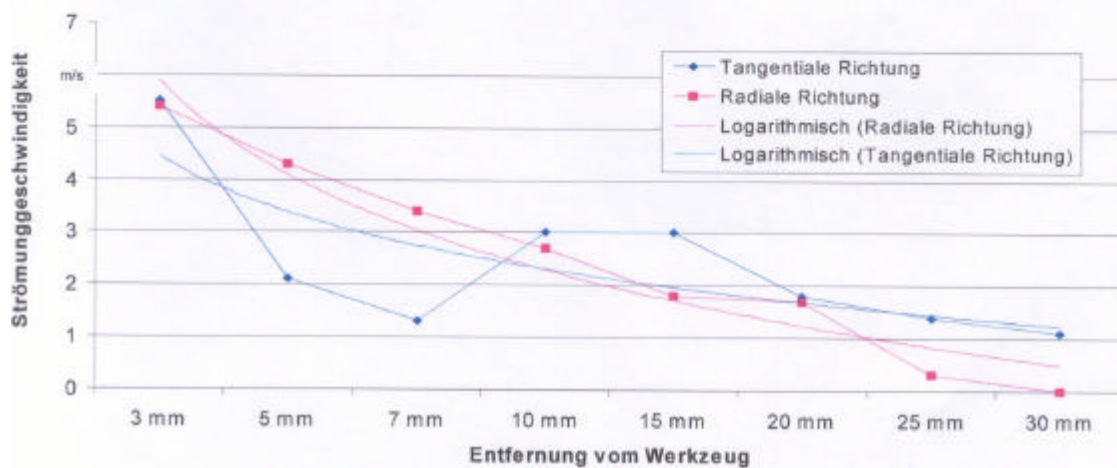
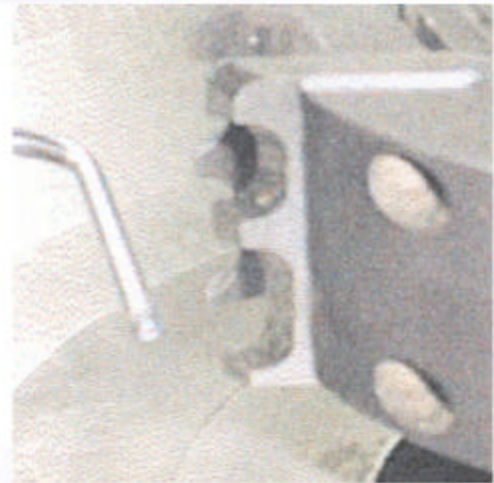


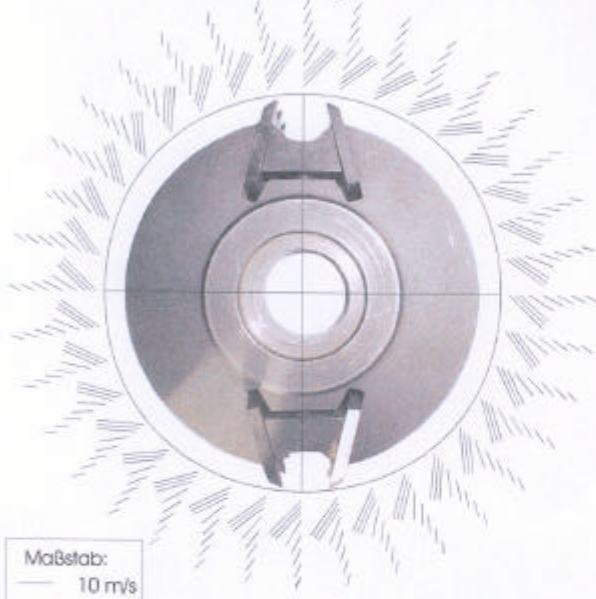
Diagramm der Umströmung

Bild 5.5: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Schneidengeometrie 4

Datenblatt
Werkzeugumströmung
Schneidengeometrie 5



Darstellung der Umströmung



Daten

Wirbelströmung um Tischfräse 5

Abstand vom Werkzeug	tang. Richtung (1)	rad. Richtung (1)
3 mm	11,5	11,7
5 mm	10,3	10,7
7 mm	9,2	9,8
10 mm	5,4	8,8
15 mm	3,5	6,9
20 mm	2,8	5,6
25 mm	2,3	5,0
30 mm	2,0	4,2

Radiale und tangentielle Strömung um Tischfräse 5

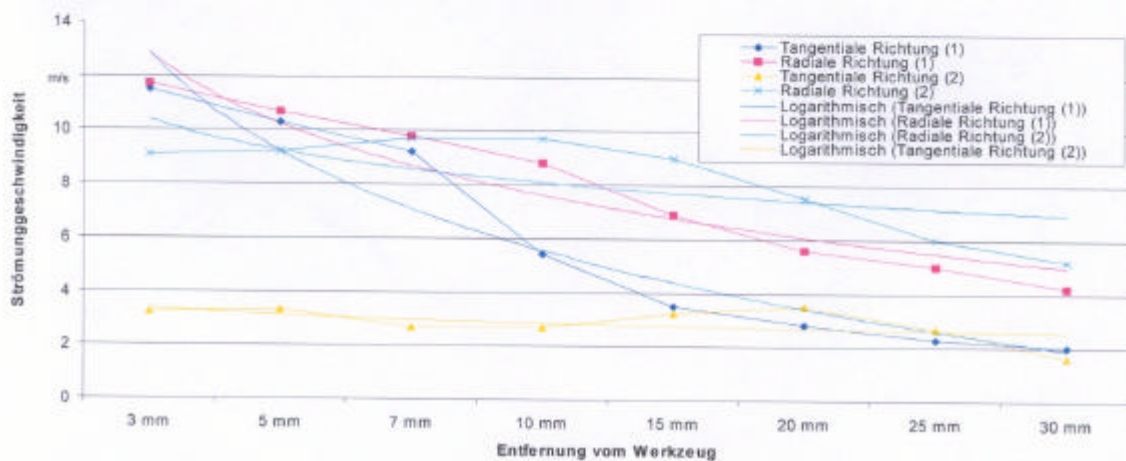


Diagramm der Umströmung

Bild 5.6: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Schneidengeometrie 5

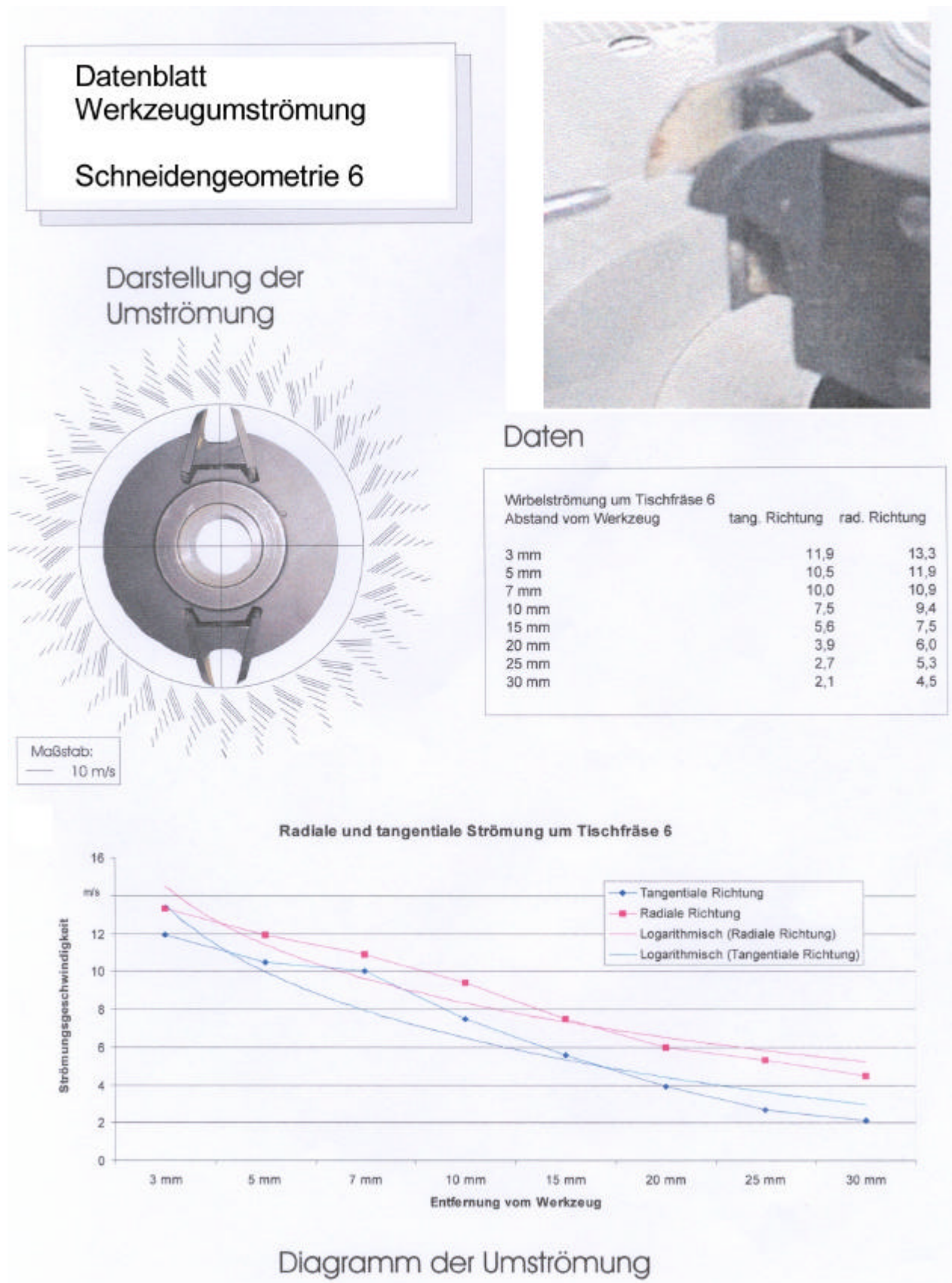
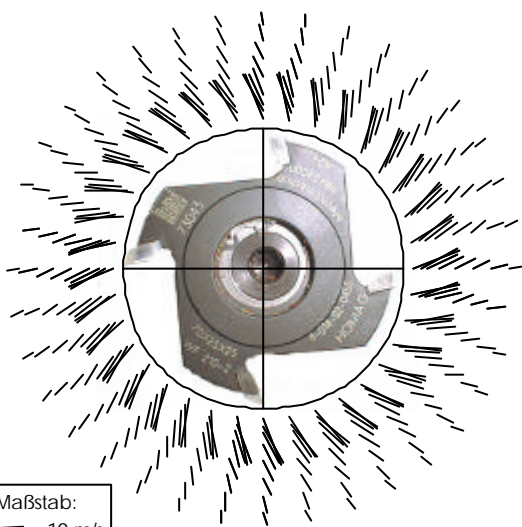


Bild 5.7: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Schneidengeometrie 6

Leitz Vorfräser
Datenblatt
Werkzeugumströmung



Darstellung der Umströmung



Daten

Abstand vom Werkzeug	Tangente Richtung	radiale Richtung
3mm	5,1	12,7
5mm	5,9	10,3
7mm	4,2	8,3
10mm	3,2	6,9
15mm	2,9	5,6
20mm	2,2	4,7
25mm	1,2	3,9
30mm	0,8	3,4

Drehzahl = 992 U/min
 Strömungsmessung = arithmetisches Mittel einer Minute

Radiale und tangente Strömung um Leitz Vorfräser

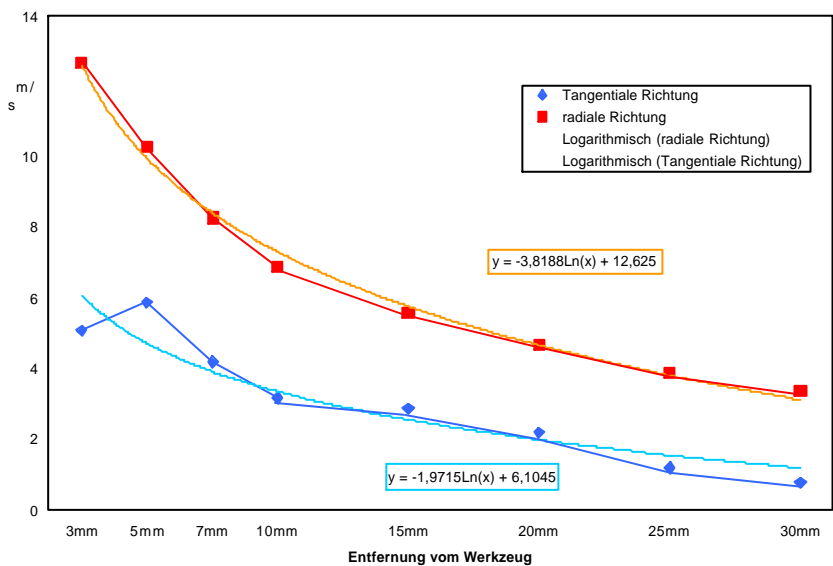


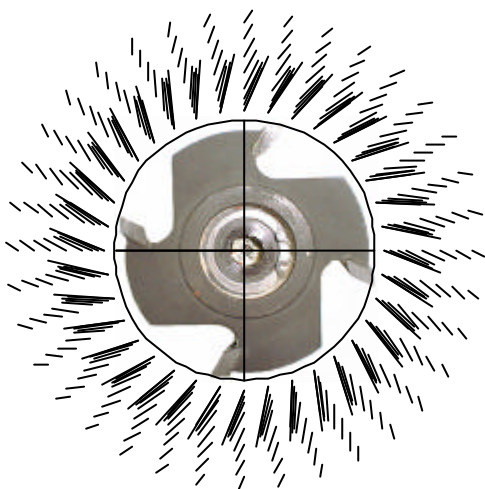
Diagramm der Umströmung

Bild 5.8: Tangente und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Vorfräser 1 (Fa. Leitz)

Leuco Vorfräser
 Datenblatt
 Werkzeugumströmung



Darstellung der Umströmung



Daten

Abstand vom Werkzeug	Tangentiale Richtung	radiale Richtung
3mm	7	17
5mm	5,3	12,6
7mm	4,4	9,9
10mm	4,2	8,5
15mm	3,5	6,7
20mm	2,9	5
25mm	2,7	4,3
30mm	2,2	3,7

Drehzahl = 993,5 U/min
 Strömungsmessung = arithmetisches Mittel einer Minute

Maßstab:
 — 10 m/s

Radiale und tangentielle Strömung um Leuco Vorfräser

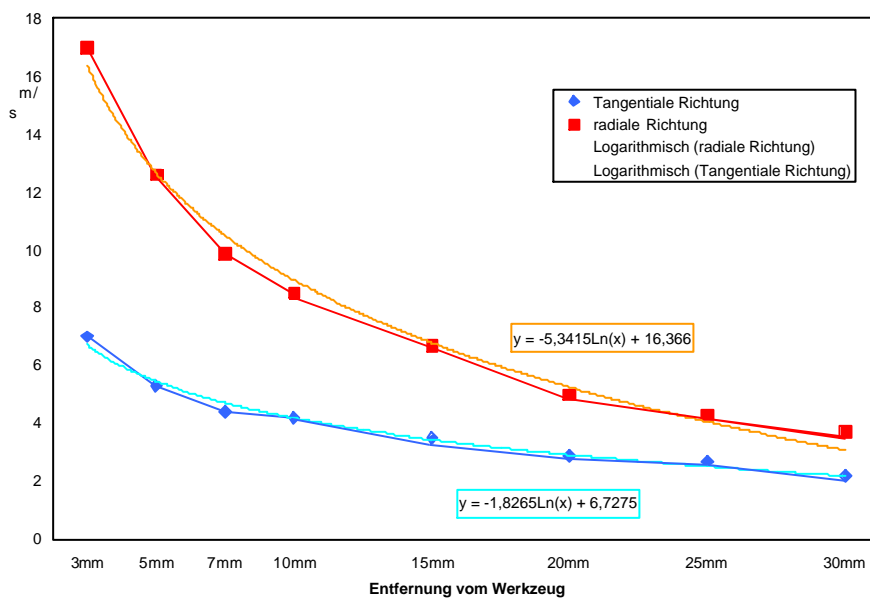
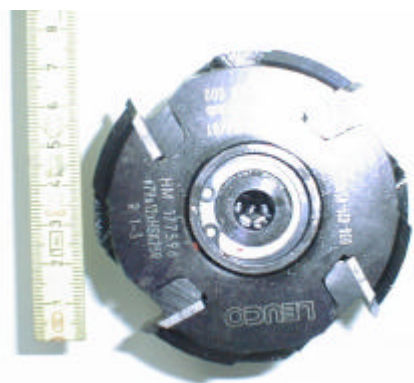


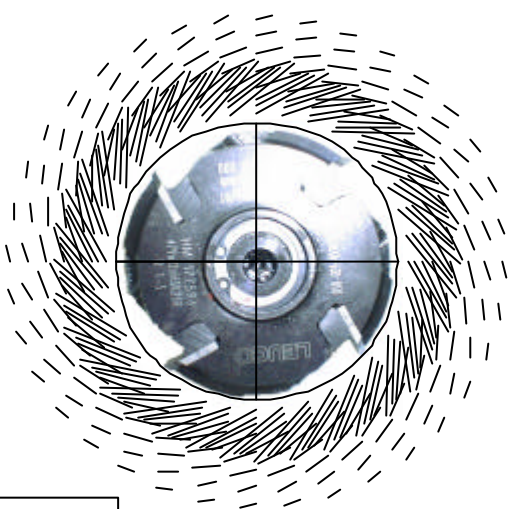
Diagramm der Umströmung

Bild 5.9: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Vorfräser 2 (Fa. Leitz)

Leuco Radienfräser
mit Schneidpalten
 Datenblatt
 Werkzeugumströmung



Darstellung der Umströmung



Maßstab:
 — 10 m/s

Daten

Abstand vom Werkzeug	Tangentielle Richtung	radiale Richtung
3mm	20,4	11,2
5mm	16,2	8,8
7mm	14,6	7,1
10mm	12,6	4,4
15mm	9,5	2,8
20mm	7,6	1,7
25mm	5,4	1,6
30mm	4,5	1,1

Drehzahl = 994 U/min

Radiale und tangentielle Strömung um Leuco Radienfräser mit Schneidplatten

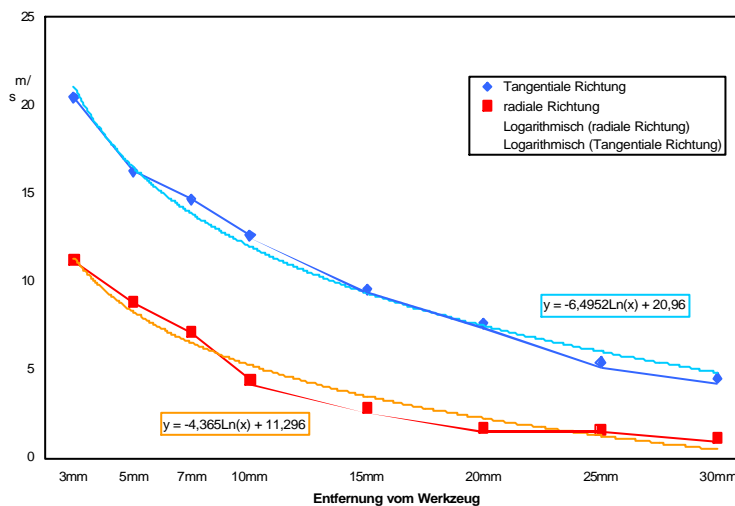


Diagramm der Umströmung

Bild 5.10: Tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten an Radienfräser mit Schneidplatten (Fa. Leitz)

6 Ermittlung der c_w -Werte bei Spänen aus Holzwerkstoffen und Massivhölzern

6.1 Grundüberlegung

Die Formel für den Luftwiderstandsbeiwert c_w ergibt sich aus folgenden Gleichungen (6.1), wenn die Kraft auf den Partikel mit seiner Gewichtskraft gleichgesetzt wird:

$$\begin{aligned}F_w &= \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot r_L \cdot v^2 \\F_w &= m \cdot g \\c_w &= \frac{2 \cdot m \cdot g}{A \cdot r_L \cdot v^2}\end{aligned}\tag{6.1}$$

Dieser Zustand, dass die Gewichtskraft des Partikels und die Kraft aufgrund des Luftwiderstandes auf den Partikel genau gleich groß sind, ist genau dann erreicht, wenn sich der frei fallende Partikel im Gleichgewicht befindet. Das bedeutet, er muss seine vom Luftwiderstand abhängige Endgeschwindigkeit erreicht haben.

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten einen frei fallenden Partikel in den Gleichgewichtszustand zu bringen. Zum einen kann er aus entsprechend großer Höhe fallengelassen werden. Nach der Beschleunigungsphase, während der die Gewichtskraft größer als die bremsende Luftwiderstandskraft ist, erreicht er seine Endgeschwindigkeit, mit der er so lange weiterfliegt bis er den Boden erreicht. Diese Vorgehensweise benötigt eine lange ungestörte Flugstrecke und eine Meßmöglichkeit, die die Ermittlung der Geschwindigkeit des Partikels bei seiner Endgeschwindigkeit ermöglicht.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, das Prinzip umzudrehen und den Partikel von unten anzuströmen, bis er in der Schwebelage gehalten wird. Nun ist wiederum die Gewichtskraft des Partikels und die Kraft aufgrund der Anströmung gleich groß. Der Partikel befindet sich im Gleichgewicht. Diese Vorgehensweise soll für den Versuchsaufbau umgesetzt werden.

6.2 Versuchsaufbau

Für die Bestimmung der c_w -Werte wurde ein Turm aus Acrylglas entworfen, in welchem von unten mit einem Gebläse Luft eingeblasen wurde. Der komplette Versuchsaufbau ist aus dem folgenden Bild 6.1 ersichtlich.



Bild 6.1: Versuchsaufbau bestehend aus Turm und Lüfter

In den Turm kann von unten Luft mit einem möglichst gleichmäßigen Strömungsprofil eingeblasen werden. Durch verschiedenste Maßnahmen, wie Filter und Umlenkvorrichtungen wurde die Strömung beim Einblasen noch im Schlauch vergleichmässigt. Es folgt dann im Turm ein Stück gerade Rohrleitung, in welcher sich die Strömung weiter beruhigen kann. Durch den konischen Turmteil nimmt die Strömungsgeschwindigkeit nach oben kontinuierlich ab. Ursprünglich sollte in diesem Teil der Span zum Schweben gebracht werden. Die Strecke, die jedoch notwendig ist, alle Späne einer Spanprobe zum Schweben zu bringen, müsste aufgrund der unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten im Gleichgewicht der Partikel wesentlich länger ausfallen. Daher wurde der Turm nochmals mit einem geraden Auslaufstück und einem Auffangtrichter versehen, um die Späne beim Verlassen des Turmes auffangen und auswiegen zu können. Für die Versuche wurde die Luftgeschwindigkeit in der Mitte des Rohres

im geraden Rohrstück gemessen. Das folgende Bild 6.2 zeigt den Strömungsquerschnitt im geraden Rohrstück auf zwei rechtwinklig zueinander liegenden Geraden. Wie zu erkennen ist, bildet sich ein sehr gleichmäßiger Strömungsquerschnitt aus.

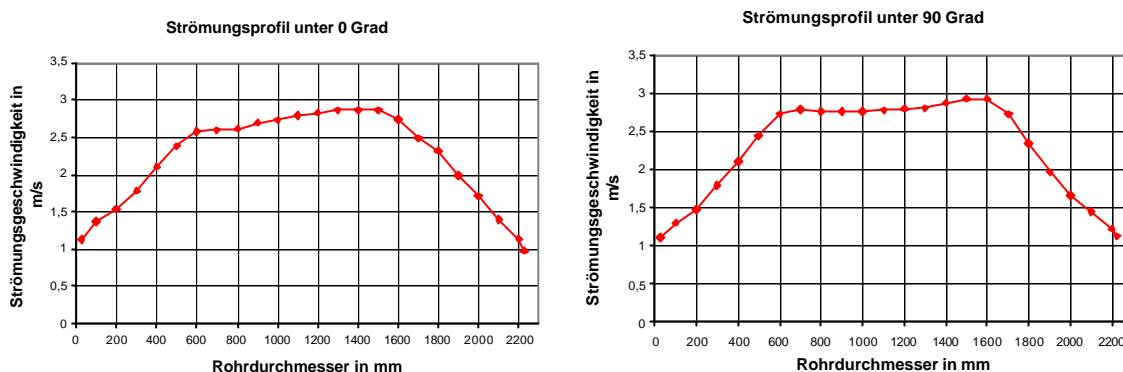


Bild 6.2: Strömungsquerschnitt im oberen Rohrteil

Die höchste Strömungsgeschwindigkeit befindet sich in der Mitte des Rohres. Es wird nun davon ausgegangen, dass die Partikel genau dann das Rohr verlassen können und im Trichter aufgefangen werden, wenn die höchste Luftgeschwindigkeit im Rohr mit ihrer End-Fallgeschwindigkeit identisch ist.

Für die Versuche wurde deshalb für jede Spanprobe die Luftgeschwindigkeit langsam in Stufen von 0,2 m/s gesteigert. Jede Luftgeschwindigkeitsstufe wurde 20 Minuten konstant gehalten, bevor der Trichter sorgfältig entleert und die Probe gewogen und verpackt wurde.

6.3 Untersuchte Werkstoffe und Bearbeitungsverfahren

Es wurden folgende Kombinationen von Werkstoffen und Bearbeitungsverfahren untersucht.

- Fräsen mit Schaftfräser auf Bearbeitungszentrum BAZ
Werkstoffe: Fichte massiv, Buche massiv, Spanplatte 18 mm, MDF 18 mm
- Kreissägen auf Tischkreissäge
Werkstoffe: Fichte massiv, Buche massiv, Spanplatte 18 mm, MDF 18 mm
- Hobeln auf Abrichthobelmaschine
Werkstoffe: Fichte massiv, Buche massiv

6.4 Versuchsergebnisse

6.4.1 Partikelgrößenverteilungen

Bild 6.3 zeigt die prozentuale Verteilung der ermittelten Partikelgrößen, die beim Fräsen und Kreissägen entstanden sind. Es zeigt sich, dass für den gleichen Werkstoff beim Kreissägen tendenziell kleinere Späne entstehen als beim Fräsen. Dies könnte an der kürzeren im Eingriff befindlichen Schneide beim Sägen liegen. Andererseits kann aber auch der Vorschub eine gewisse Rolle spielen. Jedoch ist die Kurvenform der Verteilung der Spangrößen bei gleichen Werkstoffen ähnlich. Gleiche Werkstoffe sind im Diagramm mit der gleichen Farbe dargestellt.

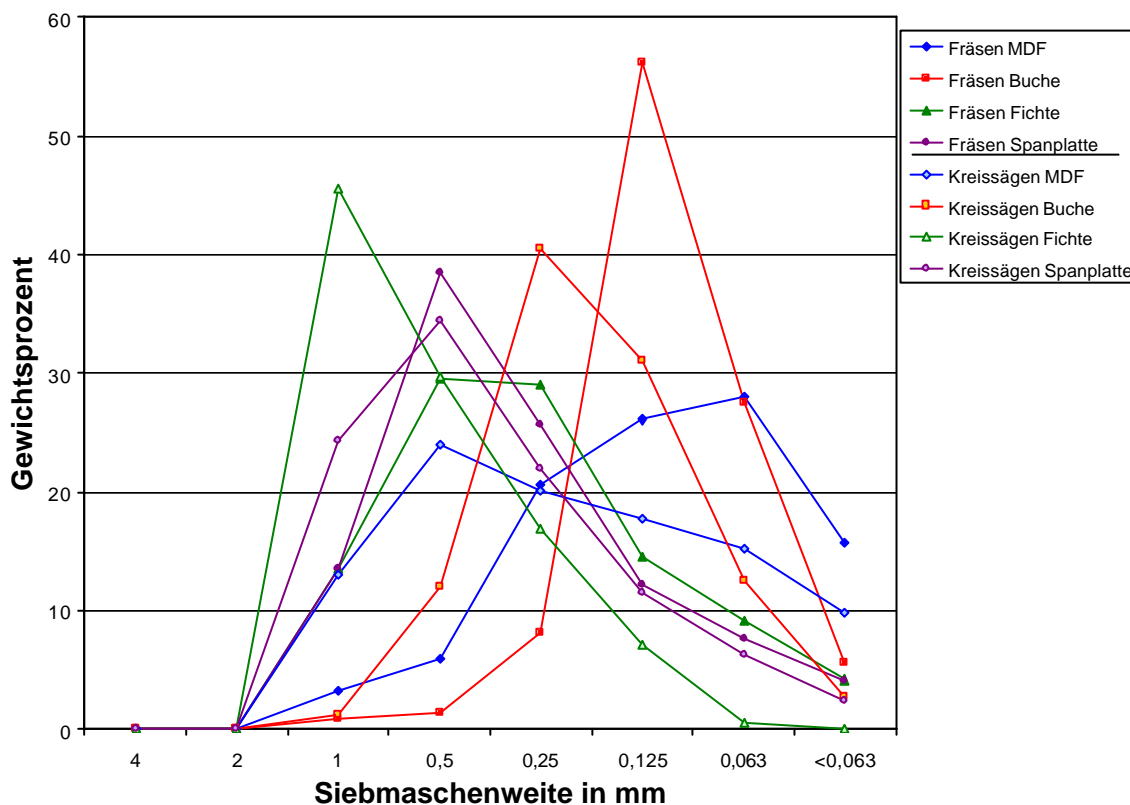


Bild 6.3: Partikelgrößenverteilung beim Fräsen und Kreissägen

Bemerkenswert ist die Spangröße bezüglich des jeweils betrachteten Werkstoffes. So liegen die Späne aus der MDF-Bearbeitung und der Spanplattenbearbeitung durchaus im erwarteten Bereich. Die MDF-Späne sind sehr klein (zwischen 70% und 80% sind 0,25 mm und kleiner) und gleichmäßig über die kleinen Spanklassen verteilt.

Die Größe der Späne aus der Spanplattenbearbeitung liegen hauptsächlich im Bereich zwischen 0,25 mm und 1 mm Größe. Auffallend ist hier, dass die Verteilung der Spangrößen nahezu deckungsgleich beim Fräsen und beim Kreissägen verläuft. Dies könnte dafür sprechen, dass es sich bei den Spanplattenspänen überwiegend um Späne handelt, die aus der Spanplatte herausgerissen und nicht zerspannt wurden. Diese Aussage gilt es aber durch den Vergleich mit Spanplattenspänen vor dem Streuen der Spanplatten oder durch weitere Zerspannungsuntersuchungen zu überprüfen.

Bei den Massivhölzern ist es noch im Rahmen der Erwartungen, dass diese eine deutliche Spitze bei einer bestimmten Spangröße aufweisen. Diese Maxima liegen auch erwartungsgemäß beim Kreissägen aufgrund der geringeren Schneidenbreite bei kleineren Spangrößen. Auffallend jedoch ist, dass die Buchenholzspäne deutlich kleiner als die Späne der Holzwerkstoffe sind, während die Fichtenholzspäne deutlich größer als die Späne der Holzwerkstoffe sind.

6.4.2 Endgeschwindigkeit als weitere Unterteilung der Spanformen

Die Unterteilung der erzeugten Späne durch die Siebanalyse in maximal acht Spangrößenklassen ist sehr grob. Für eine möglichst genaue Berechnung sollte eine weitere Unterteilung des sehr komplexen Spänegemisches stattfinden. Dies geschieht während der Untersuchung im Späneturm mit der Bestimmung des c_w -Wertes.

Die prozentual ausgetragene Spanmenge von Proben verschiedener Spangrößen des gleichen Bearbeitungsvorgangs und Werkstoffs bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten sind in Bild 6.4 dargestellt. Hier ist jeweils angegeben, wie viel Prozent der Spanprobe bei den entsprechenden Anströmgeschwindigkeiten, also den Endgeschwindigkeiten der Partikel, aus dem Turm ausgetragen werden. Dabei wird erwartungsgemäß eine größere Partikelklasse bei höheren Endgeschwindigkeiten ausgetragen. Die Verteilung der einzelnen Partikelgrößenklassen ist jedoch ähnlich, sie verschiebt sich nur auf der x-Achse des Diagramms bei unterschiedlichen Partikelgrößen.

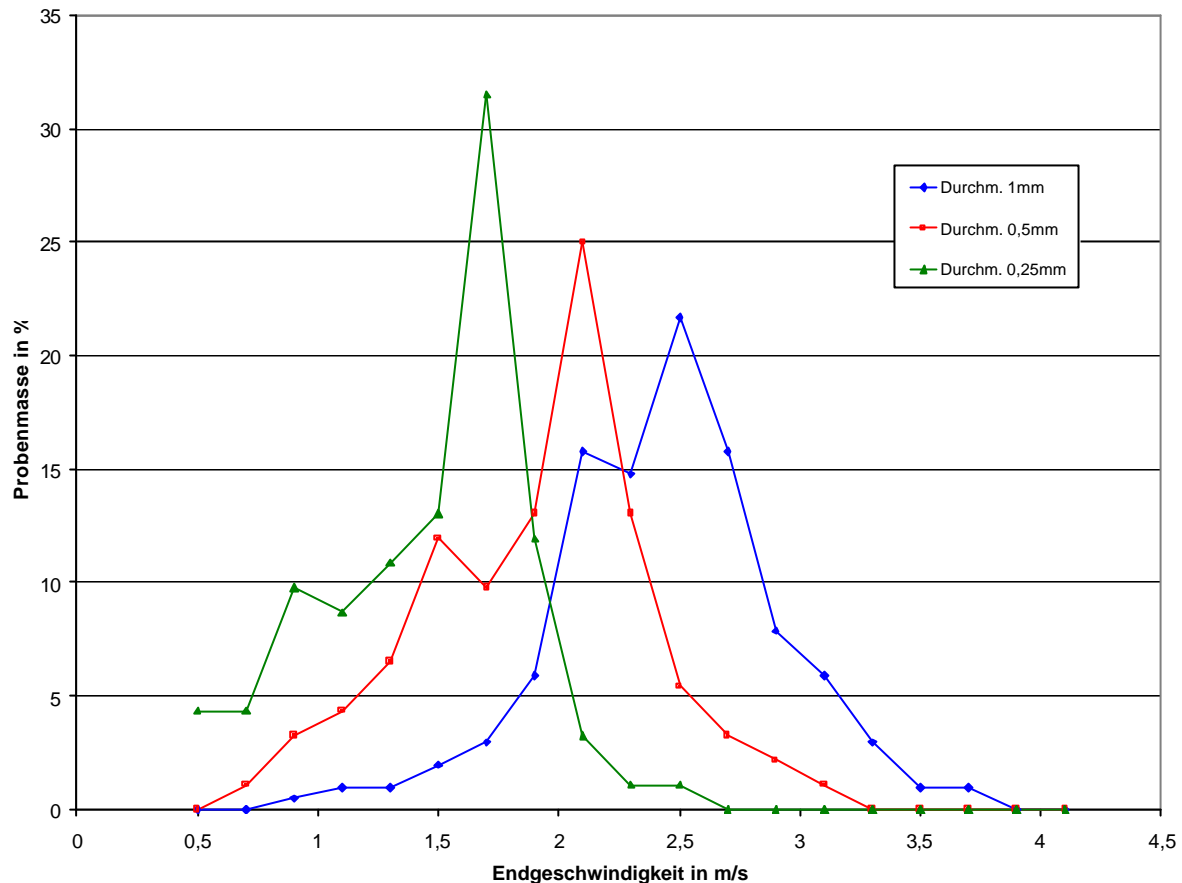


Bild 6.4: Prozentualer Partikelaustrag verschiedener Proben (Fräsen von Fichte)

Bei allen Versuchen zeigte sich eine Verkleinerung der Endgeschwindigkeit bei maximalem Späneaustrag der Probe um 0,4 m/s zur nächstkleineren Spangrößenklasse. Diese Erkenntnis soll dazu benutzt werden, die Unterteilung der Späne auch auf die übrigen Größenklassen zu extrapolieren, die nicht mit der bisher verwendeten Versuchseinrichtung untersucht werden konnten.

Spangrößenklassen von 0,125 mm und kleiner konnten mit der Versuchseinrichtung nicht untersucht werden, da die Partikel aufgrund ihrer statischen Aufladung am Acrylglas haften blieben.

Um auf die nicht untersuchten Größenklassen schließen zu können, wird zuerst eine mittlere Verteilung aus den drei gemessenen Kurven gebildet. Dies geschieht rein geometrisch, indem die Maxima der Kurven übereinandergelegt werden und ein arithmetisches Mittel für die mittlere Verteilung daraus gebildet wird. Dies ist im folgenden Bild 6.5 näher dargestellt. Die grauen Kurven entsprechen den gemessenen Werten, die rote Kurve ist die erzeugte mittlere Verteilung.

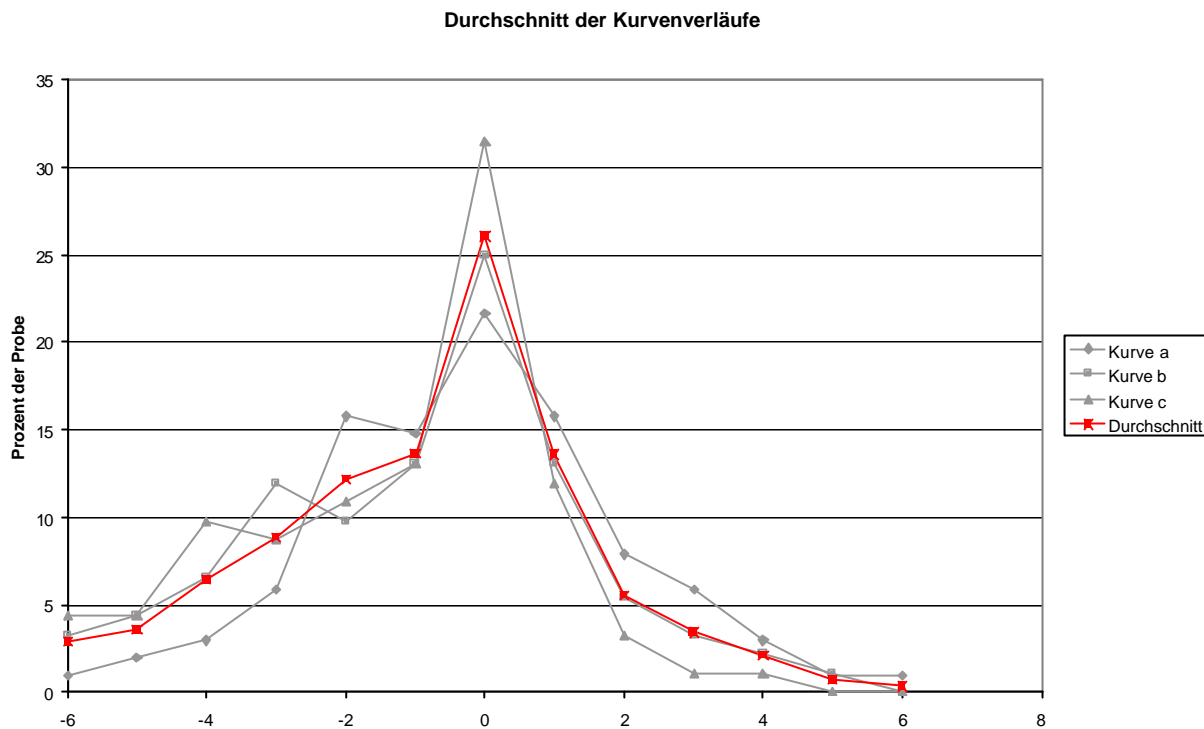


Bild 6.5: Bildung einer durchschnittlichen Verteilung beim Fräsen von Fichte

Diese mittlere Verteilung wird nun auf die nicht untersuchten Spangrößenklassen angewandt, wobei das Maxima pro Spangrößenklasse um 0,4 m/s zu kleineren Endgeschwindigkeitswerten verschoben wird. Es ergibt sich ein Raster aus Spangrößenklasse und Endgeschwindigkeit der Späne (siehe Bild 6.6). Auf der z-Achse des Diagramms sind die prozentualen Anteile der einzelnen Felder des Spanrasters am gesamten Spanvolumen aufgetragen. Die extrapolierten Kurven des Diagramms sind weiß dargestellt, die gemessenen Kurven dagegen in Farbe. Dies ermöglicht eine Einschätzung, welche Bereiche des Spänekollektivs bisher versuchstechnisch und welche nur theoretisch erfasst werden konnten.

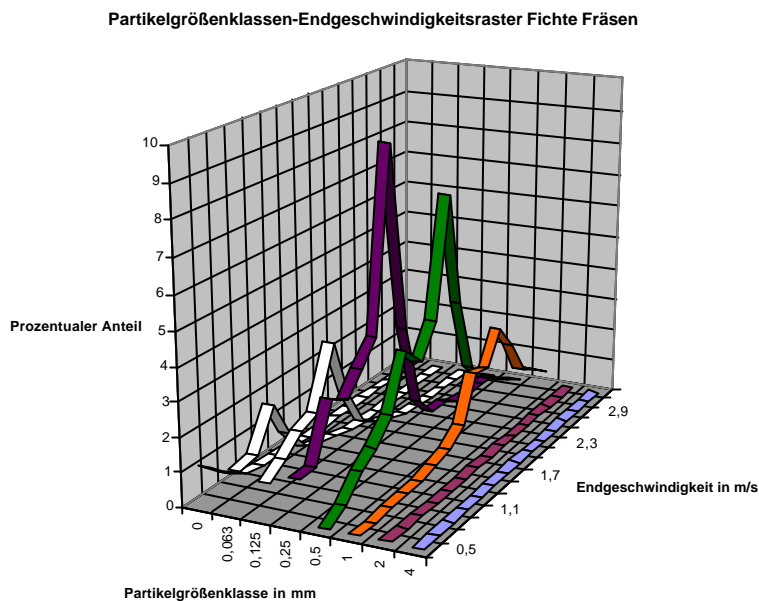


Bild 6.6: Raster des Spankollektivs beim Fräsen von Fichte

Zu bemerken ist hierbei, dass nicht bei allen Werkstoffen der gemessene Anteil des Spankollektivs so deutlich überwiegt wie dem Fräsen von Fichte (Bild 6.6). Betrachtet man zum Vergleich das Fräsen von Buche (Bild 6.7), das das andere Extrem der Spangrößenverteilung darstellt, so ist hier der extrapolierte Anteil des Spankollektivs deutlich größer.

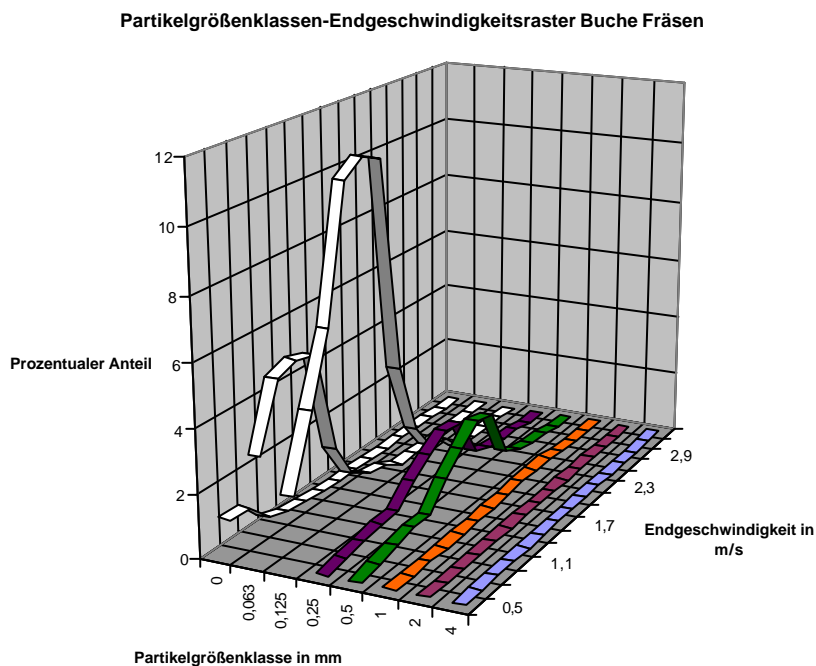


Bild 6.7: Raster des Spankollektivs beim Fräsen von Buche

6.4.3 Einfluss des durchschnittlichen Spangewichtes

Der Austrag der Späne bei unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten liegt jedoch nicht nur an den unterschiedlichen c_w -Werten der Späne, sondern auch an ihrem sehr unterschiedlichen Länge- zu Durchmesser Verhältnis und damit an ihrem Gewicht. Dies ist in Bild 6.8 zu erkennen. Es handelt sich dabei um Späne, die beim Kreissägen von massivem Buchenholz entstanden sind. Man sieht auf den Mikroskopaufnahmen deutlich, dass die Späne der linken Aufnahme leichter sind als die Späne der rechten Aufnahme. Bei beiden Aufnahmen handelt es sich um Späne der gleichen Probe, die jedoch bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten den Turm verlassen haben (0,5 m/s links und 2,1 m/s rechts).

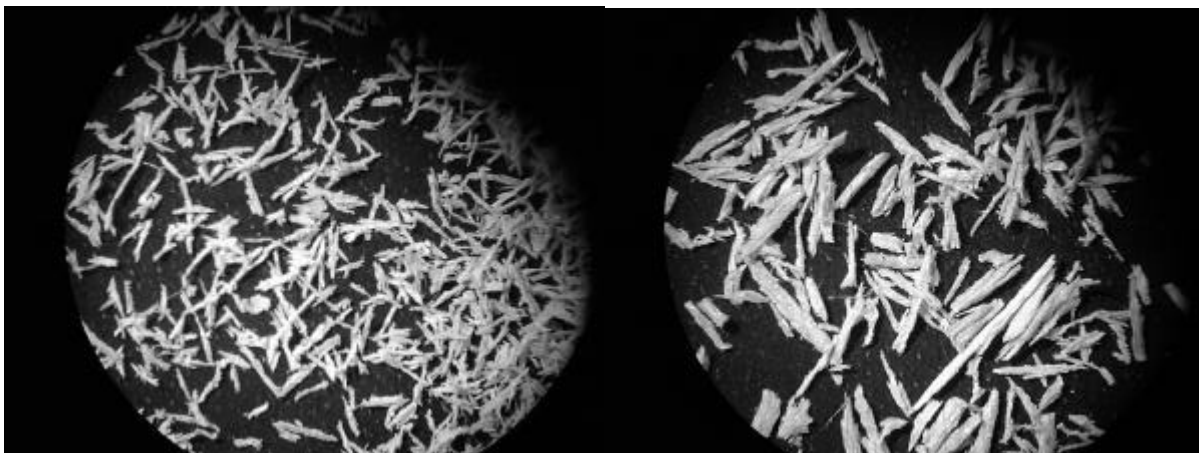


Bild 6.8: Späne der Siebmaschenweite 0,25 mm beim Kreissägen von Buche

Wird nun die Spanmasse mit einbezogen, so sieht man für die Gewichtsverteilung der Späne bei verschiedenen Endgeschwindigkeiten (Bild 6.9, Kreissägespäne der Größe 0,5 mm), dass die Späne, die bei höheren Luftgeschwindigkeiten den Turm verlassen, auch deutlich schwerer sind. Ermittelt wurde die durchschnittliche Spanmasse, indem ca. 200 Späne auf einer Feinstwaage gewogen und das Durchschnittsgewicht für einen Span errechnet wurde. Es ist bei den entsprechenden Diagrammen jedoch anzumerken, dass die durchschnittliche Spanmasse am Beginn und am Ende der eingezeichneten Kurve mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist, da hier oft eine wesentlich kleinere Spanmenge zur Mittelwertbildung zur Verfügung stand.

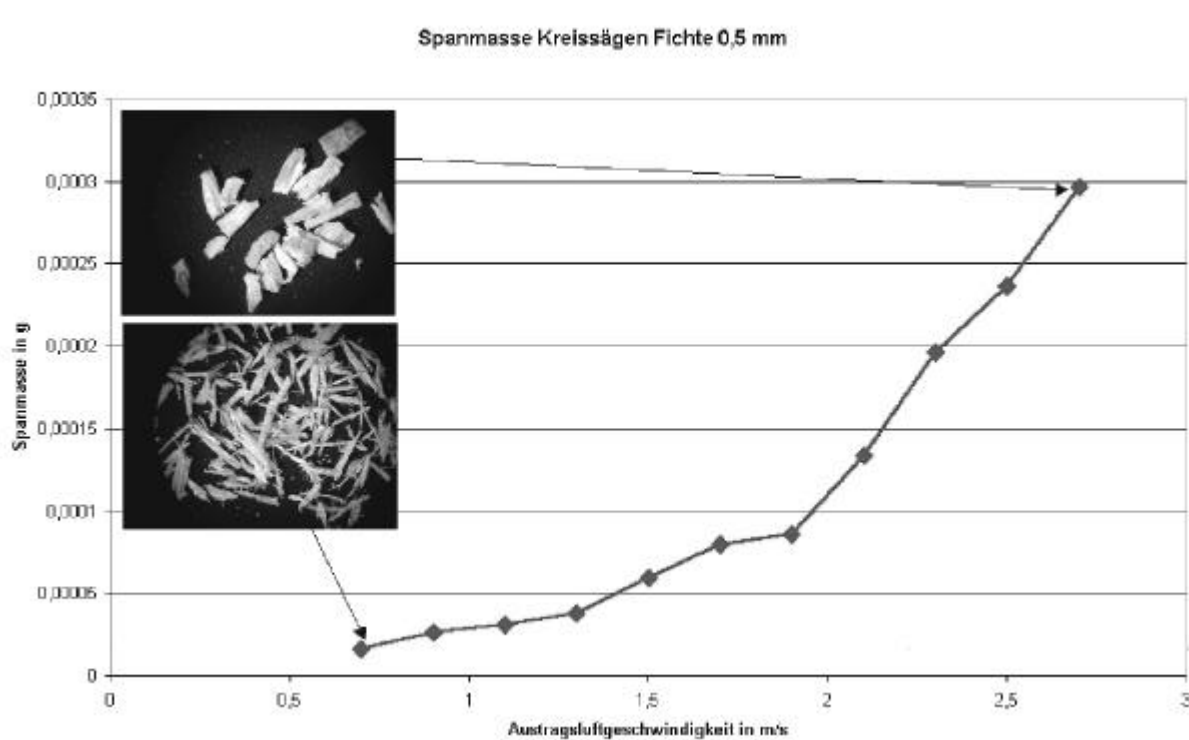


Bild 6.9: Spanmasse bei unterschiedlicher Endgeschwindigkeit aus einer Spangrößenklasse

6.4.4 Querschnittsfläche der Späne

Wollte man die tatsächlich wirksame Partikelfläche ermitteln, müssten zuerst einmal die Hauptträgheitsachsen des Partikels gefunden werden. Die Kontur senkrecht zur 1. Hauptträgheitsachse wäre dann als wirksame Partikelfläche auszumessen und in die Rechnung einzusetzen. Darüber hinaus ist es notwendig, die Partikelflächen an einer Vielzahl von Partikeln zu bestimmen, um einen realen Durchschnittswert für eine bestimmte Spanklasse zu erhalten, da die Körperformen der einzelnen Partikel sich sehr stark unterscheiden. Es ist überdies zweifelhaft, ob die exakte Ermittlung der wirksamen Partikelfläche aus den Hauptträgheitsachsen wirklich einen realitätsnahen Wert ergeben kann, da die einzelnen Partikel während des Fluges rotieren und somit die wirksame Partikelfläche sich permanent verändert.

Bei Annahme einer kreisförmigen wirksamen Partikelfläche bleibt noch ein recht großer Bereich an möglichen Durchmessern. So kann der Partikeldurchmesser theoretisch in der Staffellung der Siebmaschenweiten schwanken. Da die Siebmaschenweite jeweils zum nächsten Sieb verdoppelt wird, vervierfacht sich dabei die Partikelfläche, da der Partikeldurchmesser im Quadrat in die Flächenberechnung eingeht (Gleichung (6.2)).

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (6.2)$$

Um festzustellen, wo die durchschnittliche Partikelgröße der einzelnen Siebfractionen liegt, wurde eine Anzahl verschiedener Partikel aus der Siebfraction der Siebmaschenweite mit einer Feinmessschraube ausgemessen. Diese Partikeldurchmesser wurden aufsummiert und durch die Anzahl der vermessenen Partikel geteilt (Gleichung (6.3)).

$$D_{\emptyset} = \frac{\sum_1^n D_i}{n} \quad (6.3)$$

Dabei ergab sich ein durchschnittlicher Partikeldurchmesser von 372 μm bei der Siebfraction des Siebes mit 500 μm Maschenweite. Dieser Wert liegt nur sehr knapp neben dem durchschnittlichen Durchmesser der beiden möglichen Extremdurchmesser der Partikel, der bei 375 μm liegt. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich ein Partikel in der Größe des nächst kleineren Siebes nicht mehr im betrachteten Sieb befinden kann.

Da die gemessenen Durchschnittswerte der Partikel kleiner als die Siebmaschenweite des Siebes (in dem sie sich befanden) waren, ist anzunehmen, dass die Partikel beim Messen auf dem Messamboss der Messschraube sich in ihre stabile Gleichgewichtslage gedreht hatten. Dies bedeutet, dass der kleinste Durchmesser des Partikels gemessen wurde.

Ist das gemessene Außenmaß kleiner als die Siebmaschenweite, so muss der Körper ein zweites Außenmaß besitzen, das ihn am Passieren des Siebes gehindert hat. Dabei wird vorausgesetzt die Siebung werde erst beendet, wenn keine weiteren Partikel das Sieb mehr passieren können, was durch die Vorschrift über die Siebzeit in DIN 66 165 größtenteils gewährleistet ist.

Mit der Kenntnis von zwei Außenmaßen, der Siebmaschenweite und dem statistisch gemittelten, gemessenen Außenmaß ist es sinnvoll, als Partikelfläche eine Ellipse anzunehmen. Sie stellt, neben dem Rechteck, die einzige mit zwei unterschiedlichen Außenmaßen eindeutig beschreibbare einfache geometrischen Fläche dar. Dabei erhält man bei Verwendung des Rechtecks sicher eine zu große Fläche, da das Rechteck die größtmögliche Fläche verkörpert.

Somit wird die wirksame Partikelfläche in der theoretischen Flugbahnrechnung durch eine Ellipse angenähert (Bild 6.10). Dabei bildet die Siebmaschenweite die größere Achse und der gemessene Durchmesser die kleinere Achse.

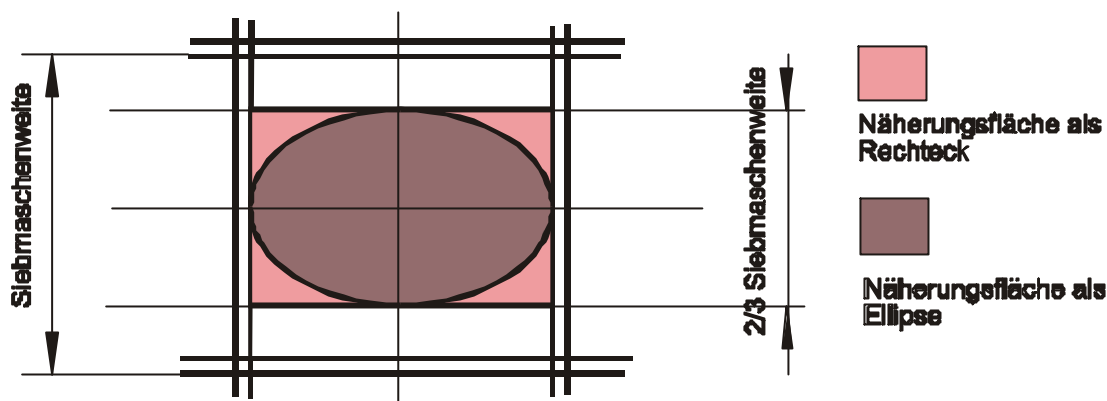


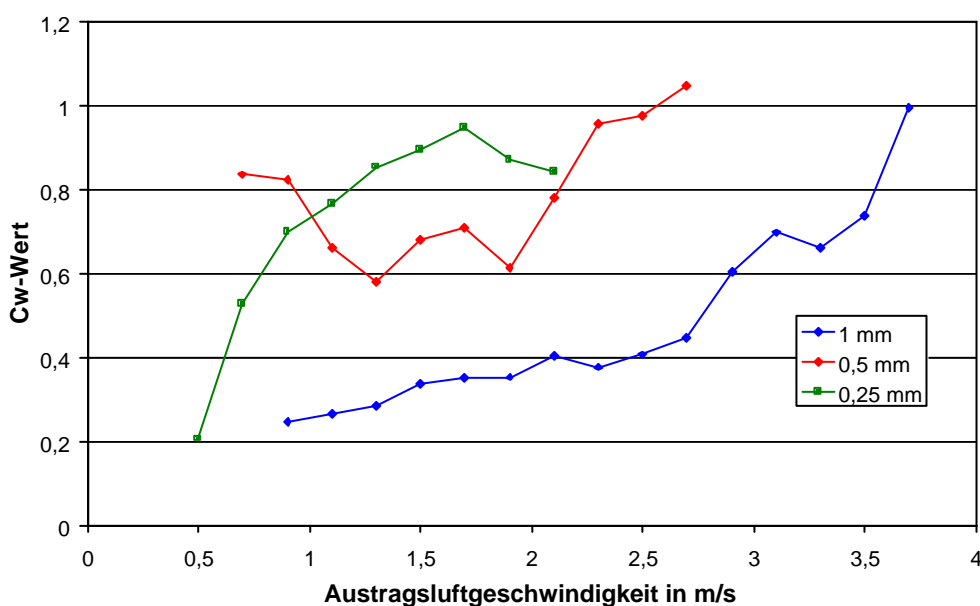
Bild 6.10: Annäherung der Partikelfläche durch verschiedene Geometrien

Die Partikelfläche berechnet sich somit aus:

$$A = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot \frac{D_{\text{Sieb}}}{2} \cdot \left(\frac{D_{\text{Sieb}} + D_{\text{Sieb-1}}}{4} \right) \quad (6.4)$$

6.4.5 Ermittelter c_w -Wert

Berücksichtigt man nun das durchschnittliche Spangewicht und die Näherung der Querschnittsfläche der Späne und setzt die Werte in die obige Formel (6.1) für den c_w -Wert ein, so ergibt sich ein Diagramm wie in Bild 6.11 gezeigt. Beim Einsetzen in die Formel wird die Austragsluftgeschwindigkeit des Turmes gleich der Endgeschwindigkeit v gesetzt.

Bild 6.11: c_w -Werte dreier Spangrößenklassen von Kreissägespänen aus Fichte

Ein Vergleich der berechneten c_W -Werte mit aus Tabellenwerken (Bild 6.12) entnommenen Werten zeigt eine gute Übereinstimmung der betreffenden c_W -Werte-Bereiche.

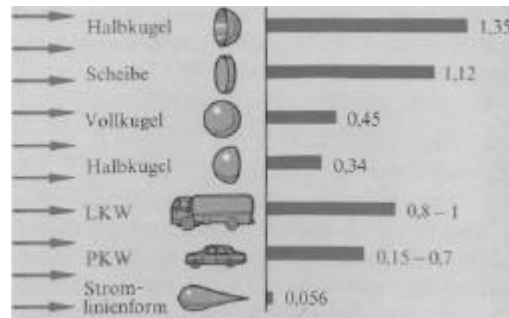


Bild 6.12: Bekannte c_W -Werte aus Tabellenwerken

7 Reflexion der Späne an einer ebenen Wand

7.1 Grundüberlegung

Für die Berechnung einer Absaughaube zur Beurteilung der Späneerfassung ist es wesentlich, den Aufprallvorgang der Partikel auf die Haubenwand zu kennen. Dabei kommt es vor allem darauf an, von den Aufprallbedingungen der Partikel auf der Wand auf die Abprallbedingungen schließen zu können.

Es wurde in den durchgeführten Untersuchungen nur das Reflexionsverhalten an einer ebenen Wand untersucht. Aus diesen Versuchen für die ebene Wand lassen sich jedoch die, in der Realität fast immer gekrümmten Haubenwände ableiten, da jede gekrümmte Wandfläche aus sehr kleinen geraden Wandelementen abgeleitet werden kann. Dadurch ist es nicht notwendig in diesem Stadium der Versuche gekrümmte Wände zu betrachten.

7.2 Versuchsaufbau

Als Versuchswerkzeug wurde ein zweischneidiges Fräs Werkzeug mit geraden Schneiden aus HSS gewählt. Bei den Versuchen war nur der gerade Teil der Schneiden im Einsatz. Das Werkzeug war auf einer Tischfräsmaschine installiert und arbeitete im Gegenlauf (Bild 7.1).

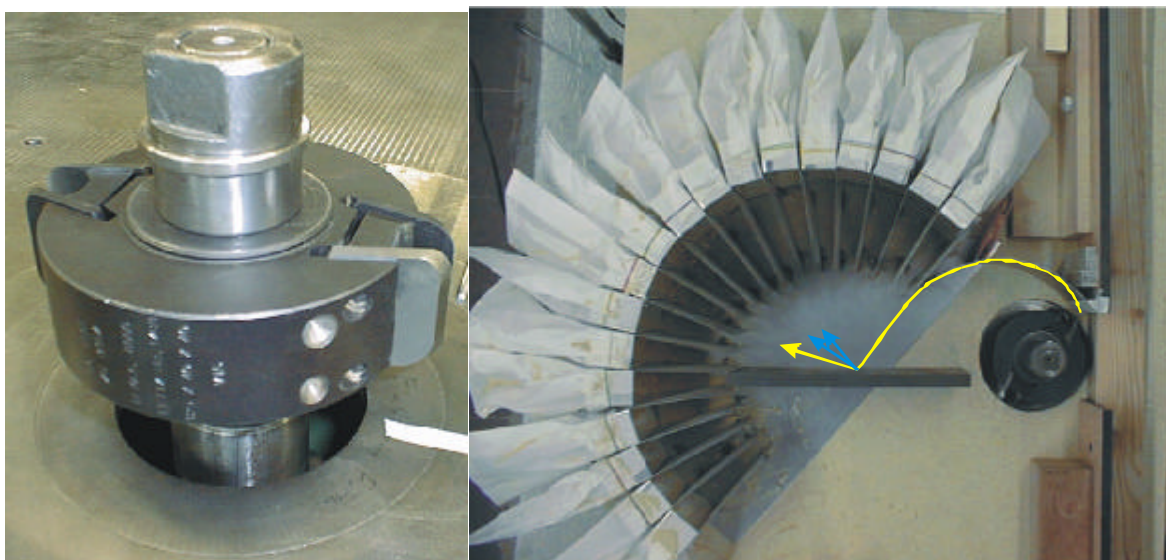


Bild 7.1: Werkzeug (links), Versuchsaufbau (rechts)

Im Rahmen der Versuche wurden die folgenden vier Werkstoffe untersucht:

- Buche massiv
- Fichte massiv
- Spanplatte 18 mm
- MDF 18 mm

Das Werkzeug bearbeitete die Werkstücke, die an zwei festen Anschlägen (durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeit des Handvorschubes = 19 – 22 m/min) geführt wurden im Gegenlauf. Dadurch war bei allen Versuchen die Schnitttiefe festgelegt. Die aus dem Werkzeug ausgeworfenen Späne wurden an einem bogenförmig gestalteten Leitblech aufgefangen und gerichtet auf die Prallwand geleitet. Dadurch ging durch die Reibung der Späne an der Wand zwar ein Teil der kinetischen Energie der Späne verloren, es ergaben sich aber weitgehend konstante Verhältnisse, was die Aufprallrichtung und Geschwindigkeit der Späne betraf. Die so ausgerichteten Späne trafen nach einer kurzen Zeit freien Fluges auf eine Wand aus blankgezogenem Stahl. Dies entspricht bezüglich der Oberflächenstruktur in etwa einer blanken Blechwand, der wohl am häufigsten anzutreffenden Haubenwand im praktischen Einsatz. (Blank deshalb, da die verschiedenen Lacke, speziell an der Auftreffstelle der Späne im Dauereinsatz nach kurzer Zeit abgerieben sind.) Die Späne verlassen die Kontaktstelle an der Wand nach dem Stoßvorgang mit einer veränderter Geschwindigkeit und neuer Richtung und werden durch eine fächerförmige Auffangvorrichtung aus Papiertüten, die auf Blechrahmen gesteckt wurden, aufgefangen. Jedes Fächerelement deckt 10° der Rückprallwinkel ab. Die Späne wurden getrennt nach den einzelnen Auffangelementen des Fächers mit einer Vibrationsiebmaschine gemäß der geltenden DIN-Norm für die Siebzeit nach Korngrößen ausgesiebt.

7.3 Theoretischer Stoß

Betrachtet man den theoretischen Stoßvorgang von Partikeln untereinander (Bild 7.2), so läßt sich leicht erkennen, dass die vielen bestehenden Möglichkeiten von Partikelstößen für die theoretische Berechnung, auch auf heutigen PCs, nicht berücksichtigt werden können.





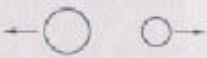
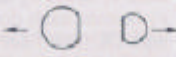

Stoßart	Bild	Charakteristika
gerade		Die Bahnen beider Schwerpunkte liegen auf einer Geraden.
schief		Die Bahnen beider Schwerpunkte liegen in einer Ebene und schließen einen Winkel ein.
zentral		Die Schwerpunkte der Stoßpartner liegen auf der Normalen zur Berührungsebene durch den Berührungspunkt (Stoßnormale).
exzentrisch		Die Schwerpunkte liegen nicht auf der Stoßnormale. Es tritt Rotation auf.
elastisch		Die Summen der kinetischen Energien vor und nach dem Stoß sind gleich.
inelastisch		Die Summen der kinetischen Energien vor und nach dem Stoß sind verschieden.
unelastisch		Die Körper bewegen sich nachher mit einer gleichen, gemeinsamen Endgeschwindigkeit weiter.

Bild 7.2: Partikelstöße

Vielmehr soll für die Untersuchungen des Stoßes mit einer Wand ein teilelastischer Stoß ohne Zerstörung des Spanes angenommen werden. Dieser läßt sich einfach nach dem Modell in Bild 7.3 beschreiben. Betrachtet werden hierbei lediglich die Anfangsgeschwindigkeit und der Aufprallwinkel sowie die Abprallgeschwindigkeit und der Abprallwinkel. Die Geschwindigkeiten können hierbei, wenn es für die Berechnung günstig erscheint, über die Winkel in x - und y -Komponenten zerlegt werden.

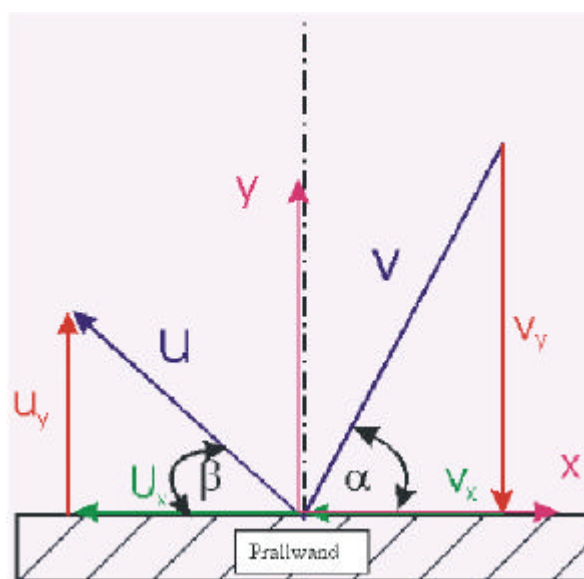


Bild 7.3: Modell des Stoßvorganges

7.4 Versuchsergebnisse

Der Zerspanungsvorgang wurde so lange durchgeführt, bis in den einzelnen Auffangelementen genügend Späne für die Auswertung vorhanden waren. Sobald ein Fach voll war, so dass die Späne nicht mehr ungehindert in die aufgespannte Tüte gelangen konnten, wurde der Versuch abgeschlossen, um keine Verfälschungen der ermittelten Reflexionswinkel zu erhalten.



Bild 7.4: Späne in den Auffangelementen bei der Bearbeitung von Buche (Öffnungswinkel = 10 Grad)

7.4.1 Spangrößenklassen

Ein erstes wichtiges Ergebnis ergibt sich aus der Betrachtung der Spangrößenverteilungen in % unter unterschiedlichen Auffangwinkeln. Daraus ergibt sich, dass der homogene Spänestrahls an der Wand auch homogen reflektiert wird. Dabei ergibt sich eine Massenverteilung in unterschiedlichen Reflexionswinkel, jedoch keine neue Spanzusammensetzung der Spangrößenklassen. Dies bedeutet wiederum, alle Partikel, ob klein oder groß, werden an der Wand in gleicher Weise reflektiert (Bild 7.5).

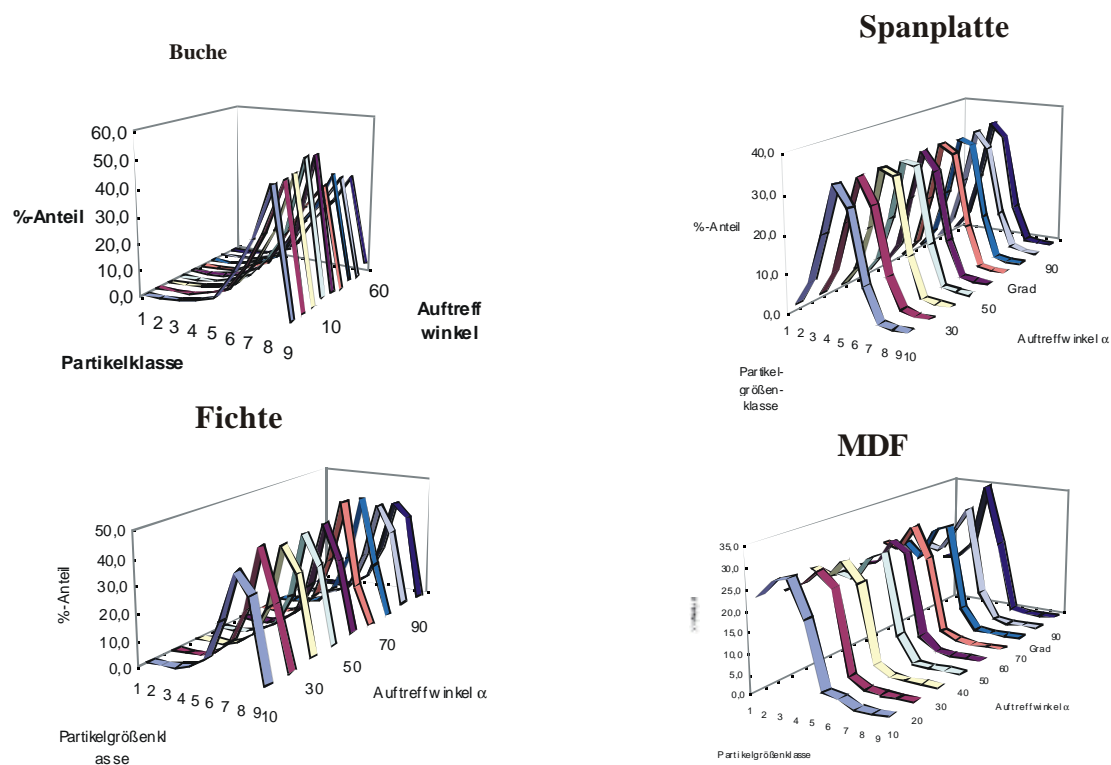


Bild 7.5: Partikelgrößenverteilung in unterschiedlichen Auffangelementen

7.4.2 Reflexionswinkel

Wie im nachfolgenden Bild 7.6 zu erkennen ist, folgt die Verteilung der Spanmasse der einzelnen Werkstoffe sehr genau der Gesamtmassenverteilung. Dies bedeutet wiederum, es kann von der Gesamtmassenverteilung der Späne auf die Reflektionswinkel der einzelnen Spangrößenklassen mit hoher Genauigkeit geschlossen werden.

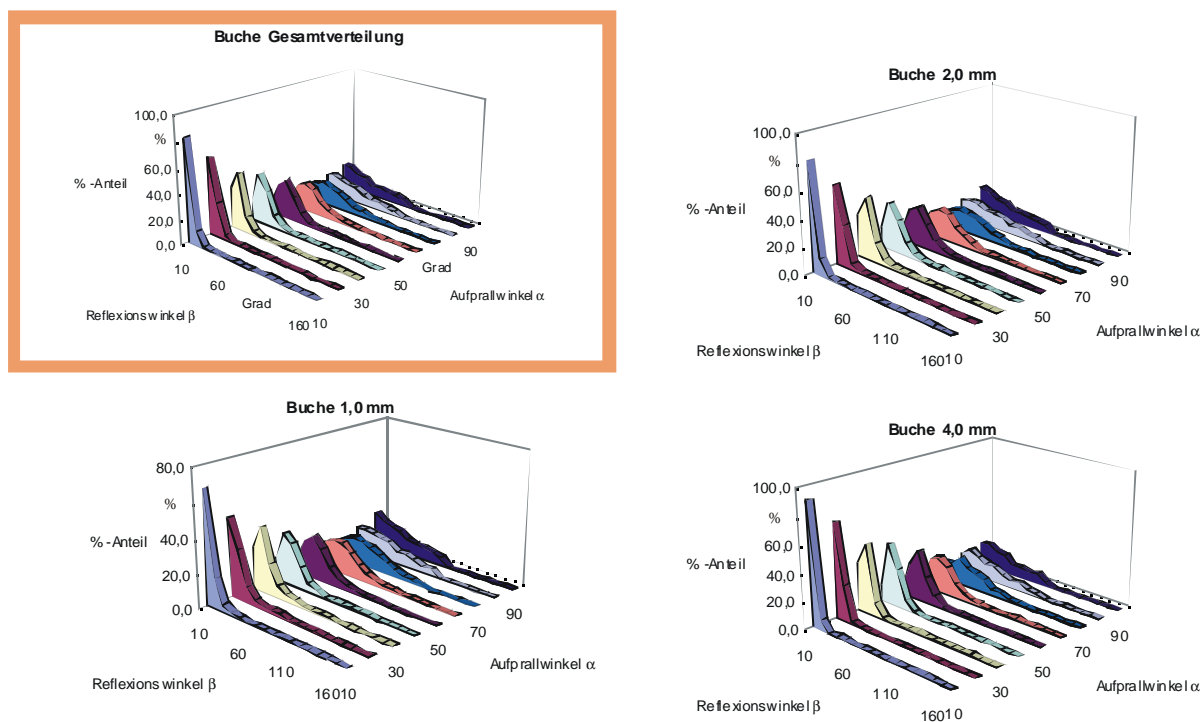


Bild 7.6: Reflexionswinkel verschiedener Spangrößenklassen und der Gesamtmassenverteilung

Betrachtet man die Reflexion der Späne in Abhängigkeit vom Aufprallwinkel genauer, so können folgende Grundaussagen getroffen werden (Bild 7.7):

- Je größer der Aufprallwinkel der Späne, desto größer wird auch die Streuung des Reflexionswinkels.
- Im Bereich um 60° Auftreffwinkel liegt der maximale Reflexionswinkel der Späne.

Im folgenden Bild 7.7 (rechte Seite) sind die Reflexionswinkel der Maximalwerte jedes Winkelbereiches aufgetragen. Daraus lässt sich erkennen, dass der größte Reflexionswinkel immer zwischen 50° und 70° liegt, mit Ausnahme von MDF, bei dem kein Maximum eines Reflexionswinkels festgestellt werden konnte.

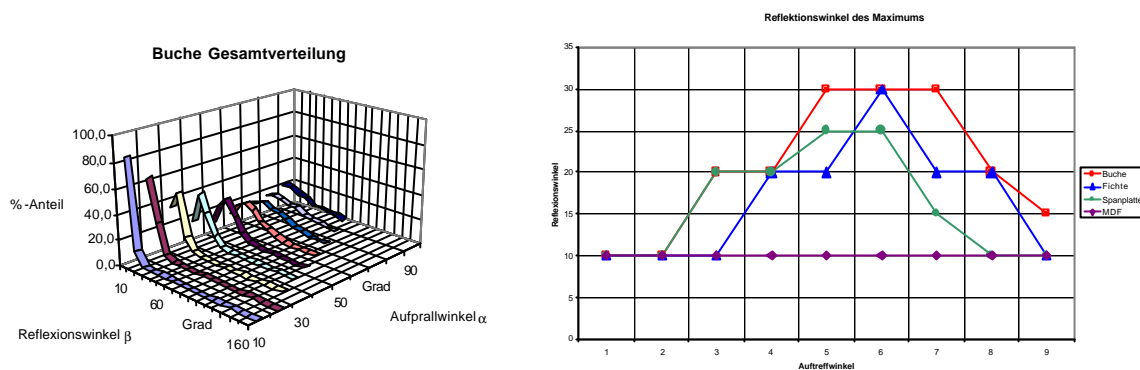


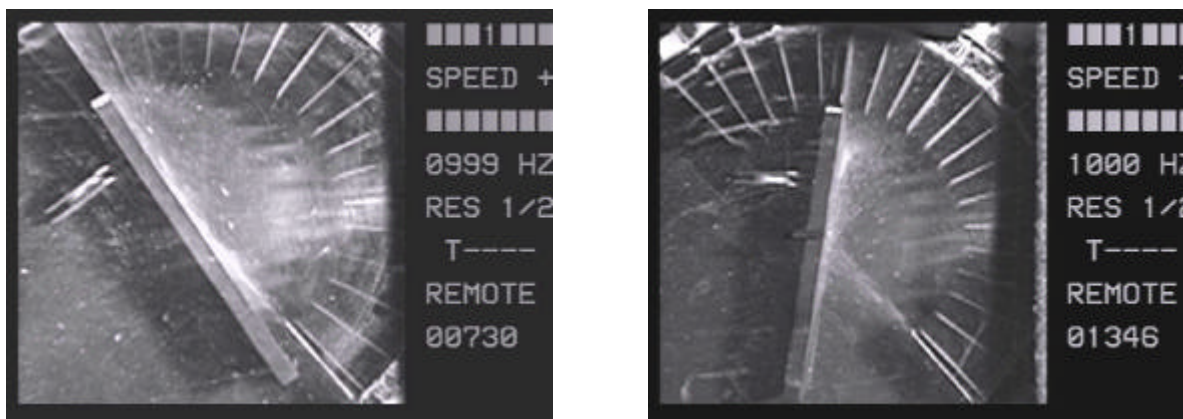
Bild 7.7: Reflexionswinkel

7.4.3 Praktische Auswirkungen für den Bau von Hauben

- Es sollte auf einen möglichst flachen Auftreffwinkel der Späne an der Haubenwand geachtet werden (geringe Streuung und geringer Reflexionswinkel).
- Ein Auftreffwinkel um 60° sollte vermieden werden, da hier der größte Reflexionswinkel der Späne liegt.
- Sehr große Auftreffwinkel ($<90^\circ$) sollten aufgrund der dort auftretenden großen Streuung ebenfalls vermieden werden. Ausnahme: MDF-Zerspanung, hier ändert sich die Streuung nur wenig, wenn der Auftreffwinkel größer wird.

7.4.4 Kontrollversuche

Betrachtet man sich die Reflexion, wie sie mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen wurde (Bild 7.8), so sieht der Vorgang sehr komplex aus und lässt starke Streuungen der Ergebnisse vermuten.

Bild 7.8: Reflexionsverhalten bei Spanplatte (links 10° -, rechts 50° -Auftrittswinkel)

Deshalb wurde ein weiterer Versuch bei 50° -Auftrittswinkel bei allen vier verwendeten Werkstoffen durchgeführt. Es ergab sich dabei eine erstaunlich geringe Streuung der Versuche. Im

folgenden Bild 7.9 sind die Versuche (50-1) und die jeweiligen Kontrollversuche (50-2) für alle Werkstoffe dargestellt.

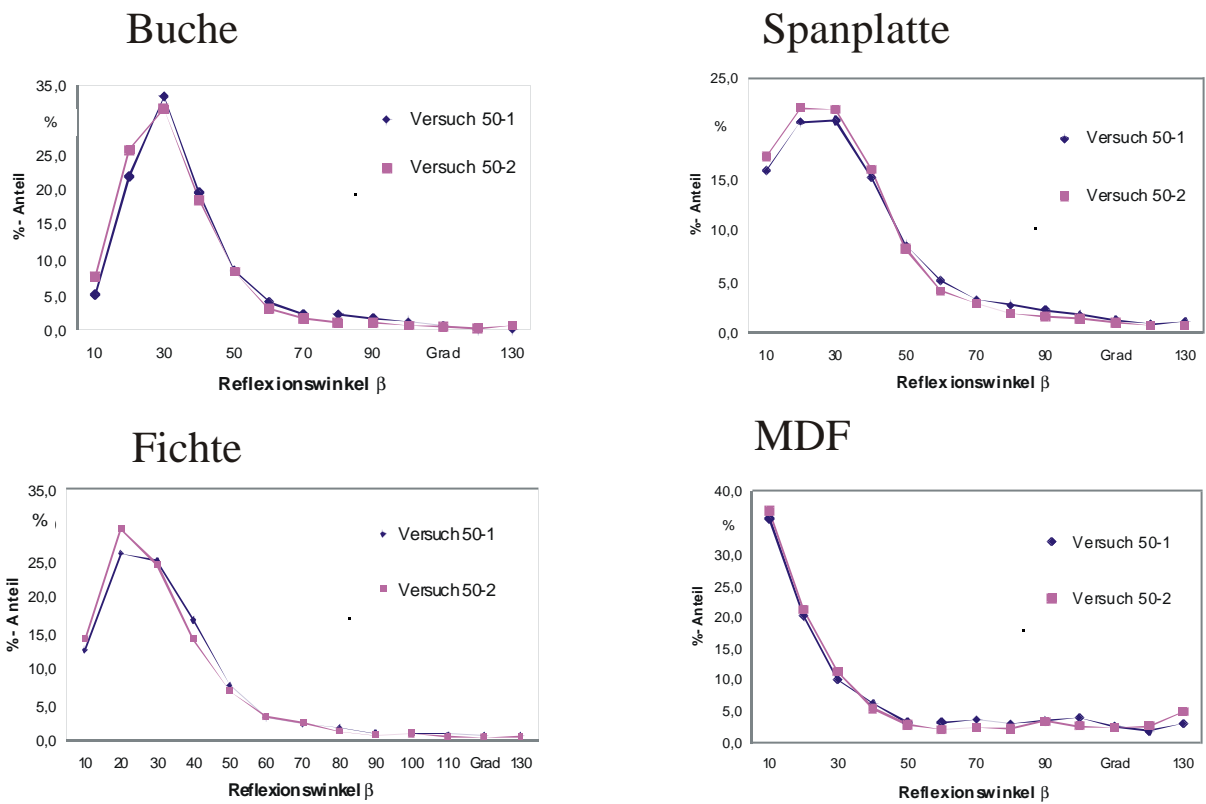


Bild 7.9: Kontrollversuche

8 Konzept der Programmierung

Die Umsetzung der Versuchsergebnisse in ein Programmmodul, welches die Berechnung von Absaughauben hinsichtlich ihres Späneerfassungsgrades erlaubt, bedingt eine modulare Aufteilung in verschiedene Teilprobleme. In Bild 8.1 sind die zu lösenden Einzelaufgaben anhand eines Beispiels dargestellt.

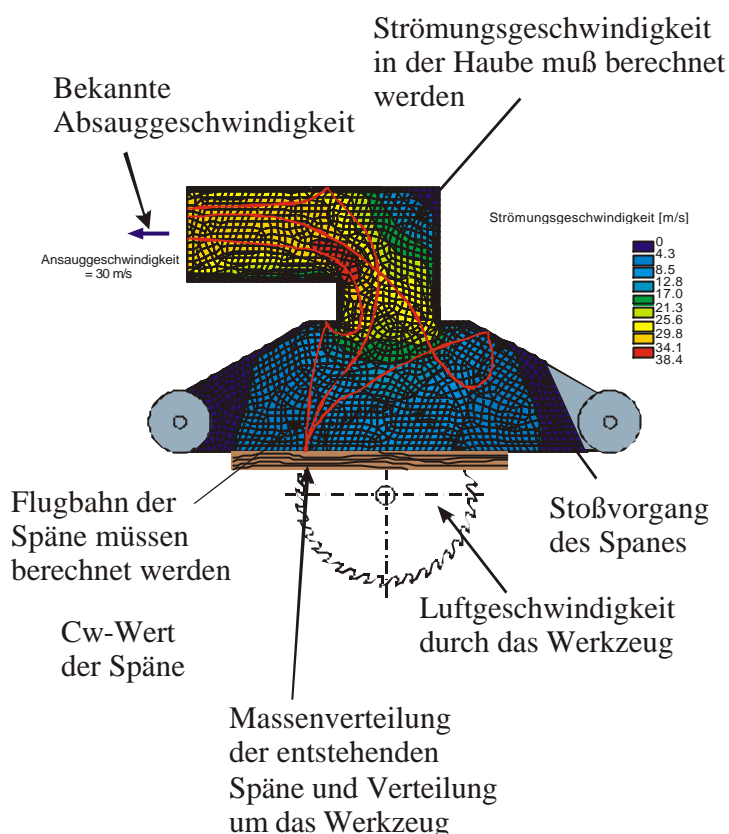


Bild 8.1: Teilaufgaben der Programmierung

8.1 Grundlage des Strömungsberechnungsprogramm

In ANSYS Flotran 5.7 ist die komplette Strömungsberechnung bereits realisiert. Für die Berechnung ist es notwendig, den Luftraum in der Absaughaube als FEM-Modell zu modellieren. Hierzu gibt es verschiedene Tools, um die Modellerstellung direkt in ANSYS bewerkstelligen zu können. Es ist jedoch auch möglich, Modelle von anderen CAD-Programmen über eine Schnittstelle zu importieren.

In das fertige Modell werden dann die notwendigen Randbedingungen eingebracht, um eine Strömungsberechnung der Haube durchführen zu können. Dies sind im einzelnen:

Absaugstutzen: Am Absaugstutzen muss die vorhandene Luftgeschwindigkeit bekannt sein. Ist sie nicht bekannt, müssen realistische Annahmen getroffen werden. In der Regel kann hier von einer vorgeschriebenen Luftgeschwindigkeit von seiten des Maschinenherstellers ausgegangen werden.

Öffnungen in der Haube: An allen Öffnungen der Haube (jedoch ohne Absaugstutzen) wird eine Druckdifferenz des Relativdrucks von 0 bar angegeben. Das Strömungsberechnungsprogramm errechnet an diesen Flächen dann die Einströmgeschwindigkeiten der Luft in Abhängigkeit von der Haubengeometrie.

Wandbedingungen: Alle Flächen des Modells, die die Haubenwände darstellen, werden mit der Haftbedingung an der Wand belegt (Geschwindigkeit in alle Achsrichtungen = 0).

Werkzeuginitiierte Luftgeschwindigkeit: Durch das Werkzeug, das wie ein Lüfter funktioniert, wird Luft in die Absaughaube geblasen, die von anderer Stelle angesaugt wird. Diese Luftgeschwindigkeiten lassen sich entweder berechnen oder aus Näherungstabellen entnehmen. Die im Rahmen dieses Vorhabens hierzu durchgeführten Untersuchungen sind noch weiter zu verifizieren.

Für das Modell sind an allen Außenflächen bestimmte Randbedingungen zu definieren. Dadurch entsteht ein bestimmtes System, dessen Gleichungen vom Strömungsberechnungsprogramm gelöst werden können.

8.2 Grundlage des Flugbahnberechnungstool

Es existiert ein Berechnungstool in der Prototypphase, das die Flugbahn eines Einzelpartikels auf der Grundlage der berechneten Strömung ermitteln und darstellen kann. Dabei werden bisher nur die Partikelmasse, der c_w -Wert einer Kugel, der Startpunkt sowie die Anfangsgeschwindigkeit und -richtung des Partikels verwendet. Das Berechnungstool kann die Flugbahn in verschiedenen Farben, je nach Geschwindigkeit des Partikels, anzeigen. Es sind nur einzelne Partikel berechnen- und darstellbar. Das Partikelberechnungstool bricht bei einem Wandkontakt des Partikels die Berechnung ab. Momentan bestehen noch Probleme, den Durchstosspunkt der Partikelflugbahn durch die Haubenwand exakt bestimmen zu können, da es möglich ist, dass die berechnete Partikelflugschrittweite vor allem in Wandnähe grösser ist als die Maschenweite des Modells. Dies führt dazu, dass der letzte berechnete Punkt im Mo-

dell nicht unbedingt in einer Randmasche liegen muss. Eine Darstellung der Flugbahn eines Partikels zeigt Bild 8.2.

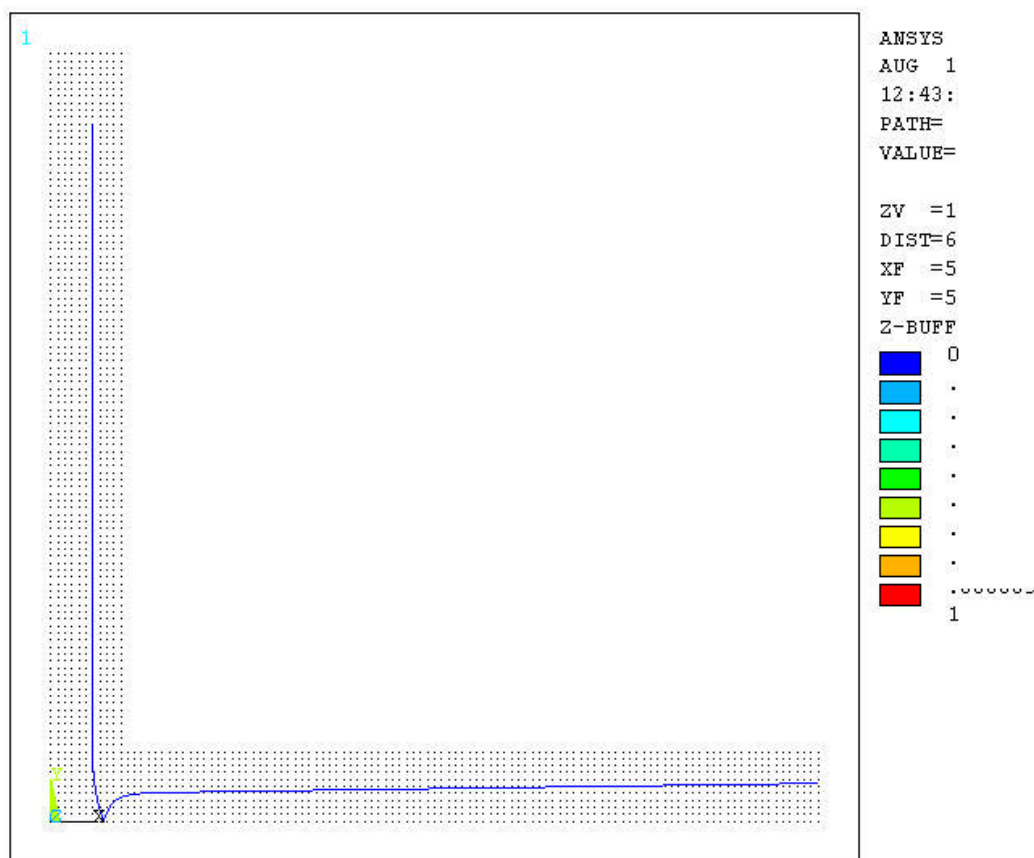


Bild 8.2: Berechnete Partikelflugbahn mit dem Flugbahnberechnungstool

8.3 Konzept der Programmierung

Im folgenden soll nun auf die einzelnen Punkte eingegangen werden, die als Programmmodule umzusetzen sind, damit die Versuchsdaten in das Programm eingebunden werden können, so dass auf ihrer Grundlage eine realistische Partikelberechnung stattfinden kann.

8.3.1 Spanmassenfaktor

Für die Berechnung einer Absaughaube können nicht alle theoretisch entstehenden Späne berechnet werden. Es muss eine Vereinfachung getroffen werden, um die Rechenzeit in vernünftigen Grenzen zu halten. Dies kann dadurch geschehen, dass nur eine exemplarische Anzahl an Spänen berechnet wird. Sinnvollerweise werden die zu berechnenden Späneklassen nach den Siebmaschenweiten der Siebanalyse gewählt, da in dieser Staffelung die Spangrößenverteilungen bei allen Versuchen bekannt sind.

Der Spanmassenfaktor wird jedem zu berechnenden Span zugewiesen. Er gibt den prozentualen Anteil des exemplarisch berechneten Spans an der Gesamtmasse der entstandenen Späne an. Das heisst, der Spanmassenfaktor ist immer eine Zahl zwischen Null und Eins. Der Spanmassenfaktor ändert sich, wenn nach einem Auftreffen des aktuell berechneten Spanes an eine Haubenwand mit mehreren neuen Spänen, gemäß der neuen Verteilung nach dem Wandstoß, weitergerechnet wird.

Das folgende Bild 8.3 zeigt an einer Schemadarstellung wie mit unterschiedlichen Spanmassenfaktor behaftete Späne von einem gemeinsamen Punkt aus starten.

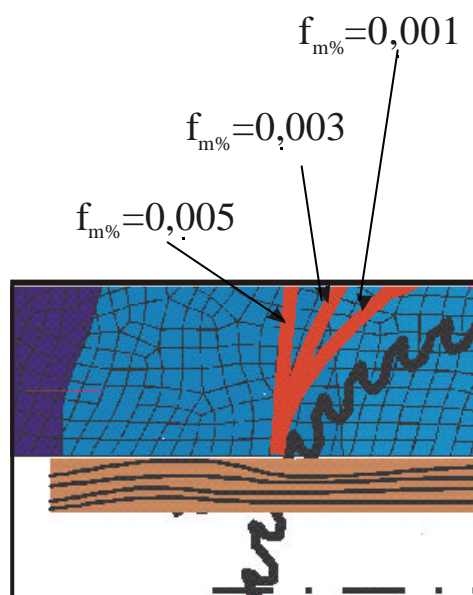


Bild 8.3 Startbedingungen Spanflug

Der Spanmassenfaktor wird weiter für die Darstellung der berechneten Ergebnisse benötigt. Dies wird in Kapitel 8.3.7 der Ergebnisdarstellung behandelt.

8.3.2 Startrichtung der Späne

Als Startrichtung der Späne wird vereinfachend die Richtung tangential zur Werkzeugaussenkantur angenommen. Dies ist nicht ganz korrekt, da Späne teilweise entlang der Schneide durch die auf sie einwirkende Fliehkraft aus dem Werkzeug ausgestossen werden. Sie haben somit eine, wenn auch kleine radiale Geschwindigkeitskomponente. Diese wird in dieser Festlegung vernachlässigt.

8.3.3 Startgeschwindigkeit der Späne (primäre Startpunkte)

Die Startgeschwindigkeit der Späne wird mit der Schnittgeschwindigkeit des Werkzeugs gleichgesetzt. Auch dies ist eine Vereinfachung. Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera haben jedoch ergeben, dass mit dem Gleichsetzen der Startgeschwindigkeit der Späne und der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs eine sehr gute Näherung gefunden wurde, die für alle Werkzeuge gültig ist.

8.3.4 Startpunkte der Späne

Für eine realistische Berechnung der Absaughaube muss den Spänen ein Startpunkt am Umfang des Werkzeugs zugewiesen werden. Die Startpunkte der Späne verteilen sich auf einen großen Umfangsbereich des Werkzeugs. Allerdings ist die Spanmasse, die das Werkzeug verläßt, nicht in allen Umfangsbereichen konstant. Diesem Umstand ist mit den oben beschriebenen Spanmassenfaktoren und mehreren unterschiedlichen Spänen, die an einem Startpunkt beginnen, Rechnung zu tragen. Problematisch für eine gute Berechnungsgrundlage ist die deutliche Abhängigkeit des Startpunktes von der Spanraumform. Da die Spanraumgeometrien zu vielfältig sind, um alle experimentell untersuchen zu können, ergibt sich hier ein Problem, das für die Ermittlung der realistischen Startbedingungen einer genaueren Untersuchung bedarf. Die Startbedingungen sind deshalb wichtig, da in den oft sehr klein dimensionierten Absaughauben keine großen Flugstrecken von den Spänen zurückgelegt werden. Stimmt dann der angenommene Startpunkt nicht mit dem realen Startpunkt der Späne überein, kommt es sehr schnell zu großen Abweichungen zwischen Realität und Simulation.

Aus den Untersuchungen des Auswurfzeitpunktes der Späne aus dem Werkzeug (siehe Kapitel 4) ergeben sich folgende grundlegende Erkenntnisse:

- Der Auswurf der Späne an den Stirnseiten eines Werkzeuges kann vernachlässigt werden (Schneiden am Umfang des Werkzeugs).
- Die Spangrößenverteilung bei Spanplatte und MDF ist über alle Winkelbereiche des Werkzeugumfangs näherungsweise konstant.
- Die Spangrößenverteilung der Massivhölzer ist in den Winkelbereichen nahe des Werkzeugeingriffs nicht konstant.
- Abhängig von der Spanraumform differiert das Maximum der ausgeworfenen Späne um 15°-30°.

Für die korrekte Berechnung der Startpunkte und der dazugehörigen Massenverteilungen für die exemplarisch berechneten Späne ist folgende Vorgehensweise sinnvoll.

1. Festlegen der Startpunkte um das Werkzeug
2. Berechnen der Spangrößenverteilung für die einzelnen Startpunkte, in Abhängigkeit vom Winkelbereich und Werkstoff
3. Berechnen der Massenverteilung im konkreten Startpunkt

Die Daten der exemplarisch zu berechnenden Späne werden mit ihren Startpunkten und Startbedingungen in eine Datei geschrieben, aus der sie nach und nach für die Berechnung wieder ausgelesen werden können.

8.3.5 Luftwiderstand der Späne

Der Luftwiderstand wirkt sich stark auf die Flugbahn der Partikel aus (siehe Bild 8.4). Die rote Flugbahn zeigt einen waagrechten Wurf ohne Luftwiderstand, die grüne Kurve einen Wurf mit Luftwiderstand. Der Luftwiderstand der Partikel muss also auch bei sehr kurzen Flugbahnen der Partikel in kleinen Absaughauben berücksichtigt werden, zumal die Luftwiderstandskraft die einzige Kraft ist, die den Span im freien Flug beeinflussen kann.

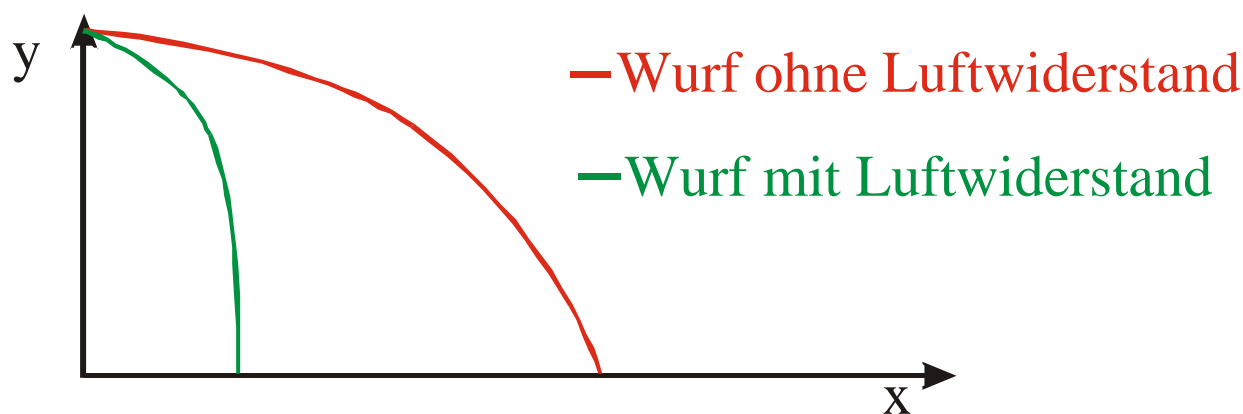


Bild 8.4: Waagrechter Wurf mit und ohne Luftwiderstand

Die Messungen des Luftwiderstandsbeiwertes c_w ergaben alle durchaus sinnvolle Meßwerte (Bild 8.5). Jedoch müssten für deren Umsetzung noch weitere Spanklassen geschaffen werden. Damit wird die notwendige Rechenzeit noch weiter gesteigert. Aus diesem Grund werden für die ersten Untersuchungen die c_w -Werte als konstante Mittelwerte angenommen. Damit wird der Luftwiderstand der Partikel zwar berücksichtigt, jedoch mit einem stark vereinfachten Wert.

In einer späteren Ausbaustufe kann der c_w -Wert dann für eine noch genauere Differenzierung der berechneten Späne verwendet werden, da bei den Untersuchungen der einzelnen Spangrößenklassen auch für die unterschiedlichen Austragsgeschwindigkeiten die jeweils gemittelten Partikelmassen mit bestimmt wurden (siehe Kapitel 5).

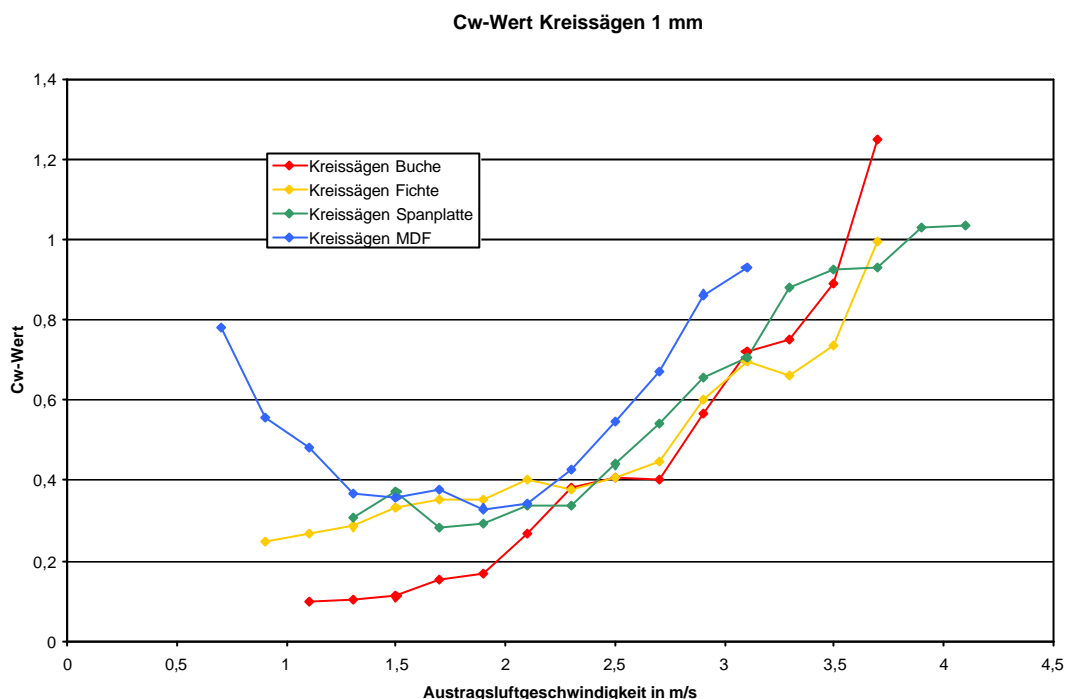


Bild 8.5: Gemessene c_w -Werte

8.3.6 Stoss der Späne an der Haubenwand (sekundäre Startpunkte)

Stossen die Partikel im Laufe der Flugbahnberechnung auf die Haubenwand, die dem Rand des Modells entspricht, so muss die Reflexion an dieser Stelle bestimmt werden. Für die Programmierung bestehen hier zwei verschiedene Möglichkeiten.

8.3.6.1 Echte Reflexion

Will man eine echte Reflexion am Modellrand programmieren, so muss der Geschwindigkeitsvektor senkrecht zur Modellgrenze in seinem Vorzeichen umgedreht und im Betrag entsprechend des Geschwindigkeitsverlustes beim Stoß reduziert werden. Der Betrag des Geschwindigkeitsvektors parallel zur Modellgrenze wird lediglich um den Geschwindigkeitsverlust beim Stoß reduziert. Problematisch bei der Programmierung einer echten Reflexion ist die Darstellung eines Auffächerns des Spänestrahles.

8.3.6.2 Unechte Reflexion

Bei der unechten Reflexion wird keine Reflexion des auftreffenden Spanes programmiert, sondern nur die Startbedingungen eines oder mehrerer neuer Späne bestimmt. Dadurch lassen sich Effekte wie das Auffächern eines Spänestrahles beim Wandkontakt simulieren. Bei der unechten Reflexion endet die berechnete Flugbahn an der Wand und wird in einen oder mehrere neue Startpunkte von Spänen überführt (Bild 8.6).

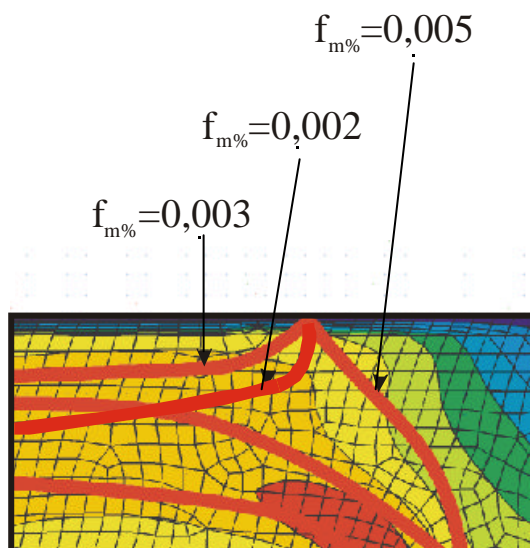


Bild 8.6: Überführung einer Flugbahn in mehrere neue Flugbahnen

Somit lassen sich nach den Untersuchungen in Kapitel 6 aus einem auftreffenden Span durch Aufteilen des Spanmassenfaktors auf verschiedene Winkelbereiche die Auffächerung des Spänestrahles beim Wandstoß und die entsprechende Massenverteilung in den unterschiedlichen Winkelbereichen simulieren. Dabei wird der Spanmassenfaktor des auftreffenden Spanes mit dem prozentualen Anteil der Späne des entsprechenden Winkelbereichs (Zahl zwischen 0 und 1) multipliziert und diese Daten mit den neuen, reduzierten Geschwindigkeitsbeiträgen und der neuen Flugrichtung in die Datei der Spänestartpunkte geschrieben. Der auftreffende Span ist aus der gleichen Datei zu löschen. Somit muss das Programm einfach alle Startpunkte und Startbedingungen der Späne, die in diese Datei geschrieben wurden, abarbeiten bis keine neuen Werte mehr vorhanden sind.

Es ist durch sinnvolle Beschränkungen der Startpunkteanzahl oder des Spanmassenfaktors die Anzahl der zu berechnenden Späne zu begrenzen, damit die Rechenzeit nicht übermäßig anwächst. Durch unkontrolliertes Anwachsen der noch zu berechnenden Späne kann das System sehr schnell überlastet werden. Trifft ein Span, wie in Bild 8.7 dargestellt, flach auf eine Wand auf und gleitet an ihr entlang, so ergeben sich sehr viele Kontaktstellen. Wenn sich nun

bei jedem Wandkontakt die Zahl der neu zu berechnenden Späne verfünffacht, wird die Zahl der insgesamt zu berechnenden Späne sehr schnell zu groß. Es wäre beispielsweise denkbar bei Aufprallwinkeln der Späne unter 5° nur mit einem neuen Span weiterzurechnen.

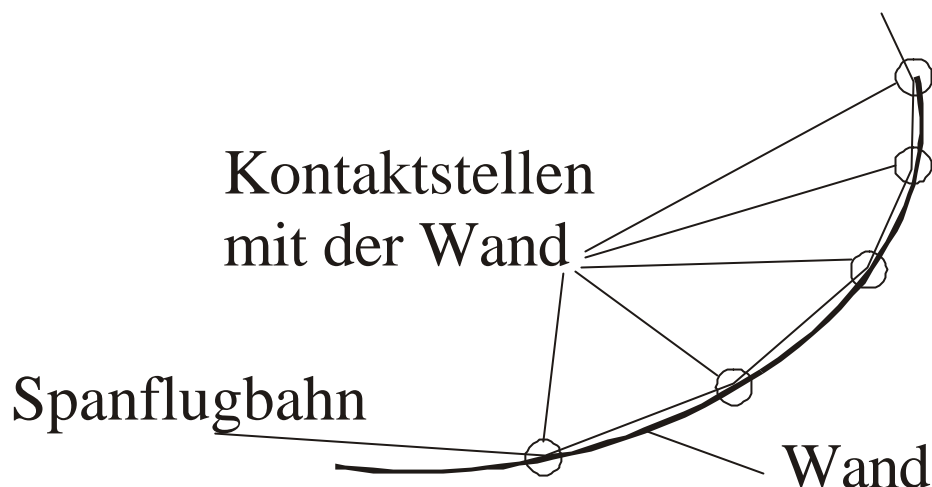


Bild 8.7: Mehrere Wandkontakte eines Spanes

8.3.7 Darstellung der Ergebnisse

Das bisher programmierte Modul kann die Flugbahn eines Partikel als Linie darstellen. Dadurch kann jedoch nur die Flugbahn einzelner Späne visualisiert werden. Die für eine realistische Dimensionierung einer Absaughaube notwendige Spananzahl ist zu groß, um die einzelnen Spanflugbahnen als Liniengrafik darzustellen. Es muss also eine Darstellungsform gefunden werden, die die Gesamtheit des Spanfluges für den Konstrukteur einer Absaughaube schnell und einfach visuell realisieren kann. Hierzu ist die Einfärbung der Netzmaschen vermutlich die geeignetste Darstellungsform (Bild 8.8).

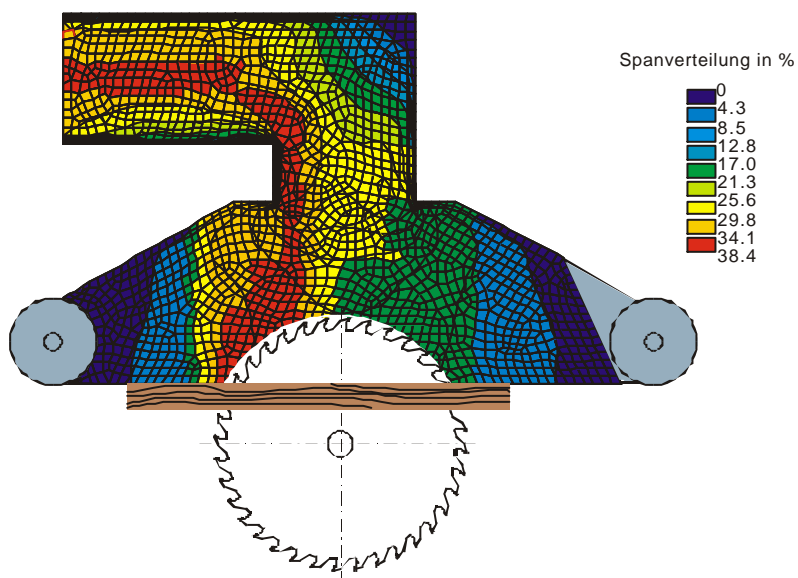


Bild 8.8: Mögliche Darstellung des Spanfluges

Zum Einfärben der Netzmaschen wird der Spanmassenfaktor verwendet. Dabei wird der Spanmassenfaktor des aktuell berechneten Spanes zu jeder Masche addiert, die er durchquert. Normalerweise muss sich bei einer wirbelfreien Spanabführung am Ende der Berechnung für jede Masche ein Wert zwischen 0 und 1 ergeben. Maschen die den Wert 0 haben, wurden von keinem Span und Maschen die den Wert 1 haben, wurden von allen Spänen durchquert. Es ist jedoch auch möglich, Maschen mit Werten über 1 zu erhalten, wenn Späne beispielsweise aufgrund von Wirbeln mehrmals eine Masche durchqueren, bevor sie abgeführt werden können.

Um eine eindeutige Zuweisung der Spanmassenfaktoren zu gewährleisten, sind die Schrittwerten der Flugbahnberechnung so klein zu wählen, dass in jede Masche, die durchquert wird, mindestens ein Berechnungsschritt fällt. Dazu ist die Schrittweite der Berechnung der Maschenweite anzupassen. Dies kann beispielsweise durch die Kontrolle der Maschenknoten geschehen. Befindet sich die neue Masche neben der alten, so müssen beide mindestens einen Knotenpunkt gemeinsam haben.

Andererseits muss aber auch sicher vermieden werden, dass der Spanmassenfaktor mehrmals der gleichen Masche zuaddiert wird. Dies kann beispielsweise dann geschehen, wenn die Schrittweite zu mehreren Schritten innerhalb einer Masche führt. Verhindert werden kann die mehrfache Addition des Spanmassenfaktors zur selben Masche, indem die Maschennummer zwischengespeichert wird. Eine Addition des Spanmassenfaktors wird nur zugelassen, wenn die zwischengespeicherte Maschennummer und die aktuell ermittelte Maschennummer nicht gleich sind.

Der Bediener muss, will er in der Tiefe des Modells die Spankonzentration ermitteln, die Ergebnissdarstellung mit verschiedenen Schnittebenen aufbrechen, um anhand dieser Schnitte beurteilen zu können, wie die Spanmassenverteilung im Innern des Modells berechnet wurde. Dies ist notwendig, da sich die Spanmassenfaktoren nur als dimensions- und richtungslose Zahlenwerte (ähnlich dem Absolutdruck bei einer Strömungsberechnung) darstellen lassen.

9 Programm

Die Berechnung von Absaughauben konnte am Beispiel mehrerer einfacher Absaughauben umgesetzt und demonstriert werden. Dabei mussten jedoch noch einige der Untersuchungen vernachlässigt werden, bzw. kommen beim ausgewählten einfachen Modell nicht voll zur Geltung. Auf diese Punkte wird im einzelnen eingegangen.

9.1 Musterhaube

Es wurde bewusst eine sehr einfache Haube ausgewählt, um nicht unnötigen Rechenaufwand in die reine Strömungsberechnung der Haube zu investieren. Weiter sollte die Haube schnell und einfach gebaut werden können, um die Ergebnisse der Rechnung überprüfen zu können. Als Musterhaube wurde schließlich die einfache Haube ausgewählt, die schon zur Erfassung der Späne bei den Versuchen zur Spangrößenverteilung (siehe Kapitel 3) verwendet wurde (Bild 9.1).



Bild 9.1: Musterhaube (Grundversion)

Die Strömung in dieser Musterhaube wurde mit ANSYS Flotran auf zwei verschiedene Weisen durchgeführt. Zum einen wurde die Strömung, die durch die Lüfterwirkung des Werkzeuges initiiert wird, vernachlässigt (Bild 9.2, linkes Teilbild), zum anderen wird diese berücksichtigt (Bild 9.2, rechtes Teilbild). Die Strömung durch das Werkzeug kann hier sehr einfach angesetzt werden, da das Versuchswerkzeug messtechnisch untersucht werden kann. Sind jedoch zum eingesetzten Werkzeug keine Strömungsmessungen vorhanden, was in der Regel

der Fall ist, dann ist diese werkzeuginduzierte Strömung, aufgrund der großen Vielfalt an unterschiedlichen Spanräumen, zum derzeitigen Stand der Arbeiten nur sehr schwer anzusetzen. Die Luftgeschwindigkeiten um das Werkzeug wurden durch ein Makro in ANSYS Flotran programmiert.

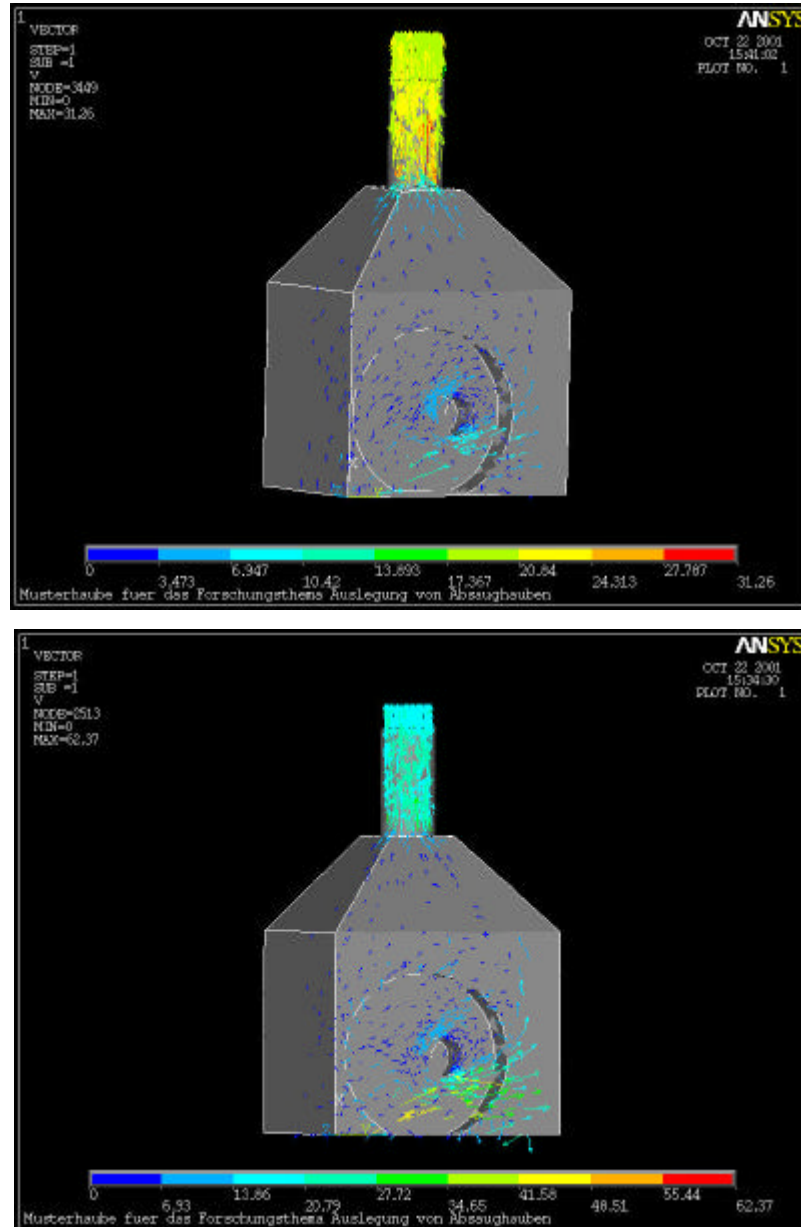


Bild 9.2: Strömungsberechnung mit und ohne werkzeuginduzierte Luftgeschwindigkeit (unterschiedliche Skalierung der Luftgeschwindigkeitsbereiche (Farben))

Es wird deutlich, dass bei der ausgewählten Musterhaube die Strömungsgeschwindigkeiten durch das Werkzeug nicht wesentlich sind. Die Luftgeschwindigkeiten in der Haube sind bei beiden Berechnungen im Absaugstutzen besonders hoch und fallen dann schnell auf kleine Werte ab. Dies ist besonders bei eng gestalteten Hauben, an welchen häufig Probleme mit der Späneerfassung auftreten, nicht der Fall. Hier ist auch die Berücksichtigung der werkzeugin-

duzierten Luftgeschwindigkeit wesentlich relevanter. Um diese korrekt ansetzen zu können, sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig.

9.2 Eingearbeitete Versuchsergebnisse

Im folgenden sollen die im Programm umgesetzten Untersuchungsergebnisse dokumentiert werden. Dabei wird auch auf die noch notwendigen Einschränkungen hingewiesen.

9.2.1 Spangrößenverteilung

Die Berechnungen wurden exemplarisch für die Bearbeitung von Spanplatte im Gegenlauf durchgeführt. Für die, über eine Zufallsfunktion hinterlegte, Spangrößenverteilung, wurden die ermittelten Spangrößenverteilungen (siehe Kapitel 3) verwendet.

9.2.2 Spanverteilung um das Werkzeug

Die Verteilung der Startpunkte der Späne um das Werkzeug wurden aus vergleichbaren Untersuchungen (siehe Kapitel 4) entnommen. Dabei ist wiederum zu beachten, dass für einen allgemeinen Einsatz hier zu wenige Daten über das Auswurfverhalten unterschiedlicher Spanräume in Werkzeugen vorhanden sind. Diese müssen über eine erweiterte Berechnung (Folgeantrag) in einer allgemeingültigeren Form ermittelt werden.

9.2.3 Berechnung der Partikelbahnen

Die Bewegungsgleichung der Späne wird durch folgende, in der Berechnung angewandte, gewöhnliche Differentialgleichung (Formel (9.1)) beschrieben:

$$\dot{V}_P = \frac{\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_F}{\mathbf{r}_P + c_A \mathbf{r}_F} g - 0,75 \frac{c_W \mathbf{r}_F}{d_P (\mathbf{r}_P + c_A \mathbf{r}_F)} (V_P - V_F) |V_P - V_F| \quad (9.1)$$

mit:

V_P : Partikelgeschwindigkeit

V_F : Fluidgeschwindigkeit

\mathbf{r}_P : Partikeldichte

\mathbf{r}_F : Fluiddichte

d_P : Partikeldurchmesser

c_W : c_W -Wert

c_A : Koeffizient der scheinbaren Masse

Die Differentialgleichung wird mit Hilfe des Euler-Verfahrens numerisch gelöst. Unter den vorgegebenen Anfangsbedingungen von Startpunkt und Startgeschwindigkeit liefert das Euler-Verfahren eine Trajektorie (Flugbahn) auf der sich der Span im Luftraum der Haube bewegt. Trifft der Span auf eine Haubenwand, so wird die Berechnung an dieser Stelle abgebrochen und ein neues Anfangswertproblem generiert.

Nachfolgend sind in den Bildern 9.3 und 9.4 die Trajektorien eines Spanes mit und ohne Berücksichtigung der werkzeuginduzierten Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass die Strömungsgeschwindigkeit, auch wenn sie in der Musterhaube gegenüber der Rohrströmung im Absaugstutzen sehr klein ist, einen sichtbaren Einfluß hat. Mit der Luftgeschwindigkeit durch das Werkzeug wird der Span mehr in Richtung des Absaugstutzens geblasen.

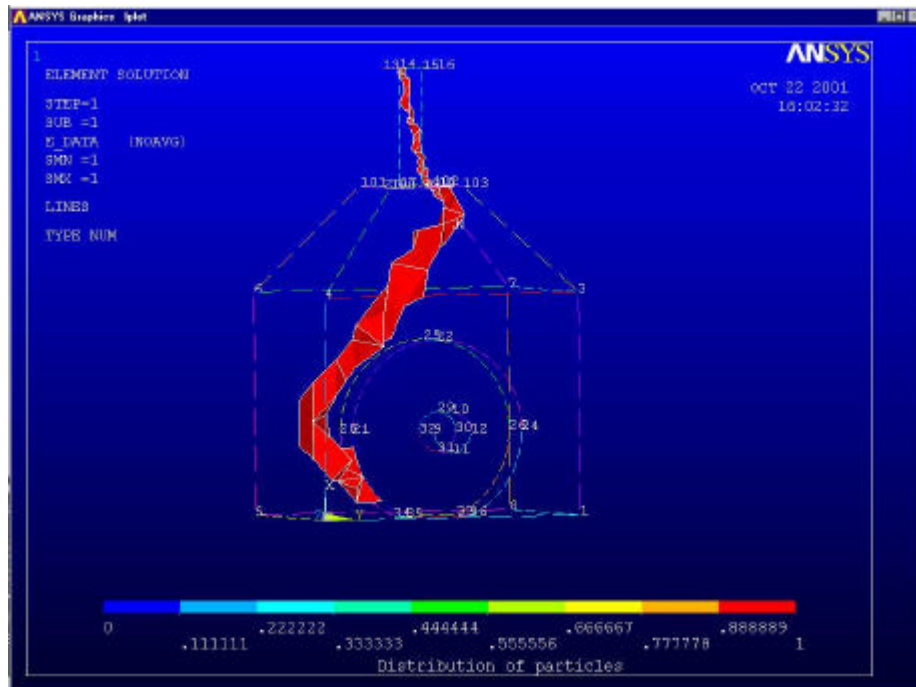


Bild 9.3: Trajektorie ohne werkzeuginduzierte Luftgeschwindigkeit

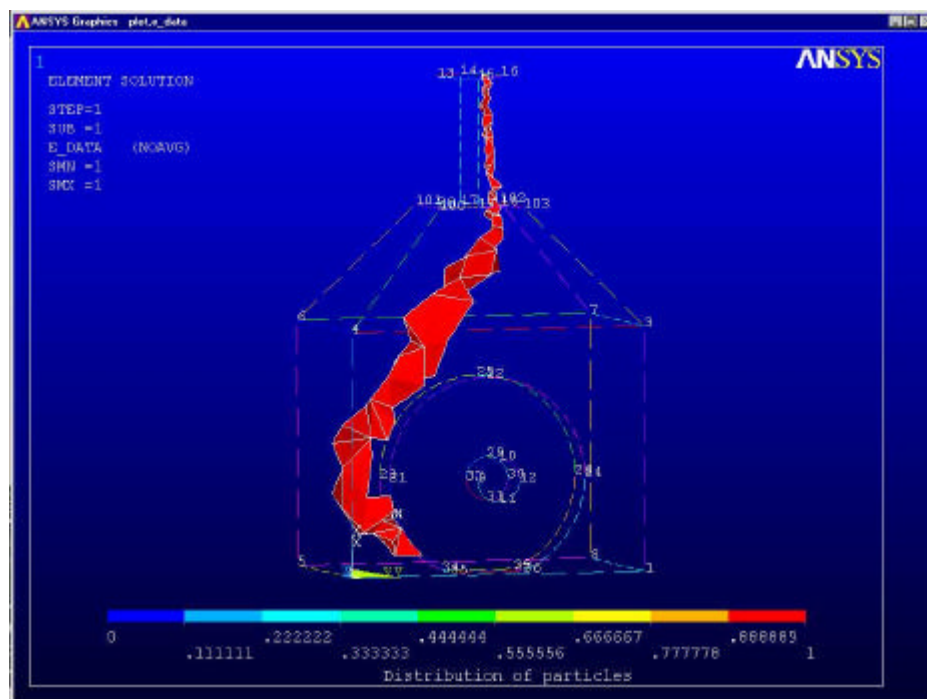


Bild 9.4: Trajektorie mit werkzeuginduzierter Luftgeschwindigkeit

Die Darstellung der Trajektorien in den Bildern 9.3 und 9.4 werden erzeugt, indem eine Rechnung mit nur einem Span durchgeführt wird. Dadurch werden nur die vom Span durchflogenen Netzelemente mit dem Spanmassenfaktor = 1 dargestellt. Diese lassen sich dann, wie geschehen, als Flugbahn eines Einzelspanes darstellen. Mit dieser Vorgehensweise kann recht einfach auf die vorhandenen Darstellungsmöglichkeiten von ANSYS zugegriffen werden. Dies erspart zeitaufwendige Programmierarbeit um eine Flugbahn aus einzelnen Punkten zu generieren. Die Flugbahndarstellung kann bei bedarf durch eine feinere Vernetzung des Problemgebietes verfeinert werden.

9.2.4 Generierung des Anfangswertproblems

Das Anfangswertproblem setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. So ist bekannt mit welcher Geschwindigkeit in x, y, und z-Richtung der Span an der Wand auftrifft. Weiter ist der Auftreffpunkt des Spanes (x- y, z-Koordinate) bekannt. Daraus müssen nun die neuen Startbedingungen für die weitere Berechnung der Spanflugbahn bestimmt werden.

Startpunkt:

Als Startkoordinaten wird der Auftreffpunkt des Spanes übernommen.

Startgeschwindigkeit:

Die Startgeschwindigkeit wird gleich der Aufprallgeschwindigkeit des Spanes auf die Wand angenommen. Dies entspricht nicht der Realität. Allerdings fehlen noch genaue Untersuchungen die hier einen besseren Ansatz ermöglichen. Weitere Untersuchungen sollen in einem Folgeantrag durchgeführt werden.

Rückprallwinkel:

Der Rückprallwinkel wird nach einer Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnet, die auf den Untersuchungen zum Rückprallverhalten der Späne basiert (siehe Kapitel 7). Der weitergehende Ansatz, an der Aufprallstelle mehrere Späne mit aufgeteilten Spanmassenfaktoren in unterschiedlichen Richtungen nach den Ergebnissen der Rückprallversuche starten zu lassen konnte im ersten Programm noch nicht verwirklicht werden. Hierzu fehlte die notwendige Programmierkapazität.

9.2.5 Berechnete Spananzahl

In der Berechnung wird immer eine Späneanzahl von 1000 Spänen angenommen, welche sich auf verschiedene Sektoren um das Werkzeug als Startpunkte verteilen. Diese Verteilung geschieht nach den ermittelten Versuchsergebnissen mit den entsprechenden Spangrößen und Spanmassenfaktoren. Der Wert Späneanzahl = 1000 wurde definiert. Ob und wie weit diese Anzahl reduziert werden kann, muss sich durch Vergleichsrechnungen noch erweisen.

9.3 Berechnungsergebnisse der Hauben

Um nachzuweisen, dass trotz einiger Einschränkungen, die weiterer Untersuchungen bedürfen, die Berechnung in der Lage ist, die realen Verhältnisse abzubilden, wurden verschiedene, auf der Grundhaube basierende Haubenvarianten, gebaut und mit den Berechnungsergebnissen verglichen. Aus diesen, nachfolgend beschriebenen Untersuchungen, ist erkennbar, dass die Erfassungsgrade der Berechnung und des Versuchs die gleiche Tendenz zeigen. Es lassen sich aber auch Schwächen der Berechnung, die in weiteren Untersuchungen eliminiert werden müssen, zeigen.

9.3.1 Haubenmodelle

Die Grundhaube wurde in 3 verschiedenen Stufen abgewandelt. Sie hatte einen runden Auslassstutzen und einen in z-Richtung unsymmetrischen Kegel an der Haubenrückseite (Bild 9.5). Bei ihr befindet sich das Werkzeug unterhalb der Auslassstutzebene.

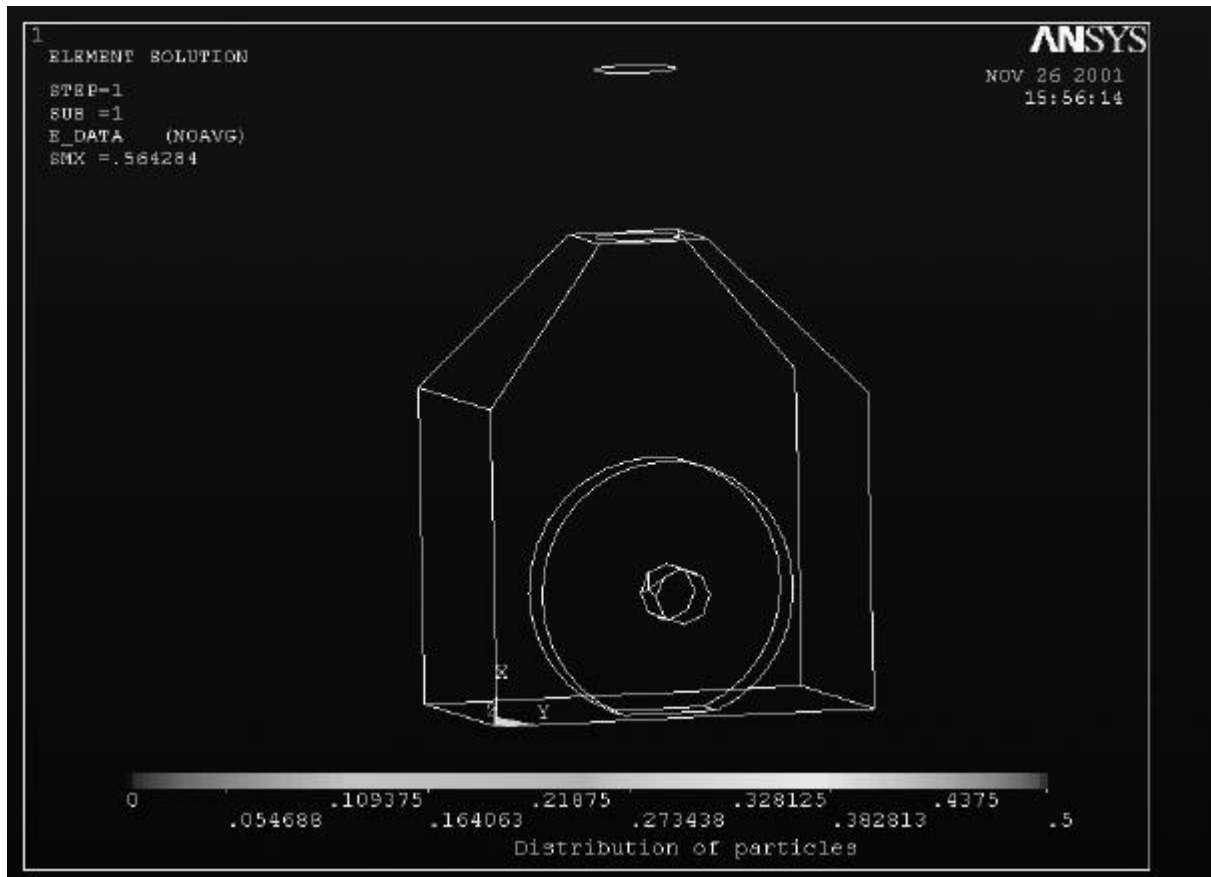


Bild 9.5: Grundhaube

Als erster Schritt wurde der Auslassstutzen an der Rückseite in die Mitte gerückt (Verschiebung in z-Richtung). Er blieb jedoch weiter als runder Rohrstutzen am Ende des Kegel erhalten (Bild 9.6). Dadurch sollten die Späne weniger an der Haubenrückseite reflektiert werden und leichter in den Stutzen finden.

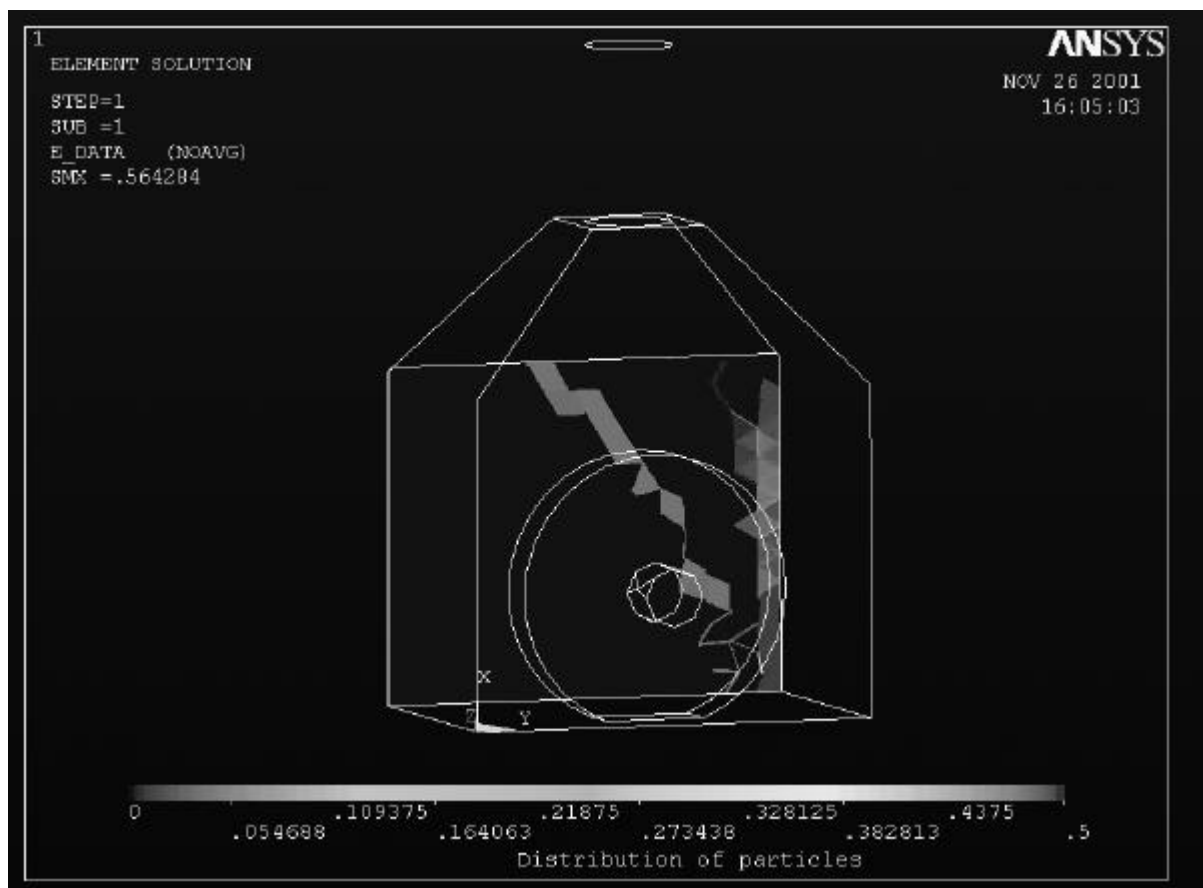


Bild 9.6: Erste Haubenvariation

Als nächster Schritt wurde der Auslassstutzen auf einen rechteckigen Querschnitt vergrößert (Bild 9.7). Dadurch wurde zum einen die abgesaugte Luftmenge aus der Haube vergrößert, zum andern fällt dadurch die Stirnfläche, an der Späne anstoßen und reflektieren werden können weg.



Bild 9.7: Zweite Haubenvariation

Da die Späne beim Zerspanungsprozess nur an einer Seite des Werkzeugs entstehen wurde vermutet, dass ein unsymmetrischer Auslass eine weitere Verbesserung der Späneerfassung bringt. Dies wurde in der dritten Haubenvariation umgesetzt (Bild 9.8).

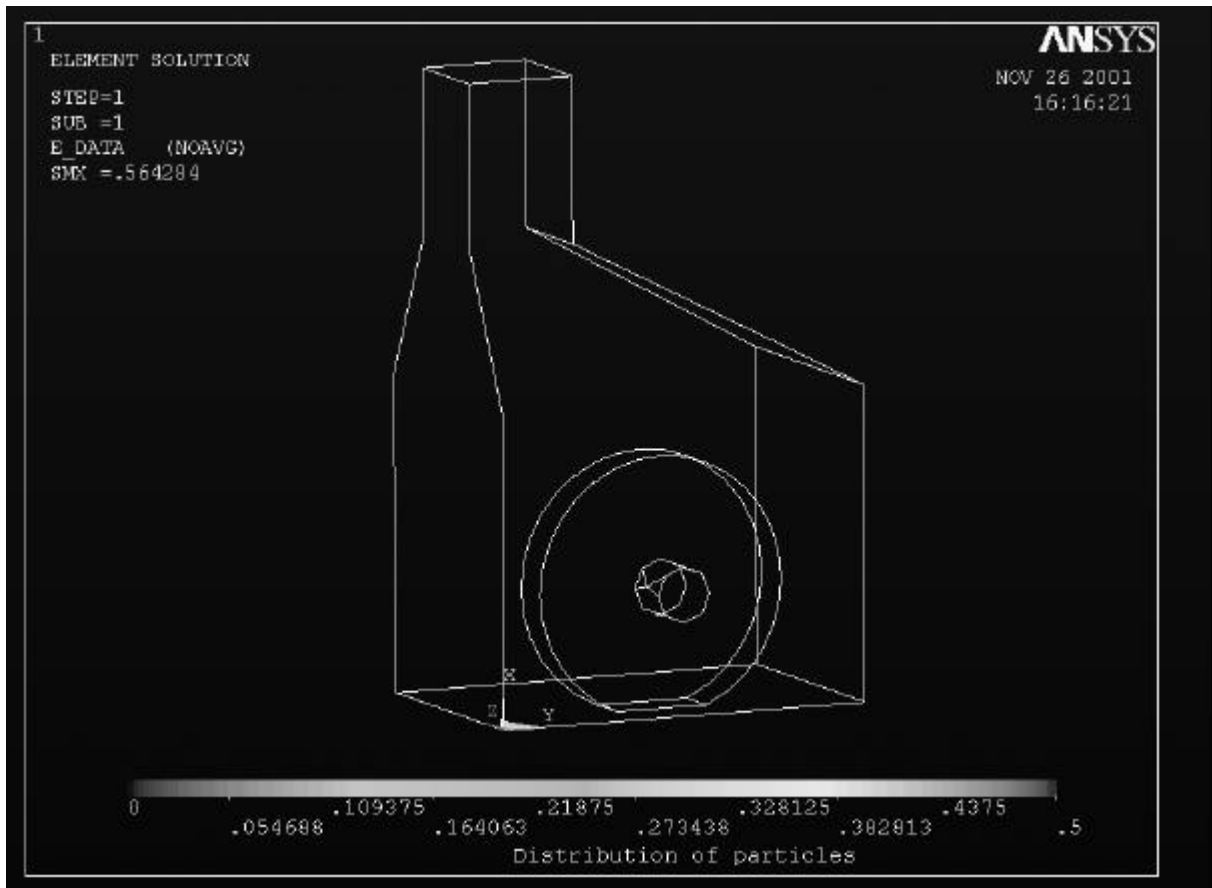


Bild 9.8: Dritte Haubenvariation

9.3.2 Darstellung der Berechnungsergebnisse

Als Berechnungsergebnis wird als Spanmasse, die ein Netzelement durchquert hat, dargestellt. Dabei werden die einzelnen Elemente in unterschiedlichen Farben eingefärbt. Die Farbskalierung ist bei allen nachfolgenden Bildern identisch und reicht von 0 % Spanmasse mit der Farbe blau bis zu 50 % Spanmasse mit der Farbe rot. Dabei werden Elemente, die von mehr als 50 % der Spanmasse durchquert wurden, grau dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse lassen sich in ANSYS als Film darstellen. Dabei läuft eine Schnittebene durch das Volumenmodell und vermittelt so einen guten plastischen Eindruck der Spanverteilung im Raum. Um eine einigermaßen vergleichbare Darstellung im Bericht zu erreichen, wurden einzelne Schnittdarstellungen nebeneinander kopiert (Bilder 9.9 bis 9.12).

Die Bildfolgen sind von links nach rechts und von oben nach unten zu lesen.

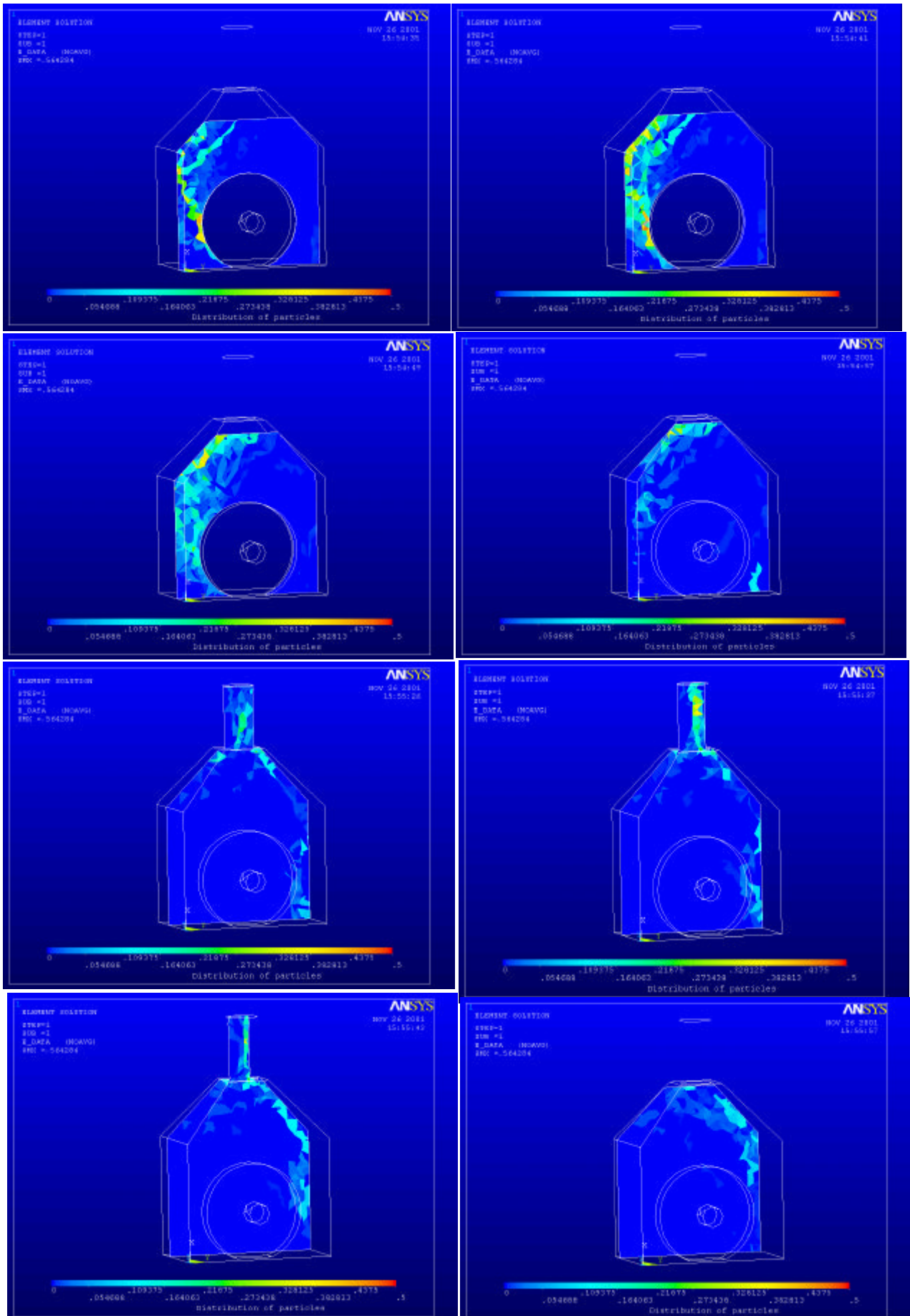


Bild 9.9: Berechnungsergebniss der Grundhaube

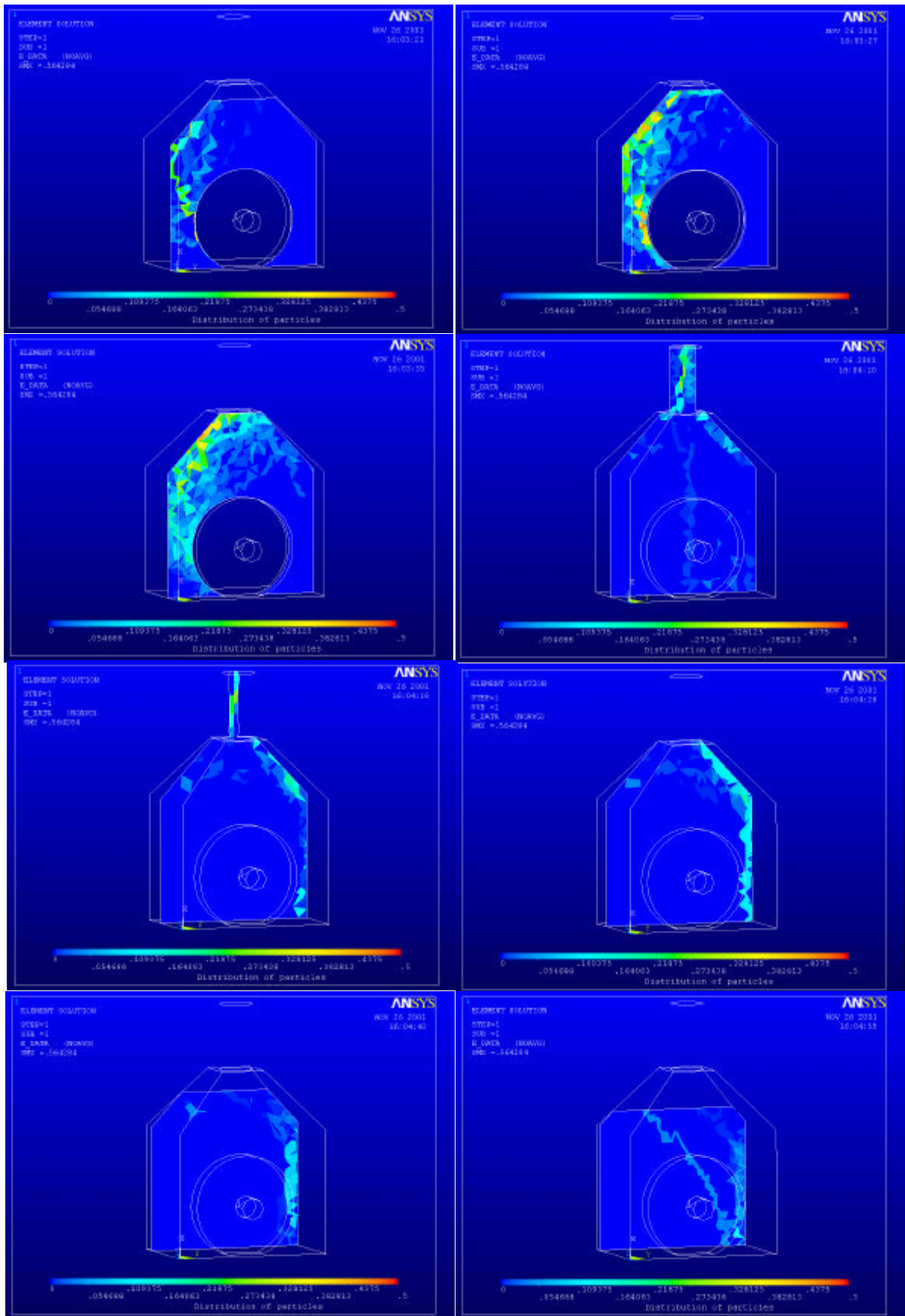


Bild 9.10: Berechnungsergebnis der ersten Haubenvariation

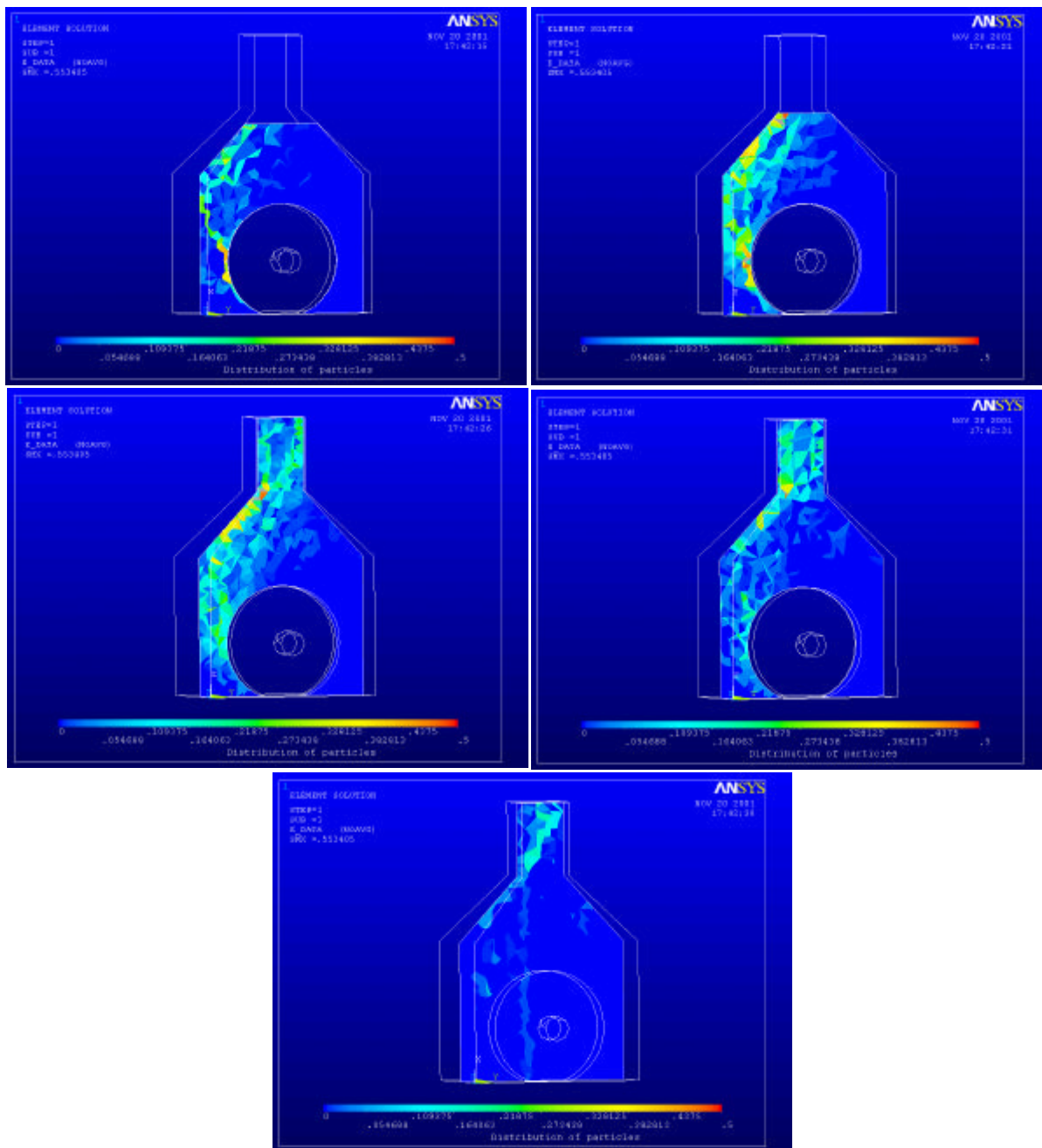


Bild 9.11: Berechnungsergebnisse zweite Haubenvariation

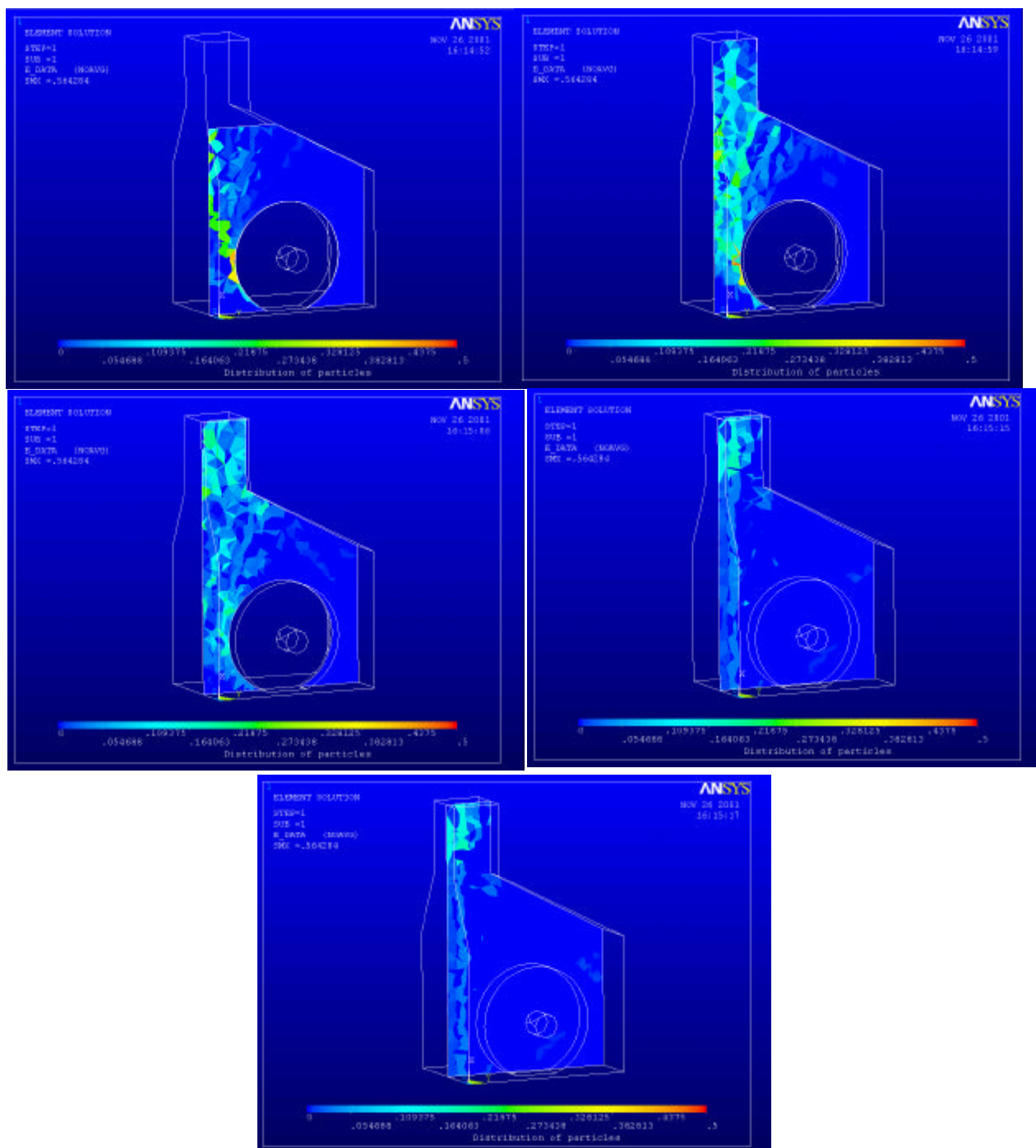


Bild 9.12: Berechnungsergebnisse der dritten Haubenvariation

Bei allen Berechnungen werden die Werkstücke von links im Gegenlauf zugeführt. Als Werkstoff wird Spanplatte verwendet. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt 20 m/min. In allen vier Darstellungen (Bild 9.9 bis Bild 9.12) läßt sich der Steuungswinkel mit welchem die Späne das Werkzeug verlassen an den hohen Spankonzentrationen auf der linken Werkzeugseite erkennen. Ebenfalls bei allen vier Hauben an den dort auftretenden hohen Spankonzentrationen zu erkennen ist, das Auftreffen der Späne auf die linke Haubenwand. Von dort werden die Späne wieder in den Haubenraum zurückgeführt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen beim unsymmetrischen Stutzenanschluss (Bild 9.9) einen niedrigeren Erfassungsgrad als beim symmetrischen Stutzenanschluss (Bild 9.10) bei welchem der Absaugstutzen näher an die Ebene in welcher sich das Werkzeug befindet heranrückt. Dies erscheint logisch, da die Späne weniger umgelenkt werden müssen.

In Bild 9.11 und Bild 9.12 wurden die runden Absaugstutzen, die eine senkrechte Fläche, an welcher Späne reflektieren können, durch einen eckigen Absaugstutzen ersetzt. Dadurch wird auch der Volumenstrom aus der Haube größer. Es ergibt sich dadurch ein deutlich höherer berechneter Erfassungsgrad. Es wurde angenommen, dass eine Verschiebung des Absaugstutzens in Richtung der Zerspanungsstelle den Erfassungsgrad der Haube weiter erhöht. Dieser These widerspricht das berechnete Erfassungsergebniss. Es wird beim symmetrisch angeordneten eckigen Absaugstutzen ein um 5 % höherer Erfassungsgrad berechnet. Dies ergibt sich hauptsächlich aus der Streuung der Partikel um das Werkzeug. Dadurch gelangen Späne direkt auf die flache Schräge neben dem Absaugstutzen. Die Luftgeschwindigkeit in der Haube ist hier nicht in der Lage die Späne zurückzusaugen.

9.4 Versuchsanordnung

Alle zuvor beschriebenen Haubenvariationen wurden in Plexiglas gefertigt und auf einer Tischfräsmaschine untersucht (Bild 9.13). Dabei wurden alle Hauben an einen Hochdrucksauger der Fa. SE angeschlossen. Die Strömungsgeschwindigkeit im Absaugstutzen wurde nach Vorgabe der Rechnung durch Falschlufthöffnungen im Absaugschlauch auf durchschnittlich 20 m/s eingestellt. Bearbeitet wurde die Schmalseite einer beschichteten, 19 mm dicken Spanplatte mit 2 mm Zustelltiefe im Gegenlauf. Die von Hand geführte Vorschubgeschwindigkeit lag bei ca. 20 m/min. Der Erfassungsgrad wurde durch Wiegen des Werkstücks vor und nach der Bearbeitung, sowie durch auswiegen der erfassten Späne im Sauger ermittelt.



Bild 9.13: Versuchsanordnung

9.5 Vergleich der Messungen mit den Berechnungen

Die Tabelle im folgenden Bild 9.14 zeigt die berechneten und die gemessenen Erfassungsgrade.

Haubentyp:	Berechneter Erfassungsgrad:	gemessener Erfassungsgrad:
Haube 1: runder Stutzen, asymm. Kegel	55,7%	76,9%
Haube 2: runder Stutzen, symm. Kegel	63,0%	76,4%
Haube 3: eckiger Stutzen, symmetrischer Aufbau	97,0%	77,5%
Haube 4: eckiger Stutzen auf eine Haubenseite verschoben	92,3%	72,6%

Bild 9.14: Vergleich der gemessenen und der berechneten Erfassungsgrade

Beide Hauben mit runden Absaugstutzen zeigen in der Berechnung einen deutlich zu niedrigen Erfassungsgrad. Dies liegt in erster Linie an der bisher in der Berechnung nicht berücksichtigten Reduktion der Spangeschwindigkeit beim Aufprall auf eine Haubenwand. Bild 9.15 zeigt dies sehr eindrucksvoll an einer einzelnen Trajektorie. Hier trifft der Span auf die kleine Stirnfläche, die sich durch den Anschluss des kreisrunden Rohres an den rechteckigen Haubenkegel ergibt. Dabei wird der Span wieder zurückgeworfen und verlässt den Haubenraum an der Vorderseite der Haube. In den meisten Fällen wird bei solch einem Stoss mit der Haubenwand jedoch soviel kinetische Energie absorbiert, dass der Span durch die dort herrschende recht hohe Luftgeschwindigkeit trotzdem erfasst werden kann. Dieses Problem muss mit weiteren Untersuchungen noch näher untersucht werden (siehe Folgeantrag).

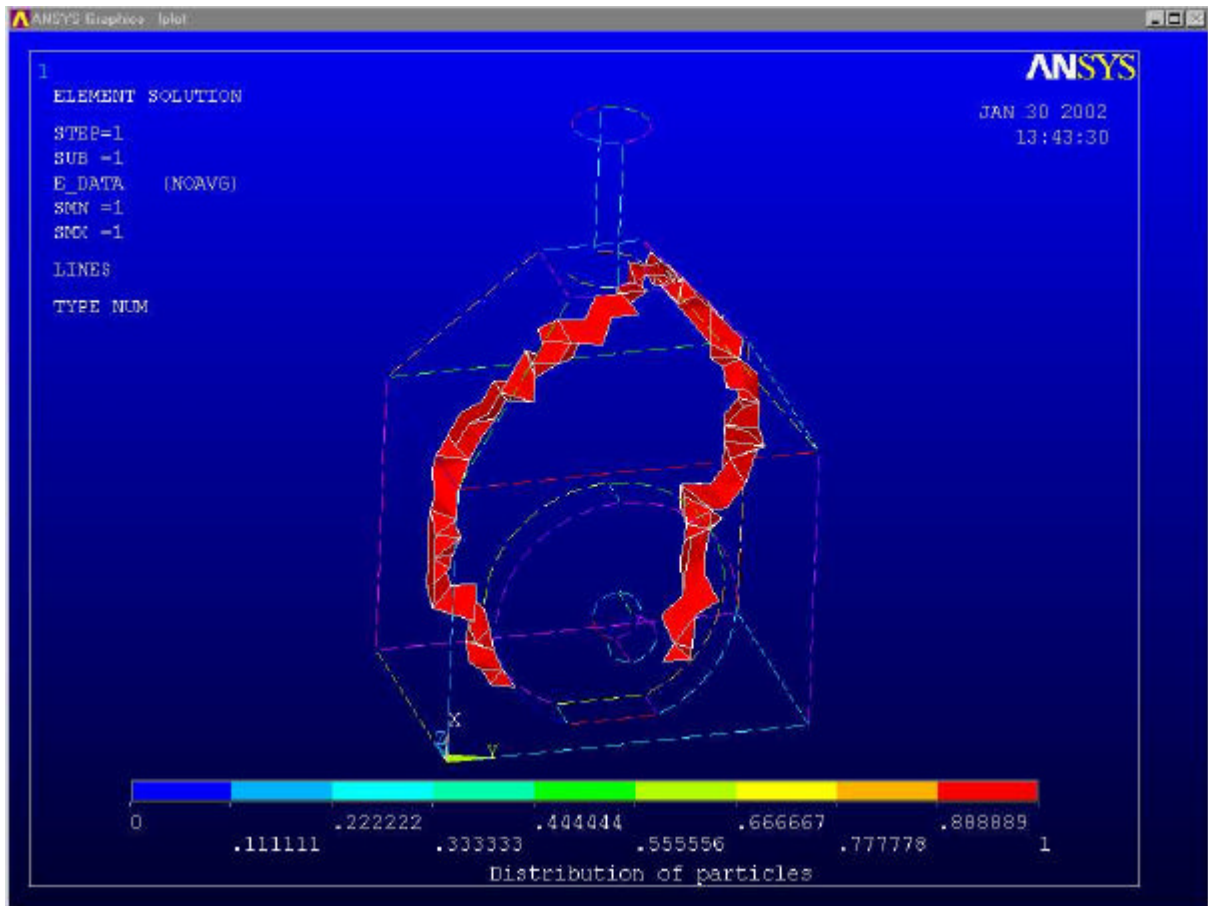


Bild 9.15: Spanflugbahn eines aus der Haube zurückreflektierten Spanes

Bei den beiden Hauben mit quadratischem Querschnitt des Absaugstutzens ergibt sich, obwohl die Berechnungsergebnisse um ca. 20 % zu hoch ausfallen, eine sehr interessante Tendenz. Allgemein wurde die unsymmetrisch gestaltete Haube als die Haube mit dem höheren Erfassungsgrad eingeschätzt. Dies bewahrheitete sich jedoch nicht. Die symmetrisch aufgebaute Absaughaube hatte, sowohl in der Simulationsrechnung als auch in der anschließenden Messung, einen um ca. 5 % höheren Erfassungsgrad. Dies erscheint dann logisch, wenn man bedenkt, wann die Späne das Werkzeug verlassen. Die Erfahrung des Konstrukteurs täuscht hier sehr leicht, da in der Einschätzung fast ausschließlich die Lage der Zerspanungsstelle berücksichtigt wird. An diesem Beispiel läßt sich sehr schön zeigen, wie einige durchgeführte Rechnungen das Verständnis für die gesamten Zusammenhänge beim Konstrukteur erweitern und dessen Einschätzungsvermögen für Hauben mit gutem Erfassungsgrad fördern können.

10 Zusammenfassung

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben "Auslegung von Absaughauben mittels Simulationsrechnung" wurden wichtige Grundlagen für die Berechnung des Erfassungsgrades mittels FEM-Rechnung gelegt. So konnten die Spangrößenverteilungen der Späne bei MDF, Spanplatte und der Massivhölzer Fichte und Buche in Abhängigkeit von der mittleren Spannungsdicke ermittelt werden. Auch wurden Untersuchungen zur Ermittlung des c_w -Wertes und des Reflexionsverhaltens beim Auftreffen des Spänestrahles auf eine feste Wand durchgeführt. Diese Ergebnisse können mit gutem Erfolg in die Berechnung einbezogen werden.

Schwieriger gestaltet sich die Beurteilung der Lüfterwirkung des Werkzeugs und des Auswurfzeitpunktes der Späne aus dem Werkzeug. Beide hängen stark vom Spanraum des Werkzeugs ab. Da die Formenvielfalt der verwendeten Spanräume jedoch so groß ist, dass eine einfache Klassifizierung nicht mehr möglich ist, muss hier ein weiterer Berechnungsschritt eingeführt werden (Berechnung des Spanraumes als drehendes System), der sich auf weitere Untersuchungen der Spanentstehung und der Lüfterwirkung gründet. Hierzu wurde ein Folgeantrag gestellt.

Insgesamt konnte durch das Forschungsvorhaben nachgewiesen werden, dass eine Berechnung von Absaughauben zur Bestimmung ihres Späneerfassungsgrades prinzipiell möglich ist. Durch weitere Untersuchungen ist eine gute Berechenbarkeit von Absaughauben erreichbar.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Weiss, E.: Untersuchung der Einflußgrößen auf die Bestimmung der Staubemission bei der maschinellen Holzbearbeitung. Universität Stuttgart, Dissertation 1998
- [2] Czichos, H.: Hütte, Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Berlin, Heidelberg, New York, London, Tokyo: Springer-Verlag, 1991
- [3] Gersten, K.: Einführung in die Strömungsmechanik. Düsseldorf: Bertelsmann Universitätsverlag, 1974
- [4] Lösch, R.: Untersuchungen zur flexiblen Erzeugung von 3D-Rechnernetzen zur Strömungsberechnung beim Vorentwurf einfacher Konfigurationen. Universität Stuttgart, Dissertation, 1997
- [5] Herr, H.: Mechanik der Flüssigkeiten und Gase, Technische Physik. Wuppertal: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co., 1980
- [6] Welschhof, G.: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen. VDI Forschungsheft 492, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1962
- [7] Siegel, W.: Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung körniger Stoffe in wasgerechten Rohren und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze. VDI-Forschungsheft 538, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1970
- [8] Flatow, J.: Untersuchungen über den pneumatischen Fördervorgang in lotrechten Rohrleitungen. VDI-Forschungsheft 555, Düsseldorf: VDI-Verlag 1973
- [9] Weidner, G.: Grundsätzliche Untersuchungen über den pneumatischen Fördervorgang, insbesondere über die Verhältnisse bei Beschleunigung und Umlenkung. In: Forschung 21. Bd. (1955) Nr. 5, S. 145 – 153
- [10] Möller, H.: Untersuchungen über den pneumatischen Transport von Feinstaub in einer horizontalen Förderleitung. Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, 1964
- [11] Bohnet, M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Absetzen, das Aufwirbeln und den Transport feiner Staubteilchen in pneumatischen Förderleitungen. VDI-Forschungsheft 507. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965
- [12] Sawatzki, O.: Über den Einfluß der Rotation und der Wandstöße auf die Flugbahn kugelliger Teilchen im Luftstrom. Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, 1961
- [13] Weber, M.: Kompressible Rohrströmung von Gas-Feststoffgemischen bei hohen Materialbeladungen. Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, 1966
- [14] Ahland, E.O.: Strömungsvorgänge im vertikalen feststoffbeladenen Förderrohr mit austretendem Freistrah. Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1966

-
- [15] Mühle, J.: Partikelbewegung in Strömungen mit rotationssymmetrischer Geschwindigkeitsverteilung. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1969
- [16] Piplies, L.: Experimentelle Untersuchungen an Gas-Feststoff-Rohrströmungen. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1970
- [17] Siegel, W.: Pneumatische Förderung. 1. Aufl. Würzburg: Vogel-Verlag, 1991
- [18] Weber, M.: Strömungs-Fördertechnik. Mainz: Otto Krausskopf-Verlag, 1974
- [19] Barth, W.: Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen. In: Chemie-Ingenieur-Technik 30 (1958), Nr. 3, S. 171-180
- [20] Molerus, O.: Zur Beschreibung feststoffbeladener Strömungen. In: Chemie-Ingenieur-Technik 49 (1977), Nr. 12, S. 945-955
- [21] Adam, O.: Feststoffbeladene Luftströmungen hoher Geschwindigkeit. In: Chemie-Ingenieur-Technik 29 (1957), Nr. 3, S. 151-159
- [22] Muschelknautz, E.; Krambock, W.: Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit feinkörnigen Produkten. In: Chemie-Ingenieur-Technik 41 (1969), Nr. 21, S. 1164-1172
- [23] Dehning, C.: Numerische Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Partikeln in turbulenter Kanalströmung bei hohen Reynoldszahlen. Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1993
- [24] Meyer, H.: Allgemeine Gesetzmäßigkeiten bei der pneumatischen Förderung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 1959
- [25] Vossen, A.: Pneumatische Förderung im vertikalen Abwärtsstrom und im vertikalen abwärts gerichteten Freistrah. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1967
- [26] Hermann, J.: Staub in turbulenter Gasströmung – Staubverteilung und messtechnische Probleme. Technische Universität München, Dissertation, 1976
- [27] Karman, T.V.; Rubach, H.: Über den Mechanismus des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes. In: Physikalische Zeitschrift 13 (1912)
- [28] Gasterstädt, J.: Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorgangs. In: Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens. (1924), Nr. 265
- [29] Möller, W.: Experimentelle Untersuchungen zur Hydrodynamik der Kugel. In: Physikalische Zeitschrift 39 (1938), Nr. 2, S. 57-80
- [30] Mohr, E.: Der Beschleunigungswiderstand bewegter Körper in einer Flüssigkeit. In: Zeitschrift angewandter Mathematik und Mechanik 32 (1952), Nr. 2/3, S. 87-88

-
- [31] Kürten, H; Raasch, J; Rumpf, H.: Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfeld konstanter Geschwindigkeit. In: Chemie-Ingenieur-Technik 38 (1966), S. 941-942
- [32] Müller, W.: Zur Theorie der Kräfte bei der beschleunigten Bewegung eines Körpers in der reibungslosen Flüssigkeit. In: Ingenieur Archiv 14 (1944), Nr. 5, S. 332-350
- [33] Neumark, S.: Beschleunigungswiderstand geradlinig bewegter Körper in einer idealen Flüssigkeit. In: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 16 (1936), S. 117-120
- [34] Schmiedel, J.: Experimentelle Untersuchungen über die Fallbewegung von Kugeln und Scheiben in reibenden Flüssigkeiten. In: Physikalische Zeitung 29 (1928), S. 593-610
- [35] Wieselberger, C.: Neuere Feststellungen über die Gesetze des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes. In: Physikalische Zeitschrift 22 (1921), Nr. 11, S. 321-328
- [36] Schauki, N.: Der Widerstand von Zylinder und Kugel bei stationären Strömungsverhältnissen. Universität Karlsruhe, Dissertation, 1972
- [37] Schuchart, P.: Widerstandsgesetze für den pneumatischen Feststofftransport in geraden Rohren und Rohrkrümmern. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1968
- [38] Barth, W.: Die Bestimmung des Luftwiderstandes von schwebenden staubförmigen Teilchen. In: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. 25/27 (1947), Nr. 5/6, S. 157-159
- [39] Molerus, O.: Teilchenbewegung in einem pulsierenden Strömungsfeld. In: Chemie-Ingenieur-Technik 36 (1964), Nr. 11, S. 866-870
- [40] Molerus, O.: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit kugeliger Teilchen in einem vertikal pulsierenden Strömungsfeld. In: Chemie-Ingenieur-Technik 40 (1968), Nr. 11, S. 522-524
- [41] Müller, K.; Wessel, J.: Berechnung von Teilchenbahnen im Windsichter mit dem elektronischen Analogrechnern. In: Aufbereitungs-Technik (1963), Nr. 6, S. 235-242
- [42] Kalthoff, W.: Dynamische Eigenschaften von Zweiphasenströmen: Ein Simulationsansatz für Partikel in Flüssigkeiten. Universität Stuttgart, Dissertation, 1997
- [43] Muschelknautz, E.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht. VDI-Forschungsheft 476, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1959
- [44] Kerker, L.: Druckverlust und Partikelgeschwindigkeit in der Anlaufstrecke bei der vertikalen Gas-Feststoffströmung. Universität Karlsruhe, Dissertation, 1977

-
- [45] Dressler, M.: Ermittlung des Zusammenhangs zwischen theoretischem und realem Späneflug. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1996
- [46] Scheurich, H.: Ermittlung des Späneauswurfs aus dem Werkzeug und Dokumentation des Spanflugverhaltens im Spanraum. Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2000
- [47] Froschmeier, T.: Bestimmung des c_w -Wertes von Holzpartikeln in spanenden Bearbeitungsverfahren. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2001
- [48] Koch, S.: Bestimmung des Reflexionsverhaltens eines Spänestrahls an einer festen Wand. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2001