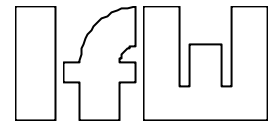


Universität Stuttgart
Institut für Werkzeugmaschinen
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. U. Heisel



Studienarbeit

cand. mach. Tilman Froschmeier

Matrikelnr.: 1762538

Bestimmung des c_w - Wertes von Holzpartikeln aus spanenden Bearbeitungsverfahren

Betreuer:

Dipl.-Ing. Martin Dressler

Stuttgart, Juli 2001

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

II Inhaltsverzeichnis

	Titelblatt	1
I	Aufgabenstellung	2
II	Inhaltsverzeichnis	3
III	Verwendete Formelzeichen und Einheiten	7
IV	Verzeichnis der Abbildungen	10
1	Einleitung	14
2	Stand der Technik	16
3	Versuchsaufbau	18
3.1	Sichtanalyse	18
3.2	Mögliche Sichtprinzipien	19
3.2.1	Sichtung durch freien Fall in ruhender Luft	20
3.2.2	Schwebesichtung	20
3.2.3	Wurfsichtung	22
3.2.4	Zentrifugalsichtung	22
3.2.5	Die Windsichtung	23
3.3	Auswahlkriterien und Auswahl des Sichtverfahrens	23
3.4	Aufbau der Versuchseinrichtung	24
3.5	Verfahrensschritte der Schwebesichtung	25
3.6	Der Ventilator	27
3.7	Die Luftzufuhr zum Sichter	27
3.7.1	Störungen bei der Luftzufuhr	28
3.7.2	Einbauten in der Luftzufuhr	28
3.8	Das Sichterrohr	30

3.8.1	Strömungsverhältnisse im Sichterrohr	30
3.8.2	Querschnittsverlauf des Sichterrohrs	32
3.8.3	Anhaften von Partikeln durch elektrostatische Aufladung	33
3.8.4	Meßstellen für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung	34
3.9	Späneabscheider	35
3.10	Frequenzumformer	37
4	Versuchsvorbereitung	38
4.1	Auswahl der Zerspanungswerkstoffe und Werkstücke	38
4.2	Auswahl der Zerspanungsverfahren	38
4.2.1	Verwendete Maschinen und Werkzeuge	40
4.2.2	Werkzeuge und Schnittdaten der Zerspanung	42
4.3	Erfassung der Späne	42
4.4	Auswahl der Aufbewahrungsmöglichkeit für die Spanproben	43
4.5	Feinjustierung und Aufnahme des Strömungsprofiles	44
4.5.1	Meßverfahren	44
4.5.2	Meßgerät zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung	45
4.5.3	Übersicht über die einsetzbaren Sondentypen	47
4.5.4	Ausgewählter Typ	48
4.5.5	Funktionsprinzip des thermischen Strömungssensor	48
4.5.6	Einsatzbedingungen des Sensors	49
4.5.7	Fehler beim Messen mit einem thermischen Kugelsensor	49
4.5.8	Allgemeine Fehler bei der Luftstrommessung	50
5	Versuchsdurchführung	51
5.1	Analyse der Korngrößenverteilung mittels Siebanalyse	51
5.1.1	Auswahl der optimalen Siebzeit	53
5.1.2	Masse und Schüttvolumen	55

5.1.3	Mögliche Fehlerquellen bei der Siebanalyse	56
5.1.4	Wiegen der Analysesiebe	58
5.1.5	Dokumentation der Siebergebnisse in einer Tabelle	58
5.2	Verfahren zur Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit	59
5.2.1	Festlegen der Spanmenge pro Versuch	61
5.2.2	Bestimmung der Sichtzeit einer Geschwindigkeitsstufe	62
5.2.3	Dispergieren des Aufgabengutes	63
5.2.4	Ermittlung der ausgetragenen Spanmasse je Geschwindigkeitsstufe	64
5.2.5	Die minimal untersuchbare Partikelgröße	64
5.3	Bestimmung der Spanmasse einzelner Späne	65
5.4	Bestimmung des zur Berechnung verwendbaren Spanquerschnitts	66
6	Theorie des Spanfluges	69
6.1	Einzelpartikel in der Rohrströmung	69
6.2	Am Partikel angreifende Kräfte	71
6.3	Bei der Berechnung vernachlässigte physikalische Effekte	72
6.3.1	Turbulente Umströmung	72
6.3.2	Der Magnus-Effekt	73
6.3.3	Statischer Auftrieb	74
6.3.4	Dynamischer Auftrieb	74
6.3.5	Zusammenstoß von Partikeln	75
6.4	Berücksichtigte Kräfte in der Berechnung	76
6.4.1	Strömungswiderstandskraft F_W	77
6.4.2	Gewichtskraft F_G	80
6.5	Herleitung der Formel zur Berechnung der C_W -Werte	80
7	Auswertung der Versuche	84
7.1	Partikelgrößenverteilung beim Zerspanen	84

7.1.1	Gauß- oder Normalverteilung	84
7.1.2	Partikelgrößenverteilung beim Fräsen	87
7.1.3	Partikelgrößenverteilung beim Kreissägen	91
7.1.4	Partikelgrößenverteilung beim Hobeln	92
7.2	Schwebegeschwindigkeitsverteilung der Partikelklassen	93
7.3	Ermittlung der c_W -Wert-Verläufe und der mittleren c_W -Werte	96
7.4	Möglichkeit zur Bestimmung des c_W -Wertes nicht untersuchbarer Partikelgrößenklassen	98
8	Zusammenfassung und Ausblick	100
9	Literaturverzeichnis	102
10	Anhang	A 1
10.1	Siebprotokolle	A 1
10.2	Datenprotokolle der Sichtanalyse	A 6
10.3	Datenprotokolle der Massenbestimmung, des prozentualen Auswurfs und Berechnung der c_W -Werte	A 17
10.4	Schwebegeschwindigkeitsdiagramme	A 29
10.5	Vergleich Schwebegeschwindigkeitsverteilung-Normalverteilung	A 34
10.6	C_W -Wertverläufe	A 51

III Verwendete Formelgrößen und Einheiten

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	[m ²]	Partikelquerschnittsfläche
a	[m]	große Halbachse einer Ellipse
b	[m]	kleine Halbachse einer Ellipse
c _D	-	Druckwiderstandsbeiwert
c _w	-	c _w -Wert
D	[m]	Partikeldurchmesser
D _Ø	[m]	durchschnittlicher Partikeldurchmesser
D _{sieb}	[m]	Siebmaschenweite
F _A	[N]	Auftriebskraft
F _D	[N]	Druckwiderstandskraft
F _{Fl}	[N]	Fliehkraft
F _G	[N]	Gewichtskraft
F _{ges}	[N]	Gesamtkraft
F _q	[N]	Querkraft
F _R	[N]	Reibkraft
F _w	[N]	Strömungswiderstandskraft
g	[m/s]	Erdbeschleunigung
k	-	Konstante
m	[kg]	Masse
m _t	-	Spänemenge zur Zeit t
m ₀	-	Spänemenge zu Beginn
n	[1/min]	Drehzahl
n	-	Anzahl der aufsummierten Werte
Δp	[Pa]	Druckgefälle
Re	-	Reynoldszahl
t	[s]	Zeit
T	[N]	Trägheitskraft
u	[m/s]	Geschwindigkeit vor dem Stoß
V	[m ³]	Partikelvolumen

v	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
v_{fh}	[m/s]	Handvorschub
V_F	[m ³ /m ²]	größtes zulässiges Schüttvolumen pro Flächeneinheit
V_{max}	[m ³ /m ²]	maximale Aufgabemenge pro Flächeneinheit
v_{rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit
v_S	[m/s]	Schwebegeschwindigkeit
w	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit
w_{ges}	[m/s]	Gesamtgeschwindigkeit
$w_{Öff}$	[m]	Nennöffnungsweite Siebboden
w_R	[rad/s]	Rotationsgeschwindigkeit
w_{rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit zwischen Partikel und Umgebungsluft
z	-	Zähnezahl
μ	-	Erwartungswert
s^2	-	Varianz
ρ_L	[kg/m ³]	Dichte der Luft
ρ_S	[kg/m ³]	Dichte der Späne

Abkürzungen

BAZ	Bearbeitungszentrum
bzw	beziehungsweise
DIN	Deutsche Industrie Norm
ISO	International Organization for Standardization
KW	Kilowatt
MAK	Maximale-Arbeitsplatz-Konzentration
MDF	mitteldichte Faserplatte
PC	Personal Computer
TRGS	Technische Regel für Gefahrstoffe
TRK	Technische Richtkonzentration
UV	ultraviolett
VDI	Verein deutscher Ingenieure

vgl. vergleiche
z.B. zum Beispiel

IV Verzeichnis der Abbildungen

Bild 3.1	Prinzipien der Windsichtung (Schema)	19
Bild 3.2	Gleichgewicht zwischen Fall- und Strömungsgeschwindigkeit	20
Bild 3.3	Strömungsgeschwindigkeit überwiegt der Fallgeschwindigkeit	21
Bild 3.4	Fallgeschwindigkeit überwiegt der Strömungsgeschwindigkeit	21
Bild 3.5	Trennkräfte bei der Zentrifugalsichtung	22
Bild 3.6	Versuchsaufbau	25
Bild 3.7	Verfahrensschritte einer Schwebesichtung	26
Bild 3.8	Bauart des Radialventilators	27
Bild 3.9	Gummispiralschlauch	28
Bild 3.10	Strohhalmbündel als Strömungsgleichrichter	29
Bild 3.11	Ideale Geschwindigkeitsprofile der Rohrströmung	30
Bild 3.12	Abhängigkeit der c_w - Werte von Kugel und Zylinder von der Reynoldszahl	31
Bild 3.13	Elektrostatische Aufladung beim Sichten	33
Bild 3.14	Mögliche Störstellen, Abbau der Unregelmäßigkeit des Strömungsprofils mit zunehmendem Abstand von der Störstelle	35
Bild 3.15	Sichterrohr mit Strömungsteiler	36
Bild 3.16	Späneabscheider mit Manschette und Strahlteiler	36
Bild 3.17	Frequenzumformer zur Drehzahlregulierung	37
Bild 4.1	Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8589	39
Bild 4.2	Kreissäge HOLZHER Super Slide 1245	40
Bild 4.3	Hobelmaschine Aldinger	41
Bild 4.4	Homag Bearbeitungszentrum Typ BAZ 31 OPTICENTER	41

Bild 4.5	Polizeifilter	43
Bild 4.6	gemessene Strömungsgeschwindigkeitsverteilung	45
Bild 4.7	Sekunden-Anemometer testo 452 mit Zubehör	46
Bild 4.8	Übersicht der verschiedenen Sonden und deren Einsatzbedingungen	47
Bild 4.9	Thermische Strömungssonde mit Teleskopstil	48
Bild 4.10	Der Strömungssensor	48
Bild 4.11	Optimale Anströmung des Kugelsensors	49
Bild 4.12	Gierwinkel bei der Anströmung	50
Bild 4.13	Abweichung durch Gierwinkel	50
Bild 5.1	Analysesieb mit Drahtsiebböden	51
Bild 5.2	Siebmaschine mit Siebsatz	52
Bild 5.3	Beispiel eines Vorversuchs mit 90 g Spänemasse zur Ermittlung der benötigten Siebzeit bezogen auf die Probenmasse	54
Bild 5.4	Darstellung der tatsächlich notwendigen, aus Vorversuchen ermittelten, Siebzeit und der bei den Versuchen angewandten Siebzeiten	55
Bild 5.5	Größtes zulässiges Schüttvolumen und maximale Aufgabemenge bei der Siebanalyse nach DIN 66165	56
Bild 5.6	Analysewaage SARTORIUS Excellence E 12000 S	58
Bild 5.7	Beispiel eines Teilsiebprotokolls der Siebanalyse	59
Bild 5.8	Beispiel eines Datenprotokolls der Sichtanalyse	61
Bild 5.9	Annäherung der Partikelfläche durch verschiedene Geometrien	67
Bild 5.10	Tabelle der berechneten Partikelflächen	68
Bild 6.1	Symmetrische Partikelumströmung im lotrechten Rohr	69
Bild 6.2	Umströmung von zwei Partikeln in unmittelbarer Nähe	70
Bild 6.3	Partikelumströmung an der Rohrwand	70

Bild 6.4	Umströmung eines rotierenden Partikels	70
Bild 6.5	Der Stoß eines rotierenden Partikels	71
Bild 6.6	Der Magnus-Effekt am rotierenden Partikel	73
Bild 6.7	Angreifende Kräfte am Partikel im Schwebezustand	77
Bild 6.8	Skizze des fliegenden Partikels mit Kräften und Drücken	77
Bild 6.9	Widerstandbeiwerte c_w angeströmter Körper in Abhängigkeit von der Reynoldszahl	79
Bild 7.1	Näherungswerte für das Zeichnen der Glockenkurve der Gauß-Laplace-Verteilung	85
Bild 7.2	Gauß-Verteilungen mit unterschiedlichen Erwartungswerten	86
Bild 7.3	Partikelgrößenverteilung beim Fräsen	87
Bild 7.4	Vergleich der Partikelgrößenverteilungskurve Buche Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung	88
Bild 7.5	Vergleich der Partikelgrößenverteilungskurve Spanplatte Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung	88
Bild 7.6	Vergleich der Partikelgrößenverteilungskurve Fichte Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung	89
Bild 7.7	Vergleich der Partikelgrößenverteilung MDF Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung	89
Bild 7.8	Partikelgrößenverteilung beim Kreissägen	91
Bild 7.9	Partikelgrößenverteilung beim Hobeln	92
Bild 7.10	Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen	93
Bild 7.11	Vergleich der Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen 1000 μm mit der normalen und mit der korrigierten Gauß'schen Normalverteilung	94

Bild 7.12	Vergleich der Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen 500 μm mit der normalen und mit der korrigierten Gauß'schen Normalverteilung	95
Bild 7.13	Vergleich der Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen 250 μm mit der normalen und mit der korrigierten Gauß'schen Normalverteilung	95
Bild 7.14	c_w -Wertverläufe Fräsen MDF	96
Bild 7.15	Mittlere c_w -Werte aller Werkstoffe und Verfahren	97
Bild 7.16	Sinkgeschwindigkeit kugelförmiger Partikel in ruhender Luft nach Batel	99

1 Einleitung

Lange Zeit wurde die Stauberfassung bei der Bearbeitung von Holz und Holzwerkstoffen überwiegend unter dem Gesichtspunkt der gesundheitlichen Gefährdung des Menschen am Arbeitsplatz diskutiert. Da in medizinischen Untersuchungen insbesondere bei Buchen- und Eichenholzstäuben ein erhöhtes krebserregendes Potential festgestellt wurde, sind diese Stäube seit 1985 in die Kategorie A1 der MAK-Liste als erwiesenermaßen krebserregend eingestuft. Alle übrigen Holzstäube gelten als verdächtig Krebserkrankungen hervorzurufen. Sie wurden daher in die Kategorie B aufgenommen. Neben der erhöhten Krebsgefahr können Holzstäube als Träger von Mikroorganismen und Holzschutzmitteln in einer erhöhten Konzentration Hauterkrankungen und allergische Reaktionen wie Ausschläge und Atemwegserkrankungen hervorrufen /1/. Aus den erwähnten Gründen gilt für alle eingesetzten Anlagen die in der Technischen Regel für Gefahrstoffe TRGS 553 „Holzstaub“ festgelegte Technische Richtkonzentration (TRK) von 2 mg/m^3 Gesamtstaubkonzentration /2/.

Neben den oben aufgeführten Aspekten der Gesundheitsgefährdung gibt es auch Untersuchungen über die Funktionsbeeinträchtigung von Maschinenelementen, wie z.B. Sensoren, Lagerungen und Vakuumpspannvorrichtungen, die Beeinträchtigung der Werkstückqualitäten, durch Staub und Späne, und die Brand- und Explosionsgefahr von Holzstaub-Luftgemischen /3/.

In letzter Zeit wird die Späneentsorgung nun verstärkt von der wirtschaftlichen Seite her untersucht. Als Hauptkostenverursacher und damit sogleich als Ansatzpunkt für die Optimierung, sind hier zum einen die Anlageninvestitionen sowie in zunehmendem Maße auch die Energiekosten für den Betrieb der Anlage anzusehen. Weitere Kosten entstehen bei der Wartung, Reparatur und Überwachung der Anlage. Die installierte Absaugleistung, die durch die Leitungsquerschnitte und die Luftgeschwindigkeit bestimmt wird, ist sowohl für die Höhe der Anlageninvestition wie auch für die Energiekosten maßgebend. Derzeit wird in den Anlagen zur Holzbearbeitung der Staub mit einer Luftgeschwindigkeit von 25 m/s abgesaugt. Um den dazu benötigten sehr großen Luftstrom zu bewerkstelligen ist ein hoher kosten- und investitionsintensiver apparativer Aufwand zu betreiben. Wäre es nun möglich, die Luftgeschwindigkeit, bei gleichzeitiger Einhaltung der TRK-Werte, in Richtung der zum Spänetransport vorgeschriebenen Mindestgeschwindigkeit von 20 m/s zu senken, so könnte

der Energieverbrauch, der in dritter Potenz zur Strömungsgeschwindigkeit steigt, erheblich gesenkt werden. Zusätzlich würde bei dieser niedrigeren Strömungsgeschwindigkeit die Lebensdauer der Anlage, infolge geringeren Verschleißes, steigen, das Arbeitsgeräusch würde vermindert und die Wärmeenergie, die zur Heizung der nachströmenden Frischluft notwendig ist, wird verringert /4/.

Ein neuer Ansatz besteht in der Erkenntnis, daß auf hohe Absaugleistungen verzichtet werden kann, wenn die Späneerfassungseinrichtung richtig gestaltet und positioniert ist. Um diese hinsichtlich dieser beiden Gesichtspunkten optimieren zu können, ist die Kenntnis der Kinematik des frei beweglichen Spans und dessen Beeinflußbarkeit notwendig.

Die vorliegende Studienarbeit befaßt sich mit der Ermittlung des c_w -Wertes unterschiedlicher Holz-, Holzwerkstoff- und Kunststoffspankollektive, der zur Berechnung der Kräfte die beim Flug am Span angreifen maßgeblich ist. Die gewonnenen Werte sollen später in Form einer Datenbank in ein herkömmliches Strömungsrechenprogramm integriert werden /5/. Damit wird der Konstrukteur in die Lage versetzt eine Absauganlage schon während der Konstruktion am PC durch Simulationsrechnungen hinsichtlich ihrer Funktion zu optimieren. Durch diese Möglichkeit kann die Anzahl der zu bauenden Prototypen, und der Versuche an diesen, die zur Entwicklung einer auf die Maschine oder Anlage abgestimmte effektive Späneentsorgung notwendig sind, erheblich reduziert werden. Dadurch kann die zur Entwicklung nötige Zeit und die dadurch anfallenden Kosten auf ein Minimum reduziert werden.

2 Stand der Technik

Um die oben erwähnte maximale Staubkonzentration von 2 mg/m^3 einhalten zu können, muß sich der Konstrukteur mit einer auf die Maschine oder Anlage zugeschnittenen Lösung für die Erfassung von Staub und Spänen befassen. Dabei werden die meisten Erfassungselemente nur mit Hilfe der gesammelten Erfahrung oder nach Intuition des Konstrukteurs entworfen, da es bislang noch keine geeignete Möglichkeit gibt durch Strömungssimulationsrechnung in die Entwicklung und Auslegung einzugreifen. Eine Optimierung der Erfassungseinrichtung ist somit derzeit nur über Versuche am Prototyp möglich, wodurch die Entwicklung einer effektiven Späneerfassungseinrichtung durch die große Anzahl der zu bauenden Prototypen sehr zeitaufwendig und kostenintensiv ist.

Über einzelne Bereiche der Absaugproblematik gibt es bereits einige Untersuchungen, so ist beispielsweise die pneumatische Förderung von Partikeln bekannt /6/. Auch gibt es Betrachtungen zum Späneablauf bei Fräsern /7/, und W. Schmutzler wendet Erkenntnisse aus der Strömungslehre und Strömungsfördertechnik auf die Erfassungselemente von Holzbearbeitungsmaschinen an /8/. Über zur Berechnung wichtiger Kenngrößen von Holzspänen, wie z.B. c_w -Werte und Partikelgestalt gibt es zwar Untersuchungen, in denen jedoch nur Mittelwerte bestimmt wurden, und keine Aufschlüsselung nach Partikelart, -gestalt, -größe und -werkstoff erfolgte. So wird in vielen früheren Arbeiten, wie z.B. in der von W.Gumz veröffentlichten Arbeit, „Zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit von Teilchen beliebiger Gestalt“, von körnigen Gütern, deren Gestalt als Kugel idealisiert wird, ausgegangen /9/. Der natürlich gewachsene Rohstoff Holz besitzt im Gegensatz zu anderen Werkstoffen, wie beispielsweise Metall, einen sehr inhomogenen Aufbau. Durch die zellförmige Struktur wird die Entstehung von Spänen definierter Form verhindert, wodurch bei der Zerspanung stets ein Spänekollektiv unterschiedlicher Größen- und Gestaltsverteilung entsteht /10/. Aufgrund dieser Tatsache kann bei einer Untersuchung mit Holzspänen, deren Gestalt kaum durch wenige idealisierte Körper angenähert werden kann, nicht von den Kennwerten dieser ausgegangen werden.

Dagegen ist über den realen Späneflug noch sehr wenig bekannt. Die auf den fliegenden Span einwirkenden Kräfte sind in der Theorie zwar bekannt, doch wurden zu deren Bestimmung, mangels Kenntnis von Kenngrößen, Vereinfachungen getroffen, die zu sehr ungenauen

Aussagen über das Flugverhalten eines Spanes führen. So werden bislang in Programmen zur Flugbahnberechnung von Holzpartikeln die c_W -Werte der Kugelform verwendet, wodurch zu niedrige Widerstandskräfte errechnet werden, die wiederum bei der Auslegung der Späneerfassungseinrichtung auf eine zu hohe erforderliche Absauggeschwindigkeit führen.

3 Versuchsaufbau

Das Ziel bei der Konzeption des Versuchsstandes war ganz allgemein, den Luftwiderstandsbeiwert c_w , der bei verschiedenen Zerspanungsverfahren entstehenden Späne, zu ermitteln. Dabei mußte darauf geachtet werden, daß mit diesem die jeweiligen Versuche unter möglichst einheitlichen und definierten Bedingungen durchzuführen sind.

Wie aus der in Kapitel 6 dargestellten Theorie des Spanfluges ersichtlich wird, benötigt man zur Ermittlung dieses, von mehreren Faktoren abhängenden Beiwertes, neben den am Span direkt ermittelbaren Größen, die Schwebegeschwindigkeit des Einzelspans. Diese entspricht der erforderlichen Strömungsgeschwindigkeit, mit der ein Partikel im lotrechten Luftstrom von unten angeblasen werden muß, um in einer bestimmten räumlichen Lage zu verharren. Diese Geschwindigkeit entspricht laut Strömungslehre der freien Fallgeschwindigkeit eines Partikels in ruhender Umgebung.

Es hat sich gezeigt, daß das Prinzip der Sichtanalyse für diese Versuche, bei denen die Schwebegeschwindigkeit von Partikeln, die teilweise auch sehr geringe Abmessungen aufweisen, ermittelt werden soll, als die geeignetste anzusehen ist. Nach DIN 66160 wird die Sichtanalyse als Dispersitätsanalyse, bei der ein disperses Gut in einem strömendem Gas, unter Einfluß von Massen- und Strömungskräften, in Sinkgeschwindigkeitsklassen getrennt wird, definiert.

3.1 Sichtanalyse

Bei der Sichtanalyse werden die Flugeigenschaften von Einzelpartikeln, die durch deren Sinkgeschwindigkeit in Luft gekennzeichnet sind untersucht. Die Sinkgeschwindigkeit ist deshalb das gemeinsame Merkmal aller Verfahren der Sichtanalyse.

Die Trennung des zu untersuchende Gutes in Sinkgeschwindigkeitsklassen erfolgt im Analysewindsichter (im folgenden kurz Sichter genannt). Diese Trennung wird dadurch hervorgerufen, daß auf die in den Sichter eingebrachten Partikel gleichzeitig Luftwiderstands- und Massenkräfte, jeweils von der Partikelgröße abhängig in verschiedener Potenz, in unterschiedlicher Richtung und Größe an den zu trennenden Partikeln angreifen. Die Luftkräfte ergeben sich aus der Relativgeschwindigkeit der Partikel zur umgebenden Luft und sind je nach Re-Zahl linear bzw. quadratisch von dieser abhängig. Die Massenkräfte

resultieren je nach Sichtverfahren aus der Erdbeschleunigung und/oder aus der Zentrifugalkraft die in dritter Potenz zur Korngröße steht /11/. Die durch dieses Prinzip voneinander getrennten Partikelklassen werden quantitativ aufgefangen und ihre Massenanteile am Gesamtkollektiv bestimmt.

3.2 Mögliche Sichtprinzipien

Für die angestrebte Trennung in Partikelklassen werden im wesentlichen die Prinzipien der Gegenstrom- und Querstromsichtung angewandt, die man einzeln oder in Kombination unter der Wirkung von Schwer- oder Fliehkraft anwendet. Die Sichtung durch freien Fall in ruhender Luft kann dabei als Spezialfall der Gegenstromsichtung angesehen werden. Die Begriffe Gegen- und Querstrom leiten sich von der relativen Bewegung des Aufgabegutes im Sichter vor der Trennung zur umgebenden Luft ab.

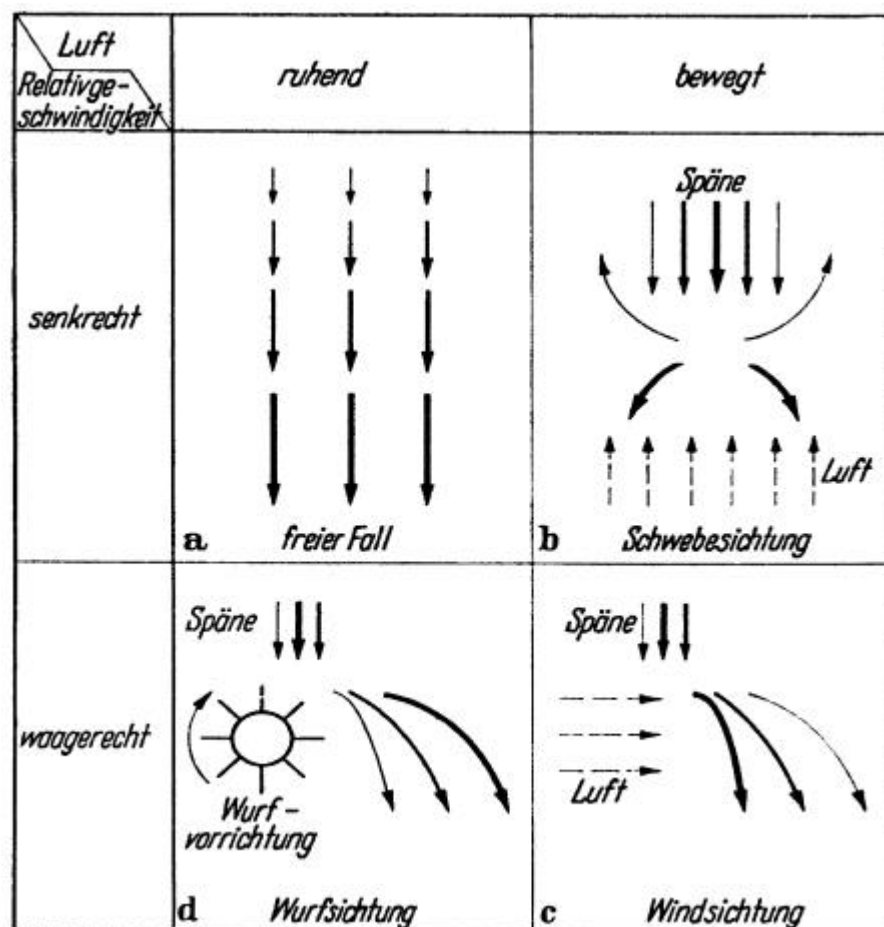


Bild 3.1: Prinzipien der Windsichtung (Schema) /12/, Die Strichdicke deutet das Gewicht des Teilchens an.

3.2.1 Sichtung durch freien Fall in ruhender Luft

An einem in ruhender Luft frei fallendes Masseteilchen wirkt senkrecht nach unten die aus Masse und Erdbeschleunigung herrührende konstant bleibende Gewichtskraft. Senkrecht nach oben wirkt die von der Luftdichte, der Teilchenform und -größe und der Relativgeschwindigkeit zur Luft abhängige Luftwiderstandskraft. Das Teilchen wird so lange beschleunigt, bis beide Kräfte im Gleichgewicht sind und fällt dann mit konstanter Geschwindigkeit. Dieses in Bild 3.1 unter Fall a dargestellte Verfahren ist theoretisch sehr leicht zu behandeln, ist praktisch jedoch bedeutungslos, weil es nicht kontinuierlich betrieben werden kann.

3.2.2 Schwebesichtung

Das in Bild 3.1 unter Fall b erläuterte Verfahren beruht auf dem Prinzip der Gegenstromsichtung und ist ähnlich dem Fall eines Partikels in ruhender Luft, jedoch mit dem Unterschied, daß eine vertikal nach oben gerichtete Luftströmung erzeugt wird, die eine Auftriebskraft auf die Partikel ausübt. Dabei können je nach dem Verhältnis der am Körper angreifenden Kräfte, die wiederum durch die Geschwindigkeit der erzeugten Strömung variabel sind, drei Fälle auftreten, die im folgendem beschrieben werden.

Besteht ein Gleichgewicht zwischen der Massenkraft, die dem Spangewicht gleich ist, und der nach oben wirkenden Luftwiderstandskraft, so schwebt das Teilchen im Luftstrom ohne seine Lage zu verändern. Die vertikale Strömungsgeschwindigkeit bei der dieser Zustand eintritt, wird als Schwebegeschwindigkeit v_s bezeichnet, und entspricht der Endgeschwindigkeit w dieses Partikels im freien Fall.

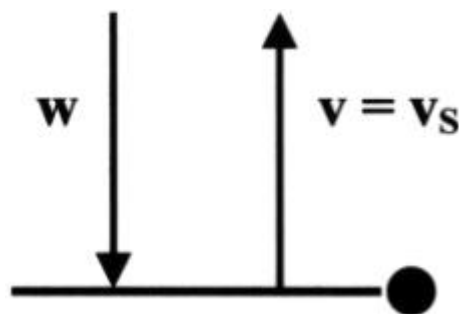


Bild 3.2: Gleichgewicht zwischen Fall- und Strömungsgeschwindigkeit

Ist die Strömungsgeschwindigkeit v größer als die Fallgeschwindigkeit w des Partikels, so wird er nach oben ausgetragen. Dies geschieht, nach kurzer Beschleunigungszeit, mit der Differenzgeschwindigkeit $v = v - w$.

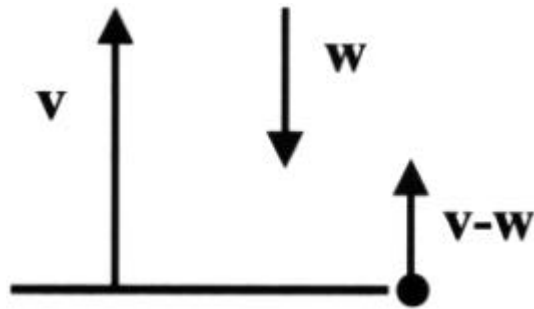


Bild 3.3: Strömungsgeschwindigkeit überwiegt der Fallgeschwindigkeit

Ist jedoch die Fall- bzw. Schwebegeschwindigkeit w des Partikels größer als die erzeugte Strömungsgeschwindigkeit v , so bewegt er sich mit der Differenzgeschwindigkeit $v = w - v$ nach unten, und sedimentiert dort am Boden ab.

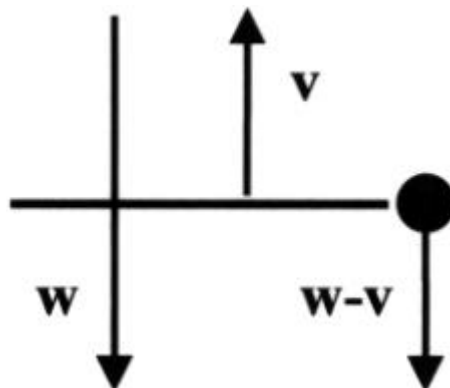


Bild 3.4: Fallgeschwindigkeit überwiegt der Strömungsgeschwindigkeit

Durch diese Zusammenhänge kann mit der Schwebesichtung ein Partikelkollektiv in unterschiedliche Fall- bzw. Schwebegeschwindigkeitsklassen aufgeteilt werden. Die Grenze, bei der die Trennung des Kollektives erfolgen soll, kann durch die Veränderung der erzeugten Strömungsgeschwindigkeit variiert werden.

3.2.3 Wurfsichtung

Dieses in Bild 3.1 als Fall d aufgeführte Verfahren beruht auf dem Prinzip der Querstromsichtung unter dem Einfluß von Flieh- und Massenkräften. Werden Teilchen mit einer bestimmten Anfangsgeschwindigkeit waagrecht in ruhende Luft geworfen, so erfahren diese eine durch die Luftwiderstandskraft erzeugte Verzögerung. Teilchen bei denen das Verhältnis der Masse zur gegen die Flugrichtung angestellten Oberfläche groß ist, werden dabei weniger verzögert und fliegen dadurch weiter als solche bei denen dieses Verhältnis kleiner ist. Das Aufgabegut kann dadurch je nach Bedarf in beliebig viele Fraktionen getrennt werden.

3.2.4 Zentrifugalsichtung

Der Sichter ist als flachzylindrische Kammer ausgebildet. Die Luft wird durch eine Einlaufdüse tangential in den Sichterraum eingeleitet. Dort strömt sie auf spiralförmigen Bahnen zum Zentrum, wo sie in die axiale Richtung umgelenkt wird. Im Sichter wird das Aufgabegut durch die Wirkung der in radialer Richtung an den Teilchen angreifenden Kräfte, der nach innen gerichteten Luftwiderstandskraft F_w und der nach außen gerichteten Fliehkraft F_{fl} , getrennt (Bild 3.5). Bei den Grobpartikeln überwiegt die Fliehkraft gegenüber der Widerstandskraft, die Teilchen fallen in Umfangsnähe aus dem Sichter. Umso feiner die Partikel sind, desto weiter werden sie mit der Spiralströmung in Richtung Sichterzentrum mitgetragen, bevor sie aus der Strömung und somit auch aus dem Sichter nach unten austreten.

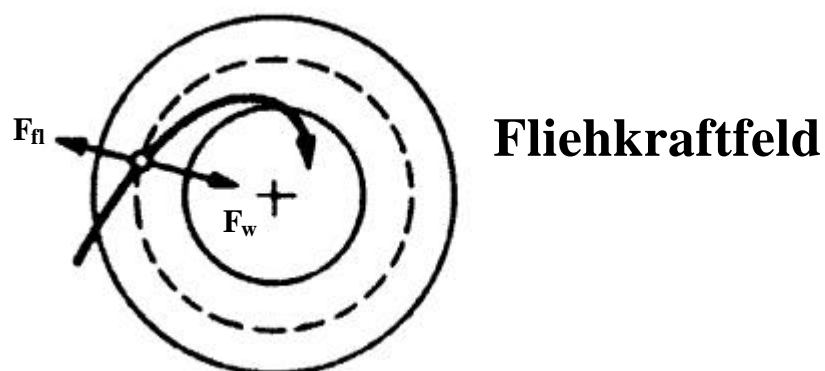


Bild 3.5: Trennkräfte bei der Zentrifugalsichtung

3.2.5 Windsichtung

Das in Bild 3.1 als Fall c dargestellte Verfahren entspricht dem des freien Falls in ruhender Luft, jedoch erhalten die Teilchen durch die zusätzliche waagrechte Luftwiderstandskomponente eine waagrechte Beschleunigung. Teilchen mit geringerer Schwebegeschwindigkeit durchfallen den Luftstrom in längerer Zeit und werden dadurch von diesem weiter abgelenkt als solche mit einer größeren Schwebegeschwindigkeit. Betrachtet man die unterschiedlichen Wurfparabeln, so kann man die ausgebrachten Partikel in mehrere Klassen nach ihrer Schwebegeschwindigkeit einteilen.

3.3 Auswahlkriterien und Auswahl des Sichtverfahrens

Die Tauglichkeit der verschiedenen Sichtverfahren für die Ermittlung des c_w -Wertes von Holzspänen unterschiedlicher Art und Größe läßt sich anhand der folgenden Kriterien beurteilen:

- Die Trennung sollte eine möglichst hohe Trennschärfe aufweisen. Unter Trennschärfe versteht man die Güte der Trennung eines Partikelkollektives in einzelne Fraktionen. Eine ideale Scheidung mit 100 % - iger Trennschärfe liegt vor, wenn nach dem Trennvorgang sämtliche Partikel einer Merkmalsklasse in einer Fraktion vorliegen. Diese ideale Scheidung ist jedoch bei keinem technischen Verfahren der Sichtung erreichbar.
- Die Analysezeit für einen Trennvorgang sollte möglichst kurz sein. Der Vorgang zur Ermittlung und Festlegung der optimalen Analysezeit die für eine gute Trennung notwendig ist wird in Kapitel 5.2.2 dargestellt.
- Die während eines Sichtvorgangs eingestellten Betriebsbedingungen dürfen sich im Verlauf eines Versuchs nicht ändern und müssen reproduzierbar sein. Hierbei spielt vor allem das Strömungsprofil der Luft eine Rolle das zeitlich konstant sein muß.
- Das Sichtverfahren sollte auch noch bei sehr feinen Partikelkollektiven in der Lage sein diese in ausreichender Trennschärfe zu scheiden.
- Die Agglomeration einzelner Partikeln im Betrieb muß gering sein und falls sie auftritt müssen geeignete Maßnahmen zur Abhilfe möglich sein.
- Die abgeschiedene Fraktion muß für weitere Untersuchungen vollständig erfassbar sein.
- Die Handhabung und der Betrieb sollten möglichst einfach sein.

Da bei der Holzspannung im allgemeinen feine Partikel entstehen, die durch ihre Gestalt und gegebenenfalls auch durch ihren Harzgehalt zur Agglomeration neigen, eignet sich für diese Versuche das Verfahren der Schwebesichtung. Da dieses Verfahren auf dem Gegenstromprinzip beruht, ist die Agglomerationsbildung gering und eventuell schon bei Versuchsbeginn vorhandene Agglomerationen werden schnell aufgelöst. Ein weiterer Vorzug gegenüber den anderen Verfahren, ins besondere gegenüber der Sichtung im freien Fall, ist die kleine zu realisierende Baugröße der Versuchsanordnung. Da das Verfahren der Gegenstrom-Schwebesichtung auch hinsichtlich der weiteren, oben aufgeführten Kriterien, wie Trennschärfe, Analysenzeit, Betriebsbedingungen, Erfassbarkeit, Handhabung und Betrieb die günstigsten Eigenschaften aufweist, wurde es für die Versuche ausgewählt.

3.4 Aufbau der Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung wurde in Anlehnung an eine von H.W. Gonell zur Untersuchung der Kornzusammensetzung staubförmiger Stoffe verwendeten Anlage aufgebaut, und entspricht im Prinzip auch der von P. Jiru zur Bestimmung der minimalen Luftgeschwindigkeit für pneumatischen Transport von Spänen und Mahlgut verwendeten Einrichtung /13/, /14/. Diese für die Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit verwendete Versuchseinrichtung zeigt Bild 3.6. Sie besteht aus einem Radialventilator zur Erzeugung einer konstanten Luftströmung, einer Luftklappe zur groben Anpassung und einem Frequenzumformer zur Feinjustierung der vom Ventilator erzeugten Strömungsgeschwindigkeit und einem in einem Gestell fixierten Sichterrohr. Um die aus der Sichtzone ausgetragenen Partikel für die weiteren Untersuchungen zu gewinnen, ist auf das Gestell ein abnehmbarer Spanabscheider aufgesetzt.



Bild 3.6: Versuchsaufbau

3.5 Verfahrensschritte der Schwebesichtung

Die Schwebesichtung in einer Gegenströmung besteht aus mehreren nacheinander abfolgenden Verfahrensschritten. Im ersten Schritt wird eine zeitlich möglichst konstante Luftströmung erzeugt, die im zweiten und dritten Schritt, vor dem Erreichen des Objektbodens vermessen, und gegebenenfalls durch geeignete Maßnahmen gleichmäßig eingestellt wird. Danach wird das auf den Objektboden aufgebrachte Partikelkollektiv in der Strömung dispergiert, bevor es die eigentliche Trennzone erreicht, in welcher eine Aufspaltung in Grob- und Feingut erfolgt. Im letzten Schritt werden die Feingutpartikel aus dem Sichterrohr ausgeworfen und mit einer geeigneten Einrichtung aufgefangen. In Bild 3.7 erfolgt eine Zuordnung der einzelnen Verfahrensschritte zum jeweiligen Bereich der Versuchseinrichtung in der dieser stattfindet. In den folgenden Kapiteln werden die Bauteile der Versuchseinrichtung in der Reihenfolge der ihnen zugeordneten nacheinander abfolgenden Verfahrensschritten erläutert.

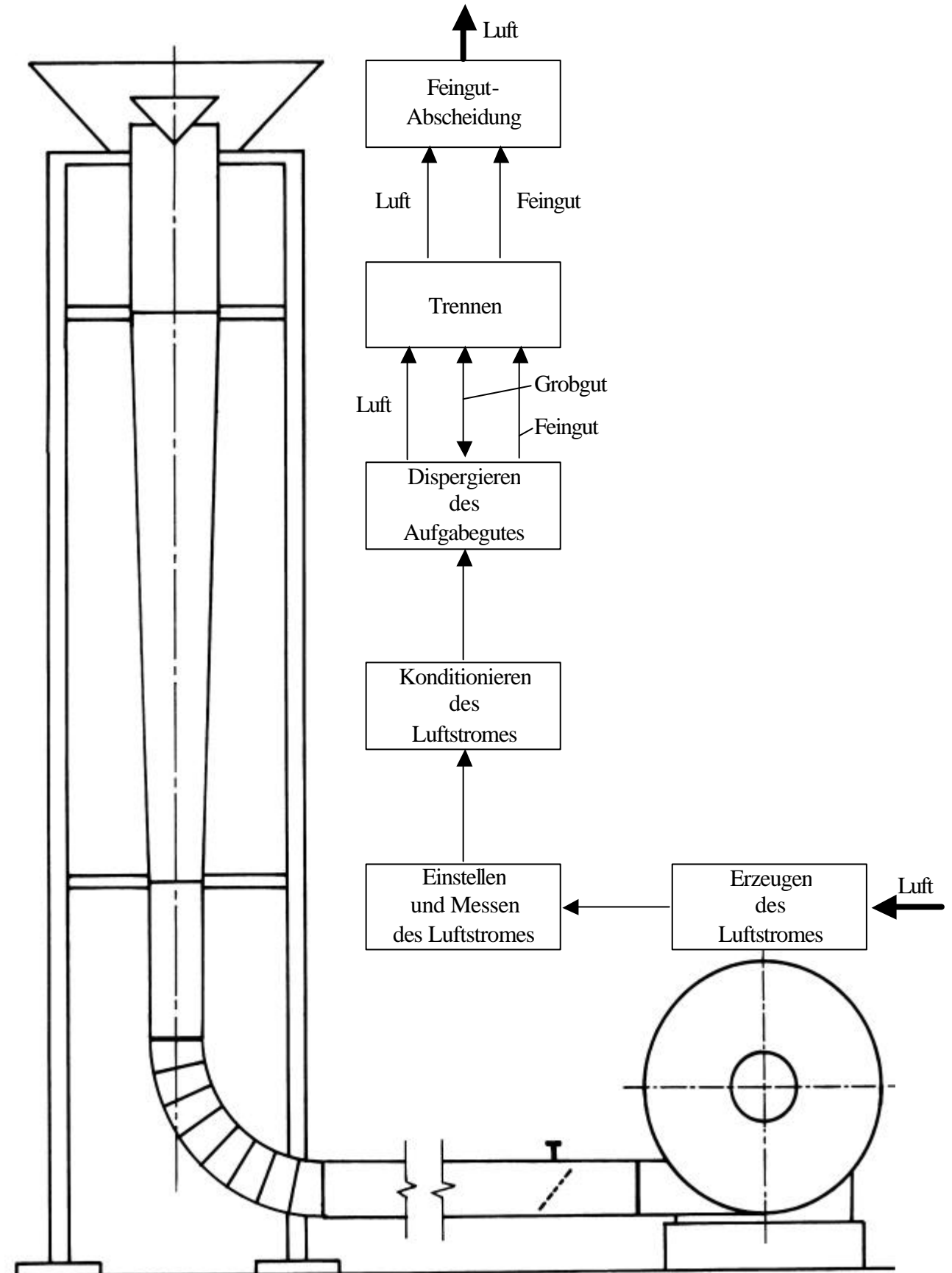


Bild 3.7: Verfahrensschritte einer Schwebesichtung

3.6 Ventilator

Die Versuche wurden mit einem Radialventilator der Firma Schröter Lufttechnik Rudersberg, mit einer Antriebsleistung von 3,1 KW, mit welcher er bei einer Drehzahl von 2870 1/min einen konstanten Luftvolumenstrom von 950 m³/h erzeugt, durchgeführt. Da bei der Bauart des verwendeten Ventilators das Lüfterrad direkt auf der Antriebswelle des Motors sitzt, und der Motor keine eigene Regelung besitzt, kann der geförderte Luftvolumenstrom nur indirekt verstellt werden. Diese indirekte Anpassung an die im Sichter erforderliche Strömungsgeschwindigkeit erfolgte grob durch eine Luftklappe in der Zuleitung und fein durch die Regulierung der Ventilator Drehzahl mittels eines vorgeschalteten Frequenzumformers. Bild 3.8 zeigt einen Radialventilator mit eingezeichneter Dreh- und Strömungsrichtung.

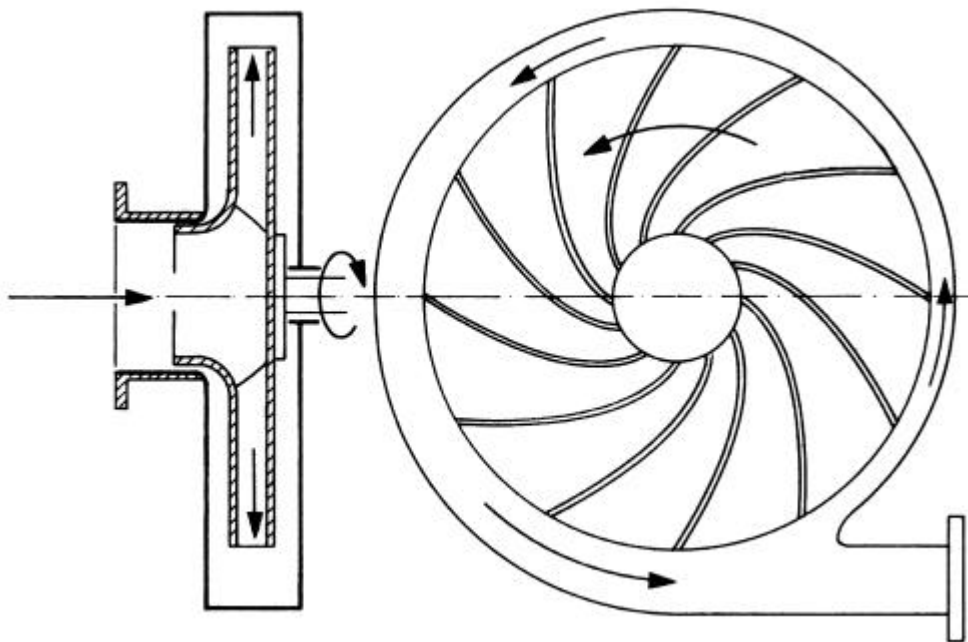


Bild 3.8: Bauart des Radialventilators /6/

3.7 Luftzufuhr zum Sichter

Die Luftzufuhr vom Ventilator bis zum Eintritt in den Sichter erfolgte über einen Gummispiralschlauch mit Durchmesser 150 mm. Beim Gummispiralschlauch wird die den Schlauchquerschnitt stabil haltende Stahlspirale in eine Gummibindeschicht eingebettet. Diese geht zum Schlauchinneren hin in eine verschleißfeste innere Gummideckschicht über. Am äußeren Mantel des Schlauches ist eine Gewebeschicht zur Druckaufnahme aufgetragen. Wegen der

elektrostatischen Aufladung wird der Gummi leitend ausgeführt und die Stahlspirale mit dem Flansch des Ventilators leitend verbunden. Bild 3.9 zeigt den Aufbau eines solchen Schlauches.

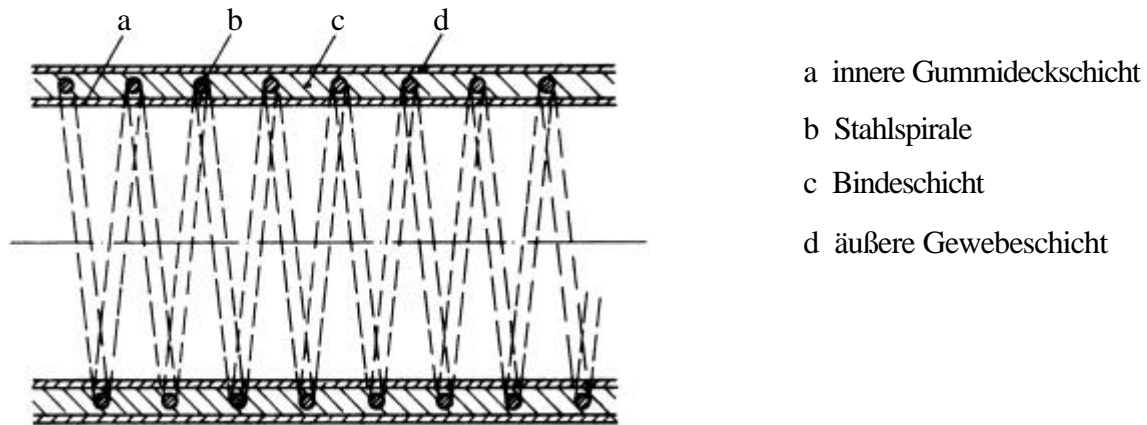


Bild 3.9: Gummispiralschlauch /6/

3.7.1 Störungen bei der Luftzufuhr

Die Luft, die durch das rotierende Lüfterrad gefördert wird, besitzt eine zum unteren Bereich des Austrittsquerschnitts hin ansteigende Geschwindigkeitsverteilung. Im weiteren Verlauf der Luftzufuhr entstehen durch die eingebaute Klappe und den nicht konstanten Querschnitt des Schlauches weitere Störungen des Geschwindigkeitsprofils. Des weiteren wird die Geschwindigkeit des Luftstromes nach dem Krümmer durch die Ablösung der Strömung und durch die Entstehung von Sekundärströmungen im Kurveninneren erhöht und fällt nach außen hin ab (vgl. Bild 3.14 unten).

Beim Versuchsaufbau ist es aus Platzgründen nicht möglich, die zum Erhalt einer räumlich und zeitlich gleichmäßigen Rohrströmung benötigten Einlauf- und Ausgleichsstrecken, die bei den vorliegenden Verhältnissen etwa $30 - 40 \times D$ lang sein sollten, einzuhalten. Durch geeignete, aus der Strömungstechnik bekannte, Einbauten wurde versucht den idealen Bedingungen auch bei verkürzten Strecken nahe zu kommen.

3.7.2 Einbauten in der Luftzufuhr

Hinter den durch den Ventilator und den Krümmer verursachten Störstellen ist ein aus Filterflies bestehender Strömungswiderstand eingebaut. Die Höhe dieses Widerstandes wurde beim Einbau in iterativen Schritten, durch Variation der Fliesdicke, an das verzerrte

Strömungsprofil so gut wie möglich angepaßt. Das heißt, an Stellen erhöhter lokaler Geschwindigkeit wurde ein größerer Widerstand als in Regionen geringerer Strömung, eingebaut. Um das Profil fein anzupassen wurden am Sichtereintritt, radial um den Luftschlauch, Einstellkeile zwischen diesem und dem Sichtergestell angebracht, mit denen durch gezielte Deformation des Schlauches ein Ausgleich des Profiles erreicht werden kann. Die aus dem Spiralschlauch austretende Strömung wies einen durch dessen Form verursachten starken Drall auf. Da eine Drallströmung stabil ist, und sich so über große Strecken im Sichterrohr fortsetzen würde, wurde nach dem Filterfließ hinter dem Krümmer ein Strömungsgleichrichter eingebaut. Dieser, in Bild 3.10 abgebildete, Gleichrichter, besteht aus einem den ganzen Querschnitt ausfüllenden Bündel von Strohhalmen. Aufgrund deren hohen Verhältnis von Länge zu Durchmesser sind die austretenden Einzelströmungen drallfrei, was dazu führt, daß im Sichterrohr eine drallfreie Gesamtströmung entsteht.

Um zu verhindern, daß die zu untersuchenden Partikel bei zu geringer Strömungsgeschwindigkeit durch das Strohhalmbündel auf den Filterfließ fallen und sich dort verfangen, ist dieser mit einem feinen Stoff bespannt. Zusätzlich dazu bewirkt diese siebähnliche Bespannung feine lokale Turbulenzen, die eine ungewünschte Agglomerationsbildung von Spänen bei geringer Strömungsgeschwindigkeit verhindern, oder eine beim Anlauf existierende auflösen. Aufgrund der sehr geringen Ausmaße der Turbulenzen haben diese auf den weiteren Verlauf der Strömung keinen Einfluß.



Bild 3.10: Strohhalmbündel als Strömungsgleichrichter

3.8 Sichterrohr

Das Sichterrohr besteht aus zwei zylindrischen, lotrechten Rohren unterschiedlicher Durchmesser die durch ein konusförmiges Rohr mit einem Öffnungswinkel von 10° verbunden sind. Um die Bewegung der Späne beobachten zu können bestehen alle Rohre aus durchsichtigem Acrylglas.

3.8.1 Strömungsverhältnisse im Sichterrohr

Die Luftgeschwindigkeit in einem solchen Sichterrohr ist ortsabhängig. Durch den im konusförmigen Bereich ansteigenden Rohrquerschnitt verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung proportional zum Querschnitt. Senkrecht zur Strömungsrichtung ändert sich das Profil je nach Strömungscharakter, laminar oder turbulent, in unterschiedlicher Weise. Bild 3.11 zeigt die zwei möglichen idealen Strömungsprofile in einem Rohr. Links eine ausgeprägte laminare Strömung mit einem deutlichen Maximum in der Kanalmitte, die mittlere Strömungsgeschwindigkeit liegt bei ca. einem Drittel des Kanaldurchmessers. Rechts sieht man ein turbulentes Grenzschichtprofil mit einer weitgehend konstanten Strömung in der Kanalmitte und steilem Abfall an den Wänden. Zwischen diesen beiden Idealformen sind alle Mischformen möglich.

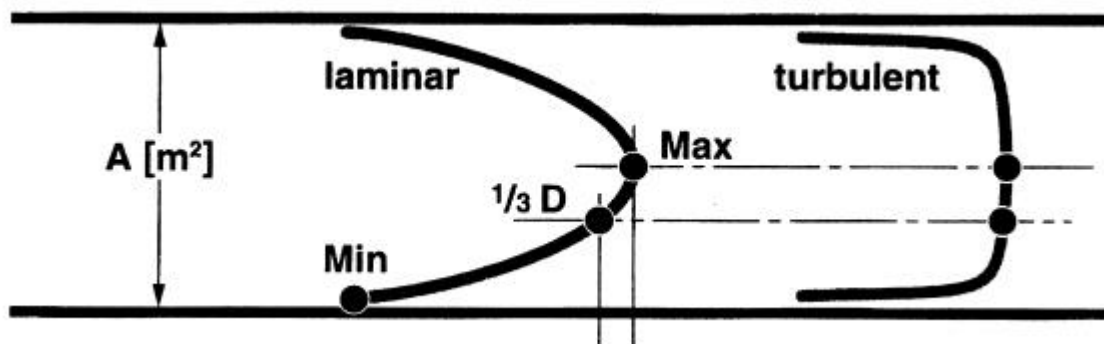


Bild 3.11: Ideale Geschwindigkeitsprofile der Rohrströmung

Die im oben beschriebenen Strömungscharaktere werden durch die Höhe der Reynoldsen Zahl bestimmt. Da für diese Kennzahl der Rohrquerschnitt, die Strömungsgeschwindigkeit und die Zähigkeit der Luft, maßgebend sind, wurden die Rohrquerschnitte so ausgelegt, daß

bei allen zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten in jedem Querschnitt eine ausgeprägte turbulente Strömung vorhanden ist. Diese Strömungsform, die für Reynoldszahlen über $3 \cdot 10^3$ stets herrscht, ist für diese Versuche notwendig da die zu ermittelnden c_w -Werte für einen Partikel im Bereich der turbulenten Strömung nahezu konstant sind. Erst bei Reynoldszahlen über $2 \cdot 10^5$, d.h. bei konstantem Rohrdurchmesser erst bei hohen Geschwindigkeiten, fällt der c_w -Wert mit zunehmender Reynoldszahl ab. Dadurch sind die unter Verwendung dieser Versuchseinrichtung, bei Reynoldszahlen im Bereich von $5 \cdot 10^3$ - $7 \cdot 10^4$, gewonnenen c_w -Werte später für einen maximalen Geschwindigkeitsbereich verwendbar. Bild 3.12 zeigt beispielhaft die Verläufe der Werte für Zylinder und Kugel. Auch alle anderen Körperformen, mit denen eine Näherung der Spanformen möglich sind, zeigen einen ähnlich charakteristischen, im Reynoldszahlbereich der Versuche nahezu konstanten Verlauf.

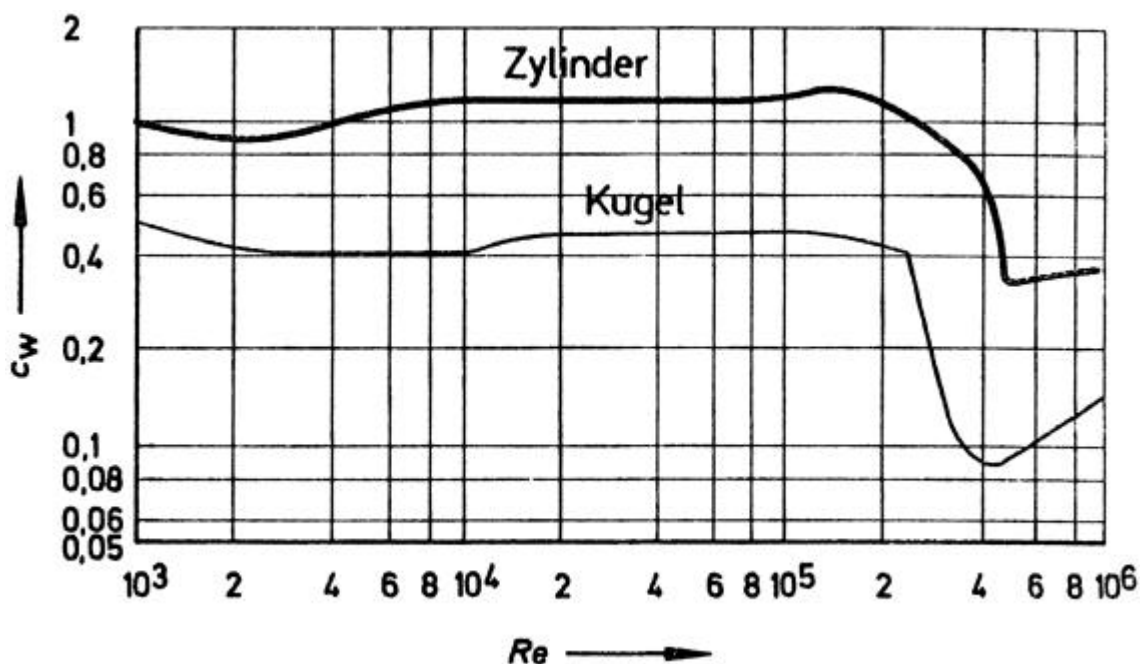


Bild 3.12: Abhängigkeit der c_w -Werte von Kugel und Zylinder von der Reynoldszahl /15/

Des weiteren wirkt sich diese Strömungsform positiv auf die erforderliche Anlaufstrecke aus. Als Anlaufstrecke wird die Länge des Weges nach dem sich das Geschwindigkeitsprofil nicht mehr ändert verstanden.. Diese ist nach B. Eck durchweg kürzer als bei laminarer Strömung und hängt kaum von der Reynoldszahl ab. Bereits nach etwa $10 \times D$ ist eine der endgültigen Kurve sehr nahe Geschwindigkeitsverteilung vorhanden, nach $30 - 40 \times D$ ist das endgültige

Profil mit Sicherheit erreicht. /11/ Dadurch ist die notwendige Bauhöhe bei Einhaltung des geforderten Strömungscharakters für den Laborversuch gut zu realisieren. Zusätzlich ergibt sich bei der Verwendung des in der Rohrmitte relativ flachen Strömungsprofils der Vorteil, daß sich die Wahrscheinlichkeit des Austritts eines Spanes erhöht, was zu einer Verringerung der erforderlichen Versuchszeit führt. Auf dies wird in Abschnitt 5.2.2 ausführlich eingegangen.

Da sich bei unrunder Querschnitten in den Ecken Sekundärströmungen ausbilden können, die das Strömungsprofil wesentlich verschieben können, wurde ein Sichterrohr mit kreisrundem Querschnitt gewählt. Ebenso wurde bei der Gestaltung der Meßstellen und der Querschnittsübergänge auf eine möglichst geringe negative Beeinflussung der Strömung durch Störstellen geachtet.

3.8.2 Querschnittsverlauf des Sichterrohrs

Das Sichterrohr wird im mittleren Bereich durch einen Öffnungswinkel von 10° aufgeweitet. Da die Strömungsgeschwindigkeit der Luft umgekehrt proportional zum durchströmten Rohrquerschnitt ist, ergibt sich bei den im Versuch verwendeten Rohrdurchmessern, 150 mm am Sichtereintritt und 250 mm am Austritt, ein Strömungsverhältnis von 1 : 2,8. Durch die so erzeugte Geschwindigkeitsreduzierung erreicht man eine Schichtung der Partikelgrößenklassen längs des Sichtrohres, wodurch eine verbesserte Sichtgenauigkeit ermöglicht wird. Ebenso kann beim Anlauf der Sichtung die Strömungsgeschwindigkeit sukzessiv, bei gleichzeitigem Beobachten der Spanwolke, erhöht werden. Dadurch wird ein unkontrollierter Spanaustritt, wie er bei einem rein zylindrischem Rohr, beim Anlauf mit zu hoher Anfangsgeschwindigkeit, auftreten könnte, vermieden. Ein Span der sich in einem Bereich des Sichtrohres mit der örtlichen Strömungsgeschwindigkeit v befindet, die größer als dessen Schwebegeschwindigkeit v_s ist, wird nach oben beschleunigt (vgl. Bild 3.3). Da er durch die beschleunigte Bewegung über die Grenze an der $v_s = v$ gilt hinausfliegt, und erst nach dieser wieder durch $v_s > v$ abgebremst wird, muß durch eine Ausgleichstrecke dafür gesorgt werden, daß durch diesen Vorgang keine Späne vor dem Erreichen ihrer Schwebegeschwindigkeit ausgetragen werden. Dies erfolgt durch ein zylindrisches Abschlußrohr im oberen Bereich des Sichters. Da dieser Effekt mit größer werdendem Öffnungswinkel im mittleren Bereich zunimmt, wurde dieser möglichst klein gewählt, ohne dabei jedoch die im oberen Abschnitt beschriebenen Vorteile zu gefährden.

3.8.3 Anhaften von Partikeln durch elektrostatische Aufladung

Bei der pneumatischen Förderung von trockenen Holzspänen ist immer mit elektrostatischen Aufladungen zu rechnen. Dieses Oberflächenphänomen beruht darauf, daß beim mechanischem Kontakt zweier Körper aus unterschiedlichem Werkstoff mit gleicher Temperatur innerhalb einer gemeinsamen Grenzschicht der Werkstoffe ein Elektronenübertritt erfolgen kann. Die Wahrscheinlichkeit eines Elektronenübertritts und die Höhe der daraus entstehenden elektrischen Helmholtz-Doppelschicht wird maßgeblich durch die den beteiligten Stoffen als Eigenschaft zugeschriebenen Elektronenaustrittsenergien bestimmt. Der Elektronenübergang erfolgt hierbei von dem Stoff mit der kleineren Elektronenaustrittsenergie (Donator) zum Stoff mit der größeren Austrittsenergie (Akzeptor), und lädt ihn negativ auf. Ein Gleichgewichtszustand tritt ein, wenn die auf den unterschiedlichen Austrittsenergien beruhende Potentialdifferenz gleich der Potentialdifferenz aus der übergetretenen Ladung ist. /16/ Beim Sichtversuch ist die Elektronenaustrittsenergie der Holzwerkstoffe kleiner als die des Acrylglases, also treten Elektronen vom Holzwerkstoff zum Acrylglas über, das dadurch in der Grenzschicht eine negative Ladung erhält, während die Grenzschichtladung der Holzpartikel entsprechend positiv wird (Bild 3.13).

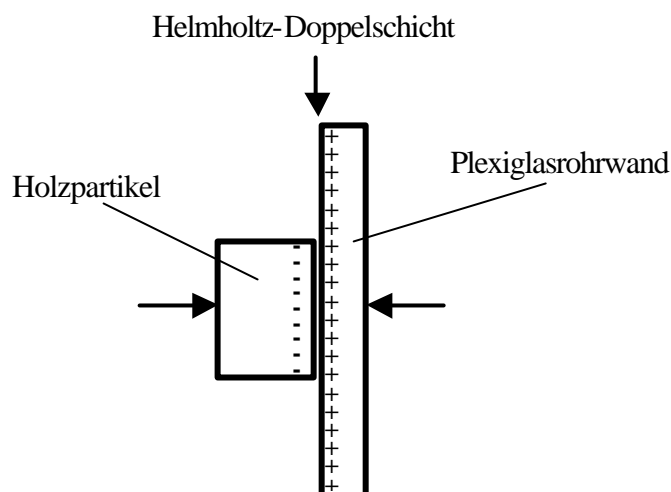


Bild 3.13: Elektrostatische Aufladung beim Sichten

Da Acrylglas und Holzwerkstoffe Isolatoren sind, und die Elektronenaustrittsenergie von Isolatoren hoch ist, kommt es bei der Bewegung der Holzpartikel im Sichterrohr zu einer starken elektrostatischen Aufladung. Dies führt dazu, daß Partikel an der Wand anhaften und somit das Sichterergebnis verfälschen. An Störstellen der Strömung, z.B. an Querschnitts-

übergängen, an denen es zu vermehrten Wandberührungen kommt, tritt dieser Effekt verstärkt auf. Um das Anhaften der Späne am Sichterrohr zu verringern wurde die Innenseite des Sichterrohrs mit einem Antistatikmittel benetzt. Dieses Mittel bindet Wasser aus der umgebenden Luft, wodurch auf der behandelten Oberfläche eine aus wenigen Moleküllagen bestehende Wasserschicht entsteht, die das Anhaften durch elektrostatische Aufladung über eine Ladungsableitung weitgehend verhindern kann. Um diesen Effekt zu fördern, wurde der Ansaugstutzenfilter des Ventilators von Zeit zu Zeit mit einem Zerstäuber mit Wasser besprüht. Da ein Isolierstoff wie Acrylglas nicht leitfähig ist, kann man von einem Kontakt zur Erde auch keine Ladungsableitung erwarten. Zusätzlich zur Behandlung mit Antistatikmittel bleibt als einzige Möglichkeit noch, das den Isolierstoff umgebende Medium Luft leitfähig zu machen. Das ist durch Ionisation möglich, durch die es zu einer Anlagerung von Ionen entgegengesetzter Polarität auf der aufgeladenen Fläche kommt. Eine solche Ionisation kann z.B. durch Einwirkung ionisierender Strahlung, wie sie z.B. durch die von radioaktiven Atomkernen ausgehende Alpha-Strahlung erzeugt wird, hervorgerufen werden. Ebenso führt hochenergetische elektromagnetische Strahlung, wie Röntgen- und UV-Strahlung, wenn auch weniger Effektiv zur Ionisation der Luft. Auch sind Flammen außerordentlich gut wirkende Ionisatoren /17/. Da diese Ionisationsmöglichkeiten für den Versuch nicht zu realisieren sind, und bei den meisten die Reichweite der Ionisation bei weniger als 10cm liegt, wurde nur das Antistatikmittel angewendet.

3.8.4 Meßstellen für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung

Die wichtigste Voraussetzung für eine exakte Strömungsgeschwindigkeitsmessung in einem Rohr ist die Eignung des Meßortes. Die Messung erfordert eine drall- und rückstromfreie Strömung. Deshalb muß die Meßstelle in ausreichendem Abstand von Störstellen gewählt werden. Rückströmungen die durch Blenden, Klappen und Krümmer entstehen können, sind in der Regel nach einem Abstand in Höhe des zweifachen Durchmesser zur Störstelle abgebaut (Bild 3.14). Allerdings kann das Strömungsprofil danach immer noch stark verzerrt sein /18/.

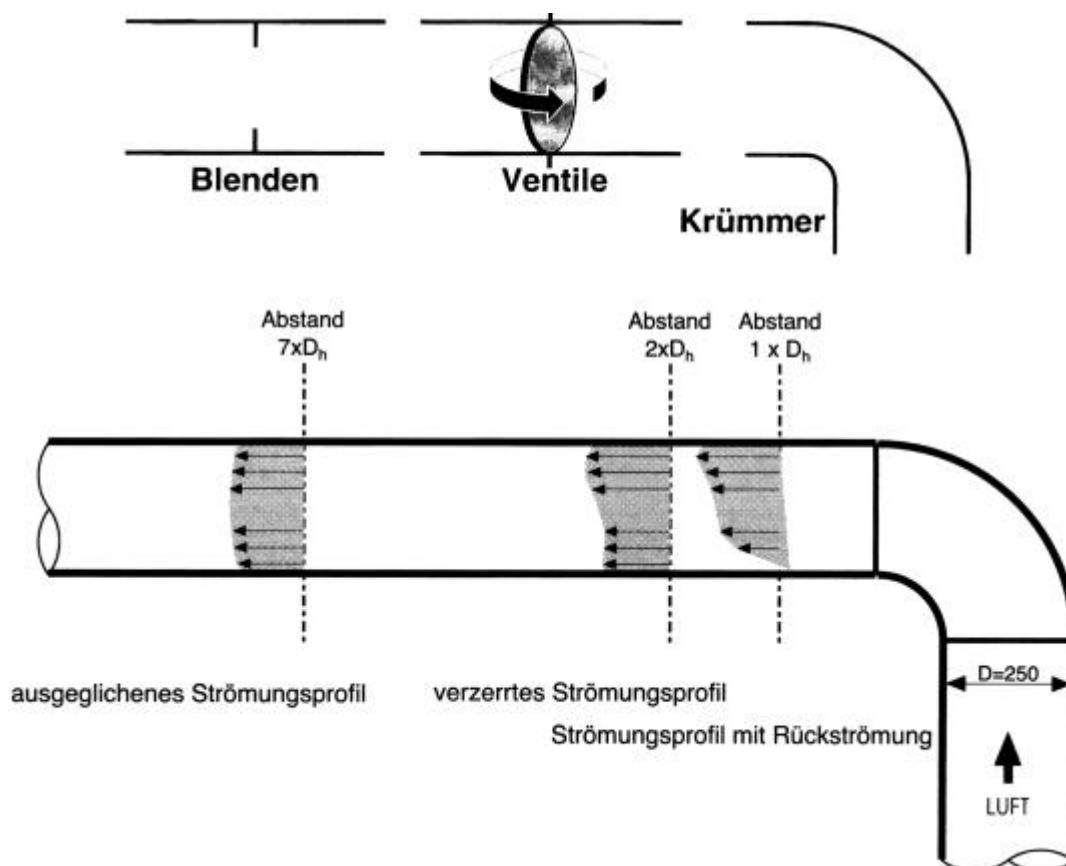


Bild 3.14: Mögliche Störstellen (oben), Abbau der Unregelmäßigkeit des Strömungsprofils mit zunehmendem Abstand von der Störstelle (unten).

Unter Berücksichtigung dieser Punkte, d.h. in ausreichendem Abstand hinter dem Krümmer, wurden zum Messen und Einstellen des für den Versuch notwendigen, zur Sichtachse symmetrischen Geschwindigkeitsprofils, am Sichterrohr an drei Stellen je zwei Bohrungen angebracht. Diese sind jeweils um 90° zueinander versetzt, um Meßlinien zu erhalten, die aufeinander senkrecht stehen und durch die Sichtermitte verlaufen. Um die Messung definiert ausführen zu können, sind am Gestell Querstreben zum Auflegen der Strömungsmeßsonde angebracht. Durch Einkerbungen an diesen Streben wird sichergestellt, daß die Meßpunkte sich bei jeder Messung an den geforderten Orten im Rohr befinden.

3.9 Der Späneabscheider

Um die aus dem Sichterrohr austretenden Späne vom Luftstrom abscheiden zu können, ohne die Strömungsverhältnisse im Austrittsquerschnitt zu verändern, wurde auf das Sichterrohr ein Spänefangtrichter aufgesetzt. Da bei Vorversuchen festgestellt wurde, daß ein großer Teil

der ausgetretenen Späne wieder ins Sichterrohr zurückfällt, wurde um dies zu vermeiden ein zylindrischer Kreiskegel als Strömungsteiler, der die Strömung nach dem Austritt pilzförmig nach außen ablenkt, über dem Sichterende angebracht.

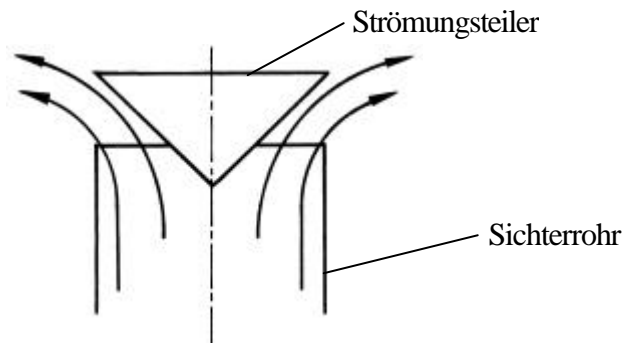


Bild 3.15: Sichterrohr mit Strömungsteiler

Um beim Abnehmen des Spänfangtrichters zu verhindern, daß einzelne Partikel zwischen Sichterrohr und Ausschnitt des Trichters verloren gehen, wurde um den Ausschnitt eine Papiermanschette angebracht. Diese wurde nach dem Aufsetzen mit einem Gummiring an das Sichterrohr angelegt.

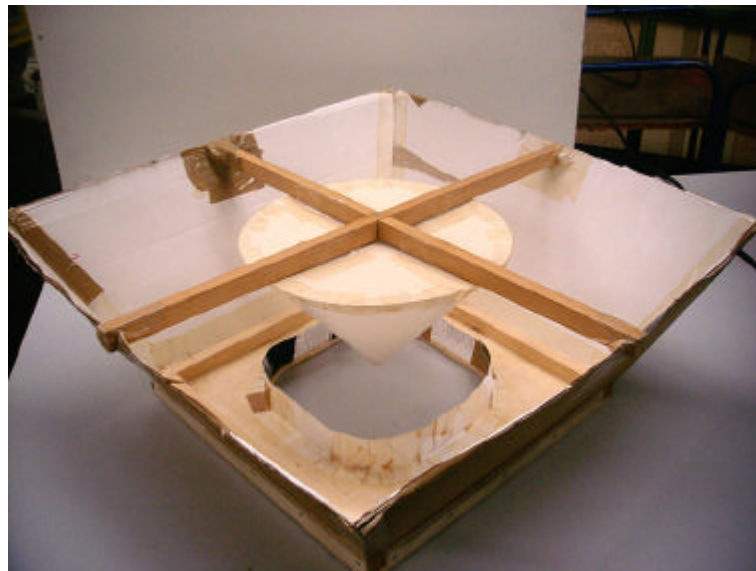


Bild 3.16: Späneabscheider mit Manschette und Strahlteiler

Bei Messungen der Strömungsgeschwindigkeitsverteilung mit und ohne aufgesetzten Abscheider wurde gezeigt, daß der Späneabscheider keinen messbaren Einfluß auf die Strömungsverhältnisse im Sichter hat.

3.10 Frequenzumformer

Wenn ein Radialventilator über einen Frequenzumformer angesteuert wird, ist darauf zu achten, daß der Ventilator nicht für längere Zeit in einer seiner Resonanzfrequenzen betrieben wird. Die Schwingungsamplitude muß dabei am Motor selbst - nicht außen am Gehäuse - gemessen werden. Die Resonanzfrequenzen müssen, falls sie zum Erreichen des gewünschten Arbeitsbereich passiert werden, schnell durchfahren werden. Bei niedrigen Drehzahlen, d.h. geringem Motordrehmoment ist zu beachten, daß der Motor nicht durch Gegenstrom zum annähernden Stillstand kommen kann. Der Motor läuft sonst Gefahr überhitzt zu werden. In Bild 3.17 ist der zur Steuerung des Luftvolumenstroms verwendete Frequenzumformer dargestellt.



Bild 3.17: Frequenzumformer zur Drehzahlregulierung

4. Versuchsvorbereitung

4.1 Auswahl der Zerspanungswerkstoffe und Werkstücke

Für die Herstellung der zu untersuchenden Spankollektive wurden die, aufgrund ihrer häufigen Verwendung, für die Holzbearbeitung wichtigsten Werkstoffe ausgewählt. Dies sind als Vertreter der Holzwerkstoffe die Span- und MDF- Platte, als Vertreter der Harthölzer Buche und als Weichholzvertreter Fichte. Dazu wurde noch PVC- Kantenmaterial, das bei der Späneentsorgung vermehrt mitbetrachtet werden muß, hinzugenommen.

Bei Buche und Fichte ist es wichtig trockene Versuchswerkstücke zu verwenden, da diese Materialien auch bei der Verarbeitung üblicherweise in diesem Zustand vorliegen. Zudem erhöht die Feuchtigkeit die Rohdichte des Werkstoffes erheblich. Die im Laufe der Sichtung, durch den von der Luftströmung verursachten Trocknungseffekt, abnehmende Feuchtigkeit würde sich nachteilig auf die Genauigkeit der Messung auswirken. Da Buche und Fichte aufgrund ihres natürlichen Wuchses eine stark inhomogene Struktur aufweisen können, wurde ein möglichst homogenes Werkstück ausgewählt, das groß genug war, um von diesem mit allen Zerspanungsverfahren eine ausreichende Menge von Spänen erzeugen zu können. Dies ist von Bedeutung, da der Dichtekontrast innerhalb der gleichen Holzart bei Massivhölzern bis zu einem Verhältnis von 2 : 1 bis 3 : 1 betragen kann /19/. Beim Versuch würde die Variation der Dichte, die als Wurzel in die Berechnung des c_w -Wertes eingeht, zu einer Abweichung der Schwebegeschwindigkeit führen. Daraus ergäbe sich bei der anschließenden Berechnung des c_w -Wertes, bei der die Schwebegeschwindigkeit quadratischen Einfluß hat, eine Abweichung zwischen realem und errechnetem Wert von bis zu 300 %.

4.2 Auswahl der Zerspanungsverfahren

Zur Herstellung der zu untersuchenden Spankollektive wurden die Verfahren, Werkzeuge und Schnittdaten, die bei der Bearbeitung der ausgewählten Werkstoffe üblich sind, verwendet. Mit dem Verfahren des Kreissägens, das nach DIN 8589, in der Gruppe "Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden" in der Hauptgruppe "Trennen" als Teil 6 eingeordnet ist, und dem Verfahren des Fräsens, das der selben Untergruppe als Teil 3 zugeordnet ist, wurden alle ausgewählten Werkstoffe bearbeitet. Da MDF und Spanplatte nicht hobelnd bearbeitet werden, wurde dieses Verfahren nur auf Buche und Fichte angewendet. Dieses Verfahren, das in der Holzbearbeitung im allgemeinen Sprachgebrauch als "Hobeln" bezeichnet wird,

verfahrenstechnisch gesehen aber korrekterweise Umfangsplanfräsen heißen müsste, wird nach DIN 8589 in die Untergruppe Fräsen eingeteilt. Die Einteilung der Verfahren ist in Bild 4.1 dargestellt [20]. Die Späne aus PVC - Kantenmaterial wurden aus dem Arbeitsraum einer Kantenanleim- und Bearbeitungsmaschine entnommen, die nach dem Aufleimen einer Kante auf ein Trägermaterial die Überstände durch Überfräsen entfernt. Das Verfahren des Schleifens, das nach der genannten DIN in die Gruppe "Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden" eingeordnet ist, wurde nicht angewandt. Bei diesem Verfahren entstehen ausschließlich feinste Partikel, die aufgrund ihrer Größe und Gestalt eine sehr niedrige Schwebe- und Sedimentationsgeschwindigkeit haben, und deshalb nicht mit dem ausgewählten Sichtprinzip zu untersuchen sind. In Kapitel 7.4 wird eine Möglichkeit zur Bestimmung des c_w -Wertes für Partikel, die hier nicht behandelt werden können, vorgestellt.

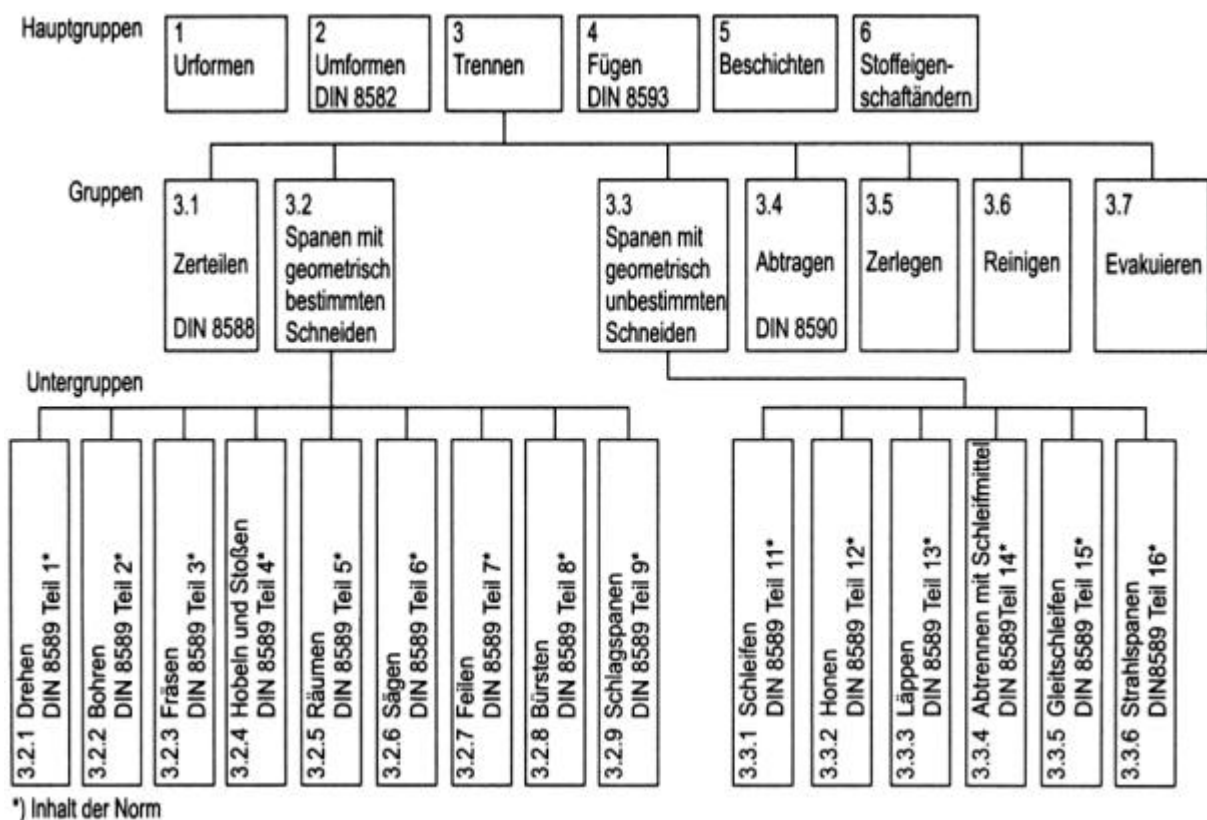


Bild 4.1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8589

4.2.1 Zur Zerspanung verwendete Maschinen

Zur Erstellung der Sägespäne wurde eine HOLZHER Tischkreissäge vom Typ Super Slide 1245 verwendet. Da diese über kein automatisches Vorschubaggregat verfügt, erfolgte der Vorschub per Hand. Bild 4.2 zeigt die verwendete Maschine.



Bild 4.2: Kreissäge HOLZHER Super Slide 1245

Bild 4.3 zeigt die zur Erstellung der Hobelspäne verwendete Hobelmaschine der Firma Aldinger, die ebenfalls keinen automatisierten Vorschub besitzt.



Bild 4.3: Hobelmaschine Aldinger

Zur Erzeugung der Frässpäne wurde ein Homag Bearbeitungszentrum vom Typ BAZ 31 OPTICENTER, welches in Bild 4.4 abgebildet ist, benutzt.



Bild 4.4: Homag Bearbeitungszentrum Typ BAZ 31 OPTICENTER

4.2.2 Werkzeuge und Schnittdaten der Zerspanung

Die aus den Größen der Werkzeugdrehzahl, Schneidenanzahl und Vorschubgeschwindigkeit gebildete charakteristische Größe "Vorschub pro Zahn" hat neben der Schneidengeometrie einen maßgeblichen Einfluß auf die Gestalt der entstehenden Späne. Da beim Hobeln und Kreissägen der Vorschub von Hand erfolgte, wurde die Vorschubgeschwindigkeit für diese Verfahren aus den meßbaren Größen der Werkstücklänge und der Bearbeitungszeit für diese Länge ermittelt. Beim Fräsen auf dem Bearbeitungszentrum konnten die eingestellten Werte direkt übernommen werden.

Die bei der Zerspanung verwendeten Werkzeuge und Schnittdaten werden bei der, von Verfahrensart und Werkstoff abhängigen, Korngrößenverteilung mit angegeben. Diese Verteilungen sind in Kapitel 5.1.5 und im Anhang 10.1 aufgeführt.

4.3 Erfassung der Späne

Zur möglichst genauen Ermittlung der Korngrößenverteilung ist es wichtig, daß alle bei der Zerspanung anfallenden Partikel aufgefangen werden. Da die verwendeten Maschinen zur Einhaltung der geltenden Vorschriften an eine zentrale Absauganlage angeschlossen sind, wurde zur Erfassung der Späne ein sogenannter Polizeifilter eingesetzt. Bei der Kreissäge konnte dieser in die Rohrleitung der zentralen Absaugung eingebaut werden. Dadurch wurden die entstehenden Partikel unmittelbar nach dem Zerspanen von der Absaugvorrichtung der Kreissäge erfaßt, von dort durch Absaugrohre zum Polizeifilter gefördert, und innerhalb diesem abgeschieden. Da die Absaugvorrichtung des Bearbeitungszentrums nur einen sehr geringen Erfassungsgrad besitzt, der darüber hinaus nicht für alle Späneklassen gleich groß ist, wurde mit einem, von Hand nachgeführten, Absaugschlauch unmittelbar am Werkzeug abgesaugt. Der eingesetzte Filter scheidet in erster Instanz wie ein Prallabscheider und reinigt anschließend die Abluft in einem Flächenfilter. Das eingesetzte Filtermittel der Apparatur läßt sich mechanisch reinigen. Durch Betätigen einer Klopfvorrichtung fällt die auf dem Filtermittel abgesetzte Staubmenge in die vorgesehene Auffangwanne. Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der erzeugten Späne wurden aus der Auffangwanne des Filters alle Partikel entnommen, wodurch ein Fehler bei der Probenentnahme ausgeschlossen werden konnte. Nach der Probenentnahme wurden die Filtertaschen durch Schütteln, Ausblasen mittels Druckluft und durch Absaugen mit einem Industriesauger gereinigt, um eventuelle

Verunreinigungen der nachfolgenden Spankollektive durch Rückstände so gering wie möglich zu halten.

Da beim Hobeln vorwiegend gröbere Partikel entstehen, und die Maschine nicht an die Absaugung angeschlossen ist, wurden die Partikel direkt an der Auswurfsstelle der Maschine, die nach jedem Vorgang gereinigt wurde, entnommen.



Bild 4.5: Polizeifilter

4.4 Auswahl der Aufbewahrungsmöglichkeit für die Spanproben

Nach der in Kapitel 5.1 beschriebenen Siebanalyse der bei der Zerspanung gewonnenen Spankollektive lagen 63 Spanklassen, die sich nach Werkstoff, Herstellungsverfahren und Korngröße unterschieden vor. Bei der darauffolgenden Sichtung wurden diese Klassen nochmals je nach Variation in 8-15 Fraktionen aufgeteilt, wodurch 427 unterschiedliche Spanproben entstanden.

Da es aus Rationalisierungsgründen nicht sinnvoll war, die durch die Siebanalyse und Sichtung gewonnenen Proben sofort weiter zu untersuchen, mußte eine geeignete Aufbewahrungsmöglichkeit gefunden werden. Durch die große Probenanzahl und die Anforderung an die Aufbewahrung, das Versuchsergebnis möglichst nicht zu beeinflussen, wurden Papiertüten verwendet. Diese eignen sich hierfür besonders gut, da sie im Gegensatz zu Plastiktüten sich statisch nicht aufladen, wodurch kein Verlust an Probenmaterial durch Zurückbleiben von einzelnen Partikeln auftritt.

4.5 Feinjustierung und Aufnahme des Strömungsprofils

Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Sichterrohr war nach dem Zusammenbau der Versuchseinrichtung, durch Störungen bei der Luftzufuhr (vgl. Kapitel 3.9.1), nicht symmetrisch zur Sichterachse. Da dies jedoch Voraussetzung für ein gutes Sichterergebnis ist, mußte das Geschwindigkeitsprofil vor den Versuchen fein justiert werden. Dies erfolgte iterativ durch die Verschiebung der zwischen Schlauch und Gestell angebrachten Einstellkeile (vgl. Kapitel 3.9.2), und dem nachfolgendem Messen der veränderten Verteilung im Sichter. Durch die große Anzahl der Einflußfaktoren wurden viele Iterationsschritte benötigt, um die für die Sichtung notwendigen Bedingungen zu erhalten. Damit die eingestellte optimale Verteilung sich nicht im Laufe der Versuche verstellen kann, wurden alle an der Luftzufuhr beteiligten Bauteile gegeneinander fixiert. Bei der Überprüfung der Einstellungen während des Versuchs hat sich gezeigt, daß das Profil durch diese Maßnahmen nahezu konstant geblieben ist.

4.5.1 Meßverfahren

Die Messungen zum Einstellen und Aufnehmen des Strömungsprofils wurden an allen drei Meßquerschnitten durchgeführt. Die Meßpunkte lagen dabei auf zwei zueinander senkrechtstehenden, durch die Rohrmitte verlaufenden, Meßlinien. Bei einer turbulenten Rohrströmung existiert ein turbulentes Grenzschichtprofil mit einer weitgehend konstanten Strömung in der Rohrmitte und steilem Abfall an den Wänden. Um dies zu berücksichtigen, wurden die Meßpunkte auf dem Rohrdurchmesser zum Rand hin mit abnehmendem Abstand angeordnet. Durch die Auflage am Sichtergestell und durch eine auf dem Teleskopstahl der Meßsonde angebrachten Meßskala konnten die einzelnen Meßpunkte genau eingehalten werden.

Bild 4.6 zeigt ein mit diesem Verfahren, nach der Einstellung und Justierung, aufgenommenes Profil der Geschwindigkeitsverteilung im obersten Meßquerschnitt. Zur Einstellung und Überwachung der für den Versuch relevanten, in der Rohrmitte am Sichteraustritt herrschenden, Strömungsgeschwindigkeit, wurde die Meßsonde am oberen Meßquerschnitt mit Klebeband fixiert.

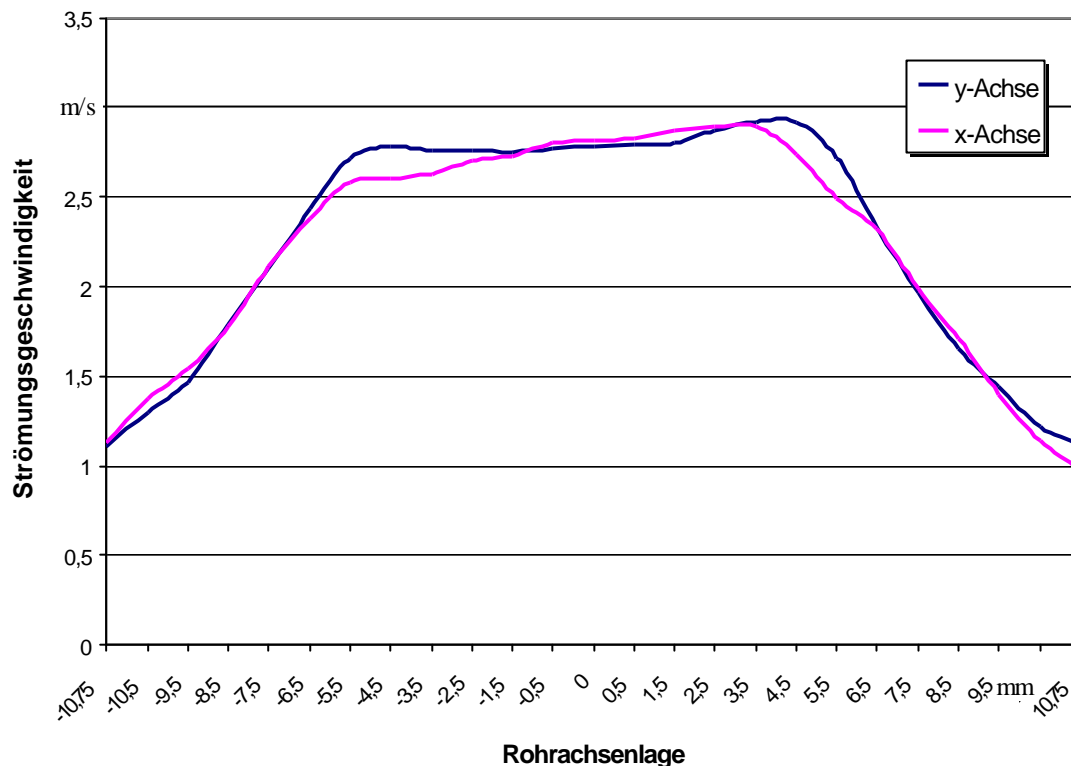


Bild 4.6: Geschwindigkeitsverteilungen auf den beiden zueinander senkrecht stehenden Meßachsen

4.5.2 Meßgerät zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung

Bei der Messung der Strömungsgeschwindigkeit an den Meßpunkten im Sichterrohr kam ein Sekunden-Anemometer des Typs testo 452 zum Einsatz (Bild 4.7). Das Meßgerät selbst verfügt über eine LCD-Anzeige zum Ablesen der Meß- und Einstellwerte. Des weiteren verfügt das Gerät über zwei Anschlußbuchsen für unterschiedliche Fühler und Sensoren. Über verschiedene Tasten kann die Meßwertbildung beeinflusst werden. So läßt sich beispielsweise durch einfachen Tastendruck zwischen mehreren Meßwerten hin- und herschalten. Zusätzlich besteht die Möglichkeit über einen, als Zubehör erhältlichen, PC-Adapter Daten zum Speichern, Drucken und Auswerten direkt vom Gerät in den PC zu laden. Des weiteren

werden ein mit einer Infrarotschnittstelle ausgestatteter Drucker, und ein Recorder zum Drucken und Speichern als Zubehör angeboten.



Bild 4.7: Sekunden-Anemometer testo 452 mit Zubehör

4.5.3 Übersicht über die einsetzbaren Sondentypen

An den Sekundenanemometer testo 452 kann im Strömungsmeßbereich zwischen 0 und 100 m/s der jeweilig optimale Aufnehmer für die drei wichtigsten Teilbereiche (unterer und mittlerer Strömungsbereich sowie Hochgeschwindigkeitsbereich) angeschlossen werden. Thermische Aufnehmer werden eingesetzt für exakte Messungen im Bereich von 0...10 m/s. Flügelräder führen im mittleren Strömungsbereich bei Luftgeschwindigkeiten von 4...40 m/s zu optimalen Ergebnissen. Für Messungen in hohen Geschwindigkeiten und in stark verschmutzten Strömungen mit hohem Partikelanteil werden Staurohre angewendet. Im folgenden Bild 4.8 werden die unterschiedlichen Sondentypen, die eingesetzt werden können, näher dargestellt. Das Bild enthält neben den Sondengrößen auch die möglichen Einsatztemperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten, so daß damit eine Auswahl des Sondentyps getroffen werden kann.

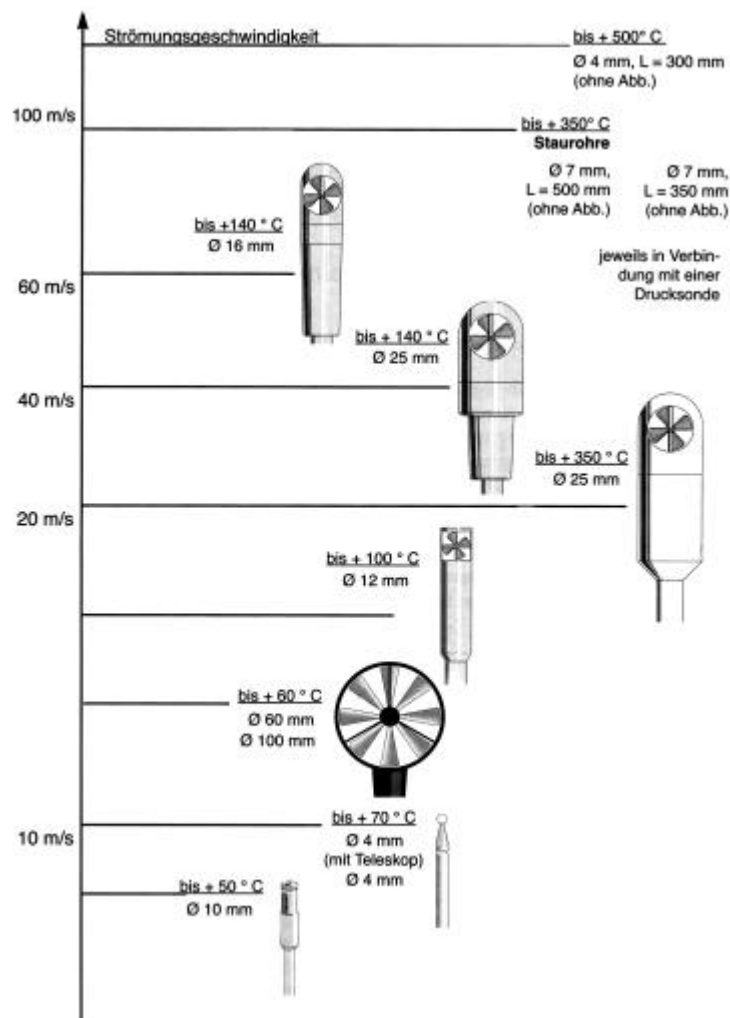


Bild 4.8 :Übersicht der verschiedenen Sonden und deren Einsatzbedingungen

4.5.4 Ausgewählter Sondentyp

Für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung im Sichter wurde ein thermischer Aufnehmer, der im Bereich der im Versuch auftretenden Luftgeschwindigkeiten von 0 bis 4 m/s am geeignetsten ist, verwendet. Um alle Meßpunkte im Rohr durch eine Bohrung erreichen zu können, wurde eine Sonde mit Teleskopstil ausgewählt. Bild 4.9 zeigt diese Sonde.



Bild 4.9: Thermische Strömungssonde mit Teleskopstil

4.5.5 Funktionsprinzip des thermischen Strömungssensors

Der Sensor (vgl. Bild 4.10) besteht aus einer Aluminiumkugel, die in einem Sackloch einen NTC(1)-Temperatursensor enthält. Dieser NTC(1) wird durch einen elektrischen Strom auf eine Temperatur von $+100^{\circ}\text{C}$ erhitzt. Die Joulesche Wärme wird kugelsymmetrisch in das Aluminium abgeführt. Die auf die Kugel auftreffende (kältere) Luftströmung kühlt die Kugel ab. Dadurch steigt der Widerstand des NTC(1). Mit einer Regelschaltung wird die dem NTC(1) zugeführte Wärmeleistung derart geregelt, daß die Temperatur konstant bleibt. Der Regelstrom bzw. die Heizspannung ist direkt ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Der NTC(2) wird zur Temperaturkompensation des NTC(1)- Signals verwendet.

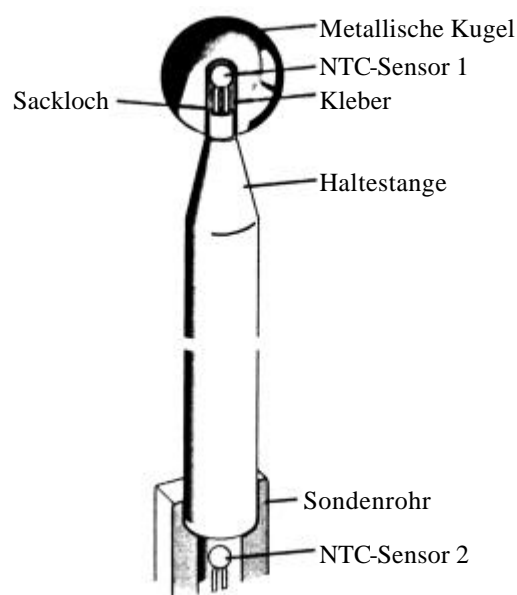


Bild 4.10: Der Strömungssensor

4.5.6 Einsatzbedingungen des Sensors

Die thermischen Kugelsensoren werden beim Hersteller in absolut gerichteter Strömung im Freistrahle senkrecht zur Haltestange angeströmt und abgeglichen. Um optimale Meßergebnisse zu erzielen, müssen diese Bedingungen auch bei der Messung eingehalten werden. Dies ist besonders bei der Messung in Rohren zu beachten. Außer gerichteter Strömung können in Rohren verwirbelte oder drallbehaftete Strömungen auftreten, wodurch es zu einer Fehlermessung (bis zu 16 % Abweichung, vgl. Bild4.13) kommen kann. Dies kann durch eine geeignete Anordnung der Meßstelle oder Einbauten zum Ausgleich der Strömung erfolgen (vgl. Kapitel 3.6.4).

4.5.7 Fehler beim Messen mit einem thermischen Kugelsensor

Beim Drehen des Sensors um die Haltestange, bei senkrechter Strömung bezüglich der Stange, ist die Meßwertabweichung $< 2,5 \%$ des realen Meßwerts. Dargestellt ist diese Position in Bild 4.11. Die Umströmung der Haltestange hat in dieser Lage keinen Einfluß auf die Luftgeschwindigkeit durch den thermischen Strömungssensor.

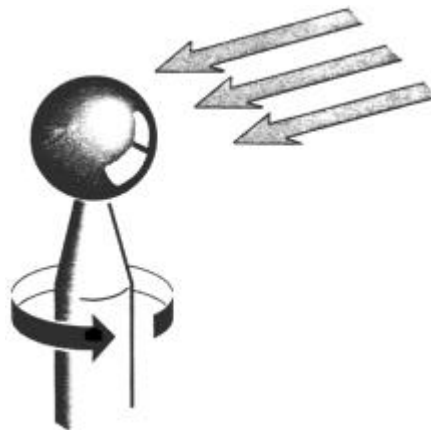


Bild 4.11: Optimale Anströmung des Kugelsensors

Wird der Kugelsensor jedoch, wie in Bild 4.12 dargestellt, mit der Haltestange verkippt, was dem Fall einer schrägen Anströmung bei der Rohrströmung entspricht, (Gierwinkel-Abhängigkeit) so tritt, aufgrund der verwirbelten Rückströmung von der Stange zur Kugeloberfläche, eine Meßwertabweichung ein. Diese Abweichung ist nicht eliminierbar, kann jedoch reproduziert werden. In Bild 4.13 sind die Abweichungen für verschiedene Gierwinkel ablesbar.

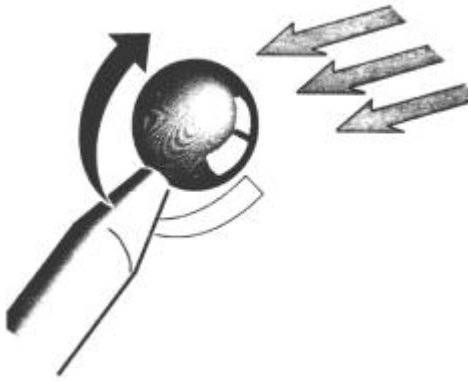


Bild 4.12: Gierwinkel bei der Anströmung

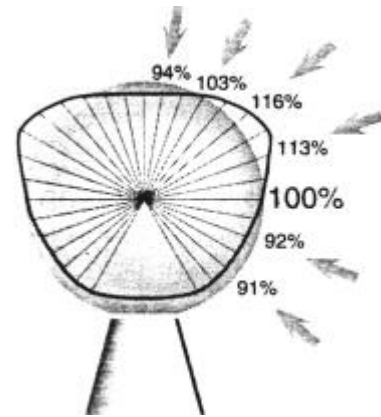


Bild 4.13: Abweichung durch Gierwinkel

Trotz dieser genauen Kenntnis der unvermeidlichen Meßwertabweichung kann nicht genau gesagt werden, wie groß die Abweichung der Luftgeschwindigkeitsmessung im Sichterrohr ist. Zwar steht die Haltestange durch die Auflage am Gestell senkrecht zur Strömung, doch kann es durch die turbulente Strömung zur schrägen Anströmung der Kugel kommen, ohne das gesagt werden kann, um welchen Wert die Messung letztendlich abweicht.

Die Temperaturkompensation des Sensors arbeitet von -10 bis 60 °C. Der Sensor hat einen Meßbereich von 0 bis 10 m/s, wobei von 0 bis 2 m/s mit maximal $2,5$ % Abweichung nach oben oder unten vom Meßwert gerechnet werden muß. Im Bereich zwischen 2 und 10 m/s ist mit einer maximalen Abweichung von 5 % vom Meßwert zu rechnen.

4.5.8 Allgemeine Fehler bei der Luftstrommessung

In der Meßtechnik unterscheidet man zwischen zufälligen und systematischen Fehlern. Die zufälligen Fehler kann man anhand von Fehlerrechnungen z.B. nach VDI 2080 abschätzen. /21/ Dabei werden die Unsicherheiten durch die Meßanordnung, die Meßmethode, die Meßgeräte und die Ablesungen zu einer Gesamtunsicherheit zusammengefaßt. Bei den systematischen Fehlern handelt es sich um "versteckte" Fehler, die dadurch entstehen, daß die Meßperson verschiedene Einflüsse, die das Meßergebnis verfälschen, nicht erkennt. Ein gutes Beispiel dafür ist die Messung der Luftgeschwindigkeit im Rückstromgebiet eines Bogens mit einem Meßgerät das unabhängig von der Strömungsrichtung positive Werte anzeigt.

Zu den in Kapitel 4.5.7 beschriebenen Fehlerquellen beim Messen mit einem thermischen Sensor müssen im Versuch mögliche Fehler, die durch Störstelleneinfluß und durch Rückstromeffekte entstehen können, beachtet werden.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Analyse der Korngrößenverteilung mittels Siebanalyse nach DIN 66165

Bei der Siebanalyse wird eine bestimmte Menge der zu untersuchenden Partikel durch ein oder mehrere Siebe in Fraktionen getrennt und es werden deren Massenanteile ermittelt. Die Massenanteile können mit einem geringen Fehler bestimmt werden. Die Problematik der Siebanalyse liegt im Ermitteln der Trenngrenze des durch das Sieben ausgeführten Trennvorganges. Die Siebung kann nach DIN 66165 nacheinander mit Einzelsieben oder gleichzeitig mit einem Siebsatz von Hand oder mit einer Maschine durchgeführt werden. Der Transport der Partikel durch die Sieböffnungen wird durch Trägheitskräfte, durch Schwerkraft und/oder Strömungskräfte sowie bei sehr großen Partikeln auch von Hand bewirkt.

Die für den Versuch erzeugten Spankollektive wurden mittels Maschinensiebung mit bewegtem Siebsatz in gasförmigen, ruhendem Fluid nach DIN 66165 (Verfahren F) in Späneklassen aufgeteilt. Dafür wurde eine Vibrationssiebmaschine der Firma Retsch verwendet. Bei der Siebung kamen Analysesiebe mit Drahtsiebböden nach DIN ISO 3310, Teil 1 aus der Hauptreihe R 20/3, der Nennmaschenweiten 0,063; 0,125; 0,250; 0,5; 1; 2 und 4 mm des selben Herstellers zum Einsatz. Die Siebmaschine und die Siebe sind auf den folgenden Bildern 5.1 und 5.2 dargestellt. Zusätzlich zu den oben erwähnten Sieben ist auf dem Bild 5.1 noch die Auffangwanne, die die Partikel enthält, die auch das feinste Sieb passieren konnten, zu sehen.



Bild 5.1: Analysesiebe mit Drahtsiebböden



Bild 5.2: Siebmaschine mit Siebsatz

Aus Gründen der Zeitersparnis wurden die Einzelsiebe nach der Nennmaschenweite steigend geordnet aufeinander gesetzt und als Siebsatz verwendet.

Holzspäne haben in ihren drei Hauptausdehnungsrichtungen sehr unterschiedliche Abmessungen. In einem Kollektiv solcher Späne kann jede Kombination aus Länge und beliebigen Querschnitt vorhanden sein. Es werden bei der Siebung zunächst die Späne durchfallen, bei denen Länge und Querschnitt kleiner als die Siebmaschenweite sind. Späne mit hohem Längen zu Querschnittverhältnis werden jedoch zum Großteil über das Sieb hinweggleiten. Da hier aber auch solche, bei denen der Querschnitt kleiner als die Maschenweite, die Länge aber größer, durchfallen sollen, wurde die einstellbare Amplitude der Siebmaschine zu 100 %, und der Modus Dauerbetrieb gewählt. Es hat sich gezeigt, daß durch die dadurch erreichte größere Wurfhöhe einer Amplitude die Wahrscheinlichkeit, daß längere Späne annähernd senkrecht auf das Sieb auftreffen und durchfallen, steigt. Diese Wahrscheinlichkeit nimmt jedoch mit zunehmender Spanlänge ab, was durch eine

Verlängerung der Verweilzeit auf dem Sieb berücksichtigt werden muß. Durch diese Maßnahmen konnte auf mechanische Siebhilfen, bei denen die Gefahr der Zerkleinerung des Siebgutes besteht, verzichtet werden.

Bei der Siebung wurde an allen Analysesieben Anhaften von feinstem Siebgut am Sieb durch statische Aufladung beobachtet. Ebenso konnte bei allen Werkstoffen ein Zusetzen von Sieböffnungen durch in Maschen verklemmte Partikel festgestellt werden. Die dadurch zurückbleibenden Partikel wurden vor dem nächsten Siebdurchgang durch Abblasen der Siebe mit Druckluft entfernt. Aufgrund ihres Harzgehaltes kam es bei den Massivhölzern Buche und Fichte teilweise zum Anhaften von feinen Partikeln am Grobgut.

5.1.1 Auswahl der optimalen Siebzeit

Die Qualität der Siebanalyse hängt wesentlich von der Siebdauer ab. Es muß den einzelnen Partikeln genügend Zeit verbleiben, durch die entsprechenden Siebmaschen zu fallen. Nach Vorgabe der DIN 66165 ist die Siebzeit eines abriebfesten Stoffes dann erreicht, wenn die Masse des Siebdurchganges in einer Minute weniger als 0,1 % der Masse des Aufgabengutes beträgt. Beim Siebsatz ist die Siebdauer für die einzelnen Analysensiebe unterschiedlich. Siebe mit kleiner Öffnungsweite beteiligen sich erst dann an der Siebung, wenn die feineren Partikel die Siebe mit größeren Öffnungsweiten passiert haben. Die Verweildauer von Siebgut auf dem obersten Sieb ist daher länger als auf dem untersten. Die Siebzeit bei der Satzsiebung wurde deshalb durch Vorversuche so ermittelt, daß die Siebdauer des untersten Siebes noch der Norm entspricht, andererseits auf dem obersten Sieb die Zerkleinerung von Partikeln durch Abrieb und Bruch durch eine zu hohe Siebzeit minimiert wird. Es wurden Aufgabemengen von 5, 15, 30, 45, 60 und 90 Gramm untersucht.

Die Proben wurden jeweils 5 Minuten gesiebt und die einzelnen Siebe anschließend ausgewogen. Dieser Vorgang wurde so oft wiederholt, bis die Massendifferenz der einzelnen Siebe pro Siebminute weniger als 0,1 % der Aufgabemenge betrug, wie die Norm dies vorschreibt.

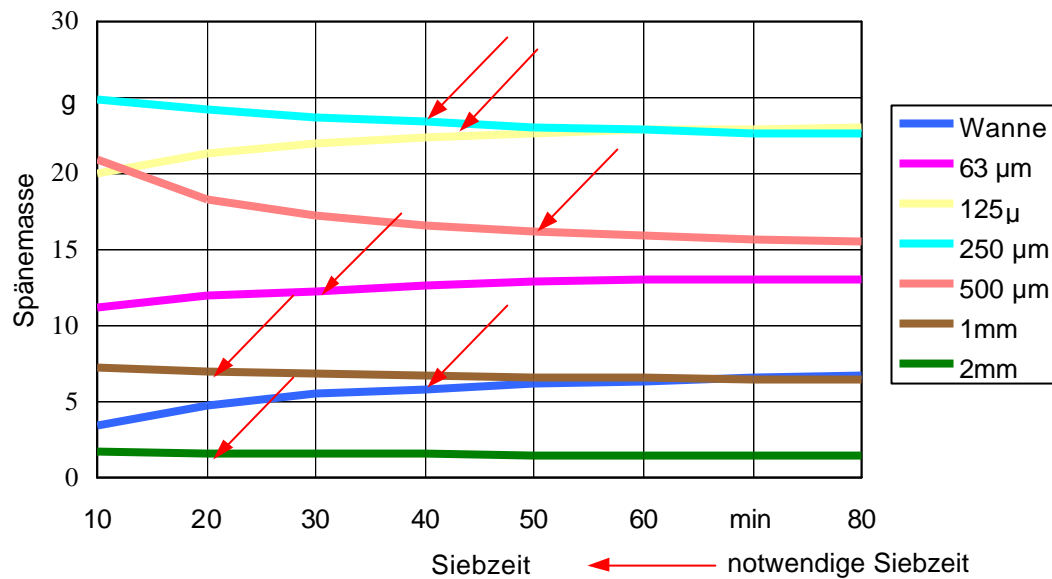


Bild 5.3: Beispiel eines Vorversuchs mit 90 g Spänemasse zur Ermittlung der benötigten Siebzeit bezogen auf die Probenmasse

Dabei stellte sich ein linearer Zusammenhang zwischen Siebzeit und Aufgabenmasse heraus, wie das folgende Bild 5.4 zeigt. Hier ist als Vergleich zusätzlich die tatsächlich verwendete Siebzeit eingetragen. Sie liegt immer höher als die notwendige Mindestsiebzeit.

Die zu analysierenden Proben wurden mit einer massenabhängigen Siebzeit von 1 Minute pro Gramm Aufgabenmenge, höchstens jedoch mit 60 Minuten Siebzeit, gesiebt.

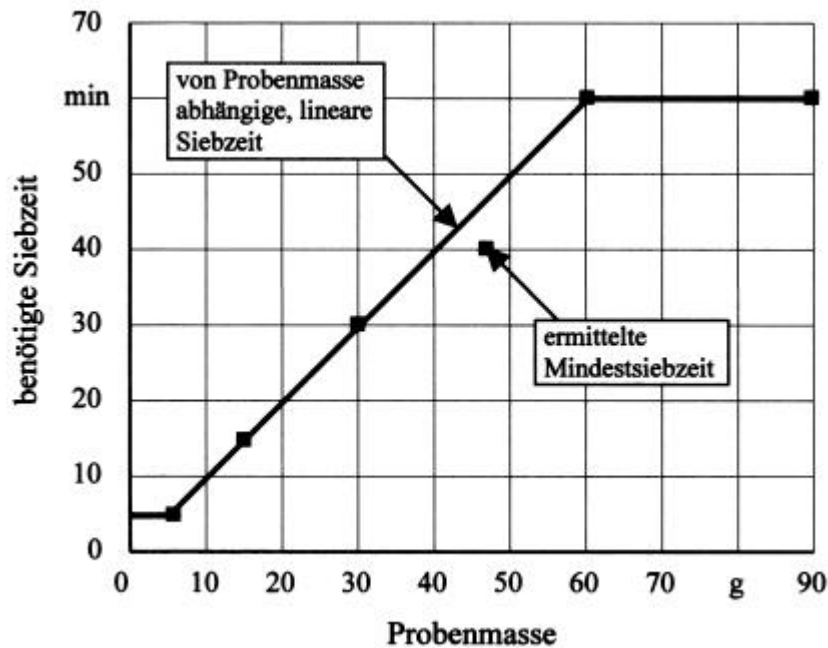


Bild 5.4: Darstellung der tatsächlich notwendigen, aus Vorversuchen ermittelten, Siebzeit und der bei den Versuchen angewandten Siebzeiten.

5.1.2 Masse und Schüttvolumen des Aufgabegutes

Die Menge des Aufgabegutes muß begrenzt werden, um jeden Partikel in einer angemessenen Siebzeit einer freien Sieböffnung zuführen zu können und um die vertretbare Belastung des Siebbodens nicht zu überschreiten. Andererseits sollte die minimale Analysenmenge der einzelnen Siebfraktionen den Anforderungen an den Stichprobenumfang und der Präzision der benutzten Waage entsprechen.

Bei der Analyse der verschiedenen, sich nach Zerspanungsverfahren und -werkstoff unterscheidenden, Partikelkollektive wurde durch einen Vorversuch die jeweils maximale Aufgabemenge bestimmt. Diese ist nach DIN 66165 maximal das doppelte des, sich nach der Siebmaschenweite richtenden, größten zulässigen Schüttvolumens des Siebrückstandes nach der Siebung. Bei der in den Versuchen angewandten Satzsiebung muß durch geeignete Wahl der Sieböffnungsweiten im Siebsatz darauf geachtet werden, daß eine gleichmäßige Verteilung des Analysegutes auf den Sieben erreicht wird und damit das größte zulässige Schüttvolumen auch auf den unteren Sieben nicht überschritten wird. In Bild 5.5 sind die nach DIN 66165 maximalen Aufgabemengen für die verwendeten Siebe in einer Tabelle dargestellt.

Nennöffnungs- weite des Siebbodens $w_{\text{Öff}}$ mm	Größtes zulässiges Schüttvolumen des Siebrückstandes je Flächeneinheit des Siebbodens V_F $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-2}$	Maximale Aufgabemenge $V_{\text{max.}}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-2}$
4	55	110
2	35	70
1	20	40
0,5	14	28
0,25	9	18
0,125	6	12
0,063	4	8

Bild 5.5: Größtes zulässiges Schüttvolumen und maximale Aufgabemenge bei der Siebanalyse nach DIN 66165

Um die Korngrößenverteilung der bei der Zerspanung entstehenden Späne möglichst genau ermitteln zu können, wurden von jedem Partikelkollektiv mehrere Siebanalysen durchgeführt. Dadurch konnten alle entstandenen Späne analysiert werden, wodurch ein Fehler bei der Ermittlung der Verteilung durch eine nicht repräsentative Entnahme von Spänen ausgeschlossen wurde. Ebenso konnten die im folgende Abschnitt beschriebenen, bei der Siebanalyse auftretenden Fehler, durch Mittelung der aus den einzelnen Siebdurchläufen ermittelten Ergebnisse minimiert werden.

5.1.3 Mögliche Fehlerquellen bei der Siebanalyse und ihre Minimierung

a) Fehler beim Wiegen

Bei der Analyse von Spankollektiven sind die an den oberen und unteren Rändern der auftretenden Größenklassen auftretenden Spanmengen teilweise so gering, daß die Wägenauigkeit der Analysewaage erreicht wird. Zur Minimierung dieser Wägefeler wurden negative Massendifferenzen zwischen vor und nach der Siebung gewogenem Sieb zu Null gesetzt, da diese mit Sicherheit auf Ungenauigkeiten beim Wiegen zurückzuführen waren.

b) Fehler durch verklemmte Partikel in den Analysesieben

Verfälschungen können sich durch Partikel ergeben, die bei der Entleerung des Siebes in den Siebmaschen stecken bleiben und sich beim darauffolgenden Versuch lösen. Deshalb wurden die Siebe jeweils nach dem Entleeren mit einem Industriesauger abgesaugt. Die durch verklemmte Partikel hervorgerufenen Fehler befinden sich damit sicher weit unter der Wägegenauigkeit der Waage.

c) Fehler bei der Trenngrenzenermittlung

Bei manchen Partikelkollektiven wurde trotz der Einhaltung der nach DIN vorgegebenen maximalen Aufgabemenge beobachtet, daß sich in den feinmaschigen Sieben Herde von kleineren Partikeln als der Siebmaschenweite befinden. Diese lassen sich aber auch nicht durch Erhöhen der Siebzeit vermeiden. Es kann davon ausgegangen werden, daß von diesem Phänomen ein kleiner Fehler im meßbaren Bereich ausgeht. Verringern ließe sich dieser Fehler beispielsweise durch die Verkleinerung der Aufgabemenge. Eine weitere Möglichkeit, diese Fehlerquelle zu verkleinern, wäre die Entnahme von Teilen der Späne nach der normalen Siebzeit und deren getrennten Nachsiebung. Die dabei entstehenden Verluste wären jedoch gewiß größer als der anders entstandene Fehler.

d) Fehler durch Veränderung des Siebgutes während der Siebung

Durch den Kontakt mit den Sieben kann sich das Siebgut durch Bruch und Abrieb zerkleinern, was zu einer Verfälschung der Korngrößenverteilung führt. Dieser Fehler ist jedoch sehr gering, da die Späne hinsichtlich der kleinen beim Sieben am einzelnen Span wirksamen Massenkräfte genügend abriebfest sind.

e) Fehler durch Anhaften von Siebgut am Analysesieb

Durch Anhaften am Sieb durch elektrostatische Aufladung entsteht vor allem bei den kleineren Partikelklassen ein Analysefehler. Durch das Wiegen der leeren Siebe vor jedem Versuch werden die noch im vorherigen Versuch anhaftenden Späne mit erfaßt und somit der Fehler auf ein Minimum reduziert.

5.1.4 Wiegen der Analysesiebe

Die bei der unter 5.1 beschriebenen Siebanalyse verwendeten Siebböden wurden mit einer Analysewaage SARTORIUS Excellence E 12000 S (Bild 5.6) ausgewogen. Die Anzeigenauigkeit der Waage betrug 0,1 Gramm.

Die Siebböden wurden jeweils leer und nach dem Versuch mit dem entsprechenden Inhalt gewogen. Aus der ermittelten Massendifferenz pro Sieb ergab sich somit die Partikelmasse der jeweiligen Spänefraktion.



Bild 5.6: Analysewaage SARTORIUS Excellence E 12000 S

5.1.5 Dokumentation der Siebergebnisse in einer Tabelle

Das ermittelte Gewicht der einzelnen Siebe, der beschriebenen Siebanalyse, wurde in eine Excel-Tabelle eingetragen, in welcher auch mittels hinterlegter Formeln die Gewichts-differenz zwischen leerem und gefülltem Sieb nach dem Versuch ermittelt wurde. Ebenfalls wurde mittels hinterlegter Formeln der prozentuale Anteil der einzelnen Spänefraktionen an der Gesamtprobe, sowie die Gewichts-differenz der eingesetzten Probenmasse zur Summe der ermittelten Einzelmassen errechnet. Des weiteren wurde die Siebzeit und die durch die Art des zerspannten Werkstoffs und durch das angewandte Zerspanungsverfahren gekennzeichnete Partikelart vermerkt. Wie schon in Kapitel 5.1.2 erwähnt, wurden von jedem Partikelkollektiv mehrere Siebanalysen, die im folgendem als Teilsiebanalysen bezeichnet sind, durchgeführt. Die Teilsiebanalysen einer Partikelart wurden jeweils zu einer Excel-Tabelle mit den

Gesamtergebnissen zusammengefaßt, welche im Anhang 10.1 zu finden sind. Anhand dieser dokumentierten, durch die Siebanalyse ermittelten Werte, wurde für jede Werstoff-Zerspanungsverfahren-Kombination ein Schaubild der Korngrößenverteilung erstellt. Diese werden in Kapitel 6.1 dargestellt und erläutert. Das folgende Bild 5.7 zeigt beispielhaft eines der für die Partikelart "Buche Kreissäge" erstellten Teilsiebprotokolle.

Partikelart:	Buche Kreissäge			
Probemasse:	27,7 g	Kreissägeblatt Fa. Leitz: WZ/HM 300x3,2x30, z = 96		
Siebzeit:	je 28 min	Handvorschub $v_{fh} = 3$ m/min, Drehzahl $n = 3000$ 1/min		
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	252,1	0,3	1,1
0,063 mm	336,3	339,6	3,3	12,0
0,125 mm	343,5	354,7	11,2	40,6
0,250 mm	358,6	367,2	8,6	31,2
0,5 mm	385,4	388,9	3,5	12,7
1 mm	365,0	365,7	0,7	2,5
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	27,6			100,1
Massendifferenz:	-0,1			0,1

Bild 5.7: Beispiel eines Teilsiebprotokolls der Siebanalyse

5.2 Verfahren zur Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit

Die turbulente Geschwindigkeitsverteilung (vgl. Bild 3.6) zeigt, daß die Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrachse am größten ist, von dort zur Wandung zunächst langsam abfällt und erst in unmittelbarer Nähe zur Rohrwand infolge der Reibung mit dieser sehr rasch auf null abfällt. Aus dieser physikalischen bedingten Tatsache der über den Sichtraumquerschnitt ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung, die auch nicht durch konstruktive Maßnahmen zu ändern ist, ergeben sich spezielle Anforderungen an das Sichtverfahren. So wurde um die zur späteren Berechnung des c_w -Wertes erforderliche Schwebegeschwindigkeit möglichst genau bestimmen zu können, nur der Bereich der maximalen Strömungsgeschwindigkeit betrachtet. Diese maßgebliche Luftgeschwindigkeit, die nur im Bereich der Rohrachse herrscht, wurde durch die Strömungsmeßsonde gemessen. Es kann nicht mit einer über den Sichtraumquerschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeit gearbeitet werden, da

durch diese die Sichtscharfe sehr stark abnehmen würde. Im Bereich der Sichterachse, in dem die tatsächliche Luftgeschwindigkeit größer als die gemittelte ist, würde ein Partikel schon bei einer Geschwindigkeitsstufe, die niedriger als seine Schwebegeschwindigkeit ist, aus dem Sichterrohr austreten. Dagegen würde ein sich im Randbereich befindlicher Partikel erst bei einer höheren Strömungsgeschwindigkeit als seiner entsprechenden Schwebegeschwindigkeit austreten.

Nach dem Befüllen des Sichters mit dem zu untersuchendem Spankollektiv wurde die Luftgeschwindigkeit mittels des Frequenzumformers so lange erhöht, bis aus dem betrachteten Bereich der Rohrmitte die ersten Partikel ausgetragen wurden. Es kann dabei angenommen werden, daß dies durch die gemessene maximale Strömungsgeschwindigkeit im Strömungsprofil geschah, und diese der Schwebegeschwindigkeit der ausgetretenen Späne entspricht. Diese Geschwindigkeit wurde über einen längeren, in Kapitel 5.2.2 näher erläuterten, Zeitraum durch Nachstellen mittels des Frequenzumformers konstant gehalten, um allen Partikel dieser Schwebegeschwindigkeitsklasse ausreichend Zeit zum Austritt aus dem Sichter zu gewähren. Da sich der Strömungswiderstand im Sichterrohr durch die geringer werdende Partikelkonzentration vermindert, was zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt, muß die Geschwindigkeit während der Sichtung überwacht und mittels des Frequenzumformers durch nachstellen konstant gehalten werden. Nach Ablauf der erforderlichen Sichtzeit wurde der Ventilator durch Ausschalten des Frequenzumformers abgeschaltet. Danach wurde der Späneabscheider vom Sichterende abgenommen, um die darin befindliche Spänefraktion zu entnehmen, zu wiegen und in eine mit der Spanart und Schwebegeschwindigkeitsklasse beschrifteten Papiertüte abzufüllen. Nach dem Wiederaufsetzen des Abscheiders wurde die Geschwindigkeit jeweils um einen Schritt der Schrittweite 0,2 m/s erhöht. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis die Geschwindigkeit erreicht war, bei der der letzte Span aus dem Sichter ausgetragen wurde. Bild 5.8 zeigt beispielhaft ein bei der Sichtung aufgenommenes Datenprotokoll. Alle weiteren Protokolle sind im Anhang 10.2 aufgeführt.

Partikelart:	Buche Kreissäge					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelauwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,9	-	-	-
0,7	-	0,1	0,8	-	-	-
0,9	-	0,4	0,9	-	-	-
1,1	0,05	0,6	1,5	-	-	-
1,3	0,1	1,2	2,1	-	-	-
1,5	0,3	1,4	1,7	-	-	-
1,7	0,6	4,0	1,1	-	-	-
1,9	0,5	1,3	0,3	-	-	-
2,1	0,2	0,3	0,1	-	-	-
2,3	0,1	0,1	0,1	-	-	-
2,5	0,1	0,1	-	-	-	-
2,7	0,2	-	-	-	-	-
2,9	0,1	-	-	-	-	-
3,1	0,1	-	-	-	-	-
3,3	0,1	-	-	-	-	-
3,5	0,1	-	-	-	-	-
3,7	-	-	-	-	-	-
Startmasse in g	2,4	10,0	12,0	0	0	0
Endmasse in g	2,55	9,5	9,5	0	0	0
Abweichung in g	0,15	-0,5	-2,5	0	0	0

Bild 5.8: Beispiel eines Datenprotokolls der Sichtanalyse

5.2.1 Festlegung der Spanmenge pro Sichtung

In Vorversuchen hat sich gezeigt, daß es für ein gutes Sichterergebnis wichtig ist, den Sichter mit einer Spanmenge zu beladen, die nicht zu groß ist. Da die Späne im Luftstrom senkrechte und waagrechte Bewegungen ausführen, steigt bei einer hohen Spankonzentration im Sichterraum die Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen zwischen den Spänen. Damit ist ein Energieaustausch zwischen den Stoßpartnern verbunden. Zusätzlich dazu kann es noch zu einer Änderung des typischen Bewegungszustandes - Taumeln oder Rotieren - kommen /22/. Das Teilchen benötigt eine freie Weglänge, um wieder bis zum vorangegangenen Zustand beschleunigt zu werden. Die dazu notwendige Energie wird der umgebenden Luft entnommen. Die freie Weglänge wird mit steigender Konzentration jedoch immer geringer, und damit auch die Möglichkeit der Wiederbeschleunigung. Dies würde im vorliegenden Versuch dazu führen, daß für die Späne eine zu hohe Schwebegeschwindigkeit ermittelt würde.

Die zulässige spezifische Beladung der Sichtluft ist eine Funktion der Korngröße bzw. der Endfallgeschwindigkeit des Partikels, wobei die zulässige Beladung mit wachsender Partikelgröße zunimmt /23/. Bei extrem hohen Sichterbelastungen kann die Tragfähigkeitsgrenze der Luft erreicht werden. Bei überschreiten dieser Grenze, für die in der Literatur für Holzspäne ein Richtwert von 0,25 kg Sichtgut je m³ Luft angegeben wird /24/, entsteht im Sichtraum eine zyklische auf und ab Bewegung des Spangutes. Diese entsteht dadurch, daß dem Luftstrom im oberen Sichtbereich durch die große Anzahl der Späne soviel Energie entnommen wird, daß dieser zum Erliegen kommt. Dadurch fällt das Spangut im Sichter nach unten. Dort wird es aufgrund der höheren Geschwindigkeit, die wegen des geringeren Querschnitts dort herrscht, wieder nach oben beschleunigt.

5.2.2 Bestimmung der Sichtzeit einer Geschwindigkeitsstufe

Beim Sichtvorgang verlassen die Teilchen der zur Trenngrenze entsprechenden Größenklasse das Sichterrohr nur mit sehr kleinen Austragsgeschwindigkeiten. Da bei dem ausgewählten Sichtverfahren der Spanaustritt nur im Bereich der Rohrachse stattfinden, muß die Laufzeit so gewählt werden, daß alle zur eingestellten Geschwindigkeitsklasse zugehörigen Partikel die Möglichkeit haben auszutreten. Ein Span hält sich jedoch nur kurz im Bereich der höchsten Geschwindigkeit in der Rohrachse auf, und fällt danach schnell wieder in die durch Reibung verzögerten äußeren Strömungsbahnen zurück. Darüber hinaus konnte noch beobachtet werden, daß trotz der Umlenkung der aus dem Sichterrohr austretenden Strömung durch den integrierten Späneabscheider nach außen immer noch Späne nach dem Austritt wieder in das Sichterrohr zurückfallen. Da ein Span dadurch meist mehrere Anläufe benötigt, um die Trennzone zu überwinden, muß die Sichtzeit ausreichend groß bemessen werden. Der zeitliche Verlauf des Austrages folgt, wie durch frühere Versuche /22/ festgestellt wurde, einer Exponentialfunktion der Form:

$$m_t = m_0 (1 - e^{-kt}) \quad (5-1)$$

wobei m_0 = Spänemenge zur Zeit $t = 0$

m_t = Spänemenge, die zur Zeit t ausgetragen wird

k = Konstante

Die Konstante k wächst mit steigender Differenzgeschwindigkeit $v = v - w$. Späne, deren Differenzgeschwindigkeit groß ist, verlassen in ihrer Gesamtheit den Sichtraum rascher als solche mit geringer Differenzgeschwindigkeit, die dort länger verweilen. Da bei den vor-

liegenden Versuchen durch die feine Geschwindigkeitsstufung sich nur kleine Differenzgeschwindigkeiten ergeben, was zu einer kleinen Konstanten k führt, ist bei diesen eine relativ hohe Sichtzeit erforderlich.

Bei eigenen Vorversuchen hat es sich als sinnvoll erwiesen, als Kriterium für die Dauer einer Geschwindigkeitsstufe den Restaustrag nach einer bestimmten Sichtdauer zu messen. Dabei hat sich gezeigt, daß nach einer 15 minütigen Sichtzeit der Restaustrag an Partikeln bei fast allen Partikelklassen vernachlässigbar klein ist. Bei Spankollektiven mit einer erhöhten Agglomeratneigung, wie z.B. Fichtehobelspäne, wurde ein Zuschlag von 5 min zur ermittelten Mindestsichtzeit gegeben.

5.2.3 Dispergieren des Aufgabegutes

Um das in den Sichter eingefüllte Partikelkollektiv möglichst genau in Schwebegeschwindigkeitsklassen aufteilen zu können, müssen die Späne in der Trennzone als Einzelpartikel vorliegen. Die sich beim Befüllen, beim Absinken nach dem Abschalten des Ventilators sowie während der Sichtung in der Trennzone bildende Agglomerate und Wandansätze müssen deshalb aufgelöst werden. Dieses als Dispergieren bezeichnete Verfahren wird umso schwieriger desto größer die Haftkräfte zwischen den Partikeln, deren Höhe durch die Partikelart, -gestalt und -größe bestimmt wird, sind. Das Dispergieren muß deshalb jeweils an das zu untersuchende Partikelkollektiv angepaßt werden. Nach DIN 66118 Punkt 5 kann bei der Sichtanalyse dazu eine Reihe von verfahrenstechnischen Maßnahmen, einzeln oder kombiniert, benutzt werden:

- a) Dispergieren durch hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Feststoff und eine starke Turbulenz in einer vorgeschalteten Dispergierzone.
- b) Mechanische Dispergierhilfen, z.B. durch Zugabe von kleinen Mengen grober Partikel, durch Stoß und Reibung der Partikel an Wänden oder zwischen den Partikeln.
- c) Zugabe oberflächenaktiver Dispergiermittel in Gas- oder Dampfform, als Flüssigkeit oder als Pulver.

Beim Dispergieren ist darauf zu achten, daß jedes Zerteilen von Agglomeraten bereits von einer Zerkleinerung der Einzelpartikel begleitet werden kann. Bei den zum Dispergieren angewendeten Methoden sollte deshalb immer ein Kompromiß zwischen der angestrebten Zerteilung von Agglomeraten und dem unerwünschten Zerkleinern gesucht werden. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß Agglomerate und sich bildende Wandansätze, die vorwiegend

durch die in Kapitel 3.6.3 beschriebene elektrostatische Aufladung der Partikel entstehen, bei den vorliegenden Gegebenheiten, am günstigsten durch Klopfen außen am Sichterrohr mit einem Holzhämmerchen beseitigt werden können.

5.2.4 Ermittlung der ausgetragenen Spanmasse je Geschwindigkeitsstufe

Nach dem Abschalten des Ventilators nach Ablauf der Sichtzeit einer Geschwindigkeitsstufe wurde der auf den Sichter aufgesetzte Spänefangtrichter vom Sichterrohr abgenommen. Die darin enthaltene Spänefraktion wurde durch Umdrehen und Abklopfen des Trichters auf eine saubere Unterlage gebracht, von wo aus diese in eine mit den zugehörigen Daten beschriftete Papiertüte eingefüllt wurden. Danach wurde die Spänefraktion in der verschlossenen Papiertüte auf der auch schon zur Bestimmung der Korngrößenverteilung verwendeten Analysewaage Sartorius Excellence E 12000 S (Bild 5.6) ausgewogen. Dabei wurde die Waage mittels der vorhandenen Kalibrierfunktion so eingestellt, daß beim Auflegen der Probestüten jeweils nur die Masse der Spänefraktion angezeigt wird. Die somit ermittelte Masse wurde in eine Excel-Tabelle eingetragen (Bild 5.8), in welcher mittels hinterlegter Formeln die Gesamtaustragsmasse aus den Einzelmassen der Geschwindigkeitsstufen und die Differenz zwischen dieser und der aufgegebenen Anfangsmasse berechnet wird. Es hat sich gezeigt, daß diese Massendifferenz bei der Sichtung kleinerer Korngrößen, die verstärkt zum Anhaften durch elektrostatische Aufladungen neigen, besonders hoch ist. Eine weitere Ursache, die bei allen Korngrößen und Werkstoffen zu dieser Differenz beitragen kann, ist das sich Aufsummieren von Rundungsfehlern die beim Wiegen der Einzelproben entstehen. Durch diese Fehlerquelle läßt sich eine Gesamtaustragsmasse die höher als die aufgebene Anfangsmasse, wie es bei einigen Versuchsdurchläufen vorkam, erklären. Dagegen hat sich bei Vorversuchen gezeigt, daß die Anzahl der Späne, die nicht durch den Auffangtrichter erfaßt werden, beim Umfüllen verloren gehen oder im Korb zurückbleiben so gering ist, daß der Einfluß dieser Fehlermöglichkeiten auf das Ergebnis vernachlässigt werden kann.

5.2.5 Die minimal untersuchbare Partikelgröße

Die minimal untersuchbare Partikelgröße, bei der die Verteilung der Schwebegeschwindigkeit noch mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden kann, liegt beim vorliegendem Versuchsaufbau bei Spänen der Siebmaschenweite 0,25 mm. Bei darunterliegenden Korngrößen sind die Haftkräfte durch elektrische Aufladung im Verhältnis zu den auf die Partikel wirkende Gewicht- und Auftriebskräfte sehr groß. Dadurch haftet ein Großteil der

Partikel auch bei Strömungsgeschwindigkeiten die weit über deren theoretischer Schwebegeschwindigkeit liegen am Sichterrohr. Die anhaftenden Späne lassen sich auch durch das mechanische Klopfen erst bei relativ hohen Strömungsgeschwindigkeiten von der Wand lösen. Dies führt dazu, daß die gelösten Partikel, falls sie sich nicht an einer anderen Stelle an der Wand anlagern, mit hoher Geschwindigkeit ausgetragen werden. Dadurch kann nicht mehr von der für den Versuch zu Grunde liegenden Annahme ausgegangen werden, daß der Austrag des Partikels bei einer Strömungsgeschwindigkeit erfolgte, die gleich der dem Partikel entsprechenden Schwebegeschwindigkeit ist. Darüber hinaus kommt es durch die hohen Haftkräfte zwischen den Spänen beim Einfüllen dieser zu einer starken und schwer auflösbaren Agglomeratbildung auf dem Sichterboden, wodurch dieser wie durch einen Pfropfen verschlossen wird. Beim Erhöhen der Ventilatorleistung bleibt die Strömungsgeschwindigkeit durch diesen Verschluß lange Zeit praktisch auf Null, bis sich dieser abrupt löst. Darauf steigt die Strömungsgeschwindigkeit im Sieb plötzlich so stark an, daß diese weit über die Austragsgeschwindigkeit der meisten Späne ansteigt. Dies führt dazu, daß zumindest für die unteren Schwebegeschwindigkeitsklassen eines Partikelkollektivs keine Verteilung mehr ermittelt werden kann.

Auf alternative Möglichkeiten zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit bzw. des c_w -Wertes dieser kleinen Korngrößen wird in Kapitel 7.4 eingegangen.

5.3 Bestimmung der Spanmasse einzelner Späne

Zur Bestimmung der zur Berechnung des c_w - Wertes eines Spanes erforderlichen Spanmasse wurden Einzelspäne auf einer Analysewaage der Firma Mettler ausgewogen. Dabei wurden von den Spänen der Siebmaschenweiten 4 mm bis 1 mm jeweils ca. 50 Partikel auf die Waagschale der Analysewaage gezählt und das abgelesene Gewicht durch die Partikelanzahl geteilt. Die Partikelklassen < 1 mm wurden in loser Streuung auf ein zuvor ausgewogenes Stück Papier gestreut. Um Fehler bei der Ermittlung der Spänezahl, die durch Verzählen oder durch das Übersehen sich überdeckender Späne ergeben können, zu minimieren, wurden bei diesen Partikelklassen jeweils ca. 200 Späne mit Hilfe einer Meßlupe abgezählt. Nach dem Entfernen der auf dem Papierträger überzähligen Partikel und dem Wiegevorgang wurde die durchschnittliche Partikelmasse, wie bei den größeren Partikeln, durch Division des auf dem Waagendisplay angezeigten Wertes durch die Partikelanzahl, bestimmt. Die Protokolle der

Massenbestimmung, und die dabei ermittelten, zur Berechnung der c_w -Werte benötigten Einzelmassen, sind im Anhang 10.3 zu finden.

5.4 Bestimmung des zur Berechnung verwendbaren Spanquerschnitts

Wollte man die beim Spanflug 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, diese Partikelfläche an einer Vielzahl von Partikeln zu bestimmen, um einen realen Durchschnittswert für eine bestimmte Spanklasse zu erhalten, da die Körperformen der einzelnen Partikel sehr stark unterscheiden. Es ist überdies zweifelhaft, ob die exakte Ermittlung der wirksamen Partikelfläche aus den Hauptträgheitsachsen wirklich einen realen Wert ergeben kann, da die einzelnen Partikel während des Fluges rotieren können und somit sich die wirksame Partikelfläche ständig verändert. Bei Annahme einer kreisförmigen wirksamen Partikelfläche bleibt noch ein recht großer Bereich an möglichen Durchmessern. So kann der Partikeldurchmesser theoretisch in der Staffelung der Siebmaschenweite schwanken. Da die Siebmaschenweite jeweils zum nächsten Sieb verdoppelt wird, vervierfacht sich dabei die Partikelfläche, da der Partikeldurchmesser im Quadrat in die Flächenberechnung eingeht.

$$A = \frac{p}{4} \cdot D^2 \quad (5-2)$$

Um festzustellen, wo die durchschnittliche Partikelgröße der einzelnen Siebfractionen liegt, wurden verschiedene Partikel aus der Siebfraction einer Siebmaschenweite mit einer Feinmeßschraube ausgemessen. Diese Partikeldurchmesser wurden aufsummiert und durch die Anzahl der vermessenen Partikel geteilt.

$$D_{\varnothing} = \frac{\sum^n D_i}{n} \quad (5-3)$$

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 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. Dabei wird davon ausgegangen, daß der Körper nur eine einzige stabile Gleichgewichtslage besitzt und nicht durch seine Form gehindert wird, diese einzunehmen.

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 66165 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 geometrische Fläche dar. Dabei erhält man bei Verwendung des Rechtecks sicher eine zu große Fläche, da das Rechteck die größtmögliche Fläche darstellt. Somit wird die wirksame Partikelfläche in der c_w -Wertberechnung durch eine Ellipse angenähert [25]. Dabei bildet die Siebmaschenweite die größere Achse und der gemessene Durchmesser, die kleinere Achse.

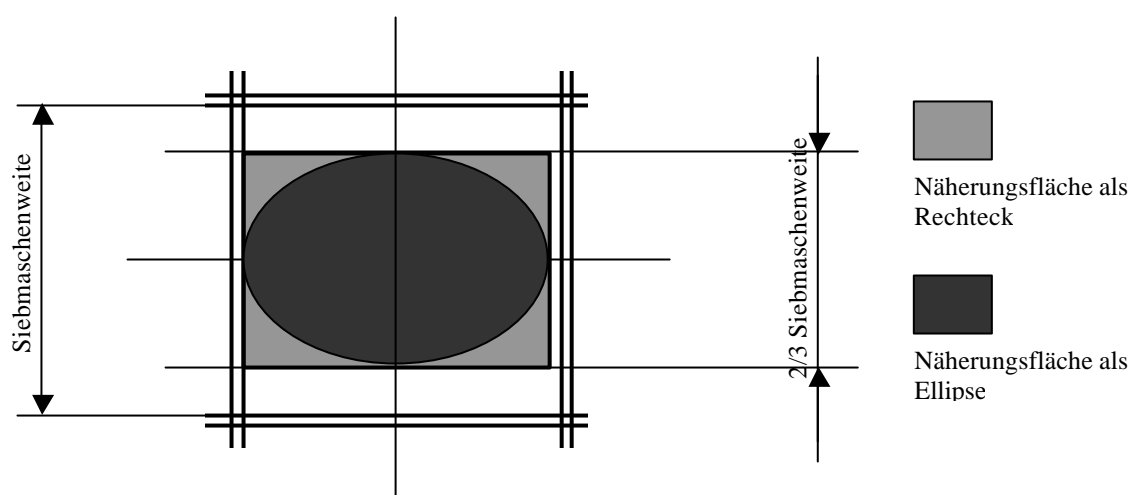


Bild 5.9: Annäherung der Partikelfläche durch verschiedene Geometrien

Die Partikelfläche errechnet sich somit aus:

$$A = p \cdot a \cdot b = p \cdot \frac{D_{\text{Sieb}}}{2} \cdot \left(\frac{D_{\text{Sieb}} + D_{\text{Sieb-1}}}{4} \right) \quad (5-4)$$

Eine Zusammenstellung der so errechneten, durchschnittlichen Partikelflächen und der Vergleich zur Näherungsfläche des Rechtecks finden sich im folgendem Bild 5.8.

Siebmaschen- weite in μm	Aus Maschenweite errechnete Partikelfläche des Rechtecks in m^2	Partikelfläche der Ellipse in m^2
4000	1,06667E-05	9,42476E-06
2000	2,66667E-06	2,35619E-06
1000	6,66667E-07	5,89049E-07
500	1,66667E-07	1,47262E-07
250	4,16667E-08	3,68155E-08
125	1,04167E-08	9,22843E-09
63	2,64667E-09	1,55862E-09
0	0	0

Bild 5.10: Tabelle der berechneten Partikelflächen

6 Theorie des Spanfluges

6.1 Einzelpartikel in der Rohrströmung

Will man die Bewegung eines Einzelpartikels im senkrechten Luftstrom beschreiben, dann sind folgende Einflußgrößen zu berücksichtigen:

- a) Partikelmasse,
- b) Partikelgröße,
- c) Partikelform,
- d) symmetrische Partikelumströmung (Bild 6.1),
- e) ein weiterer Partikel in unmittelbarer Nähe (Bild 6.2),
- f) Rohrwand in unmittelbarer Nähe (Bild 6.3),
- g) Partikelrotation (Bild 6.4),
- h) Geschwindigkeitsprofil der Rohrströmung,
- i) Stoß des Partikels auf die Rohrwand (Bild 6.5),
- j) Stoß des Partikels auf einen weiteren Partikel,
- k) Turbulenz der Rohrströmung ohne Gutbeladung,
- l) Turbulenz der Rohrströmung mit Gutbeladung.

Zweifelloos ist eine Beschreibung der Bewegung des Einzelpartikels mit der Berücksichtigung aller Einflußgrößen eine kaum zu lösende Aufgabe. Aufgrund dieser Tatsache wird in Kapitel 6.3 auf die zur späteren Berechnung verwendeten Annahmen und Vereinfachungen eingegangen.

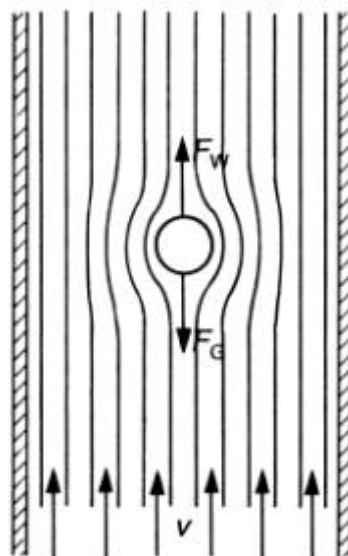


Bild 6.1: Symmetrische Partikelumströmung im lotrechten Rohr

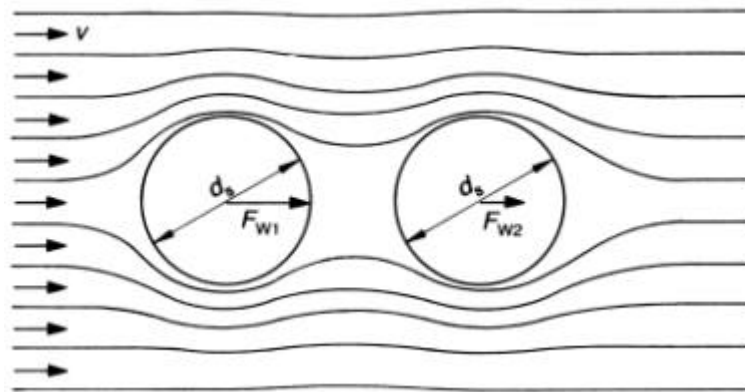


Bild 6.2: Umströmung von zwei Partikeln in unmittelbarer Nähe

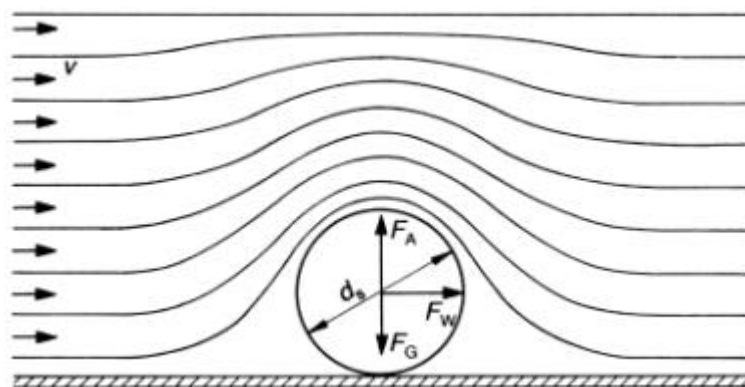


Bild 6.3: Partikelumströmung an der Rohrwand

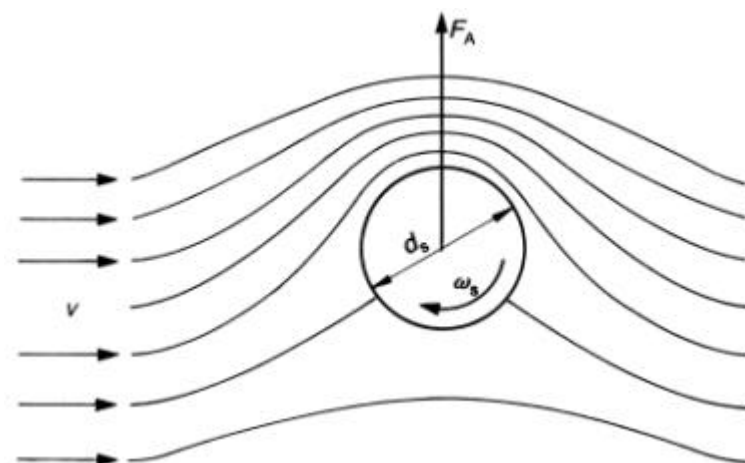


Bild 6.4: Umströmung eines rotierenden Partikels

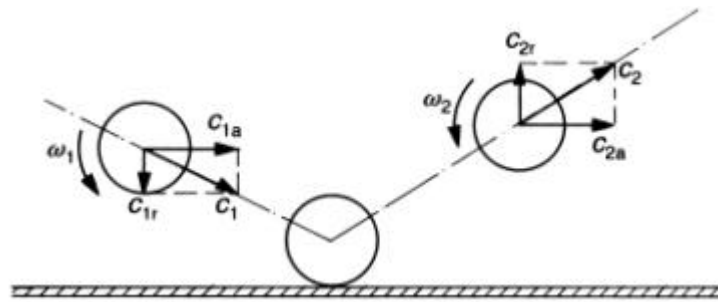


Bild 6.5: Der Stoß eines rotierenden Partikels

6.2 Am Partikel angreifende Kräfte

Bei der Sichtung wird das Aufgabegut bei jeder eingestellten Strömungsgeschwindigkeitsstufe in zwei Schwebegeschwindigkeitsklassen getrennt, von denen die eine bevorzugt Partikel unterhalb, die andere bevorzugt Partikel oberhalb einer bestimmten Schwebegeschwindigkeitsgrenze enthält. Diese Trennung wird dadurch hervorgerufen, daß an den in die Trennzone eines Sichters eingebrachten Partikeln Kräfte angreifen, die in unterschiedlichem Maße von der Partikelgröße, -form und -dichte abhängen. Diese Kräfte bewegen die Partikel auf Bahnkurven verschiedener Geschwindigkeitsklassen. Die auf die Bewegungsbahnen der Partikel angreifenden Kräfte können grundsätzlich in vier Arten eingeteilt werden, die sich wiederum weiter unterteilen lassen, wie in der folgenden Aufstellung dargestellt ist.

- Vom Strömungsmedium auf die Partikeloberfläche ausgeübte Kräfte
 - durch die Relativströmung zwischen Partikel und Strömungsmedium bedingt (Strömungskräfte)
 - in Strömungsrichtung = Widerstandskräfte
 - senkrecht zur Strömungsrichtung = dynamischer Auftrieb, Magnus-Effekt
 - statische Auftriebskräfte, durch Druckgradienten im Strömungsmedium bedingt (Archimedischer Auftrieb), die nicht von der Teilchenumströmung, sondern von Kraftfeldern oder beschleunigter Bewegung des Strömungsmediums herrühren.
 - Diffusionskräfte, bedingt durch Gasdiffusion infolge eines Temperatur-, Druck- oder Partialdruckgefälles und Molekülbombardement (Brownsche Bewegung).

- Feldkräfte auf Teilchen
 - Schwerkraft
 - Elektrische Kräfte (Coulomb-Kräfte durch elektrostatische Aufladungen)
 - Magnetische Kräfte
 - Scheinkräfte im rotierenden Bezugssystem (Fliehkraft, Corioliskraft)
- Trägheitskräfte bei beschleunigter Partikelbewegung
- Kräfte zwischen Festkörperflächen
 - Stoßkräfte
 - Reibungskräfte
 - Haftkräfte

Die durch diese Kräfte erzeugten Bahnkurven einzelner Partikel lassen sich für ein bekanntes Strömungsfeld aus dem Gleichgewicht der an den Partikeln angreifenden Kräfte errechnen.

6.3 Bei der Berechnung vernachlässigte physikalische Effekte

Die rechnerische Ermittlung des c_w -Wertes unter Berücksichtigung aller im vorigen Abschnitt aufgeführten Kräfte ist aufgrund der Vielzahl der Einflußgrößen und fehlender Kenngrößen nicht ohne weiteres möglich. Darüber hinaus haben einige der genannten Kräfte einen vernachlässigbaren Einfluß auf die im vorliegenden Versuchsaufbau herrschenden Verhältnisse. Aus Gründen der Vollständigkeit werden die bei der Herleitung der Formeln zur Auswertung vernachlässigten Kräfte im folgenden, mit einer Abschätzung ihrer Einflußmöglichkeit auf das Untersuchungsergebnis, aufgeführt.

6.3.1 Turbulente Umströmung des Partikels

Durch Ablösungserscheinungen und Wirbelbildung an scharfen Kanten des Partikels wirken nicht, wie angenommen, durch die umgebende Luftströmung nur Kräfte in axialer Richtung auf den Partikel. Die turbulente Umströmung des Spanes hat vielmehr auch Kräfte mit horizontalen Anteilen zur Folge. Die bestimmende, als aerodynamischer Auftrieb bezeichnete Größe, ist eine Funktion der Spangeometrie und des Anstellwinkels des Spanes zur Strömung. Da sich der Anstellwinkel des Spans infolge von Taumel- und Rotationsbewegungen aber fortwährend ändert, kann für den Auftriebsbeiwert der aerodynamischen Auftriebskraft kein

hinreichend genauer Mittelwert bestimmt werden. Ebenso läßt sich durch die Versuche nicht ihre Größe und Lage im Raum bestimmen. Da die horizontalen Anteile keinen Einfluß auf den Zeitpunkt des Austrags der Partikel aus dem Sichterrohr haben, und eine Bestimmung der andere Anteile unmöglich ist, muß dieser Effekt des dynamischen Auftriebs in dieser Untersuchung unberücksichtigt bleiben.

6.3.2 Der Magnus-Effekt

Befindet sich ein Partikel auf seiner Flugbahn in Eigenrotation so wird der sogenannte Magnus-Effekt hervorgerufen. Der Partikel bewegt sich im Fluid mit der relativen Geschwindigkeit w_{rel} . Durch die Fluidreibung in der Grenzschicht zwischen Luft und Span wird die Strömungsgeschwindigkeit, durch die Rotation des Spanes, an der Stelle 1 vergrößert und an der Stelle 2 verkleinert. Die Gesamtgeschwindigkeit der Luftströmung an den Stellen 1 und 2 ergibt sich somit aus:

$$w_{ges1} = w_{rel} + w_R \quad (6-1)$$

$$w_{ges2} = w_{rel} - w_R \quad (6-2)$$

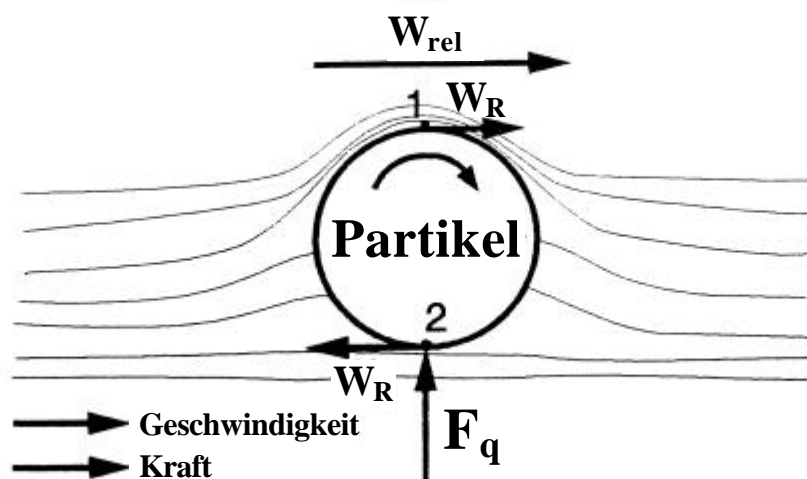


Bild 6.6: Der Magnus-Effekt am rotierenden Partikel

Damit ergibt sich nach Bernoulli eine Druckdifferenz Δp :

$$\Delta p = \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \quad (6-3)$$

$$p_1 < p_2 \quad (6-4)$$

Durch diesen Druckunterschied zwischen Punkt 1 und Punkt 2 wird am rotierenden Zylinder eine Querkraft F_q erzeugt. Sie wirkt rechtwinklig zur Strömungsrichtung und bewirkt dadurch eine Bewegung des Partikels quer zur Sichtachse.

Nach dem Entdecker dieses Effekts, dem deutschen Physiker H. G. Magnus (1802 bis 1870), spricht man hier vom Magnus-Effekt /26/.

Zur rechnerischen Bestimmung der durch den Magnus-Effekt induzierten Querkraft fehlen brauchbare Aussagen über die Rotationsgeschwindigkeit und Drehrichtung des Partikels.

6.3.3 Statischer Auftrieb

Für jeden Partikel gilt das Archimedische Prinzip: "Wird ein Körper in ein Fluid eingetaucht, so wird er scheinbar leichter. Es wirkt eine nach oben gerichtete Auftriebskraft F_A ".

Die statische Auftriebskraft läßt sich nach folgender Formel bestimmen:

$$F_A = V \cdot \rho_{\text{fluid}} \cdot g \quad (6-5)$$

Die Formel leitet sich von einer Betrachtung der Druckunterschiede an Ober- und Unterseite des Partikels her. Die Auftriebskraft ist dabei immer nach oben gerichtet und entspricht der Gewichtskraft des verdrängten Fluids, wie sich aus der obigen Gleichung ersehen läßt. Da die Gewichtskraft der durch den Span verdrängten Luft nur sehr klein ist, bleibt die statische Auftriebskraft ebenfalls sehr klein, und hat gegenüber der Schwerkraft deshalb nur einen sehr geringen Einfluß auf das Flugverhalten des Spanes. Bei den im Versuch zu untersuchenden Holzwerkstoffen beträgt dieser aerostatische Auftrieb in Luft nur ca. 0,25 % des Eigengewichts eines Partikels. Darum kann die statische Auftriebskraft bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt werden.

6.3.4 Dynamischer Auftrieb

Abhängig von der Körperform ergibt sich beim Flug des Partikels eine dynamische Auftriebskraft mit positivem oder negativem Vorzeichen. Diese hängt nach Gleichung (6-3) von den Geschwindigkeitswerten an der Grenzfläche zwischen Partikel und Luft ab. Das beste Beispiel für den dynamischen Auftrieb sind die Tragflügel von Flugzeugen. Hier wird durch die Formgebung der Flügel ein dynamischer Auftrieb erzeugt, der das Fliegen erst ermöglicht.

Die Körperform der einzelnen, bei der Zerspanung entstandenen Partikel, läßt jedoch keinen genauen Schluß über die Geschwindigkeitsverteilung der Luft um den Partikel zu. Zum einen sind dazu die Formen der einzelnen Späne zu unterschiedlich, um sie einer bestimmten Körperform zuordnen zu können. Zum zweiten rotieren die Partikel um ihre eigene Achse, was eine permanente Veränderung der dynamischen Auftriebskraft aufgrund der ständig veränderten Anströmung bewirkt. Da die meisten Späne relativ symmetrische Abmessungen haben, und ein symmetrischer Körper beim Flug keine dynamische Auftriebskraft erfährt, dürfte die Vernachlässigung keinen großen Fehler bei den Berechnungen verursachen.

6.3.5 Zusammenstoß von Partikeln

Bei der Berechnung des Partikelfluges wird von einem einzelnen fliegenden Partikel im Fluid ausgegangen. Tatsächlich handelt es sich jedoch bei der Sichtung zumindest zu Beginn um eine Partikelwolke. Dies bedeutet, daß ein Kontakt zwischen den Partikeln im Flug wahrscheinlich ist. Je dichter die Partikelwolke ist, desto wahrscheinlicher wird, statistisch gesehen, ein Zusammenstoß von Partikeln während des Fluges. Bei der Betrachtung von Stößen ohne den Verlust mechanischer Energie ergeben sich zwei prinzipielle Stoßarten. Es gilt den total unelastischen Stoß mit

$$v_1 = v_2 = \frac{m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2}{m_1 + m_2} \quad (6-6)$$

und den total elastischen Stoß mit

$$v_1 = 2 \frac{m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2}{m_1 + m_2} - u_1 \quad (6-7)$$

$$v_2 = 2 \frac{m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2}{m_1 + m_2} - u_2 \quad (6-8)$$

zu unterscheiden. Dabei werden die Geschwindigkeiten vor dem Stoß mit u und die Geschwindigkeiten nach dem Stoß mit v bezeichnet.

Zusammenstöße von Körpern erfolgen jedoch streng genommen nie nach diesen reinen Stoßformen. Beim Stoß wird kinetische Energie in Wärme und in irreversible Verformungen umgesetzt. Diese Energien werden als W zusammengefaßt. Die Mischformen der beiden

oben genannten Stoßformen werden als teilelastischer Stoß bezeichnet. Der Energiesatz des teilelastischen Stoßes lautet:

$$\frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2 = ?W + \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \quad (6-9)$$

Die Geschwindigkeiten der Körper beim teilelastischen Stoß lassen sich kaum berechnen, da für die in andere Energieformen umgewandelte kinetischen Energien nur Annahmen getroffen werden können. Bei zusammenstoßenden Partikeln handelt es sich zudem noch um sogenannte schiefe Stöße. Das bedeutet, die Körper stoßen nicht in einer geraden Linie aufeinander, sondern unter einem Winkel.

6.4 Berücksichtigte Kräfte in der Berechnung

Die Teilchenbahn in einer beliebigen, exakt definierten Strömung läßt sich immer berechnen, wenn die Eintrittsbedingungen der Teilchen in die Strömung bekannt sind und nur Strömungskräfte, Feldkräfte und Trägheitskräfte berücksichtigt werden. Die Bewegungsgleichung kann dann mit hinreichender Genauigkeit aufgestellt werden. Vorausgesetzt wird dabei, daß die Kräfte durch Lage und Geschwindigkeit der Teilchen bestimmt sind und daß das Widerstandsgesetz bekannt ist.

Von den in Kapitel 6.2 aufgeführten Kräften, die beim Spanflug am Partikel angreifen können, werden, nach den in Kapitel 6.3 begründeten Vernachlässigungen einiger dieser Kräfte und physikalischen Effekte, weiterhin nur noch die im Bild 6.7 und im folgenden aufgeführten Kräfte berücksichtigt.

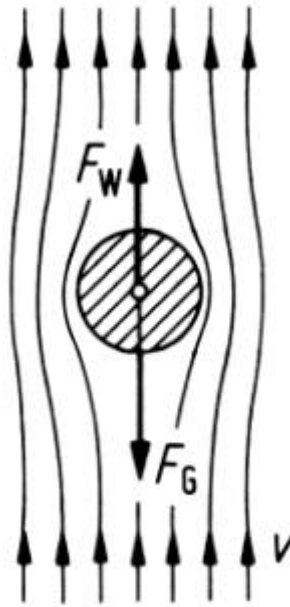


Bild 6.7: Angreifende Kräfte am Partikel im Schwebezustand

6.4.1 Strömungswiderstandskraft F_W

Durch das Druckgefälle Δp am umströmten Partikel ist der statische Druck an der Partikelrückseite kleiner als im Staupunkt an der Partikelstirnseite. Weiter ist die Luftgeschwindigkeit im Staupunkt des Partikels gleich null. Somit ergibt sich nach Bernoulli folgende Druckdifferenz Δp :

$$\Delta p = \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \quad (6-10)$$

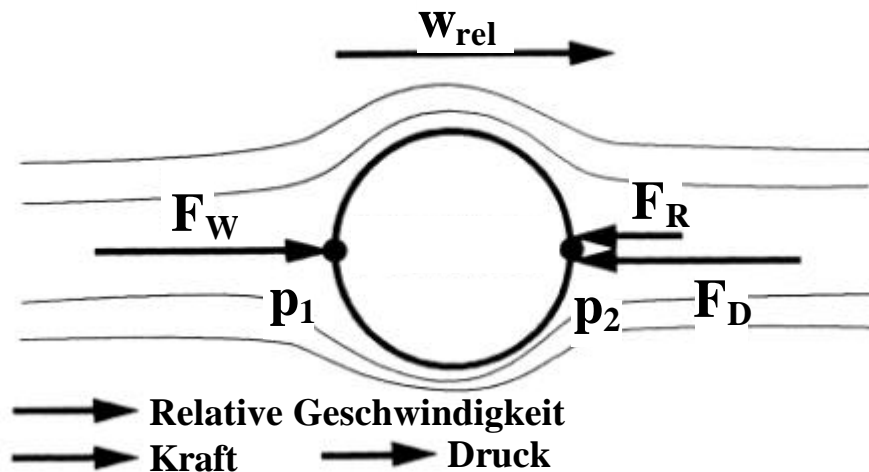


Bild 6.8: Skizze des fliegenden Partikels mit Kräften und Drücken

Die Geschwindigkeit w_{rel} ist die Geschwindigkeit zwischen dem Partikel und der umgebenden Luft. Durch diese Druckdifferenz entsteht eine auf die Stirnfläche A wirkende Kraft F_D . Diese Kraft ist parallel zur Flugrichtung des Partikels ausgerichtet.

Bei diesen Betrachtungen wurde bisher die Körperform nicht betrachtet. Sie hat jedoch einen entscheidenden Einfluß auf die Widerstandskraft und muß somit berücksichtigt werden. Bei Körpern, an deren Kontur die umgebende Luft über eine gewisse kritische Strömungsgeschwindigkeit hinaus beschleunigt wird, entstehen zwangsläufig mehr oder weniger Luftwirbel, welche Energie verbrauchen. Aus diesem Grunde wirken sich verschiedene Körperformen verschieden auf den Luftwiderstand aus. Die Körperform wird durch einen Druckwiderstandsbeiwert c_D berücksichtigt, welcher allerdings nur über Versuche ermittelt werden kann oder auf Erfahrungswerten beruht. Daraus ergibt sich schließlich der Druckwiderstand als Kraft F_D zu:

$$F_D = c_D \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A \quad (6-11)$$

Weiter muß die Newtonsche Reibkraft F_R der Fluidströmung überwunden werden. Aus der Addition beider Kräfte ergibt sich der Strömungswiderstand F_W :

$$F_W = F_R + F_D \quad (6-12)$$

$$F_W = F_R + c_D \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A$$

Am fliegenden Partikel müssen also Reibkraft und Druckwiderstand überwunden werden.

In der Praxis läßt sich meist nur wenig über die Reibkraft aussagen. Sie ist jedoch im Vergleich zum Druckwiderstand meist relativ klein. So kann zweckmäßigerweise der Strömungswiderstand proportional zum Druckwiderstand angesetzt werden. Dabei wird ein neuer Beiwert, der Widerstandsbeiwert c_W , als Proportionalitätsfaktor verwendet, der die Reibkraft mitberücksichtigt. Es ergibt sich folgende gute Näherung der Widerstandskraft F_W zu:

$$F_W = c_W \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A \quad (6-13)$$

In dieser Gleichung zur Berechnung der Widerstandskraft F_W sind, bis auf den Widerstandsbeiwert c_W , alle Variablen auf der rechten Seite der Gleichung am Partikel selbst zu bestimmen. Dieser Widerstandsbeiwert c_W ist von der Reynoldszahl abhängig. Direkt über Näherungsfunktionen berechnen lässt er sich nur in wenigen Ausnahmefällen, die sich zumeist auf sehr kleine Re-Zahlen beschränken. In der Literatur existieren für einige einfache Grundkörperformen Angaben für diesen Beiwert, die jedoch nur im jeweiligen mit angegebenem Bereich der Reynoldszahl gültig sind. In folgenden Bild 6.9 ist solch eine Auflistung einfacher Körperformen und der zugehörigen Widerstandsbeiwerte zu sehen /27/.

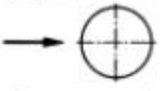
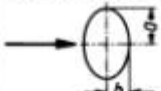
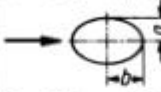




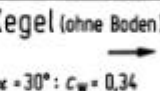
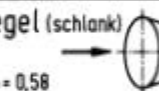
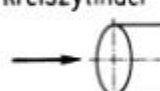
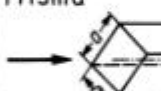
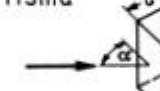
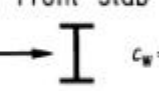
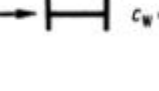
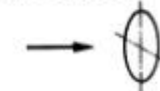
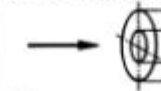
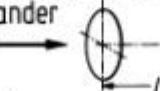

<p>Kugel</p>  <p> $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5: c_W = 0,47$ $Re = 4 \cdot 10^5: 0,09$ $Re = 10^6: 0,13$ </p>	<p>Rotationsellipsoid</p>  <p>$\frac{a}{b} = \frac{1}{0,75}$</p> <p> $Re < 5 \cdot 10^5: c_W = 0,6$ $Re > 5 \cdot 10^5: c_W = 0,21$ </p>  <p>$\frac{a}{b} = \frac{1}{1,80}$</p> <p>$Re > 10^5: c_W = 0,05 \dots 0,1$</p>	<p>Kreiszyylinder</p>  <p> $Re < 9 \cdot 10^4: l/d = 1: c_W = 0,63$ $2: 0,68$ $5: 0,74$ $10: 0,82$ $40: 0,98$ $\infty: 1,20$ </p> <p>$Re > 5 \cdot 10^5: \infty: 0,35$</p>	<p>Profilstab</p>  <p>$Re > 10^5: l/d = 2: c_W = 0,2$</p> <table border="1"> <tr><td>3</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,06</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,083</td></tr> <tr><td>20</td><td>0,094</td></tr> </table>	3	0,1	5	0,06	10	0,083	20	0,094
3	0,1										
5	0,06										
10	0,083										
20	0,094										
<p>Halbkugel</p>  <p> ohne Boden: $c_W = 0,34$ mit Boden: $0,40$ </p>	<p>Halbkugel</p>  <p> ohne Boden: $c_W = 1,33$ mit Boden: $1,17$ </p>	<p>Kegel (ohne Boden)</p>  <p> $\alpha = 30^\circ: c_W = 0,34$ $60^\circ: 0,51$ </p>	<p>Kegel (schlank)</p>  <p>$c_W = 0,58$</p>								
<p>Kreiszyylinder</p>  <p> $l/d = 1: c_W = 0,91$ $2: 0,85$ $4: 0,87$ $7: 0,99$ </p>	<p>Prisma</p>  <p>$l/a = 2,5: c_W = 0,81$</p>	<p>Prisma</p>  <p> $\alpha = 90^\circ: l/a = 5: c_W = 1,56$ $\infty: 2,03$ $\alpha = 45^\circ: 5: 0,92$ $\infty: 1,54$ </p>	<p>I-Profil-Stab</p>  <p>$c_W = 2,04$</p>  <p>$c_W = 0,86$</p>								
<p>Kreisplatte</p>  <p>$c_W = 1,11$</p>	<p>Kreisringplatte</p>  <p>$\frac{d}{b} = 0,5: c_W = 1,22$</p>	<p>2 Kreisplatten hintereinander</p>  <p> $\frac{l}{d} = 1: c_W = 0,93$ $1,5: 0,78$ $2: 1,04$ $3: 1,52$ </p>	<p>Rechteckplatte</p>  <p> $\frac{a}{b} = 1: c_W = 1,10$ $2: 1,15$ $4: 1,19$ $10: 1,29$ $18: 1,40$ $\infty: 2,01$ </p>								

Bild 6.9: Widerstandsbeiwerte c_W angeströmter Körper in Abhängigkeit von der Reynoldszahl

6.4.2 Gewichtskraft F_G

Die Gewichtskraft (oder Schwerkraft) ist die Kraft, die das Schwerefeld der Erde auf einen Körper ausübt. Sie resultiert aus der Massenanziehung (Gravitation) zwischen Erde und Körper sowie aus der von der Erdrotation stammenden Zentrifugalkraft, wobei die Zentrifugalkraft, von den Polen zum Äquator zunehmend, der Gravitationskraft entgegen wirkt. Dieser Effekt, der durch die Abplattung der Erde verstärkt wird, führt dazu, daß die Gewichtskraft eines Körpers am Äquator kleiner ist als an den Polen.

Die Gewichtskraft errechnet sich zu:

$$F_G = m \cdot g \quad (6-14)$$

6.5 Herleitung der Formel zur Berechnung der c_w -Werte

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, werden bei der Berechnung der c_w -Werte von den am Partikel angreifenden Feldkräften nur die Gewichtskraft und die Luftwiderstandskraft berücksichtigt. Diese am Partikel angreifenden Kräfte müssen mit der d'Alembertschen Trägheitskraft T , die als Beschleunigungs- oder Verzögerungskraft auftreten kann, im Gleichgewicht stehen. Man erhält so in einem Koordinatensystem, dessen Nullpunkt auf dem Sichterboden liegt und dessen y -Achse nach unten weist, die für die Partikelbewegung allgemein gültige vektorielle Beziehung:

$$F_G - F_w - T = 0 \quad (6-15)$$

Für T ist einzusetzen:

$$T = -m \cdot \frac{dw}{dt} \quad (6-16)$$

Darin ist m die Partikelmasse, w die vektorielle Teilchengeschwindigkeit und t die Zeit.

Die Gewichtskraft ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} F_G &= m \cdot g \\ &= \mathbf{r}_s \cdot g \cdot A \cdot D \end{aligned} \quad (6-17)$$

wobei g die Erdbeschleunigung, \mathbf{r}_s die über das Partikelvolumen als gleichmäßig betrachtete Rohdichte des Spanes, mit A der in Kapitel 5.4 errechneten Projektionsfläche des Partikels in

Richtung der Anströmung und D die Dicke des Partikels in der anderen Hauptausdehnungsrichtung ist.

Der Strömungswiderstand wird bei den im Versuch vorliegenden Bedingungen, bei denen die vorliegenden Reynoldszahlen in einer Größenordnung liegen in der das Newton'sche Luftwiderstandsgesetz gültig ist, durch die Beziehung

$$F_W = c_w \cdot \frac{\mathbf{r}_L}{2} \cdot A \cdot v_{rel}^2 \quad (6-18)$$

Mit \mathbf{r}_L sei die Dichte der Luft und mit $v_{rel.}$ die vektorielle Relativgeschwindigkeit des Strömungsmediums Luft gegenüber dem Partikel bezeichnet. Zwischen der Partikelgeschwindigkeit w , der Relativgeschwindigkeit $v_{rel.}$ und der Geschwindigkeit des Strömungsmediums Luft v besteht folgende vektorielle Beziehung:

$$\vec{w} = \vec{v} - \vec{v}_{rel.} \quad (6-19)$$

Durch Einführen des Widerstandsbeiwertes c_w kann die Abhängigkeit der Widerstandskraft F_W von zahlreichen weiteren Einflußgrößen berücksichtigt werden. Setzt man die Gleichungen (6-16), (6-17) und (6-18) in (6-15) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} F_G - F_W + m \cdot \frac{dw}{dt} &= 0 \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{F_G}{m} - \frac{F_W}{m} \\ &= \frac{\mathbf{r}_S \cdot g \cdot A \cdot D}{m} - \frac{c_w \cdot A \cdot \mathbf{r}_L \cdot v_{rel.}^2}{2m} \end{aligned}$$

mit $m = A \cdot D \cdot \mathbf{r}_S$ folgt:

$$\frac{dw}{dt} = g - \frac{c_w \cdot \mathbf{r}_L \cdot v_{rel.}^2}{2D \cdot \mathbf{r}_S} \quad (6-20)$$

Bei der Lösung dieser Gleichung können mehrere Fälle auftreten, die die Lösbarkeit der Gleichung (6-20) beeinflussen. Im allgemeinsten Fall sind die Geschwindigkeit des Strömungsmediums Luft v und die Partikelgeschwindigkeit w von Ort und Zeit abhängige Variablen. Eine geschlossene Lösung der Bewegungsgleichungen läßt sich hierfür nicht

angeben. Durch schrittweise graphische oder numerische Integration kann man sich lediglich spezielle Lösungen der Bewegungsgleichungen verschaffen.

Eine geschlossene Integration der Bewegungsgleichung ist möglich, wenn erstens die Geschwindigkeit des Strömungsmediums nach Größe und Richtung örtlich und zeitlich konstant ist. Die Änderung der Teilchengeschwindigkeit läßt sich dann auf die Änderung der Relativgeschwindigkeit zurückführen. Aus Gleichung (6-19) folgt:

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{dv_{rel.}}{dt} \quad (6-21)$$

Zweitens muß gefordert werden, daß die Bewegung des Teilchens durch eine einzige Differentialgleichung beschrieben werden kann.

Diese Bedingung ist erfüllt, wenn der Vektor der Relativgeschwindigkeit $v_{rel.}$ während des ganzen Beschleunigungsvorganges seine anfängliche Richtung im Raume beibehält.

Die weitere Lösung der Bewegungsgleichung erfolgt unter der Annahme der zur geschlossenen Lösung notwendigen Bedingungen. Um diesen idealen Bedingungen möglichst nahe zu kommen, wurde schon bei der Konzeption darauf geachtet einen möglichst konstanten Luftstrom im Sichterrohr zu erhalten.

Zur Integration substituiert man nun $r = \frac{\mathbf{r}_s \cdot D}{\mathbf{r}_L \cdot c_w}$, wodurch sich ergibt:

$$\frac{dw}{dt} = g - \frac{v_{rel.}^2}{2r} \quad (6-22)$$

Durch die Integration mit den Randbedingungen $w=0$ bei $t=0$, die im allgemeinen vorliegen, erhält man die Geschwindigkeit als Funktion der Zeit.

$$w = \sqrt{2gr} \frac{e^{t\sqrt{\frac{2g}{r}}} - 1}{e^{t\sqrt{\frac{2g}{r}}} + 1} \quad (6-23)$$

Der Bruch in Gleichung (6-23) nähert sich bei kleinen Werten von r , die bei Holzspänen etwa im Bereich 0,05 bis 0,3 m liegen, mit zunehmenden t -Werten rasch dem Wert Eins. Für $t \rightarrow \infty$ geht w in eine Grenzgeschwindigkeit, die Schwebegeschwindigkeit v_s über.

$$v_s = \lim_{t \rightarrow \infty} w = \sqrt{2gr} = \sqrt{2g \frac{\mathbf{r}_s \cdot D}{\mathbf{r}_L \cdot c_w}} \quad (6-24)$$

In diesem Zustand der gleichförmigen Bewegung ist die Luftwiderstandskraft gleich der Gewichtskraft und die Beschleunigung gleich Null.

Durch Umformen der Gleichung (6-24) erhält man:

$$c_w = 2g \frac{\mathbf{r}_s \cdot D}{\mathbf{r}_L \cdot v_s^2}$$

mit $m = A \cdot D \cdot \mathbf{r}_s$ folgt:

$$c_w = \frac{2g \cdot m}{\mathbf{r}_L \cdot v_s^2 \cdot A} \quad (6-25)$$

Dies ist die zur Berechnung der c_w -Werte verwendete Gleichung.

7 Auswertung der Versuche

7.1 Partikelgrößenverteilung beim Zerspanen

Im Gegensatz zu anderen Werkstoffen, wie beispielsweise Metall, besitzt der natürlich gewachsene Werkstoff Holz einen sehr inhomogenen Aufbau. Seine zellförmige Struktur verhindert die Erzeugung von Spänen mit definierter Form, - man erhält stets ein Spänekollektiv unterschiedlicher Größenverteilung. Bedingt durch verschiedenartige Struktur und Aufbau entstehen bei der Zerspanung unterschiedlicher Holzwerkstoffe Spänefraktionen unterschiedlicher Korngrößenverteilungen. Ebenso haben das Zerspanungsverfahren und die jeweiligen verwendeten Schnittdaten, sowie die benutzten Werkzeuge einen entscheidenden Einfluß auf die Korngrößenverteilung der entstehenden Spänefraktionen.

Aus den in Kapitel 5.1.5 erläuterten Teilsiebprotokollen, welche im Anhang 10.1 vollständig aufgeführten sind, wurde für jede Kombination aus Werkstoff und Zerspanungsart ein Excel-Diagramm mit der Partikelgrößenverteilung erstellt. Um Erkenntnisse über den Einfluß des Werkstoffs auf die entstehende Partikelgrößenverteilung gewinnen zu können, werden bei diesen jeweils alle Werkstoff-Größenverteilungen eines Bearbeitungsverfahrens in einem Diagramm dargestellt.

Nach Angaben aus früheren, von G. Rackwitz durchgeführten Untersuchungen, fallen bei allen schneidenden Zerspanungsverfahren im allgemeinen die Spangrößen der einzelnen Fraktionen als angenäherte Gauß'sche Normalverteilung an [28]. Deren Aufbau und Bedeutung wird im folgenden Kapitel erläutert.

7.1.1 Gauß- oder Normalverteilung

Die Gauß'sche Dichtefunktion, auch Glockenkurve genannt, definiert sich folgendermaßen:

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7-1)$$

Dabei ist der Parameter μ der Erwartungswert. Das bedeutet, bei μ auf der x-Achse befindet sich das Maximum der Gauß-Laplace-Verteilung. σ^2 wird als Varianz bezeichnet. Sie gibt die Streuung der Verteilung an und befindet sich am Wendepunkt der Verteilungskurve auf der x-Achse.

Zum Zeichnen der Normalverteilung kann diese aus Gleichung 7-1 berechnet werden. Dabei entspricht der errechnete Maximalwert der Normalverteilung dem Maximalwert der Partikelgrößenverteilung. Indem beide Faktoren durcheinander dividiert werden, erhält man einen Umrechnungsfaktor für eine Einheit der Normalverteilung. Mit diesem lassen sich die Werte der Partikelgrößenverteilung in Normalverteilungswerte umrechnen. Der einfachere Weg, die Normalverteilung zu zeichnen, ist jedoch die Verwendung der Näherungswerte die in Bild 7.1 in Tabellenform zeigt.

x =	$\mu \pm \frac{1}{2}s$	$\mu \pm s$	$\mu \pm \frac{3}{2}s$	$\mu \pm 2s$	$\mu \pm 3s$
y =	$\frac{7}{8} y_{\max}$	$\frac{5}{8} y_{\max}$	$\frac{2,5}{8} y_{\max}$	$\frac{1}{8} y_{\max}$	$\frac{1}{80} y_{\max}$

Bild 7.1 Näherungswerte für das Zeichnen der Glockenkurve der Gauß- Laplace- Verteilung

In Bild 7.2 sind drei Verteilungen dargestellt, die einen unterschiedlichen Erwartungswert μ haben. Dabei wird ersichtlich, daß der Erwartungswert die Höhe der Glockenkurve bestimmt. Dies wird als Schärfemaß einer Verteilung bezeichnet. Wenn im folgendem von einer scharfen Verteilung gesprochen wird, hat deren Glockenkurve eine der im folgendem Diagramm blauen Kurve ähnliche Gestalt, eine unscharfe Kurve hat Ähnlichkeit mit der grünen Kurve. Aus den an die blaue Kurve angelegten Begrenzungslinien bei $+s$ und $-s$ wird ersichtlich, das der als Varianz bezeichnete Parameter s die halbe Breite bei ca. 60% der maximalen Höhe (bei $e^{-1/2}$ der Höhe im Maximum) angibt.

Zum Vergleich der Partikelgrößenverteilungen (Bild 7.3) mit der Gauß'schen Normalverteilung (Bild 7.2), wie er im folgendem Kapitel vollzogen wird, setzt man den Erwartungswert beim Wert $\mu = 0$ dem maximalen x-Wert der Partikelgrößenverteilung gleich. Der Wert der Varianz für den Wendepunkt s wird aus dem geglätteten Diagramm der Partikelgrößenverteilung geschätzt, indem der Wert entweder vom Wert μ subtrahiert, oder zu ihm addiert wird, je nachdem, ob s rechts oder links von μ auf der x-Achse liegen soll. Bringt man nun das Maximum der Normalverteilungskurve (bei $\mu = 0$) mit dem Maximum der Partikelgrößenverteilung zur Deckung, können die Abweichungen der beiden Verteilungen sehr leicht graphisch bestimmt werden.

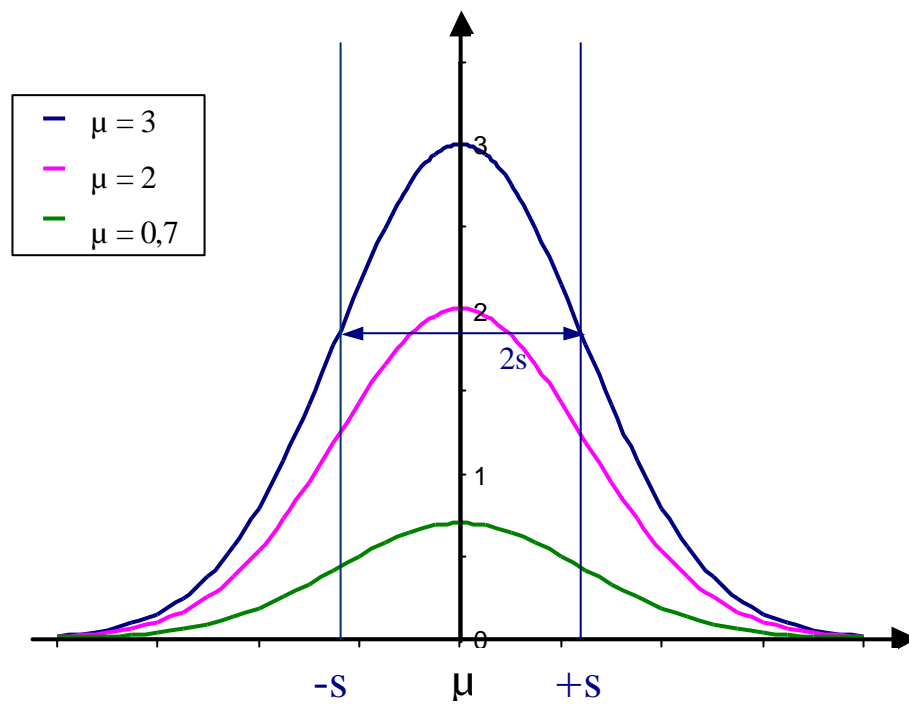


Bild 7.2: Gauß-Verteilungen mit unterschiedlichen Erwartungswerten

7.1.2 Partikelgrößenverteilung beim Fräsen

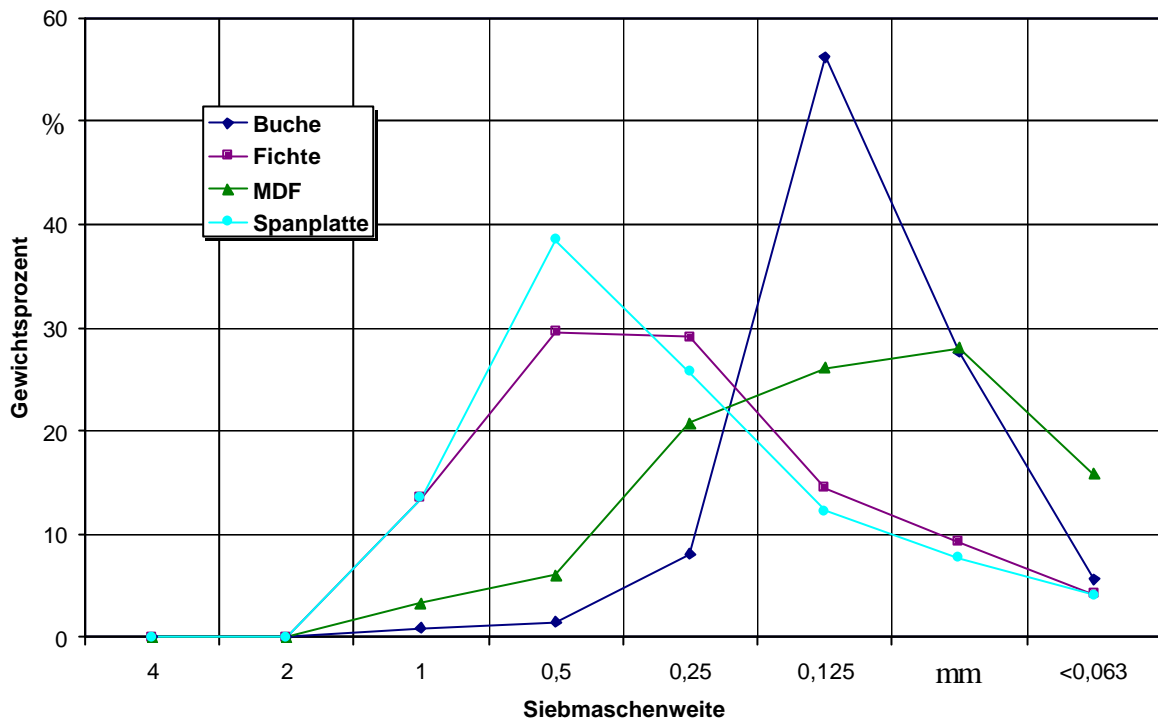


Bild 7.3: Partikelgrößenverteilung beim Fräsen

Das obige Bild zeigt die Partikelgrößenverteilungen der vier untersuchten Holzwerkstoffe die beim Fräsen entstehen. Es zeigt sich, dass beim Fräsen des Hartholzvertreter Buche die Feinstaubanteile größer als die des Weichholzes Fichte sind. Dies entspricht den Angaben aus der Literatur zu früheren Untersuchungen /28/. Gründe hierfür könnten der Bruch der Späne beim Abschnitt aufgrund ihrer größeren Härte und die kürzeren Fasern des Buchenholzes sein. Ebenso fällt die Neigung von MDF zur Bildung von feinen Spänen auf, die wohl durch die "Auffaserung" der feinen bei der Herstellung verpressten Fasern nach dem Abschnitt zustande kommt. Die Bildung von eher größeren Spänen bei der Spanplattenzerspanung ist aus früheren Untersuchungen bekannt und resultiert aus dem Herausreißen ganzer Späne aus dem Plattenverband. Betrachtet man die Art der Verteilungen, so fällt die relativ scharfe Verteilung der Buchenspäne auf. Die Verteilungen der anderen zerspannten Werkstoffe weisen eine relativ unscharfe Korngrößenverteilung auf. Wie in den folgenden Bildern gezeigt wird, sind bei allen Werkstoffen die geglätteten Verteilungen relativ gut durch Gauß'sche Normalverteilungen annäherbar. Dies bestätigt die im vorigen Kapitel erwähnte Aussage von

G. Rackwitz, in welcher dieser das Entstehen einer Gauß'schen Normalverteilung der Partikelgrößenklassen bei der Zerspanung von Holz beschreibt.

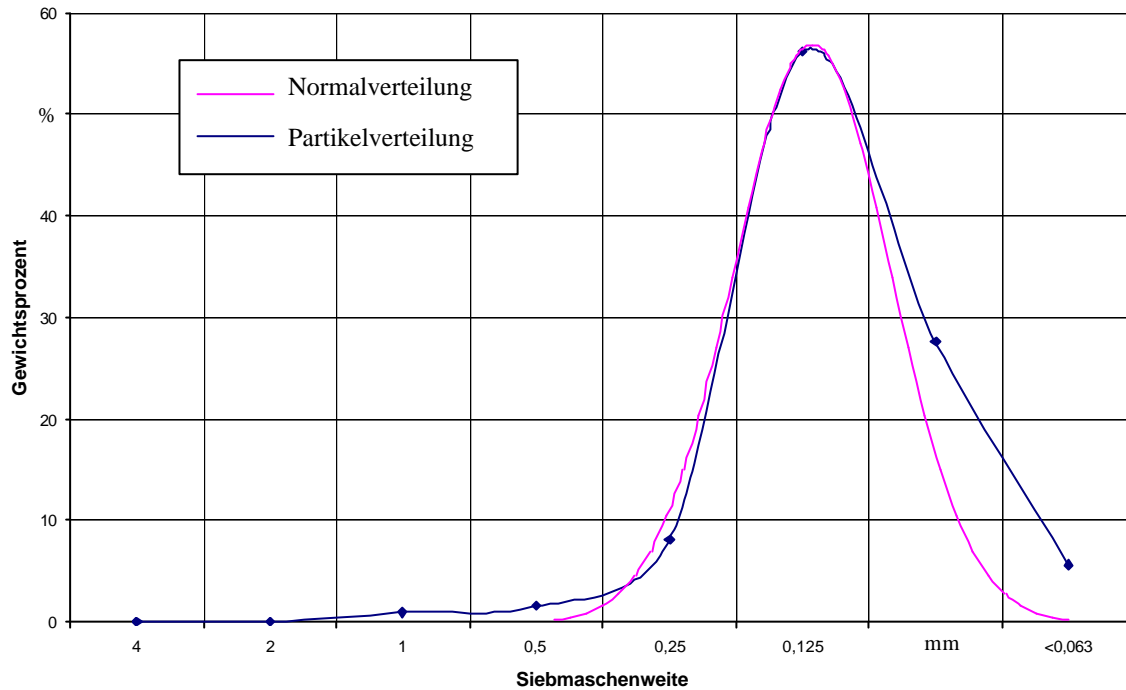


Bild 7.4: Vergleich der Partikelgrößenverteilungskurve Buche Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung

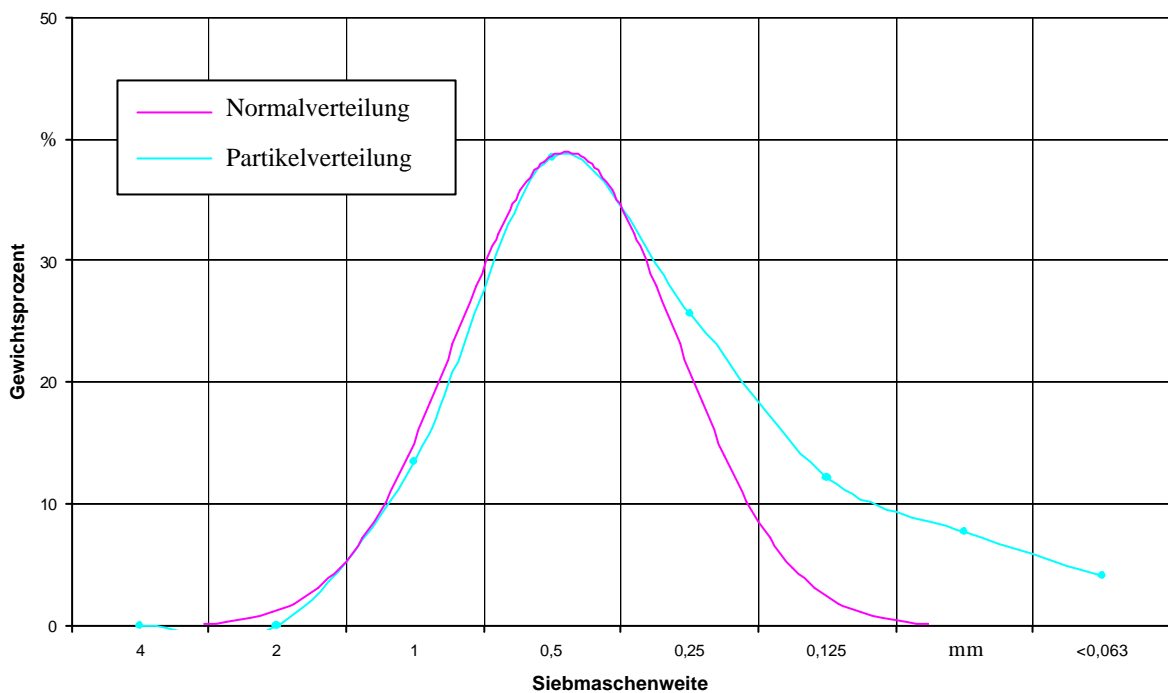


Bild 7.5: Vergleich der Partikelverteilungskurve Spanplatte Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung

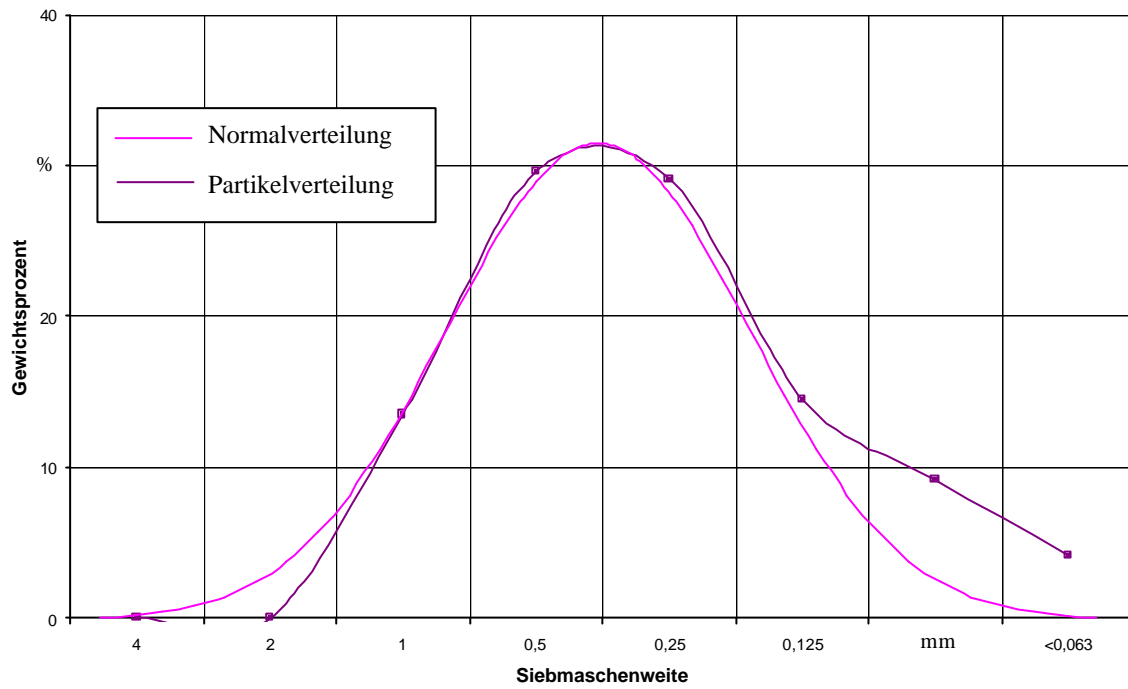


Bild 7.6: Vergleich der Partikelverteilungskurve Fichte Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung

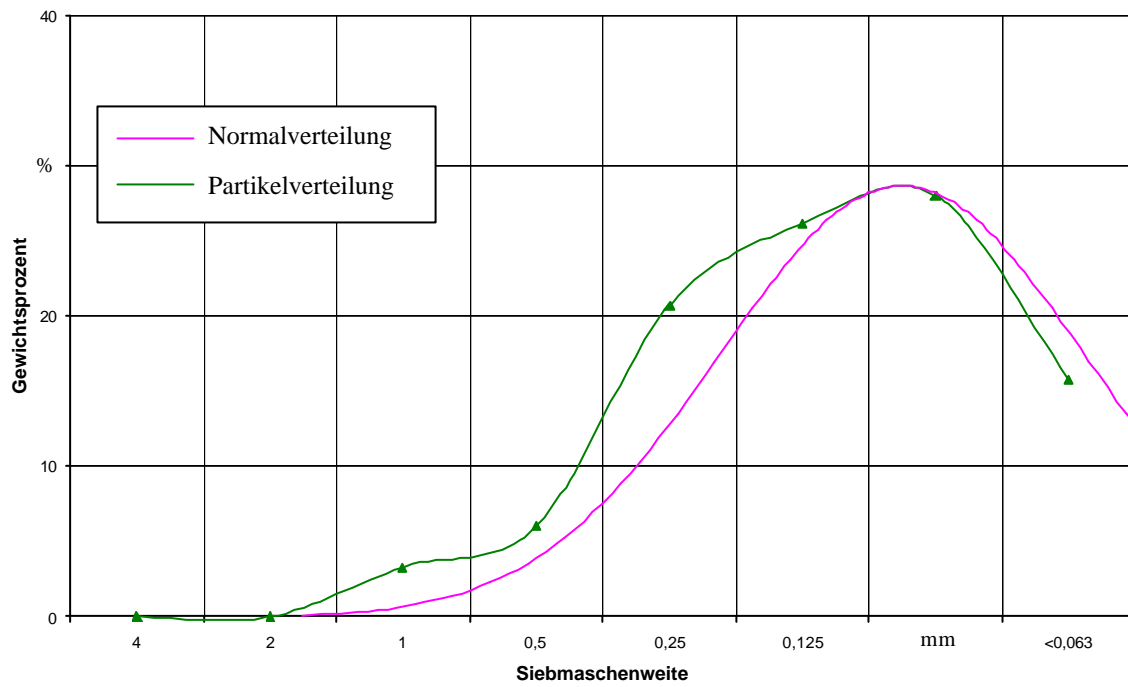


Bild 7.7: Vergleich der Partikelverteilungskurve MDF Fräsen mit der Gauß'schen Normalverteilung

Beim Vergleich der Partikelverteilungen mit der Gauß'schen Normalverteilung kann man von deren beiden Maxima bis zum Erreichen der x-Achse in Richtung größerer Partikel eine gute Übereinstimmung von beiden Kurven feststellen. Beim Abfall der Partikelverteilungskurven vom Maximum zu kleineren Partikelgrößen hin, ist der flachere Verlauf der Partikelverteilungskurven gegenüber der Normalverteilung bei allen Werkstoffen außer MDF auffallend. Bei MDF kann aufgrund des zu sehr kleinen Partikeln hin verschobenen Partikelgrößenverteilungsdiagramms über die Übereinstimmung des weiteren Verlaufs der beiden Verteilungskurven nur wenig ausgesagt werden, da im Bereich des Kurvenabfalls nur ein Meßwert vorliegt. G.Rackwitz beschreibt in seinen Untersuchungen zur "Beurteilung von Spänegemischen" ebenfalls eine schiefe Verteilung im Bereich zu feineren Spänen hin, wie sie auch bei den vorliegenden Verteilungen festgestellt wurden /28/. Nach dessen Aussage kann es sich dabei um Späne handeln, die durch die Schneidmesser aus dem Holzverband herausgerissen werden, um Späne die durch Auslaufen des Schnittes oder infolge der Drehung des Holzstückes oder durch die Zerspanung von Holz mit gestörtem Faserverlauf und durch andere Einflüsse entstehen. Er ist ebenfalls der Meinung, daß das vermehrte Zustandekommen von feineren Partikeln nicht durch Mahlvorgänge oder dem Transport im Werkzeug erklärt werden kann.

7.1.3 Partikelgrößenverteilung beim Kreissägen

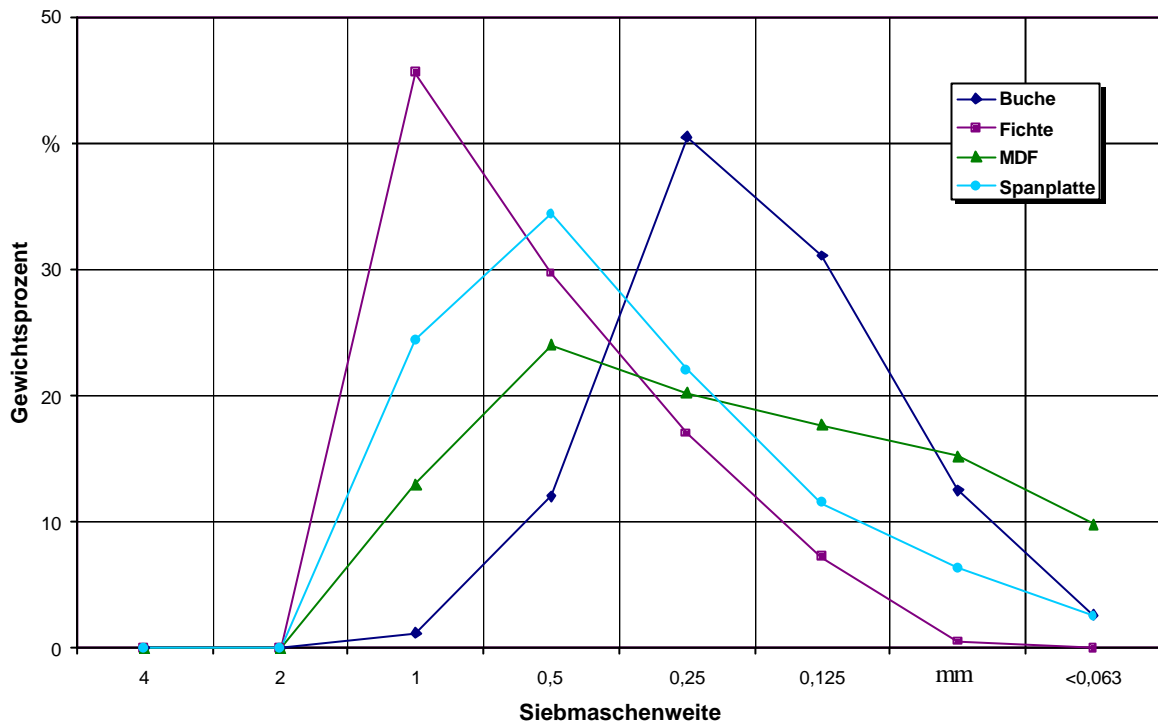


Bild 7.8: Partikelgrößenverteilung beim Kreissägen

Vergleicht man die Partikelgrößenverteilung beim Kreissägen mit der Verteilung beim Fräsen der gleichen Werkstoffe, so erkennt man einen sehr ähnlichen Kurvenverlauf der einzelnen Werkstoffe. Bei beiden Zerspanungsverfahren weist der Werkstoff Buche eine relativ scharfe, Spanplatte und Fichte eine mittlere und MDF eine flache Partikelverteilungskurve auf. Aufgrund dieser Ähnlichkeiten wird hier auf einen Vergleich dieser Verteilungen mit der Gauß'schen Normalverteilung verzichtet und auf die im vorigen Kapitel dargestellten Diagramme verwiesen. Betrachtet man jedoch die Lage der Verteilungskurven, so zeigt sich das das Maximum des prozentualen Partikelaustrags beim Kreissägen von Buche und Fichte um eine und von MDF um drei Siebmaschenweitestufen in Richtung größerer Partikel verschoben ist. Dies könnte an den beim Fräsen höher gewählten Vorschub und der, aufgrund der hohen Drehzahl von 18000 Umdrehungen pro Minute, sehr hohen Schnittgeschwindigkeit liegen. Lediglich die Verteilungskurve der Spanplatte hat ihr Maximum bei beiden Zerspanungsverfahren bei der selben Siebmaschenweite. Die Ursache hierfür könnte darin liegen,

daß es sich bei Spanplattenspänen größtenteils um Späne handelt, die aus dem Verbund herausgerissen und nicht abgeschnitten wurden.

7.1.4 Partikelgrößenverteilung beim Hobeln

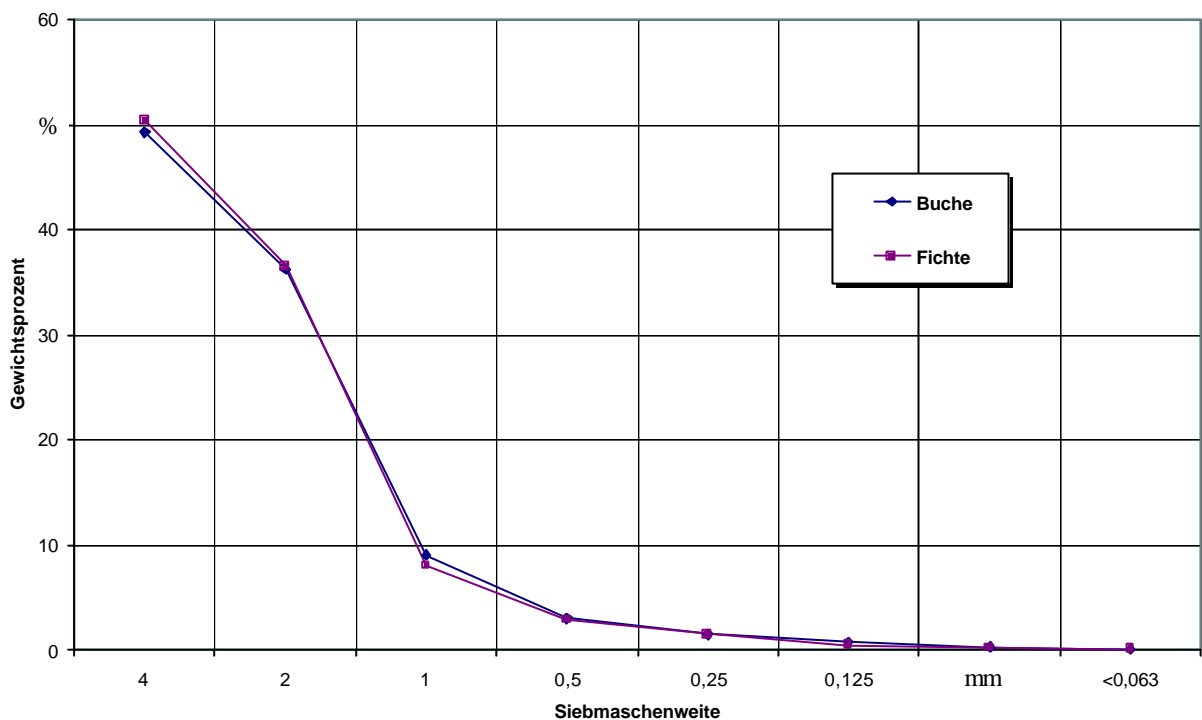


Bild 7.9: Partikelgrößenverteilung beim Hobeln

Beim Hobeln zeigt sich ein völlig anderer Partikelgrößenverlauf als beim Fräsen und Kreissägen. Die Kurven verlaufen nicht wie bei den beiden anderen Verfahren, in Form einer Normalverteilung von Null kommend über einen maximalen Wert auf Null zurück, sondern linear von einem Maximum bei großen Partikelgrößen auf den Wert Null zu. Dabei teilt sich die Kurve in einen Bereich mit hohem Gradient bei großen Partikelgrößen und in einen Bereich mit relativ flachem Gradient. Bemerkenswert bei den beiden sich durch den Zerspanungswerkstoff unterscheidenden Kurven ist der nahezu deckungsgleiche Verlauf der Partikelgrößenverteilung.

7.2 Schwebegeschwindigkeitsverteilung der Partikelklassen

Bei den in Kapitel 5.2 aufgenommenen Daten, deren Protokolle im Anhang 10.3 dargestellt sind, wurde in den Excel Tabellen der c_w -Wertberechnung durch hinterlegte Formeln der prozentuale Spanaustrag je Strömungsgeschwindigkeitsstufe berechnet. Mit den dadurch ermittelten Werten wurde für jede Kombination von Zerspanungsverfahren und Werkstoff ein Diagramm, das die prozentuale Verteilung der ausgetragenen Partikelmasse über der Strömungsgeschwindigkeit zeigt, erstellt. Betrachtet man diese Diagramme nun unter der in Kapitel 5.2 für das Sichtverfahren gemachten Annahme, daß die Partikel durch die höchste in Sichtraumquerschnitt herrschende Strömungsgeschwindigkeit ausgetragen werden, und diese der Schwebegeschwindigkeit entspricht, stellen die Kurven in diesen Diagrammen die prozentuale Verteilung der Schwebegeschwindigkeit der Partikel dar. Um bei der Betrachtung der Diagramme auf diese, dem Versuch grundlegenden Annahme hinzuweisen, ist die Abszisse mit beiden Größen, der Strömungs- und der Schwebegeschwindigkeit, beschriftet. Im folgendem Bild 7.10 ist ein solches Diagramm als Beispiel abgebildet, alle anderen sind im Anhang 10.4 aufgeführt.

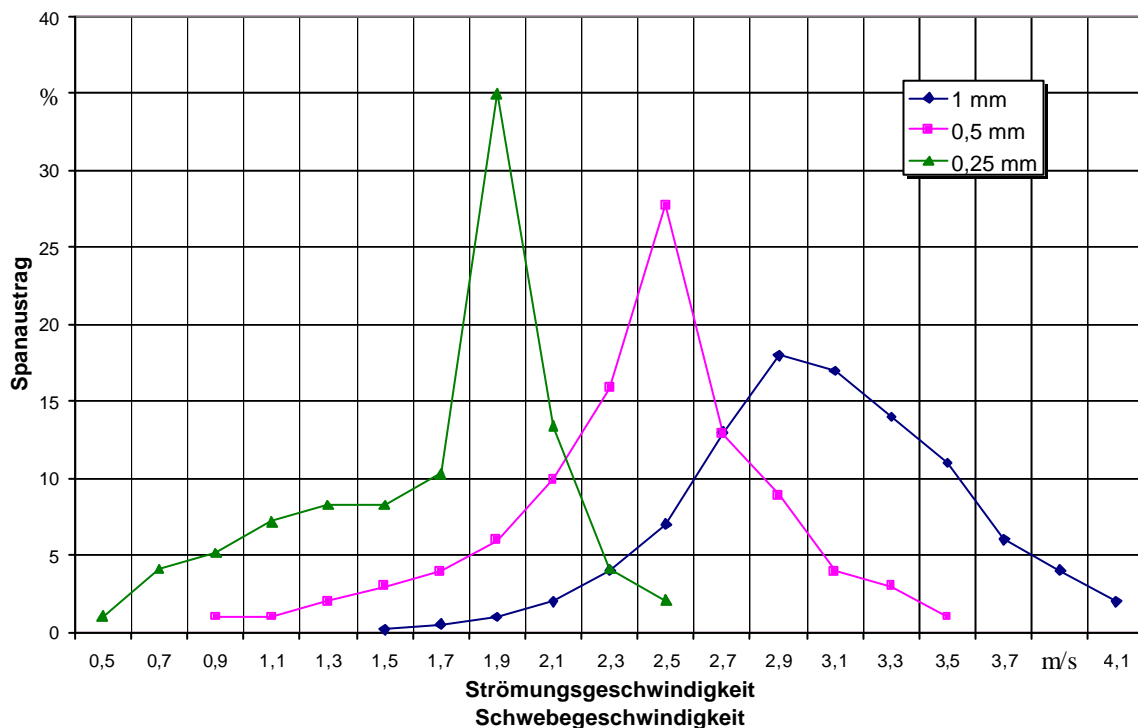


Bild 7.10: Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen

Wie zu erwarten war, verschiebt sich die Verteilungskurve des Spanaustrags mit größer werdenden Partikelgrößenklassen zu höheren Strömungs- bzw. Schwebegeschwindigkeiten. Betrachtet man diese, sich durch den Werkstoff, das Bearbeitungsverfahren und die Partikelgrößenklasse unterscheidenden Kurven, so fällt deren Ähnlichkeit auf. Ebenso ist die Verschiebung des Maximums des Spanaustrags, die bei allen Kurven je Partikelgrößenklasse im Bereich von 0,4-0,6 m/s liegt, auffallend regelmäßig.

Wie die folgenden und die im Anhang 10.5 dargestellten Diagramme zeigen, sind die Verteilungskurven gut durch eine normale Gauß'sche Normalverteilung bzw. durch eine korrigierte Normalverteilung, bei der alle Werte unter 5 % zu Null gesetzt werden, annäherbar. Durch diese Tatsache kann bei weitergehenden Untersuchungen mit Hilfe der obig festgestellten Gesetzmäßigkeit zur Verschiebung der Verteilung je Größenklassenstufe und der Annahme von ähnlichen Verteilungsformen auf Lage und Art der Verteilungskurven nicht untersuchter Größenklassen geschlossen werden.

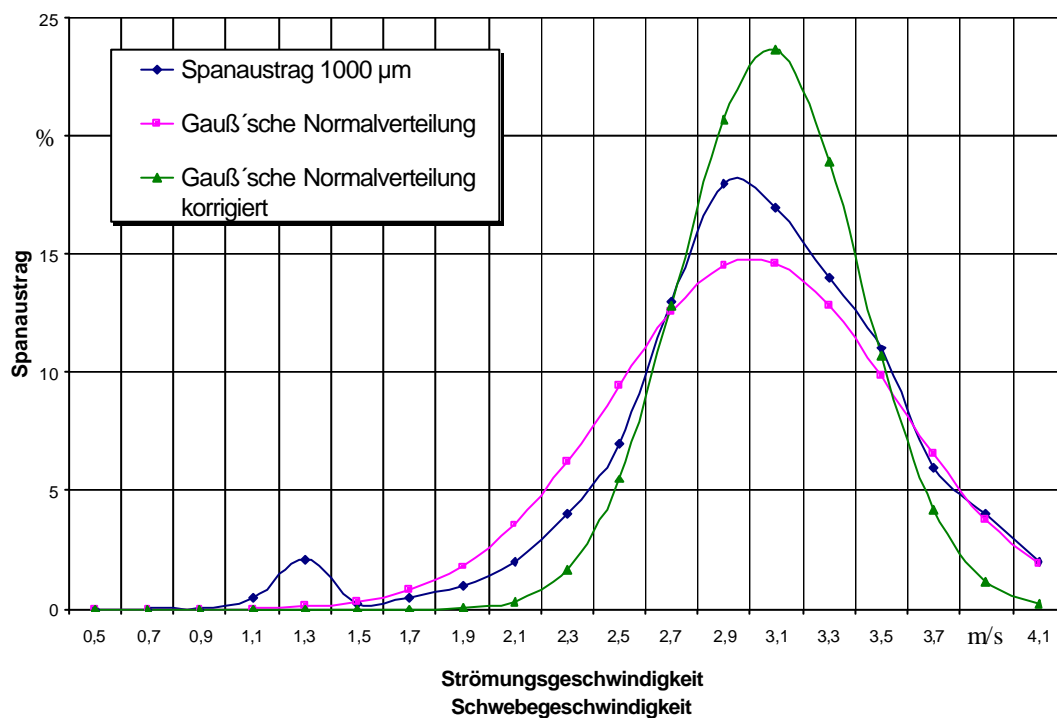


Bild 7.11: Vergleich der Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen 1000 µm mit der normalen und der korrigierten Gauß'schen Normalverteilung

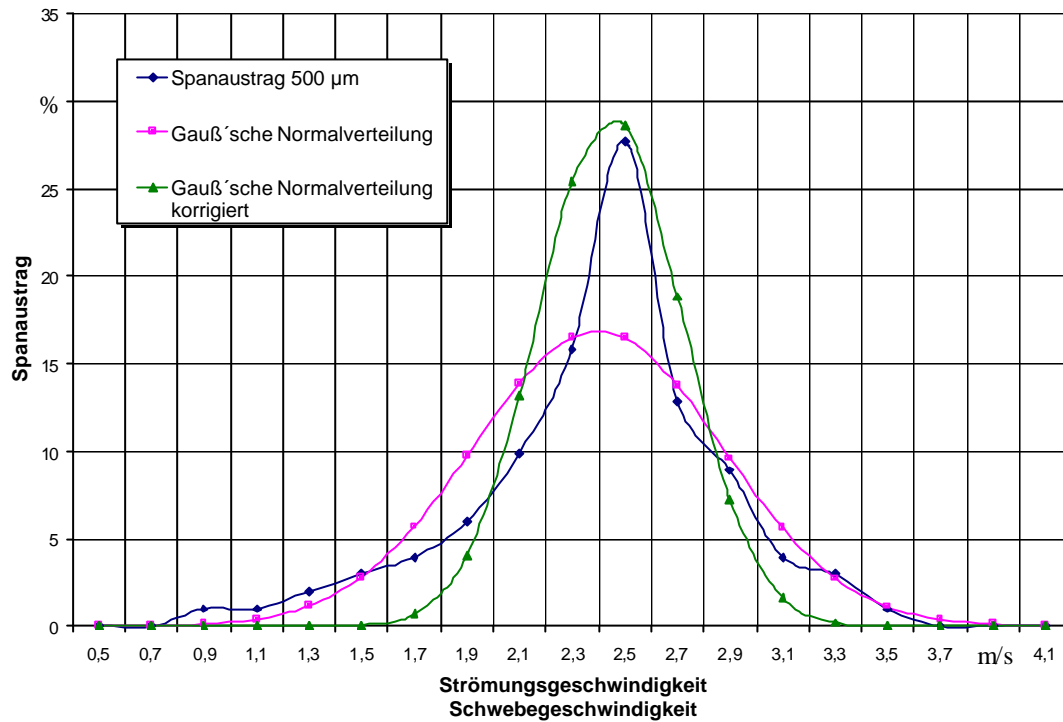


Bild 7.12: Vergleich der Schwebebeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen 500 µm mit der normalen und der korrigierten Gauß'schen Normalverteilung

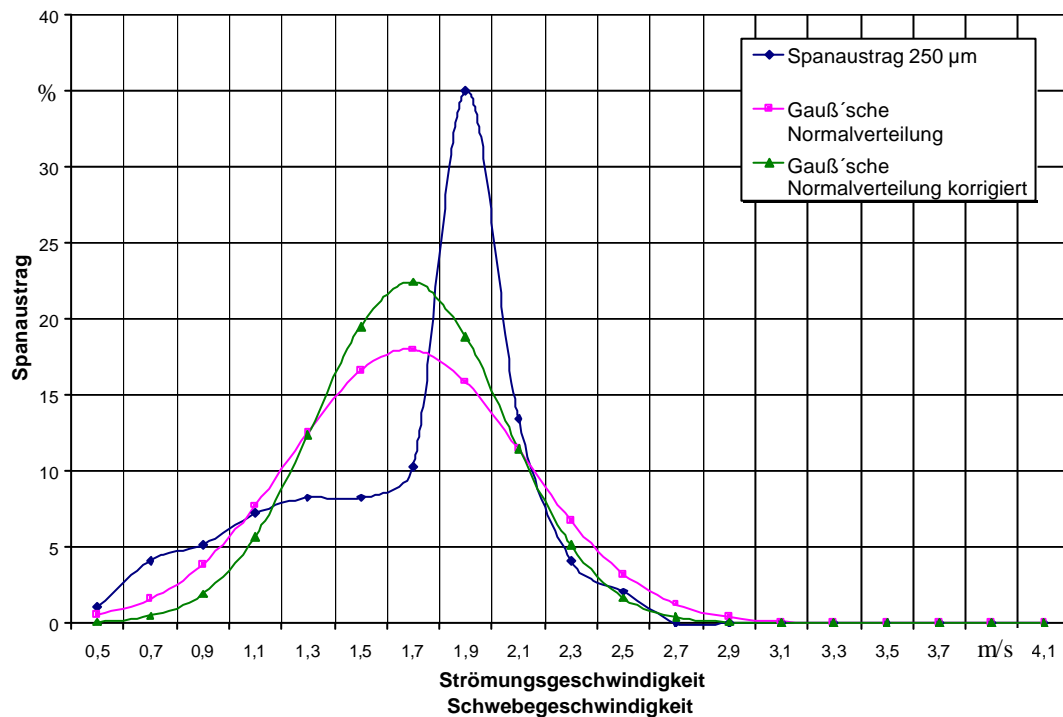


Bild 7.13: Vergleich der Schwebebeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräsen 250 µm mit der normalen und der korrigierten Gauß'schen Normalverteilung

7.3 Ermittlung der c_W -Wert-Verläufe und der mittleren c_W -Werte

Mit der in Kapitel 5.2 ermittelten Schwebegeschwindigkeit, der in Kapitel 5.3 ermittelten durchschnittlichen Spanmasse und der in Kapitel 5.4 bestimmten Näherung der Querschnittsfläche der Späne sind alle zur Berechnung der c_W -Werte notwendigen Kenngrößen bekannt. Die Berechnung erfolgte in einer Excel Tabelle in der alle in die Berechnung eingehenden Größen spaltenweise eingetragen sind. In der letzten Spalte ist die in Kapitel 6.5 hergeleitete Formel (6-25) hinterlegt, die bei der Berechnung Bezug auf die Kenngrößen nimmt. Diese Tabellen sind im Anhang 10.3 aufgeführt. Aus den errechneten c_W -Werten wurde für jede Kombination aus Werkstoff und Zerspanungsverfahren ein Diagramm erstellt, in welchem die Verläufe des c_W -Wertes der unterschiedlichen Partikelgrößenklassen eingetragen sind. Bild 7.14 zeigt beispielhaft ein solches Diagramm, alle weiteren sind im Anhang 10.6 aufgeführt.

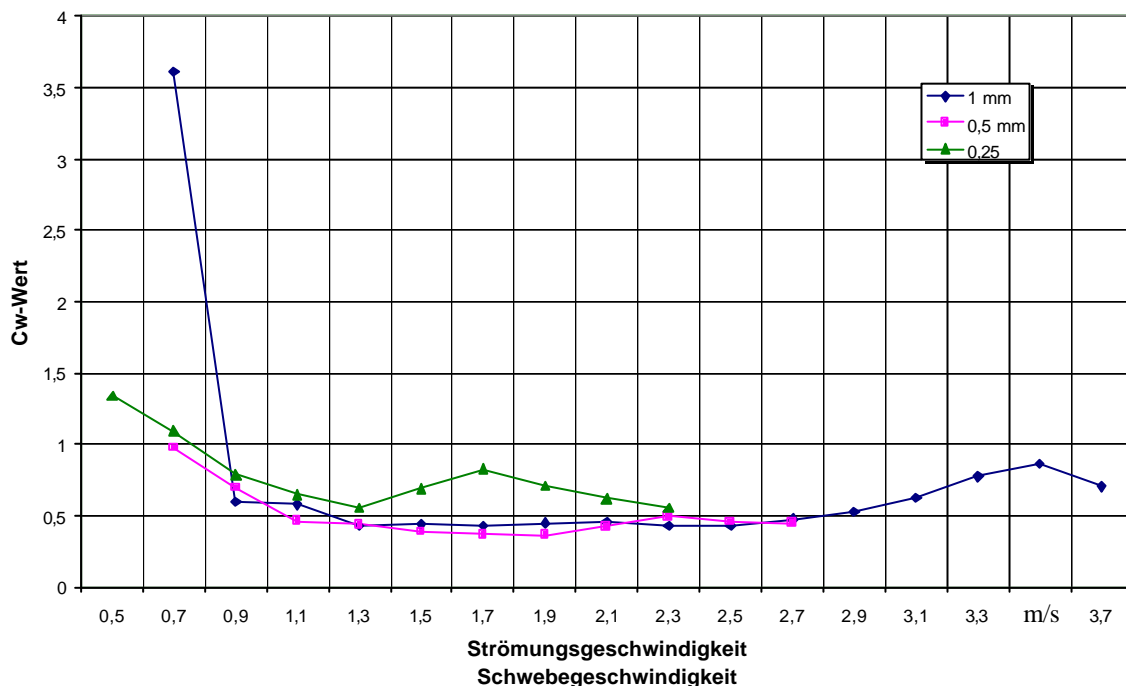


Bild 7.14: c_W -Wertverläufe Fräsen MDF

Vergleicht man die im obigen Diagramm eingezeichneten c_W -Wert-Verläufe mit den in Bild 6.9 dargestellten, aus der Theorie für einfache Körper bekannten Werten, so stellt man fest, daß die errechneten Werte in der richtigen Größenordnung liegen. Nimmt man als unteren

Anhaltswert den Wert für eine Kugel für den im Versuch herrschendem Reynoldszahlbereich von $510^3 - 7 \cdot 10^4$, so entspricht dieser mit 0,47 in etwa den kleinsten errechneten Werten. Die Werte im oberen Bereich liegen in der Größenordnung der Werte einer Rechteckplatte, die je nach Seitenverhältnis Werte zwischen 1,1 und 2 annehmen kann.

Um für jede Kombination aus Werkstoff und Zerspanungsverfahren einen Anhaltswert für die Höhe des c_w -Wertes angeben zu können, wurde für jede Kombination ein gewichteter Mittelwert errechnet. Dabei wurden die für eine bestimmte Schwebegeschwindigkeit ermittelten prozentualen Spanausträge mit den jeweilig für diese Werte errechneten c_w -Werten multipliziert. Die bei der Multiplikation entstandenen Zwischenwerte wurden aufsummiert. Der hierbei errechnete Wert wurde anschließend durch den Faktor Hundert geteilt. Durch dieses Vorgehen berücksichtigt der errechnete Mittelwert die Verteilung des c_w -Wertes über der Schwebegeschwindigkeit. Die errechneten Mittelwerte sind in der Tabelle in Bild 7.15 aufgeführt.

		Kreissägen	Fräsen	Hobeln
Buche	4000 μm	-	-	0,305
	2000 μm	-	-	0,577
	1000 μm	0,448	0,879	0,680
	500 μm	0,289	1,225	0,623
	250 μm	0,995	1,081	0,540
Fichte	4000 μm	-	-	0,272
	2000 μm	-	-	0,476
	1000 μm	0,477	0,471	0,630
	500 μm	0,787	0,877	0,656
	250 μm	0,740	1,493	-
Spanplatte	4000 μm	-	-	-
	2000 μm	-	-	-
	1000 μm	0,775	0,582	-
	500 μm	1,037	0,922	-
	250 μm	1,776	0,988	-
MDF	4000 μm	-	-	-
	2000 μm	-	-	-
	1000 μm	0,541	0,739	-
	500 μm	0,742	0,502	-
	250 μm	0,963	0,783	-

Bild 7.15: Mittlere c_w -Werte aller Werkstoffe und Verfahren

7.4 Möglichkeit zur Bestimmung des c_w -Wertes nicht untersuchbarer Partikelgrößenklassen

Wie in Kapitel 5.2.5 erläutert wurde, können mit der vorliegenden Versuchsanordnung Späne mit einer Größe kleiner 250 μm aufgrund deren starken Anhaftung am Sichterror und Agglomerationsneigung nicht untersucht werden. Bei diesen Partikeln besteht die Möglichkeit, unter der Annahme des aerodynamischen Äquivalentdurchmessers Schwebegeschwindigkeitswerte aus einer Tabelle abzulesen. Unter dem aerodynamischen Äquivalentdurchmesser versteht man den Durchmesser einer Kugel, die genau die selben Flugeigenschaften wie der zu untersuchende Holzpartikel hat. In der Literatur sind für einige Holzstäube solche Werte angegeben. Sind für ein bestimmtes Partikelkollektiv in der Literatur noch keine Werte für den aerodynamische Äquivalentdurchmesser bekannt, so muß dieser bestimmt werden. Dies könnte dadurch erfolgen, daß die Siebmaschenweite dem Durchmesser der Kugel gleichgesetzt wird, und der dabei auftretende Fehler durch einen durch Versuche ermittelten Korrekturfaktor verringert wird. In Bild 7.16 sind die Sinkgeschwindigkeiten für kugelförmige Teilchen unterschiedlicher Dichte und Größe angegeben.

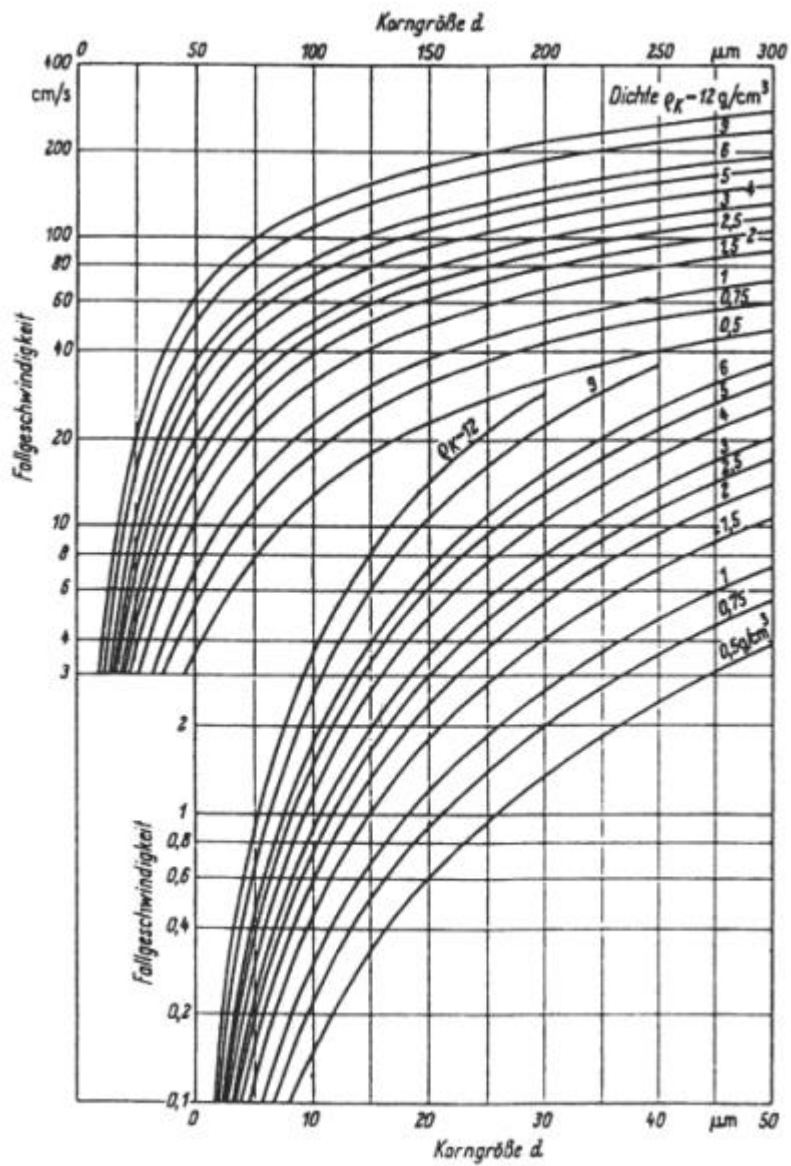


Bild 7.16: Sinkgeschwindigkeit kugelförmiger Partikel in ruhender Luft nach Batel /30/.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Ermittlung des c_w -Wertes von Partikelkollektiven verschiedener, durch unterschiedliche Verfahren zerspanter Holzwerkstoffe wurde mit der Schwebesichtung ein Sichtverfahren ausgewählt, mit welchem ein möglichst großer Anteil der erzeugten Partikel untersucht werden konnte. Für die Untersuchung der Holzwerkstoffe mit diesem Sichtverfahren wurde ein Versuchsstand entworfen und gebaut.

Von den für den Versuch ausgewählten Holzwerkstoffen wurden Buchen- und Fichtenspäne mit den Verfahren des Kreissägens, Fräsens und des Hobelns erzeugt. Spanplatten- und MDF-Späne wurden, da dies auch in der Praxis üblich ist, nur mit der Kreissäge und dem Fräser hergestellt. Die erzeugten Partikelkollektive wurden mittels Siebanalyse auf ihre Partikelgrößenverteilung hin untersucht und in Korngrößenklassen aufgeteilt. Diese Größenklassen wurden durch das ausgewählte Sichtverfahren in Strömungsgeschwindigkeitsklassen mit einer Schrittweite von 0,2 m/s getrennt. Durch die im Sichter herrschenden Verhältnisse und der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in kleinen Schritten konnte die Annahme getroffen werden, daß die Strömungsgeschwindigkeit bei der ein Span aus dem Sichter ausgetragen wurde, gleich der Schwebegeschwindigkeit dieses Spanes ist. Die Masse der aus dem Sichter ausgetragenen Partikel wurde durch Wiegen bestimmt, wodurch ein Diagramm der Schwebegeschwindigkeitsverteilung angefertigt werden konnte. Darüber hinaus wurde mit Hilfe einer Feinwaage die Einzelmasse eines Spanes bestimmt.

Mit der Kenntnis der Schwebegeschwindigkeitsverteilung, der Spanmasse und der Querschnittsfläche, die näherungsweise aus der Siebmaschenweite ermittelt wurde, konnten die c_w -Werte errechnet werden. Dabei wurden einzelne Effekte, die einen Einfluß auf die Schwebegeschwindigkeit, und somit auch auf die berechneten c_w -Werte, haben aufgrund ihres geringen Einflusses vernachlässigt. Es mußten aber auch einige physikalische Effekte, die einen Einfluß auf den Partikelflug haben könnten unberücksichtigt bleiben, teils weil die dafür erforderlichen Daten mit dem realisierten Versuchsaufbau nicht gewonnen werden können, teils weil es sich um Effekte handelt, die zur Berechnung zusätzliche, aufwendige Untersuchungen erfordern würden. Hier sei exemplarisch die Rotationsgeschwindigkeit der fliegenden Partikels genannt, die benötigt wird, um den Einfluß des Magnus-Effekts zu bestimmen.

Mit der verwendeten Versuchseinrichtung konnten nur Partikelgrößenklassen bis zu einer Siebmaschenweite von $250\ \mu\text{m}$ untersucht werden. Da bei kleineren Partikeln die Anziehungskräfte der statischen Aufladung im Verhältnis zu den Strömungs- und Gewichtskräften groß sind, bleiben am Acrylglas-Sichterrohr für eine genaue Sichtung zu viele Partikel haften. Darüber hinaus kommt es durch die Aufladung der Partikel zur Agglomeratbildung die ebenfalls zu einer Verfälschung der Sichterergebnisse führen würde. Dieses Problem könnte in weiterführenden Versuchen durch die Verwendung eines aus Blech gefertigten Sichtrohres, das aufgrund seiner Leitfähigkeit geerdet werden könnte, verringert werden. Durch die Befeuchtung des angesaugten Luftstrom mit einem Luftbefeuchter könnte die elektrische Aufladung der Partikel vermieden und bestehende Ladungen durch Ladungsausgleich über die „leitfähige“ feuchte Luft entladen werden. Dies würde zu einer weiteren Verbesserung des Sichtprozesses führen.

Durch die im obigen vorgestellten Verbesserungen der Sichteinrichtung könnte in weiteren Untersuchungen auch der c_w -Wert der aufgrund ihrer Feinheit mit der verwendeten Versuchseinrichtung nicht zu untersuchenden Partikelgrößenklassen ermittelt werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt für weiterführende Untersuchung wäre der Einfluß der zerspannungstechnischen Einflüssen auf die Spanbildung und damit auf die Höhe des c_w -Wertes zu bestimmen. Als zu betrachtende Einflüsse wären dabei die Schnittgeschwindigkeit, der Vorschub, die Schnitttrichtung bezüglich der Faser, die Schneidengeometrie und der Verschleißzustand des Werkzeugs zu nennen.

10 Literaturverzeichnis

- /1/ Munker Pasternack: Luftreinhaltung am Arbeitsplatz. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1984
- /2/ TRGS 553: Holzstaub. Ausgabe September 1992. Veröffentlicht im Bundesarbeitsblatt 9/1992, S.45 ff.
- /3/ Westkämper, E.; Riegel A.: Auslegung von Staub- und Späneerfassungseinrichtungen. In: Holz-Zentralblatt 24 (1995), S. 394,395.
- /4/ Knorpp, W: Kosteneinsparung bei Absauganlagen. In: Holz-Zentralblatt Messeheft 1965 , S. 49-53.
- /5/ Heisel, U.; Dressler, M.: Auslegung von Absaughauben durch Simulationsrechnung. Informationsblatt
- /6/ Siegel, W.: Pneumatische Förderung. 1 Aufl. Würzburg: Vogel-Verlag, 1991.
- /7/ Barz, E.; Münz U.V.: Der Spanablauf bei Fräsern für die Holzbearbeitung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 25 (1967) S.422-428.
- /8/ Schmutzler,W.: Kenngrößen für die Späneabsaugung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 21 (1963) S.265-267.
- /9/ Gumz, W.: Zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit von Teilchen beliebiger Gestalt. In: Arch. f. ges. Wärmewirtschaft Jg.1 (1950) H.2.
- /10/ Heisel,U.; Weiss,E.: Entstehung, Erfassung und Messung von Holzstaub. In: HOB - Die Holzbearbeitung 7/8-91, S.47-50.
- /11/ Eck,B.: Technische Strömungslehre. 6 Aufl. Berlin,Göttingen,Heidelberg: J. Springer-Verlag, 1961.

-
- /12/ Rackwitz, G.; Obermaier, M.: Grundlagen der Sichtung und die Sichtung im waagrechten Luftstrom. In: Holz als Roh- und Werkstoff 20 (1962) S. 27-38.
- /13/ Gonell, H. W.: Ein Windsichtverfahren zur Bestimmung der Kornzusammensetzung staubförmiger Stoffe. In: VDI-Zeitung Band 70 (1928) S.945.
- /14/ Jiru, P.: Bestimmung der minimalen Luftgeschwindigkeiten für pneumatischen Transport, Trocknung und Sortierung von Spänen sowie von Mahlgut. Drévársky Výskum Band 3 (1958) Nr.2, S.243-262.
- /15/ Bohl, W.: Technische Strömungslehre. 3 erweiterte Aufl. Würzburg: Vogel-Verlag, 1978.
- /16/ Lüttgens, G.; Glor, M.: Elektrostatische Aufladungen begreifen und sicher beherrschen. 2Aufl. Expert-Verlag 1988
- /17/ Sack, R.: Elektrostatische Aufladungen - Gefahren und Bekämpfungsmaßnahmen. Berlin: Verlag Tribüne Berlin 1985.VDI 2080
- /18/ Streicher, M.: Klimamessung für Praktiker. 1 Aufl. Lenzkirch: Testo-Firmenbroschüre.Ausgabe:
- /19/ Kollmann,F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2 Aufl., Bd.1. Berlin, Göttingen,Heidelberg: Springer-Verlag 1951.
- /20/ Heisel,U.: Grundlagen der Werkzeugmaschinen, Teil 1. Universität Stuttgart, Vorlesungsmanuskript, 1995.
- /21/ VDI 2080: Meßverfahren und Meßgeräte für Raumluftechnische Anlagen. Ausgabe: Oktober 1984. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- /22/ Rackwitz, G.: Die Sichtung im senkrechten Luftstrom. In: Holz als Roh- und Werkstoff 25 (1967) S.

-
- /23/ Wessel, J.: Schwerkraftwindsichter. In: Aufbereitungstechnik 5/1962 S.222-230.
- /24/ Keller GmbH: Sichtung im Schwebeprozess. Leverkusen 1962.
- /25/ Dressler, M.: Ermittlung des Zusammenhangs zwischen theoretischem und realem Späneflug. Universität Stuttgart: unveröffentlichte Studienarbeit, 1996.
- /26/ Herr, H.: Mechanik der Flüssigkeiten und Gase, Technische Physik. Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co., Wuppertal 1989.
- /27/ Beitz, W.; Küttner K.-H.: Taschenbuch für den Maschinenbau. 17 Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona: Springer-Verlag, 1990.
- /28/ Rackwitz, G.: Beurteilung von Spänegemischen und Sichtvorgängen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964) S.365-371.
- /29/ Pfeiffer, W.; Kühnen, G.; Armbruster L.: Feinheit von Holzstäuben. In: Staub - Reinhaltung der Luft, Band 45 (1985) S.515-518.
- /30/ Batel, W.: Entstaubungstechnik. Springer-Verlag, Berlin 1972.

10 Anhang

10.1 Siebprotokolle

Partikelart:	Buche Kreissäge			
Probemasse:	27,7 g	Kreissägeblatt Fa. Leitz: WZ/HM 300x3,2x30, z = 96		
Siebzeit:	je 28 min	Handvorschub $v_{fh} = 3$ m/min, Drehzahl $n = 3000$ 1/min		
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	252,1	0,3	1,1
0,063 mm	336,3	339,6	3,3	12,0
0,125 mm	343,5	354,7	11,2	40,6
0,250 mm	358,6	367,2	8,6	31,2
0,5 mm	385,4	388,9	3,5	12,7
1 mm	365,0	365,7	0,7	2,5
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	27,6			100,1
Massendifferenz:	-0,1			0,1

Partikelart:	Fichte Kreissäge			
Probemasse:	439,9 g	Kreissägeblatt Fa. Leitz: WZ/HM 300x3,2x30, z = 96		
Siebzeit:	je 28 min	Handvorschub $v_{fh} = 3$ m/min, Drehzahl $n = 3000$ 1/min		
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	251,8	-	-
0,063 mm	336,3	338,6	2,3	0,5
0,125 mm	343,5	375,2	31,7	7,2
0,250 mm	358,6	433,5	74,9	17
0,5 mm	385,4	516,0	130,6	29,7
1 mm	365,0	565,4	200,4	45,6
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	439,9			100
Massendifferenz:	0			0

Partikelart:	Spanplatte Kreissäge			
Probemasse:	247,1 g	Kreissägeblatt Fa. Leitz: WZ/HM 300x3,2x30, z = 96		
Siebzeit:	je 28 min	Handvorschub $v_{fh} = 3$ m/min, Drehzahl $n = 3000$ 1/min		
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	257,9	6,1	2,5
0,063 mm	336,3	351,9	15,6	6,3
0,125 mm	343,5	371,8	28,3	11,5
0,250 mm	358,6	412,9	54,3	22,0
0,5 mm	385,4	470,5	85,1	34,4
1 mm	365,0	422,7	57,7	23,4
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	247,1			100,1
Massendifferenz:	0			0,1

Partikelart:	MDF Kreissäge			
Probemasse:	232,9 g	Kreissägeblatt Fa. Leitz: WZ/HM 300x3,2x30, z = 96		
Siebzeit:	je 28 min	Handvorschub $v_{fh} = 3$ m/min, Drehzahl $n = 3000$ 1/min		
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	274,7	22,9	9,8
0,063 mm	336,3	371,8	35,5	15,2
0,125 mm	343,5	384,7	41,2	17,7
0,250 mm	358,6	405,7	47,1	20,2
0,5 mm	385,4	441,3	55,9	24,0
1 mm	365,0	395,3	30,3	13,0
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	232,9			100
Massendifferenz:	0			0

Partikelart:	Buche Fräser			
Probemasse:	361,8 g	Schruppfräser 2-schneidig, d = 22 mm		
Siebzeit:	je 28 min	Vorschub $v_f = 8$ m/min, Drehzahl $n = 18000$ 1/min		
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	272,3	20,5	5,7
0,063 mm	336,3	435,7	99,4	27,5
0,125 mm	343,5	547,0	203,5	56,2
0,250 mm	358,6	387,9	29,3	8,1
0,5 mm	385,4	391,0	5,6	1,5
1 mm	365,0	368,5	3,5	1,0
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	361,8			100
Massendifferenz:	0			0

Partikelart:	Fichte Fräser			
Probemasse:	332,2	Schruppfräser 2-schneidig, d = 22 mm		
Siebzeit:	je 28 min	Vorschub $v_f = 10$ m/min, Drehzahl $n = 18000$ 1/min		
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	265,6	13,8	4,2
0,063 mm	336,3	366,7	30,4	9,2
0,125 mm	343,5	391,6	48,1	14,5
0,250 mm	358,6	455,2	96,6	29,1
0,5 mm	385,4	483,8	98,4	29,6
1 mm	365,0	409,9	44,9	13,5
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	332,2			100,1
Massendifferenz:	0			0,1

Partikelart:	Spanplatte Fräser			
Probemasse:	483,1 g		Schruppfräser 2-schneidig, d = 22 mm	
Siebzeit:	je 28 min		Vorschub $v_f = 10$ m/min, Drehzahl $n = 18000$ 1/min	
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	271,7	19,9	4,1
0,063 mm	336,3	373,3	37,0	7,7
0,125 mm	343,5	402,4	58,9	12,2
0,250 mm	358,6	482,8	124,2	25,7
0,5 mm	385,4	564,0	178,6	37,0
1 mm	365,0	429,5	64,5	13,4
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	438,1			100,1
Massendifferenz:	0			0,1

Partikelart:	MDF Fräser			
Probemasse:	517,2 g		Schruppfräser 2-schneidig, d = 22 mm	
Siebzeit:	je 28 min		Vorschub $v_f = 10$ m/min, Drehzahl $n = 18000$ 1/min	
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	254,2	81,9	15,8
0,063 mm	336,3	359,5	144,7	28,0
0,125 mm	343,5	421,9	135,2	26,1
0,250 mm	358,6	418,9	106,9	20,7
0,5 mm	385,4	409,6	31,1	6,0
1 mm	365,0	370,1	17,4	3,3
2 mm	564,9	564,9	-	0
4 mm	569,9	569,9	-	0
Gesamtmasse:	517,2			99,9
Massendifferenz:	0			0,1

Partikelart:	Buche Hobel			
Probemasse:	191,0 g			
Siebzeit:	je 28 min Handvorschub $v_{fh} = 6$ m/min, Drehzahl $n = 2000$ 1/min			
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	251,9	0,1	0,1
0,063 mm	336,3	336,8	0,5	0,3
0,125 mm	343,5	344,8	1,3	0,7
0,250 mm	358,6	361,4	2,8	1,5
0,5 mm	385,4	391,1	5,7	3,0
1 mm	365,0	382,2	17,2	9,0
2 mm	564,9	634,1	69,2	36,2
4 mm	569,9	664,1	94,2	49,3
Gesamtmasse:	191,0			100,1
Massendifferenz:	0			0,1

Partikelart:	Fichte Hobel			
Probemasse:	213,6			
Siebzeit:	je 28 min Handvorschub $v_{fh} = 6$ m/min, Drehzahl $n = 2000$ 1/min			
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmasse:	Prozentualer Anteil:
Wanne	251,8	252,0	0,2	0,1
0,063 mm	336,3	336,7	0,4	0,2
0,125 mm	343,5	344,6	1,1	0,5
0,250 mm	358,6	361,8	3,2	1,5
0,5 mm	385,4	391,6	6,2	2,9
1 mm	365,0	382,1	17,1	8,0
2 mm	564,9	642,9	78,0	36,5
4 mm	569,9	677,6	107,7	50,4
Gesamtmasse:	213,9			100,1
Massendifferenz:	0,3			0,1

10.2 Datenprotokolle der Sichtanalyse

Partikelart:	Buche Kreissäge					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,9	-	-	-
0,7	-	0,1	0,8	-	-	-
0,9	-	0,4	0,9	-	-	-
1,1	0,05	0,6	1,5	-	-	-
1,3	0,1	1,2	2,1	-	-	-
1,5	0,3	1,4	1,7	-	-	-
1,7	0,6	4,0	1,1	-	-	-
1,9	0,5	1,3	0,3	-	-	-
2,1	0,2	0,3	0,1	-	-	-
2,3	0,1	0,1	0,1	-	-	-
2,5	0,1	0,1	-	-	-	-
2,7	0,2	-	-	-	-	-
2,9	0,1	-	-	-	-	-
3,1	0,1	-	-	-	-	-
3,3	0,1	-	-	-	-	-
3,5	0,1	-	-	-	-	-
3,7	-	-	-	-	-	-
Startmasse in g	2,4	10,0	12,0	0	0	0
Endmasse in g	2,55	9,5	9,5	0	0	0
Abweichung in g	0,15	-0,5	-2,5	0	0	0

Partikelart:	Fichte Kreissäge					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,6	-	-	-
0,7	-	0,2	0,8	-	-	-
0,9	0,2	0,4	0,9	-	-	-
1,1	0,5	1,0	0,9	-	-	-
1,3	0,6	1,1	1,3	-	-	-
1,5	1,2	2,2	1,1	-	-	-
1,7	1,7	1,0	1,2	-	-	-
1,9	1,4	1,2	0,8	-	-	-
2,1	1,1	1,6	0,2	-	-	-
2,3	1,2	0,7	0,1	-	-	-
2,5	1,3	0,2	-	-	-	-
2,7	0,5	0,1	-	-	-	-
2,9	0,4	-	-	-	-	-
3,1	0,3	-	-	-	-	-
3,3	0,2	-	-	-	-	-
3,5	0,1	-	-	-	-	-
3,7	0,1	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	10,0	0	0	0
Endmasse in g	10,8	9,7	7,9	0	0	0
Abweichung in g	0,8	-0,3	-2,1	0	0	0

Partikelart:	Spanplatte Kreissäge					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,3	-	-	-
0,7	-	-	0,3	-	-	-
0,9	-	0,1	0,6	-	-	-
1,1	-	0,4	0,8	-	-	-
1,3	0,02	0,7	1,4	-	-	-
1,5	0,05	1,3	1,5	-	-	-
1,7	0,1	1,4	2,5	-	-	-
1,9	0,1	1,1	0,7	-	-	-
2,1	0,3	1,5	0,2	-	-	-
2,3	0,8	1,7	0,1	-	-	-
2,5	1,8	0,8	-	-	-	-
2,7	0,9	0,4	-	-	-	-
2,9	2,8	0,2	-	-	-	-
3,1	1,1	0,1	-	-	-	-
3,3	0,9	0,1	-	-	-	-
3,5	0,4	-	-	-	-	-
3,7	0,3	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	10,0	0	0	0
Endmasse in g	9,9	9,8	8,4	0	0	0
Abweichung in g	-0,1	-0,2	-1,6	0	0	0

Partikelart:	MDF Kreissäge					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	1,0	-	-	-
0,7	0,02	0,5	0,9	-	-	-
0,9	0,1	0,7	1,0	-	-	-
1,1	0,2	1,1	0,9	-	-	-
1,3	0,4	1,8	1,2	-	-	-
1,5	0,8	1,7	0,6	-	-	-
1,7	0,9	0,8	2,1	-	-	-
1,9	1,1	1,6	0,4	-	-	-
2,1	1,1	1,4	0,2	-	-	-
2,3	1,1	0,3	0,1	-	-	-
2,5	2,0	0,1	-	-	-	-
2,7	1,2	-	-	-	-	-
2,9	0,5	-	-	-	-	-
3,1	0,3	-	-	-	-	-
3,3	0,1	-	-	-	-	-
3,5	-	-	-	-	-	-
3,7	-	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	12,0	0	0	0
Endmasse in g	9,8	10,0	8,4	0	0	0
Abweichung in g	-0,2	0	-1,6	0	0	0

Partikelart:	Buche Fräser					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,4	-	-	-
0,7	-	0,1	0,5	-	-	-
0,9	-	0,2	1,2	-	-	-
1,1	0,02	0,3	1,0	-	-	-
1,3	0,1	0,3	1,7	-	-	-
1,5	0,1	0,8	1,8	-	-	-
1,7	0,3	1,2	1,4	-	-	-
1,9	0,6	1,6	0,7	-	-	-
2,1	1,0	1,5	0,2	-	-	-
2,3	0,8	0,4	0,1	-	-	-
2,5	1,0	0,2	-	-	-	-
2,7	0,4	0,1	-	-	-	-
2,9	0,2	0,1	-	-	-	-
3,1	0,1	-	-	-	-	-
3,3	0,1	-	-	-	-	-
3,5	-	-	-	-	-	-
3,7	-	-	-	-	-	-
Startmasse in g	5,0	7,2	10,0	0	0	0
Endmasse in g	4,7	6,8	9,0	0	0	0
Abweichung in g	-0,3	-0,4	-1,0	0	0	0

Partikelart:	Fichte Fräser					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,4	-	-	-
0,7	-	0,1	0,4	-	-	-
0,9	0,05	0,3	0,9	-	-	-
1,1	0,1	0,4	0,8	-	-	-
1,3	0,1	0,6	1,0	-	-	-
1,5	0,2	1,1	1,2	-	-	-
1,7	0,3	0,9	2,9	-	-	-
1,9	0,6	1,2	1,1	-	-	-
2,1	1,6	2,3	0,3	-	-	-
2,3	1,5	1,2	0,1	-	-	-
2,5	2,2	0,5	0,1	-	-	-
2,7	1,6	0,3	-	-	-	-
2,9	0,8	0,2	-	-	-	-
3,1	0,6	0,1	-	-	-	-
3,3	0,3	-	-	-	-	-
3,5	0,1	-	-	-	-	-
3,7	0,1	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	10,0	0	0	0
Endmasse in g	10,1	9,2	9,1	0	0	0
Abweichung in g	0,1	-0,8	-0,9	0	0	0

Partikelart:	Spanplatte Fräser					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelauwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,1	-	-	-
0,7	-	-	0,4	-	-	-
0,9	-	0,1	0,5	-	-	-
1,1	-	0,1	0,7	-	-	-
1,3	-	0,2	0,8	-	-	-
1,5	0,02	0,3	0,8	-	-	-
1,7	0,05	0,4	1,0	-	-	-
1,9	0,1	0,6	3,4	-	-	-
2,1	0,2	1,0	1,3	-	-	-
2,3	0,4	1,6	0,4	-	-	-
2,5	0,7	2,8	0,2	-	-	-
2,7	1,3	1,3	0,1	-	-	-
2,9	1,8	0,9	-	-	-	-
3,1	1,7	0,4	-	-	-	-
3,3	1,4	0,3	-	-	-	-
3,5	1,1	0,1	-	-	-	-
3,7	0,6	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	10,0	0	0	0
Endmasse in g	10,0	10,1	9,7	0	0	0
Abweichung in g	0	0,1	0,3	0	0	0

Partikelart:	MDF Fräser					
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelauwurf in g bei Nennmaschenweite					
m/s	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	0,7	-	-	-
0,7	0,01	0,2	0,6	-	-	-
0,9	0,05	0,2	0,9	-	-	-
1,1	0,1	0,3	0,8	-	-	-
1,3	0,2	0,4	0,8	-	-	-
1,5	0,4	0,7	1,4	-	-	-
1,7	0,8	1,0	2,7	-	-	-
1,9	0,9	1,8	0,5	-	-	-
2,1	1,4	3,9	0,2	-	-	-
2,3	1,1	1,2	0,1	-	-	-
2,5	1,9	0,2	-	-	-	-
2,7	1,6	0,1	-	-	-	-
2,9	0,9	-	-	-	-	-
3,1	0,4	-	-	-	-	-
3,3	0,3	-	-	-	-	-
3,5	0,2	-	-	-	-	-
3,7	0,1	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	10,0	0	0	0
Endmasse in g	10,3	10,0	8,7	0	0	0
Abweichung in g	0,3	0,0	-1,3	0	0	0

Partikelart:	Buche Hobel							
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelauwurf in g bei Nennmaschenweite							
m/s	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	-	-	0,9	-	-	-
0,7	-	-	-	0,1	0,8	-	-	-
0,9	-	-	-	0,4	0,9	-	-	-
1,1	-	-	0,05	0,6	1,5	-	-	-
1,3	-	0,01	0,1	1,2	2,1	-	-	-
1,5	-	0,05	0,3	1,4	1,7	-	-	-
1,7	-	0,1	0,6	4,0	1,1	-	-	-
1,9	0,1	0,2	0,5	1,3	0,3	-	-	-
2,1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1	-	-	-
2,3	0,2	0,8	0,1	0,1	0,1	-	-	-
2,5	0,8	1,0	0,1	0,1	-	-	-	-
2,7	1,5	5,5	0,2	-	-	-	-	-
2,9	4,2	2,0	0,1	-	-	-	-	-
3,1	2,5	0,4	0,1	-	-	-	-	-
3,3	0,6	0,1	0,1	-	-	-	-	-
3,5	0,2	0,1	0,1	-	-	-	-	-
3,7	0,1	-	-	-	-	-	-	-
3,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	2,4	10,0	12,0	0	0	0
Endmasse in g	10,3	10,5	2,55	9,5	9,5	0	0	0
Abweichung in g	0,3	0,5	0,15	-0,5	-2,5	0	0	0

Partikelart:	Fichte Hobel							
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelauwurf in g bei Nennmaschenweite							
m/s	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	Wanne
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-
0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
1,1	-	-	0,1	0,1	-	-	-	-
1,3	-	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-
1,5	0,1	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-
1,7	0,2	0,5	0,3	0,2	-	-	-	-
1,9	0,5	1,0	0,5	0,1	-	-	-	-
2,1	1,1	1,3	0,9	0,1	-	-	-	-
2,3	1,2	1,5	1,1	-	-	-	-	-
2,5	1,0	1,0	0,8	-	-	-	-	-
2,7	3,1	2,7	0,4	-	-	-	-	-
2,9	1,4	1,1	0,2	-	-	-	-	-
3,1	0,6	0,3	0,1	-	-	-	-	-
3,3	0,4	0,1	0,1	-	-	-	-	-
3,5	0,2	0,1	0,1	-	-	-	-	-
3,7	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-
3,9	0,05	-	-	-	-	-	-	-
4,1	0,2	-	-	-	-	-	-	-
Startmasse in g	10,0	10,0	4,6	0,9	0	0	0	0
Endmasse in g	10,15	10,0	4,8	0,8	0	0	0	0
Abweichung in g	0,15	10,0	0,2	-0,1	0	0	0	0

Partikelart:	PVC Kantenmaterial
Strömungs- geschwindigkeit	Partikelauwurf in g
m/s	
0,5	-
0,7	-
0,9	-
1,1	0,02
1,3	0,1
1,5	0,1
1,7	0,1
1,9	0,2
2,1	0,3
2,3	2,2
2,5	3,3
2,7	2,4
2,9	1,0
3,1	0,4
3,3	0,2
3,5	0,1
3,7	0,1
3,9	-
Startmasse in g	10,0
Endmasse in g	10,52
Abweichung in g	0,52

10.3 Datenprotokolle der Massenbestimmung, des prozentualen Auswurfs und Berechnung der C_w -Werte

Buche Kreissäge,					
Siebmaschenweite 1000 μm ($A = 2,35619\text{E-}06 \text{ m}^2$)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m_G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C_w
1.1	197	0.0037	1.8781726E-08	1.961	0.099929
1.3	200	0.0055	2.7500000E-08	3.922	0.104758
1.5	196	0.0076	3.8775510E-08	11.765	0.110947
1.7	208	0.0142	6.8269231E-08	23.529	0.152079
1.9	200	0.0190	9.5000000E-08	19.608	0.169417
2.1	195	0.0360	1.8461538E-07	7.843	0.269508
2.3	191	0.0598	3.1308901E-07	3.922	0.381025
2.5	193	0.0760	3.9378238E-07	3.922	0.405619
2.7	200	0.0914	4.5700000E-07	7.843	0.403581
2.9	132	0.0974	7.3787879E-07	3.922	0.564847
3.1	58	0.0623	1.0741379E-06	3.922	0.719579
3.3	79	0.1002	1.2683544E-06	3.922	0.749816
3.5	63	0.1069	1.6968254E-06	3.922	0.891750
3.7	43	0.1141	2.6534884E-06	3.922	1.247830

Buche Kreissäge,					
Siebmaschenweite 500 μm ($A = 5,8905\text{E-}07 \text{ m}^2$)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m_G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C_w
0.7	200	0.00161	8.0500000E-09	1.053	0.423058
0.9	200	0.00202	1.0100000E-08	4.211	0.321097
1.1	200	0.00213	1.0650000E-08	6.316	0.226654
1.3	200	0.00305	1.5250000E-08	12.632	0.232372
1.5	200	0.00397	1.9850000E-08	14.737	0.227184
1.7	200	0.00569	2.8450000E-08	42.105	0.253504
1.9	200	0.00778	3.8900000E-08	13.684	0.277487
2.1	200	0.01013	5.0650000E-08	3.158	0.295761
2.3	200	0.01351	6.7550000E-08	1.053	0.328829
2.5	200	0.01476	7.3800000E-08	1.053	0.304072

Buche Kreissäge,					
Siebmaschenweite 250 μm ($A = 1,47262\text{E-}07 \text{ m}^2$)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m_G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C_w
0.5	200	0.0007	3.5000000E-09	9.474	1.442080
0.7	200	0.0013	6.5000000E-09	8.421	1.366403
0.9	200	0.0020	1.0000000E-08	9.474	1.271676
1.1	200	0.0022	1.1000000E-08	15.789	0.936416
1.3	200	0.0026	1.3000000E-08	22.105	0.792352
1.5	200	0.0037	1.8500000E-08	17.895	0.846936
1.7	200	0.0052	2.6000000E-08	20.000	0.926695
1.9	200	0.0052	2.6000000E-08	3.158	0.741870
2.1	200	0.0054	2.7000000E-08	1.053	0.630647

Fichte Kreissäge,						
Siebmaschenweite 1000 µm (A =2,35619E-06 m ²)						
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w	
0,9	100	0,0031	3,1000000E-08	1,852	0,246387	
1,1	100	0,0050	5,0000000E-08	4,630	0,266027	
1,3	100	0,0075	7,5000000E-08	5,556	0,285704	
1,5	100	0,0117	1,1700000E-07	11,111	0,334769	
1,7	100	0,0158	1,5800000E-07	15,741	0,351966	
1,9	100	0,0198	1,9800000E-07	12,963	0,353102	
2,1	100	0,0275	2,7500000E-07	10,185	0,401454	
2,3	100	0,0310	3,1000000E-07	11,111	0,377266	
2,5	100	0,0394	3,9400000E-07	12,037	0,405843	
2,7	100	0,0506	5,0600000E-07	4,630	0,446853	
2,9	100	0,0786	7,8600000E-07	3,704	0,601684	
3,1	100	0,1039	1,0390000E-06	2,778	0,696040	
3,3	100	0,1118	1,1180000E-06	1,852	0,660930	
3,5	83	0,1166	1,4048193E-06	1,852	0,738289	
3,7	58	0,1226	2,1137931E-06	0,926	0,994033	

Fichte Kreissäge,						
Siebmaschenweite 500 µm (A =5,8905E-07 m ²)						
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w	
0,7	126	0,0020	1,5873016E-08	2,062	0,834187	
0,9	166	0,0043	2,5903614E-08	4,124	0,823522	
1,1	174	0,0054	3,1034483E-08	10,309	0,660479	
1,3	153	0,0058	3,7908497E-08	11,340	0,577630	
1,5	123	0,0073	5,9349593E-08	22,680	0,679259	
1,7	185	0,0147	7,9459459E-08	10,309	0,708024	
1,9	115	0,0099	8,6086957E-08	12,371	0,614087	
2,1	146	0,0195	1,3356164E-07	16,495	0,779908	
2,3	128	0,0251	1,9609375E-07	7,216	0,954571	
2,5	152	0,0359	2,3618421E-07	2,062	0,973130	
2,7	118	0,0350	2,9661017E-07	1,031	1,047752	

Fichte Kreissäge,						
Siebmaschenweite 250 µm (A =1,47262E-07 m ²)						
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w	
0,5	200	0,0001	5,0000000E-10	7,595	0,206011	
0,7	200	0,0005	2,5000000E-09	10,127	0,525540	
0,9	200	0,0011	5,5000000E-09	11,392	0,699422	
1,1	200	0,0018	9,0000000E-09	11,392	0,766158	
1,3	200	0,0028	1,4000000E-08	16,456	0,853302	
1,5	200	0,0039	1,9500000E-08	13,924	0,892716	
1,7	200	0,0053	2,6500000E-08	15,190	0,944516	
1,9	200	0,0061	3,0500000E-08	10,127	0,870270	
2,1	200	0,0072	3,6000000E-08	2,532	0,840863	
2,3	200	0,0082	4,1000000E-08	1,266	0,798343	

Spanplatte Kreissäge,					
Siebmaschenweite 1000 µm)			(A =2,35619E-06 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,3	32	0,0026	8,1250000E-08	0,202	0,309513
1,5	96	0,0125	1,3020833E-07	0,505	0,372562
1,7	100	0,1270	1,2700000E-06	1,010	2,829096
1,9	100	0,0164	1,6400000E-07	1,010	0,292468
2,1	100	0,0230	2,3000000E-07	3,030	0,335762
2,3	100	0,0276	2,7600000E-07	8,081	0,335889
2,5	100	0,0427	4,2700000E-07	18,182	0,439835
2,7	100	0,0612	6,1200000E-07	9,091	0,540463
2,9	100	0,0856	8,5600000E-07	28,283	0,655269
3,1	100	0,1057	1,0570000E-06	11,111	0,708098
3,3	100	0,1487	1,4870000E-06	9,091	0,879073
3,5	100	0,1759	1,7590000E-06	4,040	0,924425
3,7	100	0,1980	1,9800000E-06	3,030	0,931116
3,9	84	0,2048	2,4380952E-06	1,010	1,031961
4,1	28	0,0757	2,7035714E-06	1,010	1,035409

Spanplatte Kreissäge,					
Siebmaschenweite 500 µm			(A =5,8905E-07 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,9	200	0,00631	3,1550000E-08	1,020	1,003031
1,1	200	0,00742	3,7100000E-08	4,082	0,789566
1,3	200	0,01104	5,5200000E-08	7,143	0,841109
1,5	200	0,01495	7,4750000E-08	13,265	0,855517
1,7	200	0,01806	9,0300000E-08	14,286	0,804618
1,9	200	0,02172	1,0860000E-07	11,224	0,774680
2,1	200	0,02893	1,4465000E-07	15,306	0,844656
2,3	200	0,04106	2,0530000E-07	17,347	0,999386
2,5	200	0,05161	2,5805000E-07	8,163	1,063222
2,7	200	0,07967	3,9835000E-07	4,082	1,407140
2,9	200	0,08563	4,2815000E-07	2,041	1,310992
3,1	121	0,05324	4,4000000E-07	1,020	1,179042
3,3	93	0,06315	6,7903226E-07	1,020	1,605693

Spanplatte Kreissäge,					
Siebmaschenweite 250 µm			(A =1,47262E-07 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,5	200	0,0020	1,0000000E-08	3,614	4,120230
0,7	200	0,0024	1,2000000E-08	3,614	2,522590
0,9	200	0,0031	1,5500000E-08	7,229	1,971098
1,1	200	0,0034	1,7000000E-08	9,639	1,447188
1,3	200	0,0039	1,9500000E-08	16,867	1,188528
1,5	200	0,0044	2,2000000E-08	18,072	1,007167
1,7	200	0,0063	3,1500000E-08	30,120	1,122727
1,9	200	0,0098	4,9000000E-08	8,434	1,398139
2,1	200	0,0103	5,1500000E-08	2,410	1,202902

MDF Kreissäge,					
Siebmaschenweite 1000 µm			(A =2,35619E-06 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,7	59	0,0035	5,9322034E-08	0,204	0,779402
0,9	160	0,0112	7,0000000E-08	1,020	0,556359
1,1	155	0,0140	9,0322581E-08	2,041	0,480566
1,3	157	0,0151	9,6178344E-08	4,082	0,366381
1,5	159	0,0198	1,2452830E-07	8,163	0,356309
1,7	153	0,0260	1,6993464E-07	9,184	0,378552
1,9	159	0,0294	1,8490566E-07	11,224	0,329750
2,1	152	0,0357	2,3486842E-07	11,224	0,342869
2,3	156	0,0546	3,5000000E-07	11,224	0,425946
2,5	154	0,0817	5,3051948E-07	20,408	0,546466
2,7	150	0,1142	7,6133333E-07	12,245	0,672340
2,9	158	0,1781	1,1272152E-06	5,102	0,862885
3,1	155	0,2150	1,3870968E-06	3,061	0,929234

MDF Kreissäge,					
Siebmaschenweite 500 µm			(A =5,8905E-07 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,7	200	0,0032	1,6000000E-08	5,000	0,840860
0,9	200	0,0043	2,1500000E-08	7,000	0,683523
1,1	200	0,0057	2,8500000E-08	11,000	0,606540
1,3	200	0,0067	3,3500000E-08	18,000	0,510456
1,5	200	0,0108	5,4000000E-08	17,000	0,618032
1,7	200	0,0120	6,0000000E-08	8,000	0,534630
1,9	200	0,0189	9,4500000E-08	16,000	0,674100
2,1	200	0,0274	1,3700000E-07	14,000	0,799985
2,3	200	0,0440	2,2000000E-07	3,000	1,070945
2,5	200	0,0527	2,6350000E-07	1,000	1,085677

MDF Kreissäge,					
Siebmaschenweite 250 µm			(A =1,47262E-07 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,5	200	0,00106	5,3000000E-09	11,905	2,183722
0,7	200	0,00161	8,0500000E-09	10,714	1,692237
0,9	200	0,00197	9,8500000E-09	11,905	1,252601
1,1	200	0,00193	9,6500000E-09	10,714	0,821492
1,3	200	0,00192	9,6000000E-09	14,286	0,585121
1,5	200	0,00235	1,1750000E-08	7,143	0,537919
1,7	200	0,00401	2,0050000E-08	25,000	0,714625
1,9	200	0,00363	1,8150000E-08	4,762	0,517882
2,1	200	0,00312	1,5600000E-08	2,381	0,364374

Buche Fräser,					
Siebmaschenweite 1000 µm (A =2,35619E-06 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,1	50	0,0038	7,6000000E-08	0,426	0,404362
1,3	70	0,0088	1,2571429E-07	2,128	0,478894
1,5	100	0,0112	1,1200000E-07	2,128	0,320463
1,7	100	0,0162	1,6200000E-07	6,383	0,360877
1,9	100	0,0296	2,9600000E-07	12,766	0,527869
2,1	100	0,0370	3,7000000E-07	21,277	0,540138
2,3	100	0,0588	5,8800000E-07	17,021	0,715589
2,5	100	0,0988	9,8800000E-07	21,277	1,017698
2,7	100	0,1362	1,3620000E-06	8,511	1,202794
2,9	100	0,2036	2,0360000E-06	4,255	1,558560
3,1	68	0,1545	2,2720588E-06	2,128	1,522082
3,3	32	0,1025	3,2031250E-06	2,128	1,893598

Buche Fräser,					
Siebmaschenweite 500 µm (A =5,8905E-07 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,7	150	0,0023	1,5333333E-08	1,471	0,805825
0,9	150	0,0036	2,4000000E-08	2,941	0,763003
1,1	150	0,0052	3,4666667E-08	4,412	0,737780
1,3	150	0,0054	3,6000000E-08	4,412	0,548549
1,5	150	0,0084	5,6000000E-08	11,765	0,640922
1,7	150	0,0096	6,4000000E-08	17,647	0,570272
1,9	150	0,0160	1,0666667E-07	23,529	0,760889
2,1	150	0,0312	2,0800000E-07	22,059	1,214576
2,3	150	0,0528	3,5200000E-07	5,882	1,713511
2,5	150	0,0737	4,9133333E-07	2,941	2,024399
2,7	63	0,0479	7,6031746E-07	1,471	2,685761
2,9	30	0,0219	7,3000000E-07	1,471	2,235254

Buche Fräser,					
Siebmaschenweite 250 µm (A =1,47262E-07 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,5	200	0,0009	4,5000000E-09	4,444	1,854103
0,7	200	0,0013	6,5000000E-09	5,556	1,366403
0,9	200	0,0019	9,5000000E-09	13,333	1,208092
1,1	200	0,0022	1,1000000E-08	11,111	0,936416
1,3	200	0,0025	1,2500000E-08	18,889	0,761877
1,5	200	0,0037	1,8500000E-08	20,000	0,846936
1,7	200	0,0050	2,5000000E-08	15,556	0,891053
1,9	200	0,0068	3,4000000E-08	7,778	0,970137
2,1	200	0,0088	4,4000000E-08	2,222	1,027722
2,3	200	0,0097	4,8500000E-08	1,111	0,944382

Fichte Fräser,					
Siebmaschenweite 1000 µm (A =2,35619E-06 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,9	190	0,0101	5,3157895E-08	0,495	0,422498
1,1	198	0,0149	7,5252525E-08	0,990	0,400385
1,3	199	0,0163	8,1909548E-08	0,990	0,312025
1,5	197	0,0248	1,2588832E-07	1,980	0,360201
1,7	193	0,0283	1,4663212E-07	2,970	0,326643
1,9	207	0,0426	2,0579710E-07	5,941	0,367007
2,1	193	0,0449	2,3264249E-07	15,842	0,339619
2,3	197	0,0586	2,9746193E-07	14,851	0,362007
2,5	191	0,0767	4,0157068E-07	21,782	0,413641
2,7	195	0,1087	5,5743590E-07	15,842	0,492277
2,9	198	0,1341	6,7727273E-07	7,921	0,518453
3,1	197	0,1795	9,1116751E-07	5,941	0,610403
3,3	173	0,2029	1,1728324E-06	2,970	0,693346
3,5	76	0,0944	1,2421053E-06	0,990	0,652776
3,7	41	0,0687	1,6756098E-06	0,990	0,787973

Fichte Fräser,					
Siebmaschenweite 500 µm (A = 5,8905E-07 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,7	195	0,0026	1,3333333E-08	1,087	0,700717
0,9	211	0,0042	1,9905213E-08	3,261	0,632822
1,1	192	0,0058	3,0208333E-08	4,348	0,642897
1,3	201	0,0081	4,0298507E-08	6,522	0,614048
1,5	196	0,0108	5,5102041E-08	11,957	0,630645
1,7	192	0,0145	7,5520833E-08	9,783	0,672928
1,9	198	0,0168	8,4848485E-08	13,043	0,605253
2,1	196	0,0259	1,3214286E-07	25,000	0,771623
2,3	201	0,0388	1,9303483E-07	13,043	0,939680
2,5	189	0,0596	3,1534392E-07	5,435	1,299285
2,7	203	0,0761	3,7487685E-07	3,261	1,324223
2,9	193	0,0850	4,4041451E-07	2,174	1,348546
3,1	62	0,0282	4,5483871E-07	1,087	1,218804

Fichte Fräser,					
Siebmaschenweite 250 µm (A =1,47262E-07 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,5	200	0,0013	6,5000000E-09	4,396	2,678149
0,7	200	0,0019	9,5000000E-09	4,396	1,997050
0,9	200	0,0028	1,4000000E-08	9,890	1,780346
1,1	200	0,0033	1,6500000E-08	8,791	1,404624
1,3	200	0,0039	1,9500000E-08	10,989	1,188528
1,5	200	0,0048	2,4000000E-08	13,187	1,098728
1,7	200	0,0061	3,0500000E-08	31,868	1,087085
1,9	200	0,0083	4,1500000E-08	12,088	1,184138
2,1	200	0,0114	5,7000000E-08	3,297	1,331367
2,3	200	0,0121	6,0500000E-08	1,099	1,178043

Spanplatte Fräser,					
Siebmaschenweite 1000 µm (A =2,35619E-06 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,5	100	0,0132	1,3200000E-07	0,200	0,377688
1,7	102	0,0146	1,4313725E-07	0,500	0,318858
1,9	100	0,0206	2,0600000E-07	1,000	0,367368
2,1	100	0,0251	2,5100000E-07	2,000	0,366418
2,3	100	0,0304	3,0400000E-07	4,000	0,369964
2,5	100	0,0398	3,9800000E-07	7,000	0,409963
2,7	100	0,0537	5,3700000E-07	13,000	0,474230
2,9	100	0,0755	7,5500000E-07	18,000	0,577953
3,1	100	0,1095	1,0950000E-06	17,000	0,733555
3,3	100	0,1172	1,1720000E-06	14,000	0,692854
3,5	100	0,1431	1,4310000E-06	11,000	0,752048
3,7	100	0,1914	1,9140000E-06	6,000	0,900078
3,9	100	0,2105	2,1050000E-06	4,000	0,890973
4,1	47	0,1119	2,3808511E-06	2,000	0,911814

Spanplatte Fräser,					
Siebmaschenweite 500 µm (A =5,8905E-07 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,9	150	0,0053	3,5333333E-08	0,990	1,123310
1,1	150	0,0061	4,0666667E-08	0,990	0,865472
1,3	150	0,0065	4,3333333E-08	1,980	0,660291
1,5	150	0,0088	5,8666667E-08	2,970	0,671443
1,7	150	0,0108	7,2000000E-08	3,960	0,641556
1,9	150	0,0119	7,9333333E-08	5,941	0,565911
2,1	150	0,0159	1,0600000E-07	9,901	0,618967
2,3	150	0,0183	1,2200000E-07	15,842	0,593887
2,5	150	0,0277	1,8466667E-07	27,723	0,760867
2,7	150	0,0441	2,9400000E-07	12,871	1,038532
2,9	150	0,0533	3,5533333E-07	8,911	1,088028
3,1	150	0,0838	5,5866667E-07	3,960	1,497026
3,3	150	0,0841	5,6066667E-07	2,970	1,325796
3,5	150	0,1042	6,9466667E-07	0,990	1,460294

Spanplatte Fräser,					
Siebmaschenweite 250 µm (A =1,47262E-07 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,5	200	0,0008	4,0000000E-09	1,031	1,648092
0,7	200	0,0010	5,0000000E-09	4,124	1,051079
0,9	200	0,0013	6,5000000E-09	5,155	0,826589
1,1	200	0,0024	1,2000000E-08	7,216	1,021545
1,3	200	0,0025	1,2500000E-08	8,247	0,761877
1,5	200	0,0028	1,4000000E-08	8,247	0,640925
1,7	200	0,0038	1,9000000E-08	10,309	0,677200
1,9	200	0,0064	3,2000000E-08	35,052	0,913070
2,1	200	0,0102	5,1000000E-08	13,402	1,191223
2,3	200	0,0113	5,6500000E-08	4,124	1,100156
2,5	200	0,0126	6,3000000E-08	2,062	1,038298

MDF Fräser,					
Siebmaschenweite 1000 µm (A =2,35619E-06 m²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m_G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C_w
0,7	8	0,0022	2,750000E-07	0,097	3,613087
0,9	159	0,0120	7,5471698E-08	0,485	0,599848
1,1	182	0,0199	1,0934066E-07	0,971	0,581752
1,3	180	0,0204	1,1333333E-07	1,942	0,431731
1,5	183	0,0282	1,5409836E-07	3,883	0,440918
1,7	167	0,0322	1,9281437E-07	7,767	0,429520
1,9	155	0,0389	2,5096774E-07	8,738	0,447561
2,1	150	0,0465	3,100000E-07	13,592	0,452548
2,3	152	0,0537	3,5328947E-07	10,680	0,429949
2,5	156	0,0652	4,1794872E-07	18,447	0,430512
2,7	155	0,0837	5,400000E-07	15,534	0,476879
2,9	150	0,1034	6,8933333E-07	8,738	0,527685
3,1	152	0,1420	9,3421053E-07	3,883	0,625840
3,3	155	0,2027	1,3077419E-06	2,913	0,773101
3,5	85	0,1395	1,6411765E-06	1,942	0,862504
3,7	50	0,0751	1,502000E-06	0,971	0,706331

MDF Fräser,					
Siebmaschenweite 500 µm (A =5,8905E-07 m²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m_G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C_w
0,7	200	0,00371	1,855000E-08	2,000	0,974873
0,9	200	0,00437	2,185000E-08	2,000	0,694651
1,1	200	0,00435	2,175000E-08	3,000	0,462886
1,3	200	0,00573	2,865000E-08	4,000	0,436554
1,5	200	0,00682	3,410000E-08	7,000	0,390276
1,7	200	0,00831	4,155000E-08	10,000	0,370231
1,9	200	0,01021	5,105000E-08	18,000	0,364157
2,1	200	0,01453	7,265000E-08	39,000	0,424226
2,3	200	0,02027	1,013500E-07	12,000	0,493365
2,5	200	0,02231	1,115500E-07	2,000	0,459610
2,7	200	0,02554	1,277000E-07	1,000	0,451090

MDF Fräser,					
Siebmaschenweite 250 µm (A =1,47262E-07 m²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m_G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C_w
0,5	200	0,00065	3,250000E-09	8,046	1,339075
0,7	200	0,00104	5,200000E-09	6,897	1,093122
0,9	200	0,00124	6,200000E-09	10,345	0,788439
1,1	200	0,00152	7,600000E-09	9,195	0,646978
1,3	200	0,00182	9,100000E-09	9,195	0,554646
1,5	200	0,00301	1,505000E-08	16,092	0,688994
1,7	200	0,00465	2,325000E-08	31,034	0,828679
1,9	200	0,00498	2,490000E-08	5,747	0,710483
2,1	200	0,00532	2,660000E-08	2,299	0,621304
2,3	200	0,00569	2,845000E-08	1,149	0,553972

Buche Hobel,					
Siebmaschenweite 4000 μm (A =3,7699E-05 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,9	40	0,0277	6,9250000E-07	0,971	0,077185
2,1	29	0,0300	1,0344828E-06	0,971	0,094386
2,3	56	0,1422	2,5392857E-06	1,942	0,193143
2,5	106	0,4584	4,3245283E-06	7,767	0,278408
2,7	117	0,7355	6,2863248E-06	14,563	0,346970
2,9	153	1,1411	7,4581699E-06	40,777	0,356828
3,1	99	1,0647	1,0754545E-05	24,272	0,450289
3,3	41	0,0551	1,3439024E-06	5,825	0,049655
3,5	10	0,1545	1,5450000E-05	1,942	0,507475
3,7	3	0,0706	2,3533333E-05	0,971	0,691675

Buche Hobel,					
Siebmaschenweite 2000 μm (A =9,42476E-06 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,3	6	0,0025	4,1666667E-07	0,095	0,396811
1,5	10	0,0055	5,5000000E-07	0,476	0,393425
1,7	30	0,0177	5,9000000E-07	0,952	0,328576
1,9	91	0,0761	8,3626374E-07	1,905	0,372836
2,1	170	0,1955	1,1500000E-06	2,857	0,419702
2,3	165	0,2331	1,4127273E-06	7,619	0,429818
2,5	129	0,2462	1,9085271E-06	9,524	0,491474
2,7	130	0,4217	3,2438462E-06	52,381	0,716167
2,9	177	0,7928	4,4790960E-06	19,048	0,857188
3,1	56	0,3076	5,4928571E-06	3,810	0,919934
3,3	12	0,0829	6,9083333E-06	0,952	1,021004

Buche Hobel,					
Siebmaschenweite 1000 μm (A =2,35619E-06 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,9	193	0,0141	7,3056995E-08	0,990	0,580656
1,1	192	0,0122	6,3541667E-08	0,990	0,338077
1,3	195	0,0186	9,5384615E-08	2,970	0,363357
1,5	191	0,0259	1,3560209E-07	7,921	0,387995
1,7	209	0,0468	2,2392344E-07	14,851	0,498820
1,9	200	0,0862	4,3100000E-07	14,851	0,768620
2,1	194	0,0998	5,1443299E-07	11,881	0,750986
2,3	213	0,1503	7,0563380E-07	15,842	0,858748
2,5	200	0,2074	1,0370000E-06	23,762	1,068170
2,7	194	0,2107	1,0860825E-06	3,960	0,959129
2,9	63	0,0738	1,1714286E-06	0,990	0,896730

Buche Hobel,					
Siebmaschenweite 500 μm			(A =5,8905E-07 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,7	203	0,0021	1,0344828E-08	1,887	0,543660
0,9	210	0,0043	2,0476190E-08	3,774	0,650975
1,1	199	0,0058	2,9145729E-08	9,434	0,620283
1,3	206	0,0085	4,1262136E-08	16,981	0,628731
1,5	195	0,0099	5,0769231E-08	15,094	0,581056
1,7	193	0,0135	6,9948187E-08	30,189	0,623273
1,9	215	0,0215	1,0000000E-07	13,208	0,713334
2,1	204	0,0227	1,1127451E-07	5,660	0,649766
2,3	199	0,0243	1,2211055E-07	1,887	0,594426

Buche Hobel,					
Siebmaschenweite 250 μm			(A =1,47262E-07 m ²)		
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
0,7	200	0,0004	2,0000000E-09	7,143	0,420432
0,9	200	0,0005	2,5000000E-09	10,714	0,317919
1,1	200	0,0011	5,5000000E-09	28,571	0,468208
1,3	200	0,0024	1,2000000E-08	28,571	0,731402
1,5	200	0,0024	1,2000000E-08	14,286	0,549364
1,7	200	0,0042	2,1000000E-08	7,143	0,748485

Fichte Hobel,					
Siebmaschenweite 4000 μm (A =3,7699E-05 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,5	90	0,0385	4,2777778E-07	1,000	0,076499
1,7	96	0,0561	5,8437500E-07	2,000	0,081361
1,9	133	0,1808	1,3593985E-06	4,000	0,151517
2,1	131	0,2690	2,0534351E-06	11,000	0,187355
2,3	142	0,4108	2,8929577E-06	14,000	0,220044
2,5	143	0,5633	3,9391608E-06	16,000	0,253598
2,7	168	0,8485	5,0505952E-06	36,000	0,278764
2,9	131	1,0124	7,7282443E-06	11,000	0,369749
3,1	68	0,5670	8,3382353E-06	2,000	0,349119
3,3	30	0,4321	1,4403333E-05	2,000	0,532179
3,5	17	0,2547	1,4982353E-05	0,500	0,492115

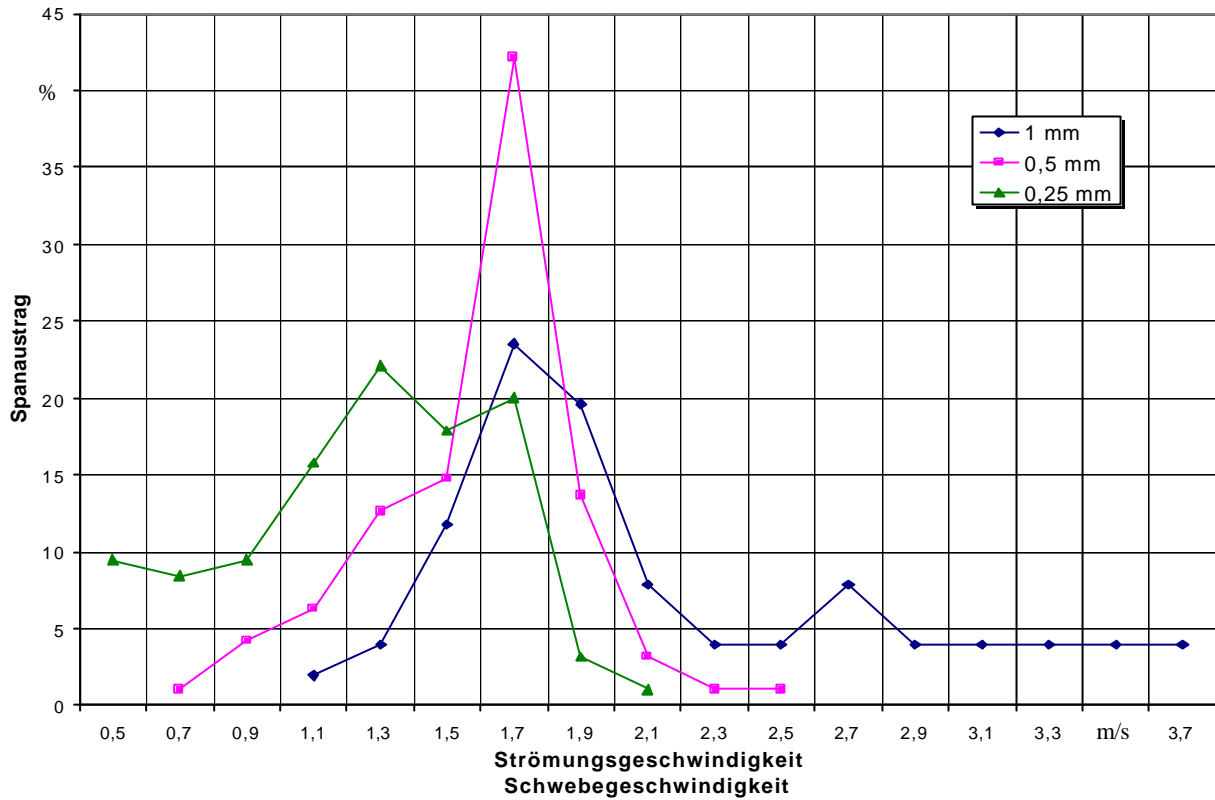
Fichte Hobel,					
Siebmaschenweite 2000 μm (A =9,42476E-06 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,3	175	0,0297	1,6971429E-07	0,990	0,161627
1,5	135	0,0522	3,8666667E-07	1,980	0,276590
1,7	132	0,0817	6,1893939E-07	4,950	0,344693
1,9	138	0,1369	9,9202899E-07	9,901	0,442282
2,1	141	0,1957	1,3879433E-06	12,871	0,506541
2,3	147	0,2662	1,8108844E-06	14,851	0,550956
2,5	136	0,2428	1,7852941E-06	9,901	0,459739
2,7	140	0,3211	2,2935714E-06	26,733	0,506368
2,9	145	0,4432	3,0565517E-06	10,891	0,584948
3,1	86	0,3273	3,8058140E-06	2,970	0,637391
3,3	24	0,0965	4,0208333E-06	0,990	0,594251
3,5	15	0,0746	4,9733333E-06	0,990	0,653421

Fichte Hobel,					
Siebmaschenweite 1000 μm (A =2,35619E-06 m ²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m _G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C _w
1,1	169	0,0092	5,4437870E-08	2,083	0,289639
1,3	165	0,0184	1,1151515E-07	2,083	0,424804
1,5	158	0,0233	1,4746835E-07	4,167	0,421947
1,7	180	0,0309	1,7166667E-07	6,250	0,382411
1,9	161	0,0380	2,3602484E-07	10,417	0,420913
2,1	159	0,0632	3,9748428E-07	18,750	0,580261
2,3	161	0,0879	5,4596273E-07	22,917	0,664430
2,5	164	0,1356	8,2682927E-07	16,667	0,851682
2,7	163	0,1727	1,0595092E-06	8,333	0,935662
2,9	93	0,1143	1,2290323E-06	4,167	0,940826
3,1	56	0,0775	1,3839286E-06	2,083	0,927112
3,3	25	0,0306	1,2240000E-06	2,083	0,723595

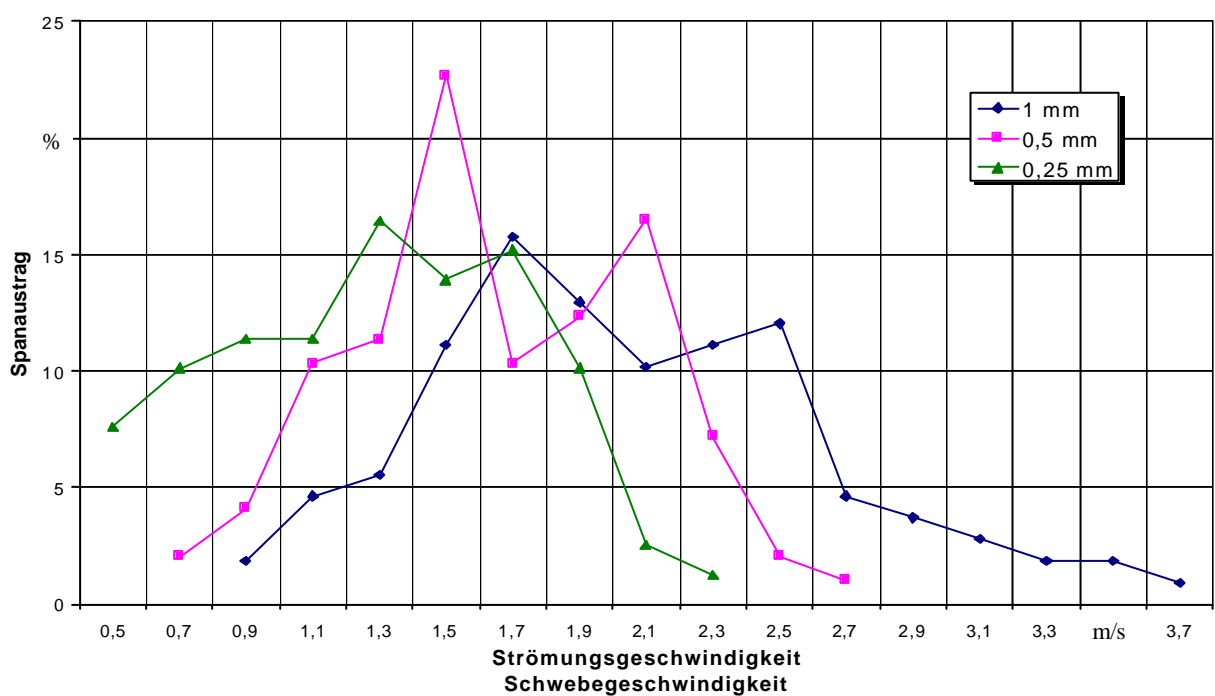
Fichte Hobel,					
Siebmaschenweite 500 µm					
(A =5,8905E-07 m²)					
v (m/s)	Spananzahl x	Gesamtmasse m_G (g)	Spanmasse m (kg)	Auswurf (%)	C_w
1,1	200	0,0041	2,0500000E-08	11,111	0,436283
1,3	200	0,0085	4,2500000E-08	11,111	0,647593
1,5	200	0,0115	5,7500000E-08	22,222	0,658090
1,7	200	0,0148	7,4000000E-08	22,222	0,659377
1,9	200	0,0246	1,2300000E-07	11,111	0,877401

10.4 Schwebegeschwindigkeitsdiagramme

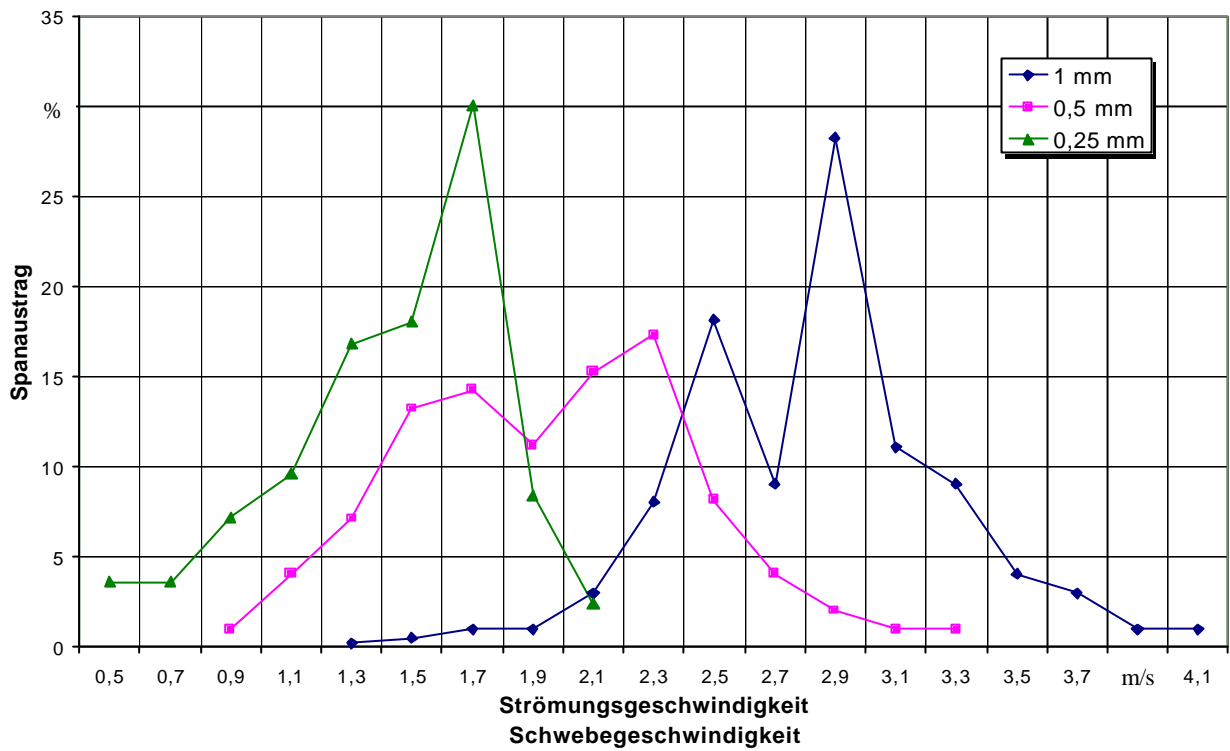
Schwebegeschwindigkeitsverteilung Buche Kreissäge



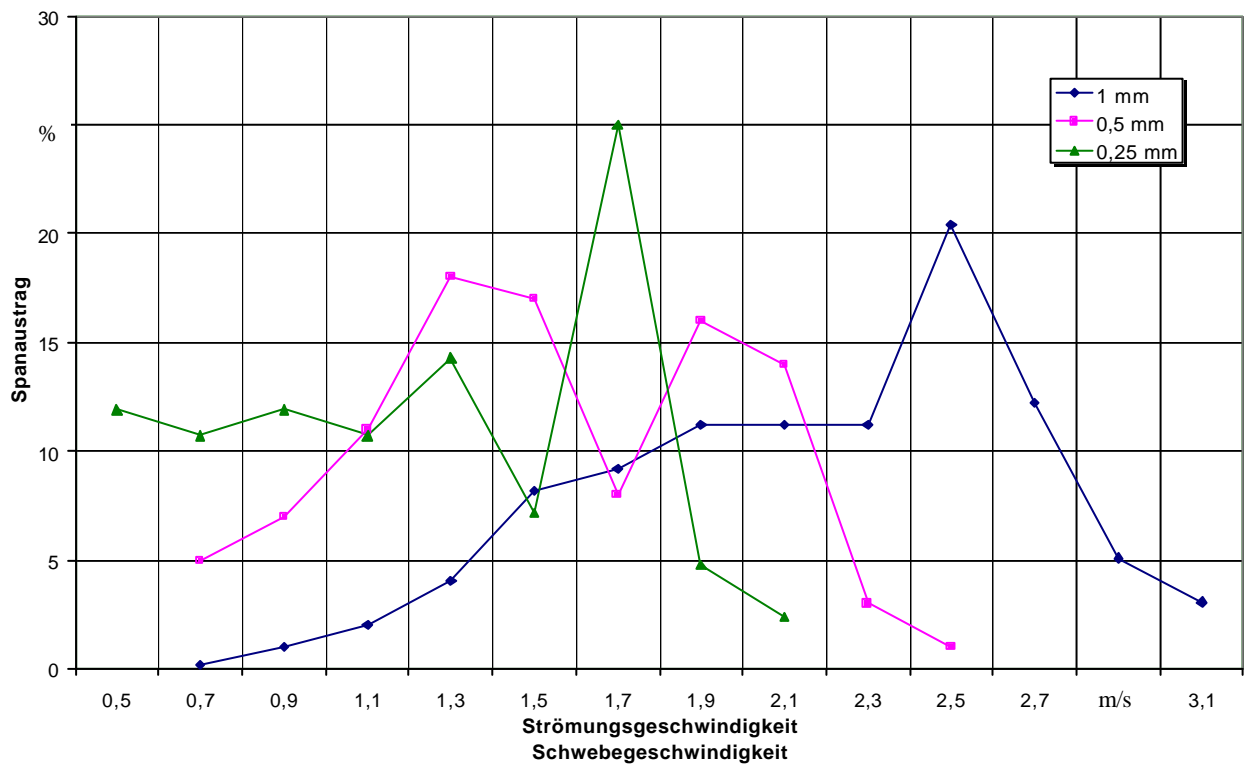
Schwebegeschwindigkeitsverteilung Fichte Kreissäge



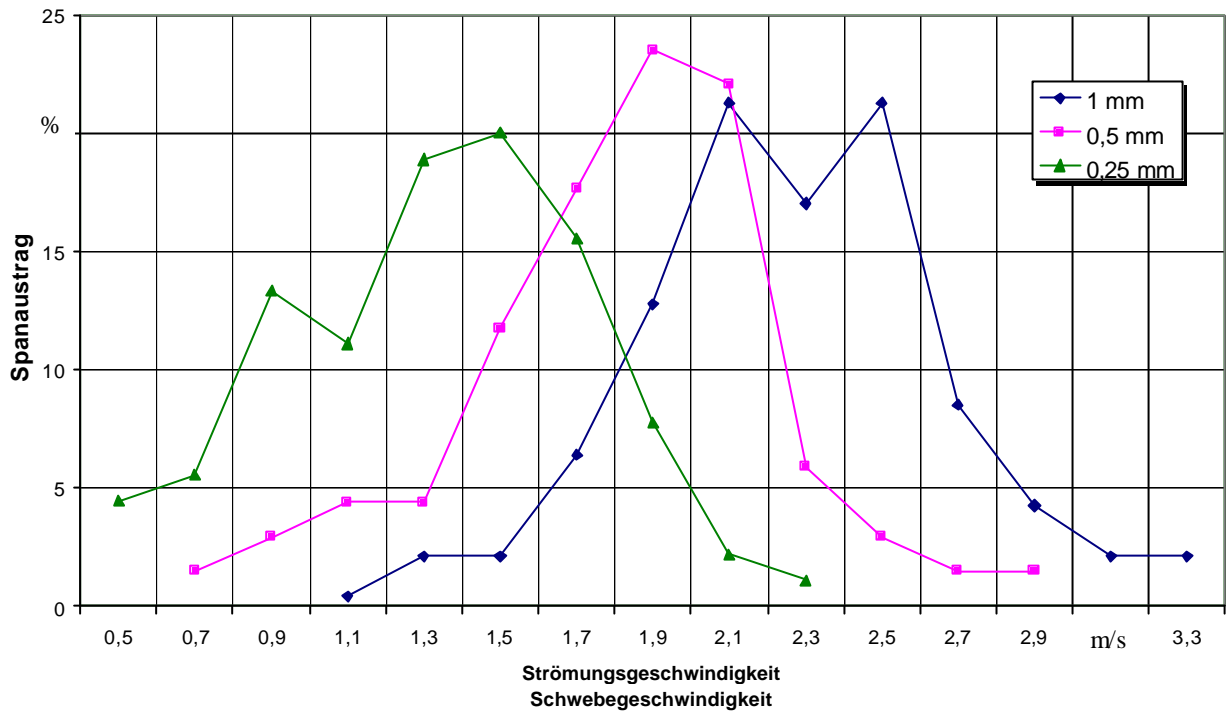
Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Kreissäge



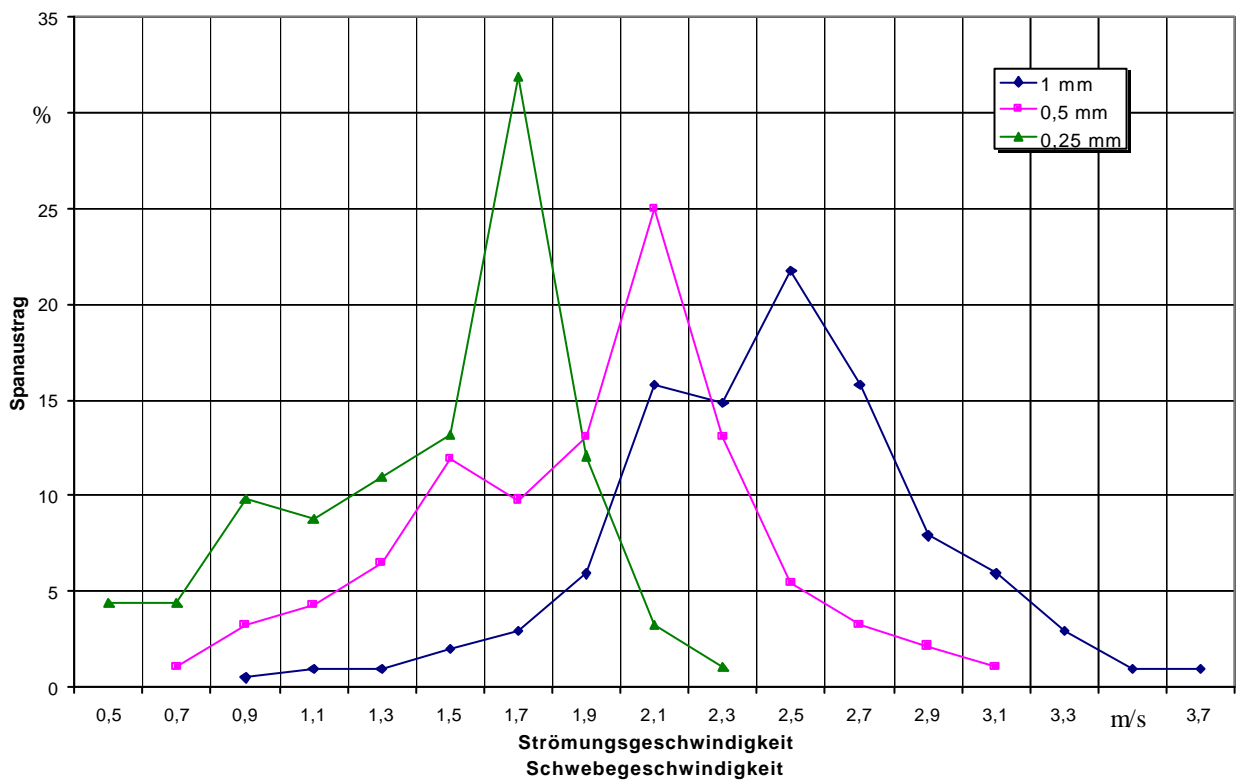
Schwebegeschwindigkeitsverteilung MDF Kreissäge



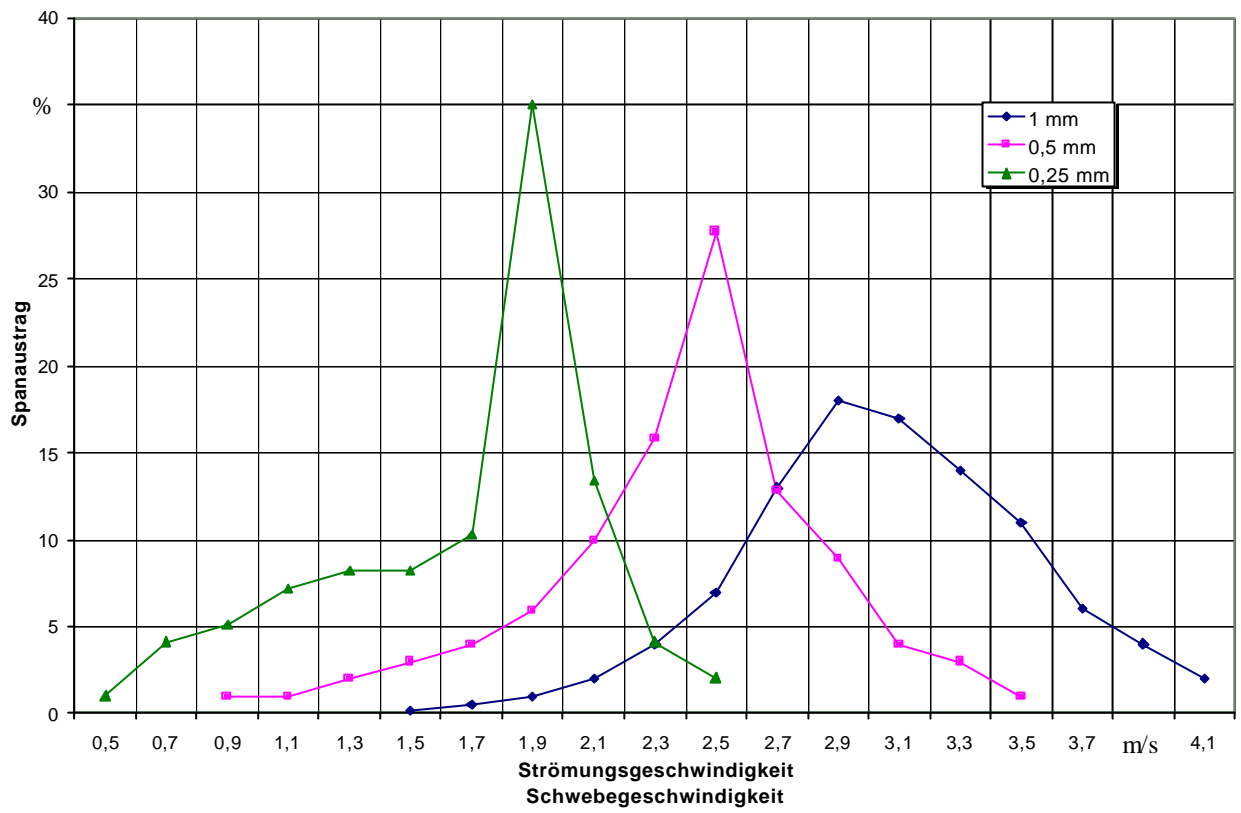
Schwebegeschwindigkeitsverteilung Buche Fräser



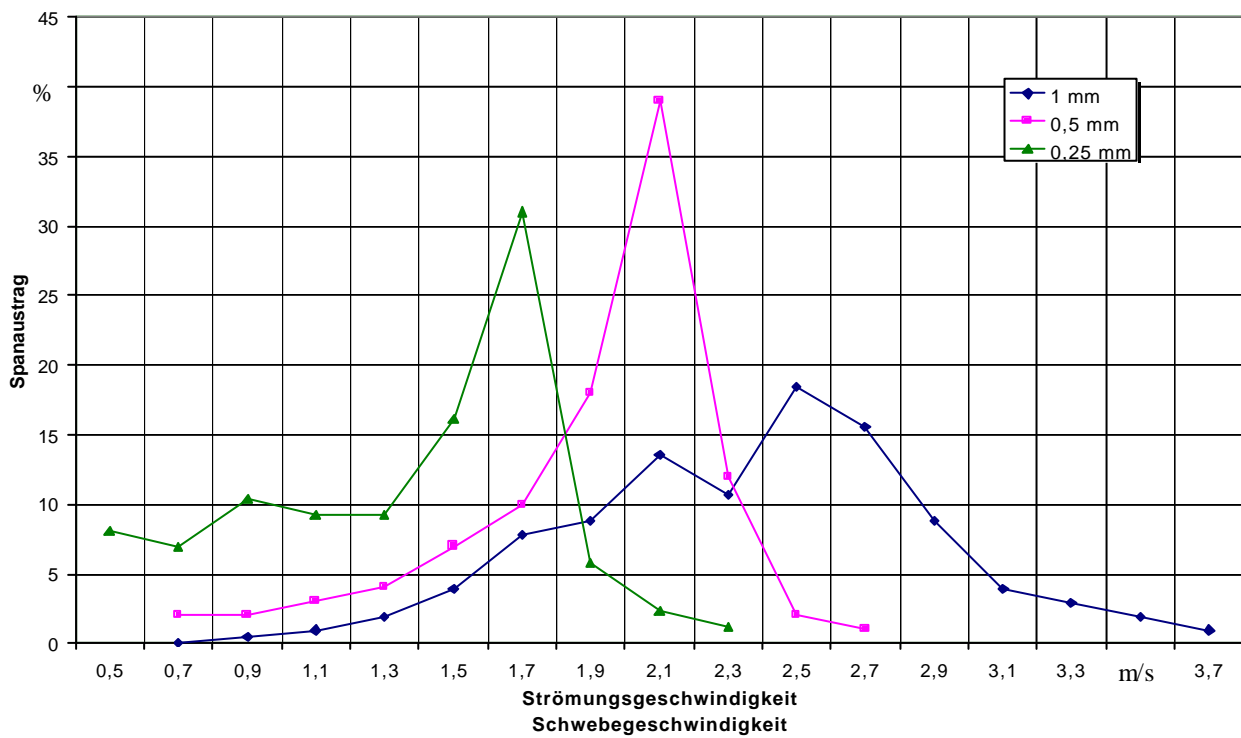
Schwebegeschwindigkeitsverteilung Fichte Fräser



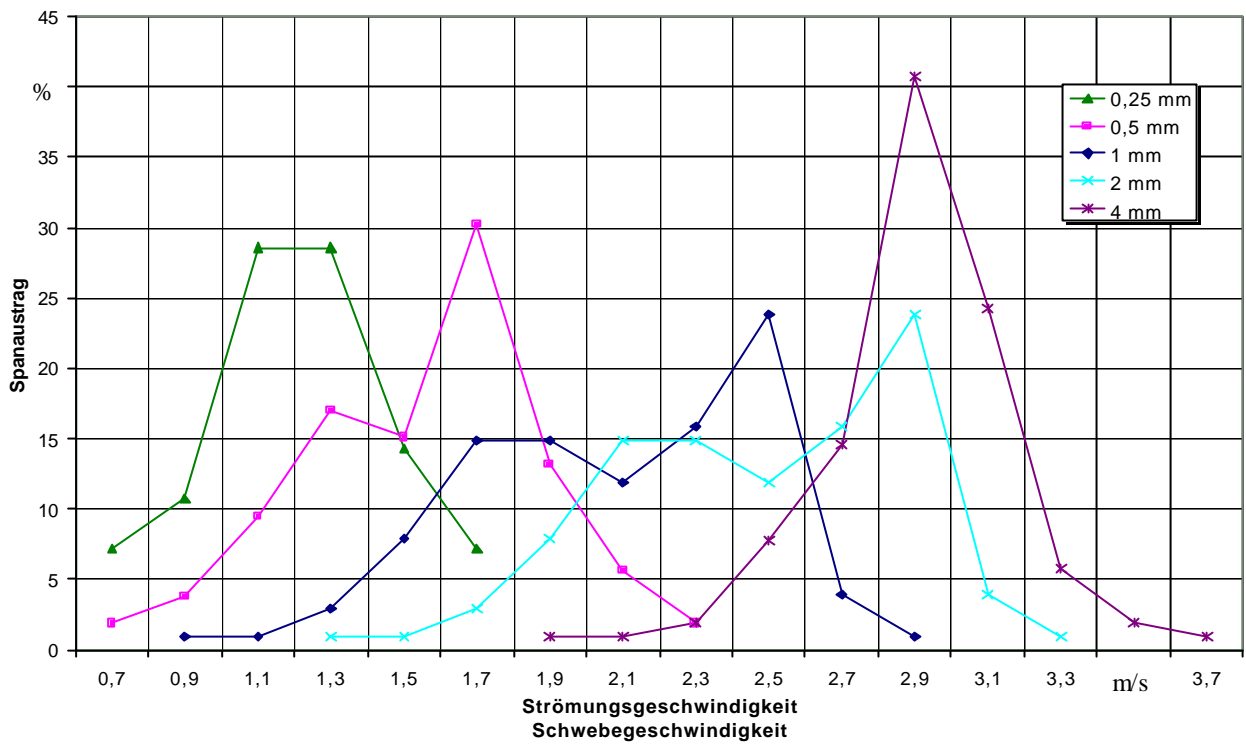
Schwebegeschwindigkeitsverteilung Spanplatte Fräser



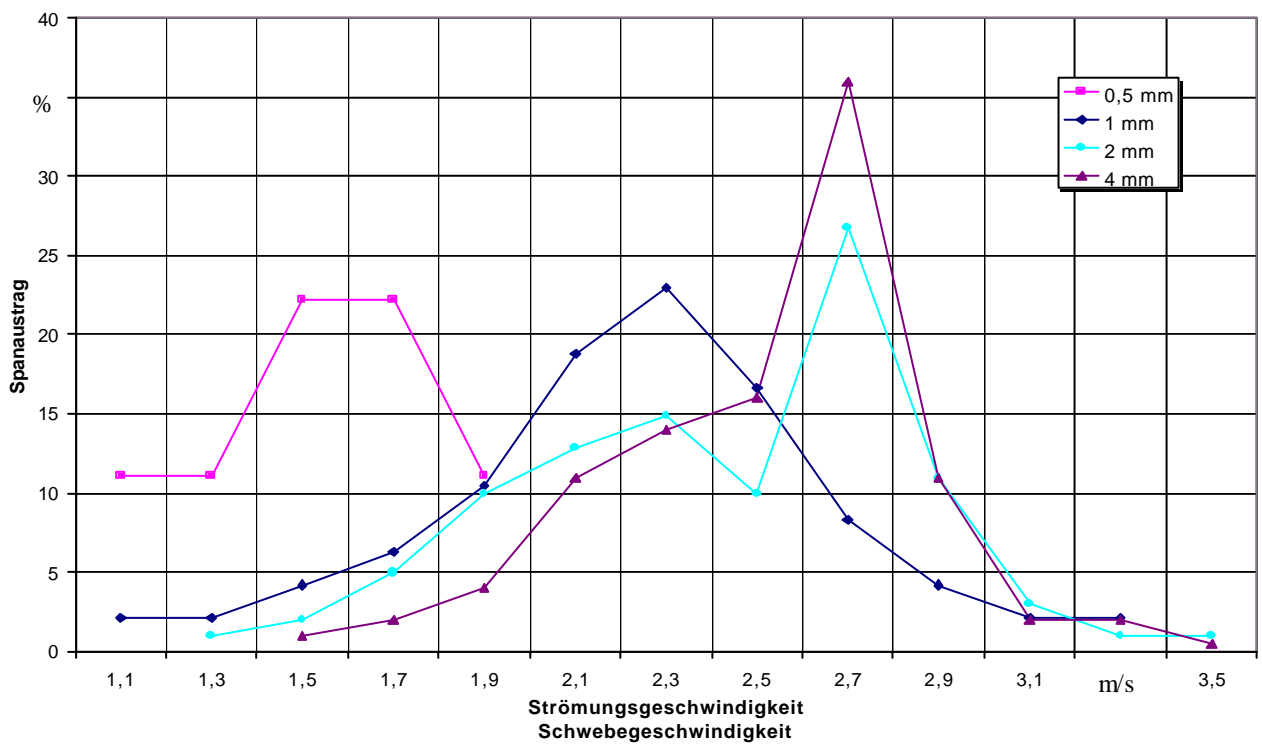
Schwebegeschwindigkeitsverteilung MDF Fräser



Schwebegeschwindigkeitsverteilung Buche Hobel

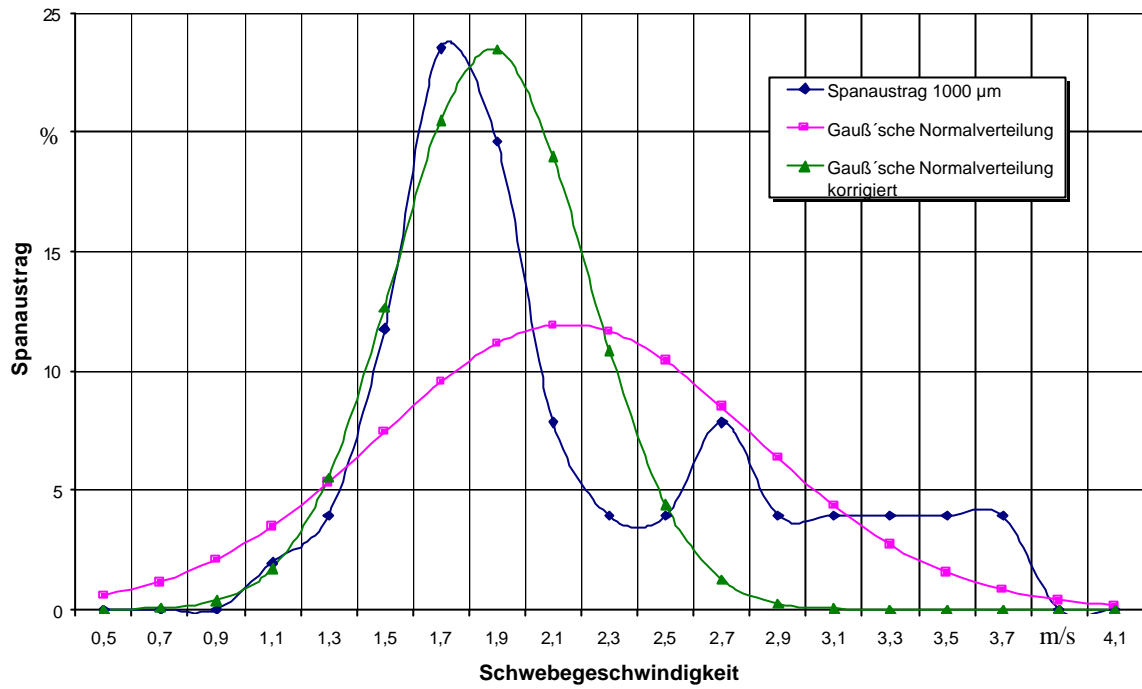


Schwebegeschwindigkeitsverteilung Fichte Hobel

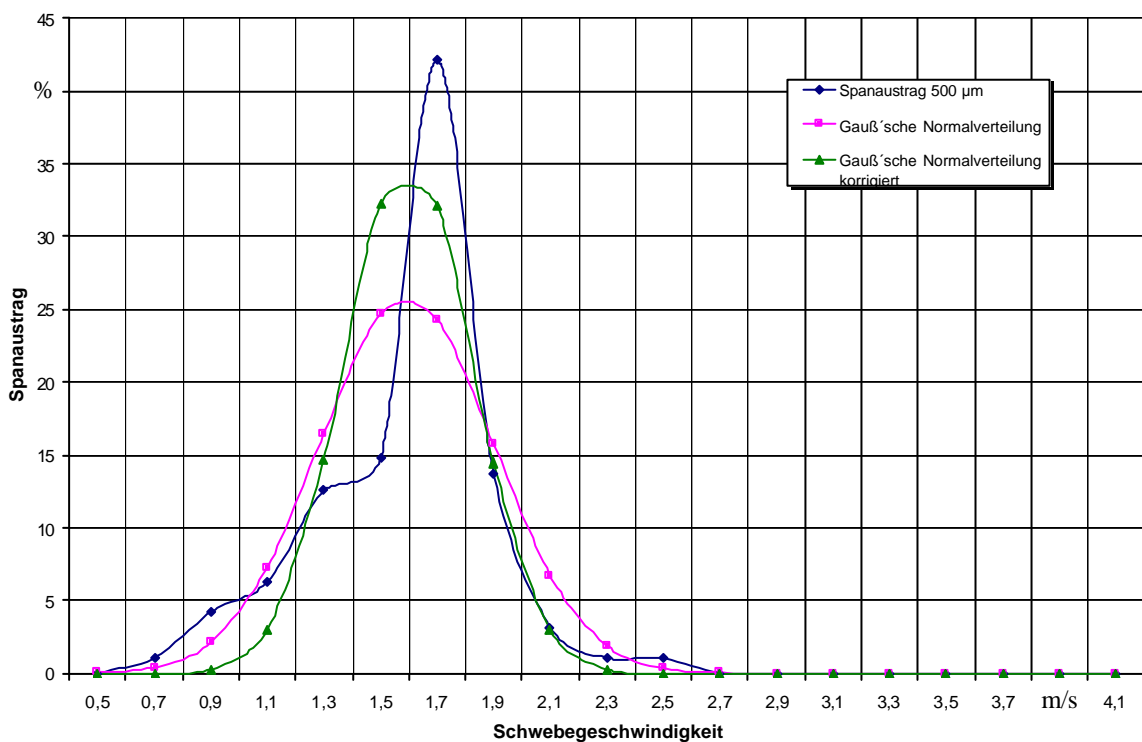


10.5 Vergleich Schwebegeschwindigkeitsverteilung - Normalverteilung

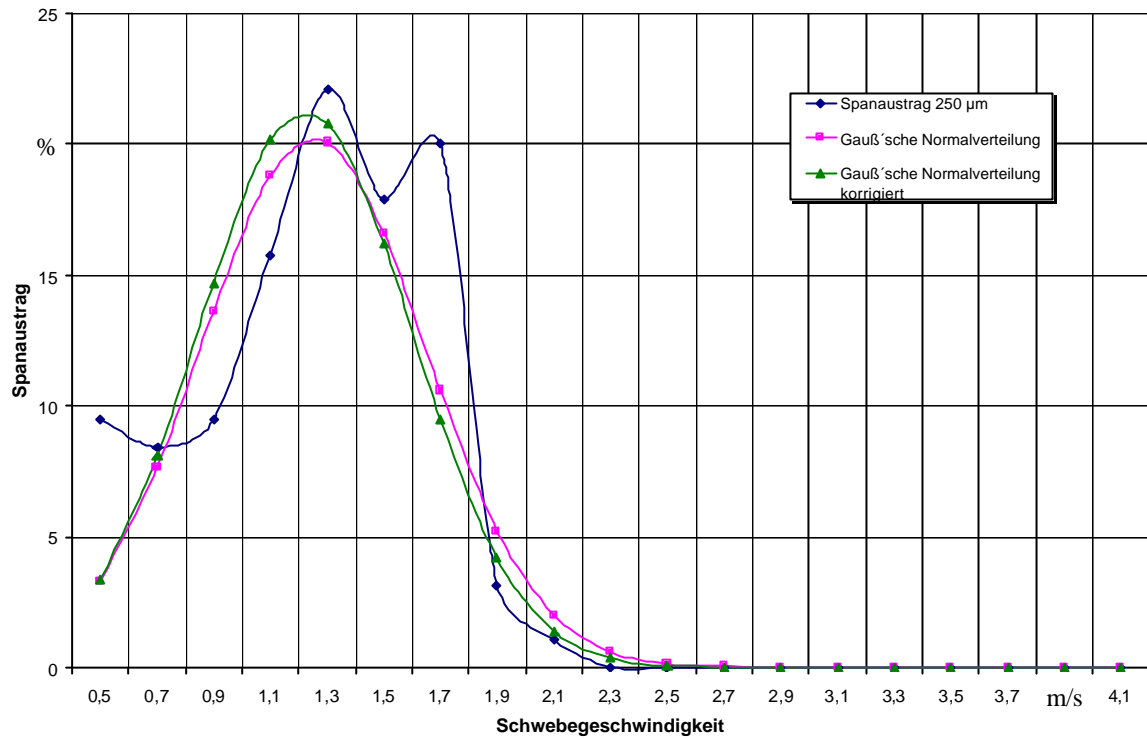
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Kreissäge 1000 μm



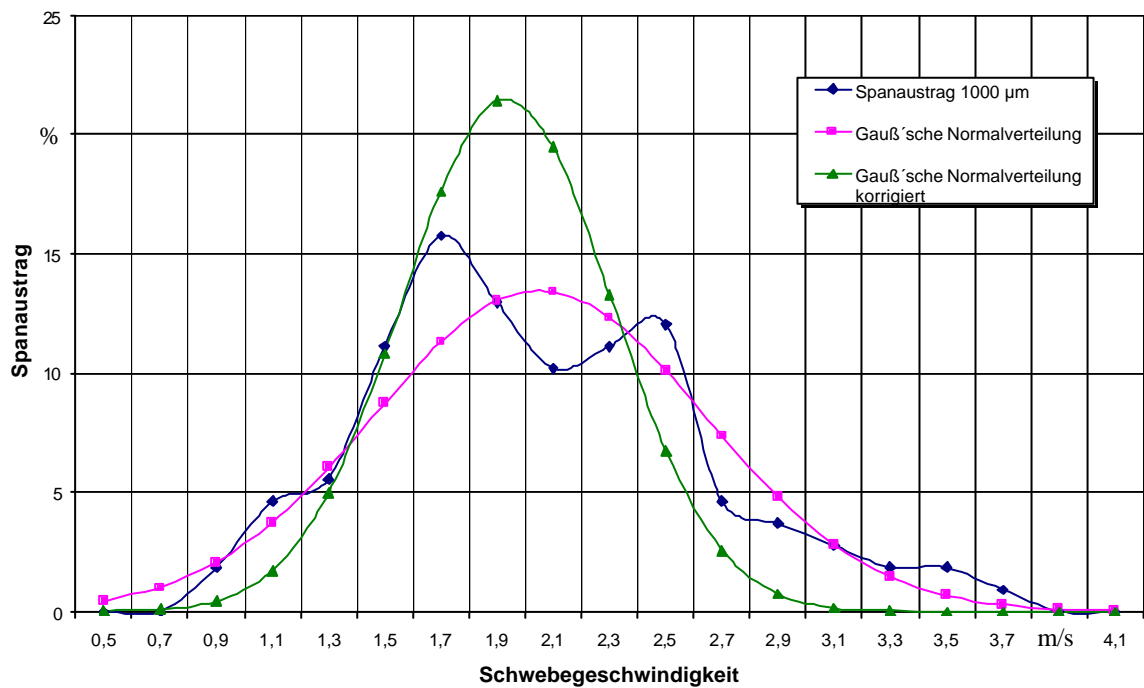
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Kreissäge 500 μm



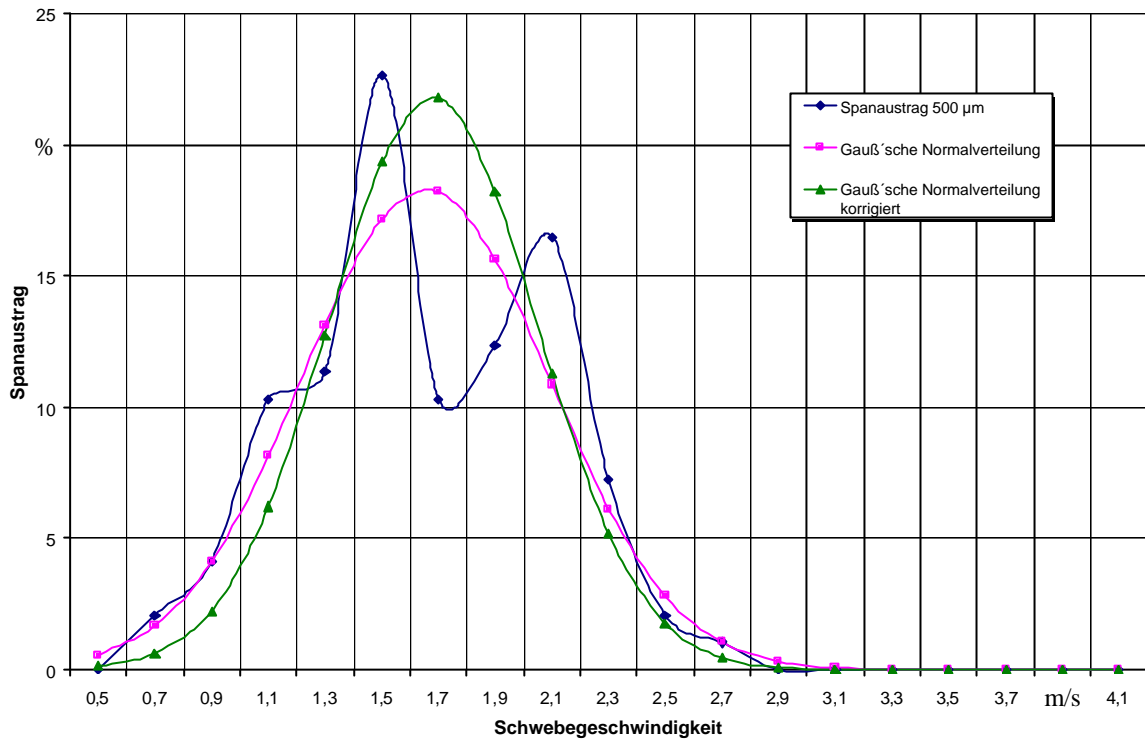
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Kreissäge 250 µm



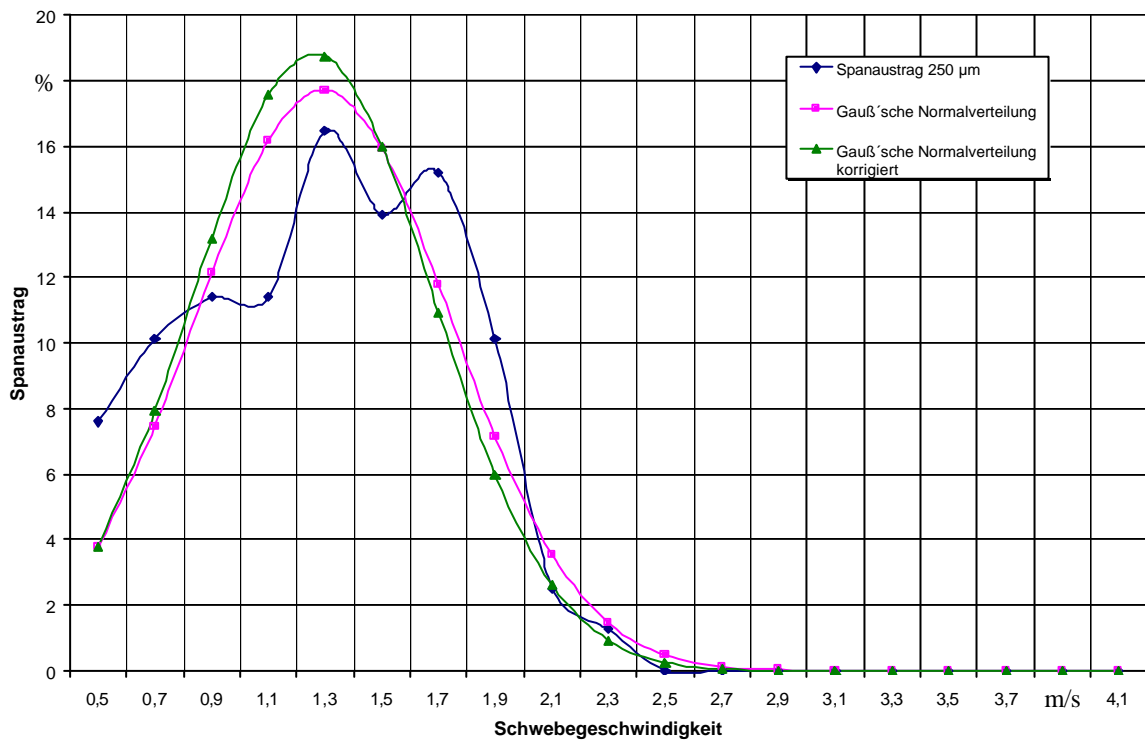
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Kreissäge 1000 µm



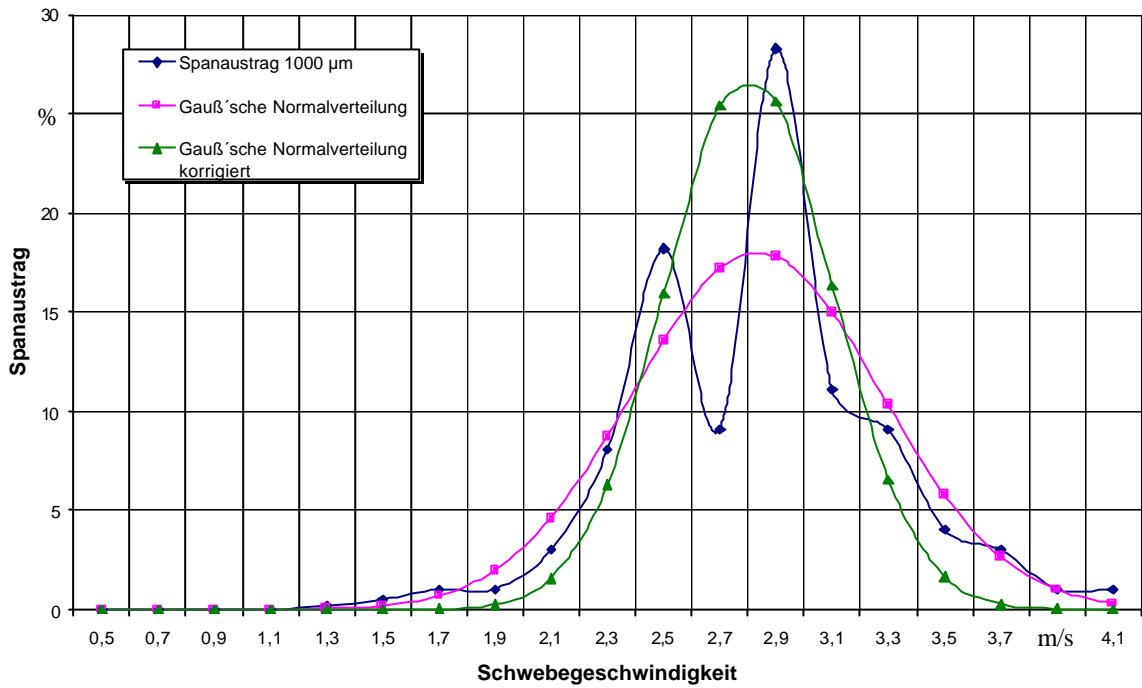
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Kreissäge 500 µm



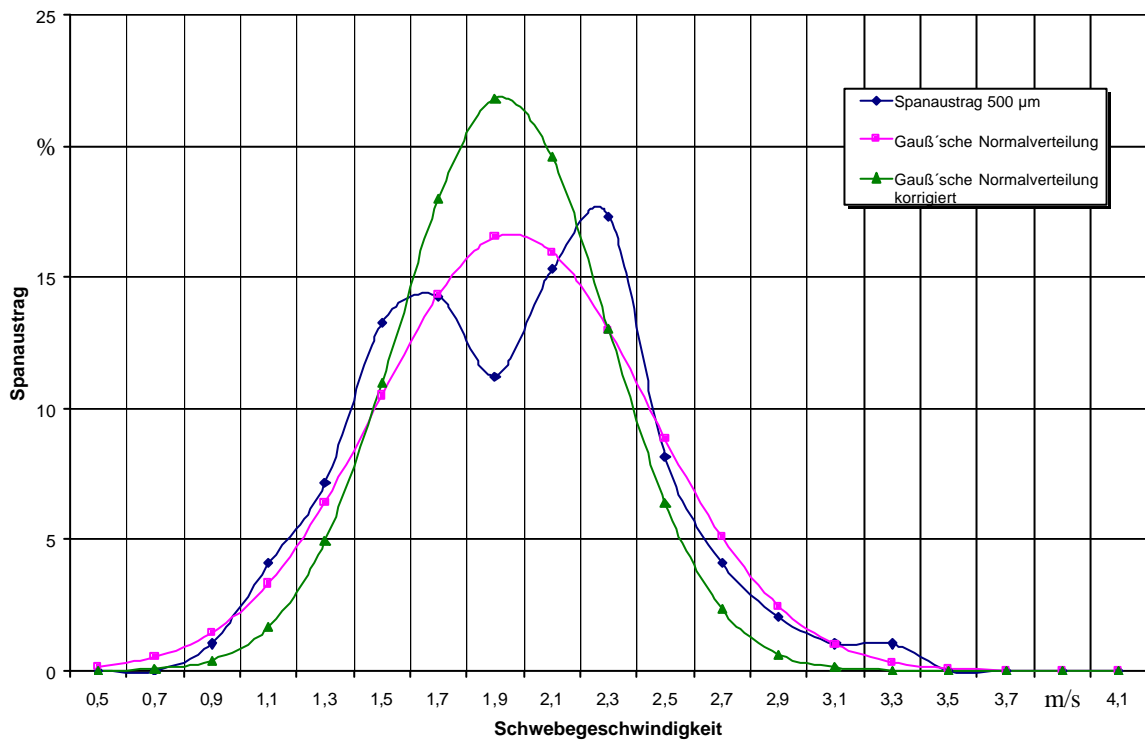
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Kreissäge 250 µm



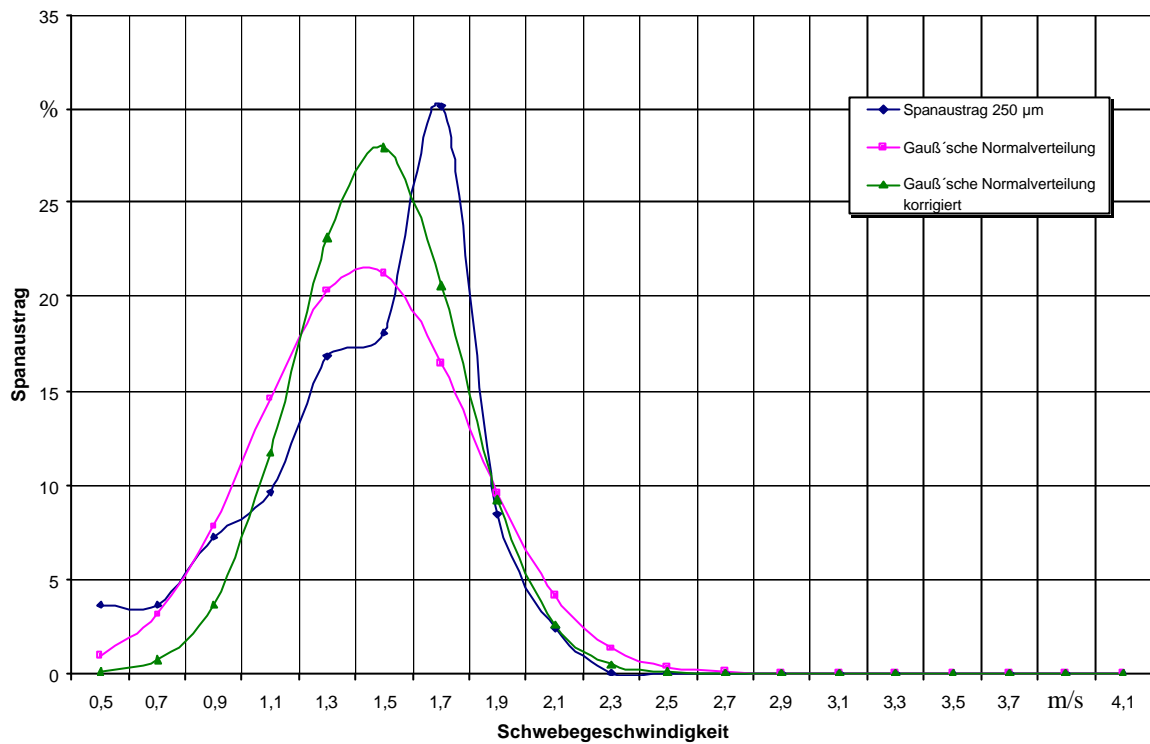
Vergleich Normalverteilung-Versuch Spanplatte Kreissäge 1000 µm



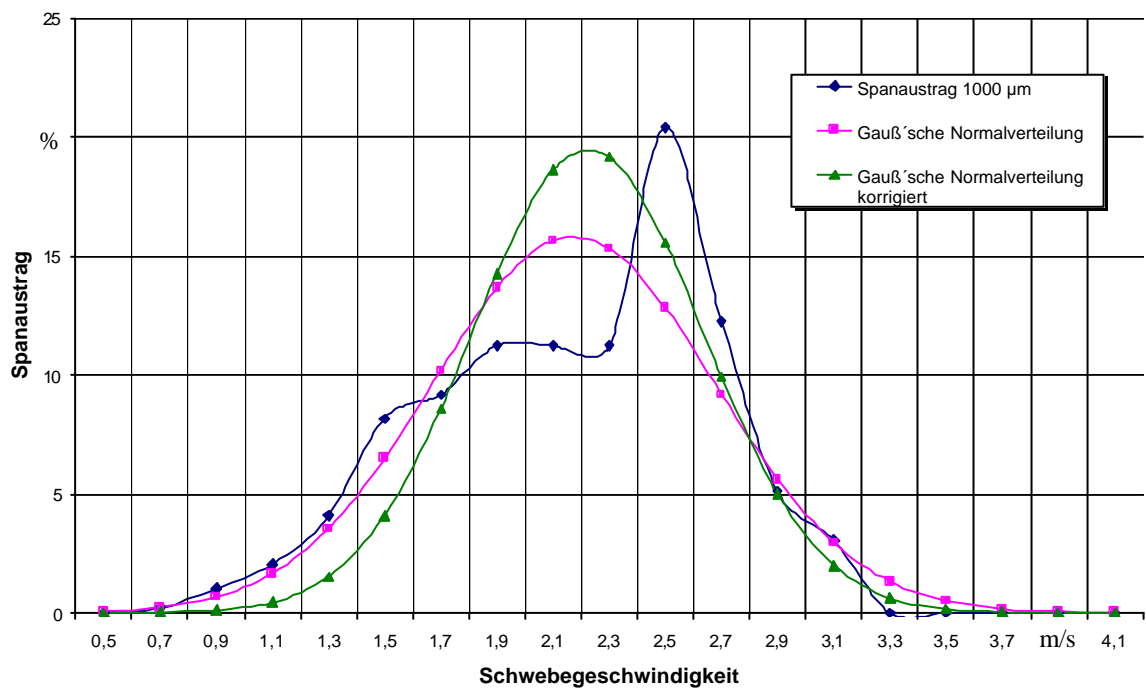
Vergleich Normalverteilung-Versuch Spanplatte Kreissäge 500 µm



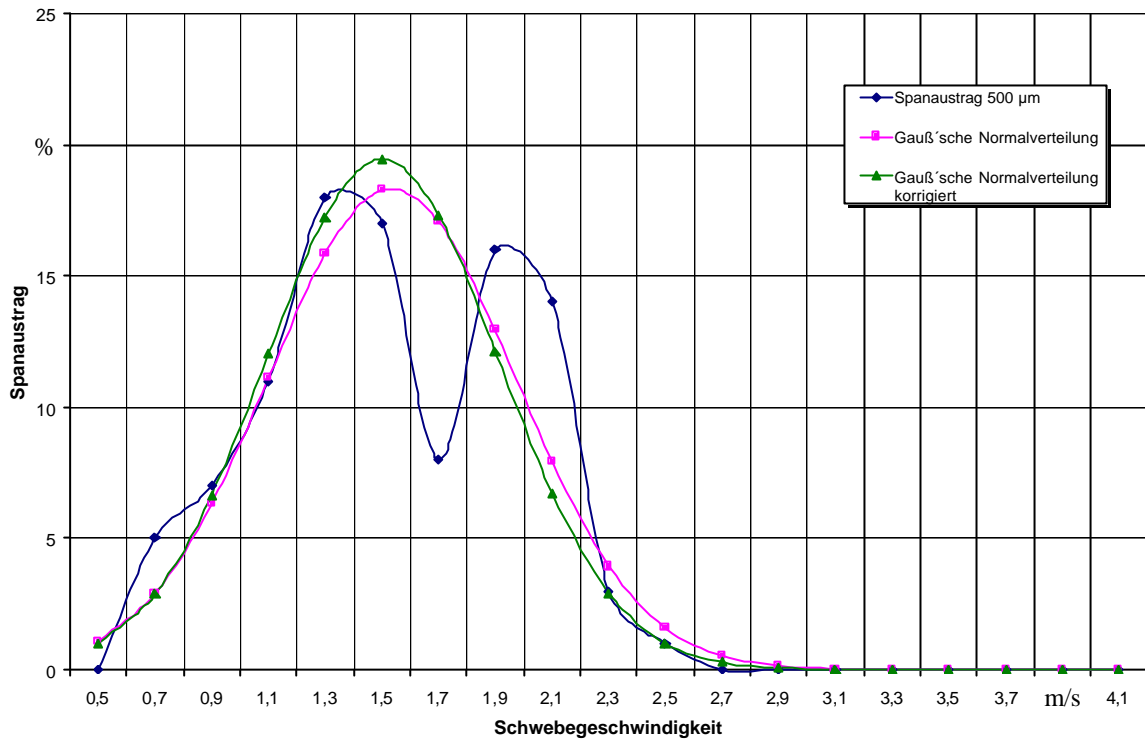
Vergleich Normalverteilung-Versuch Spanplatte Kreissäge 250 µm



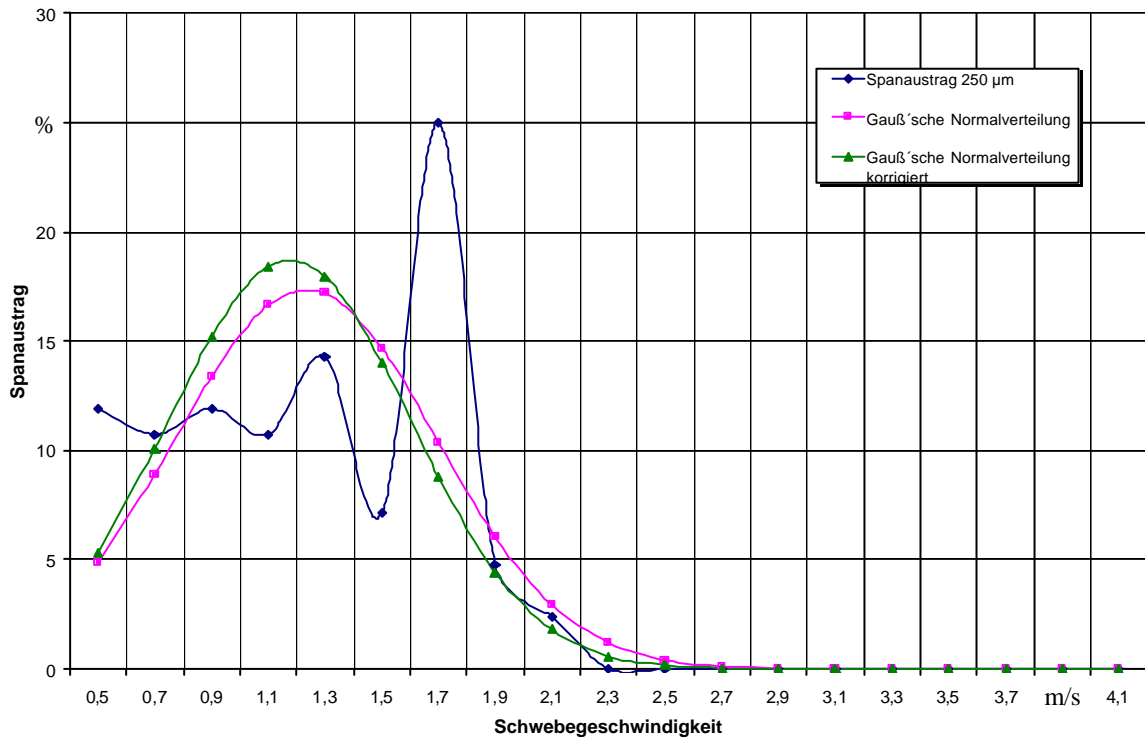
Vergleich Normalverteilung-Versuch MDF Kreissäge 1000 µm



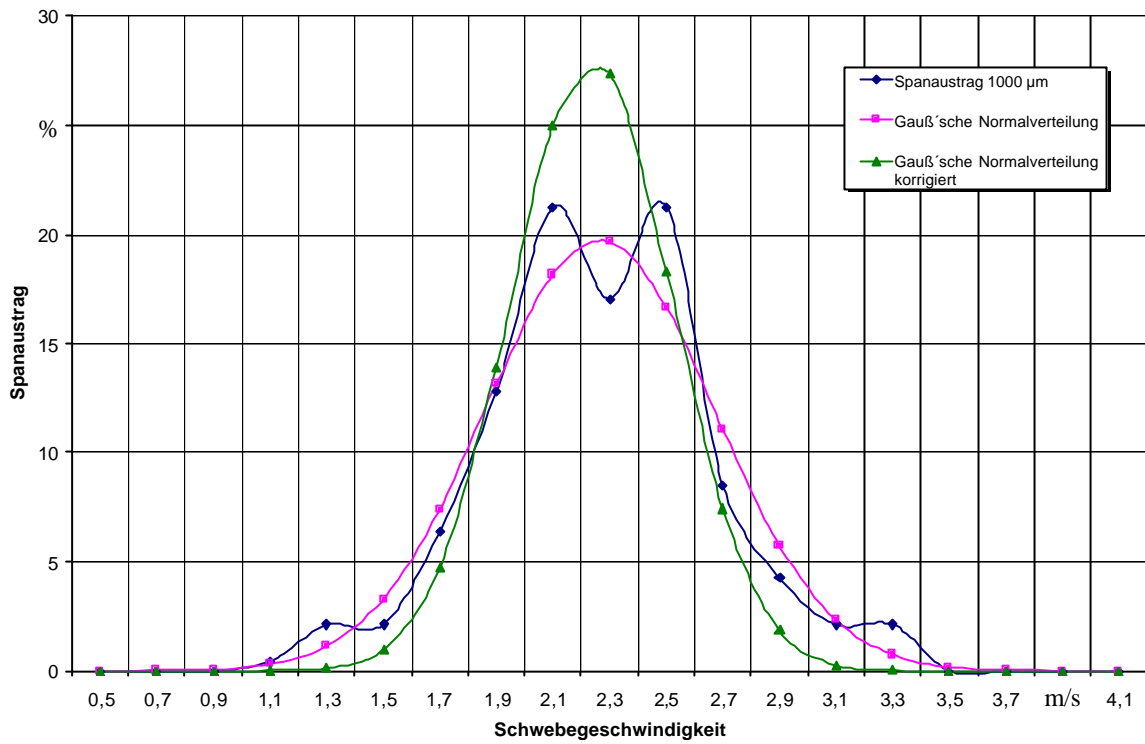
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Kreissäge 500 µm



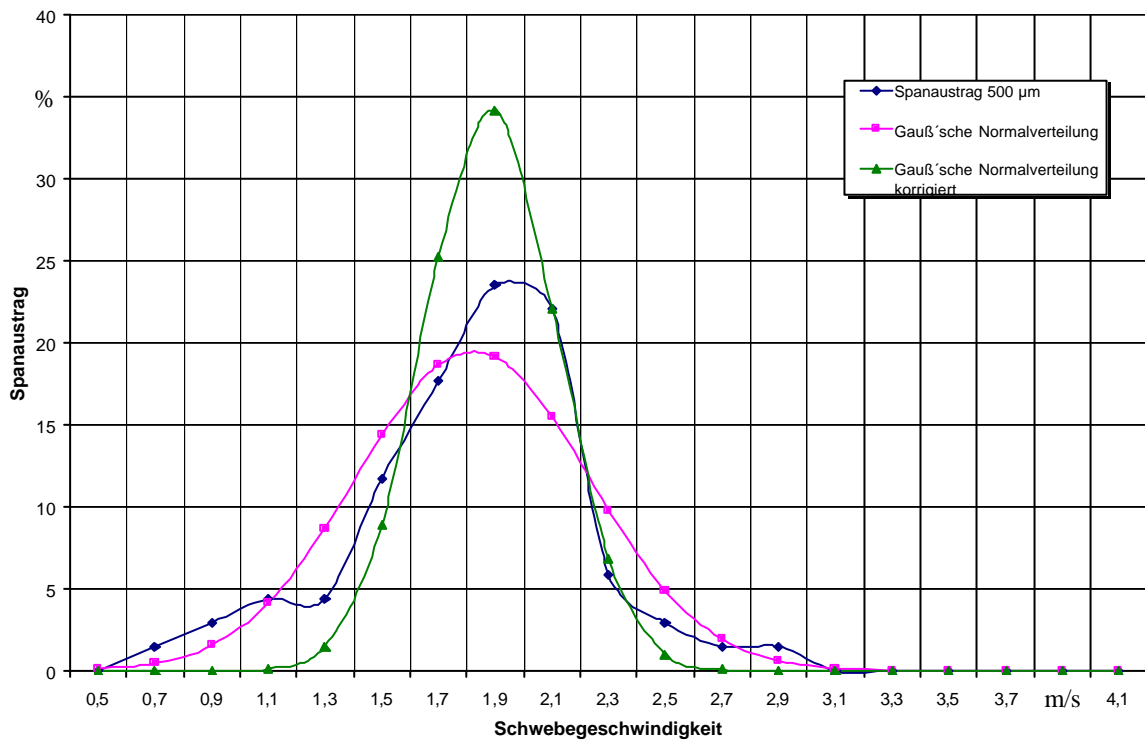
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Kreissäge 250 µm



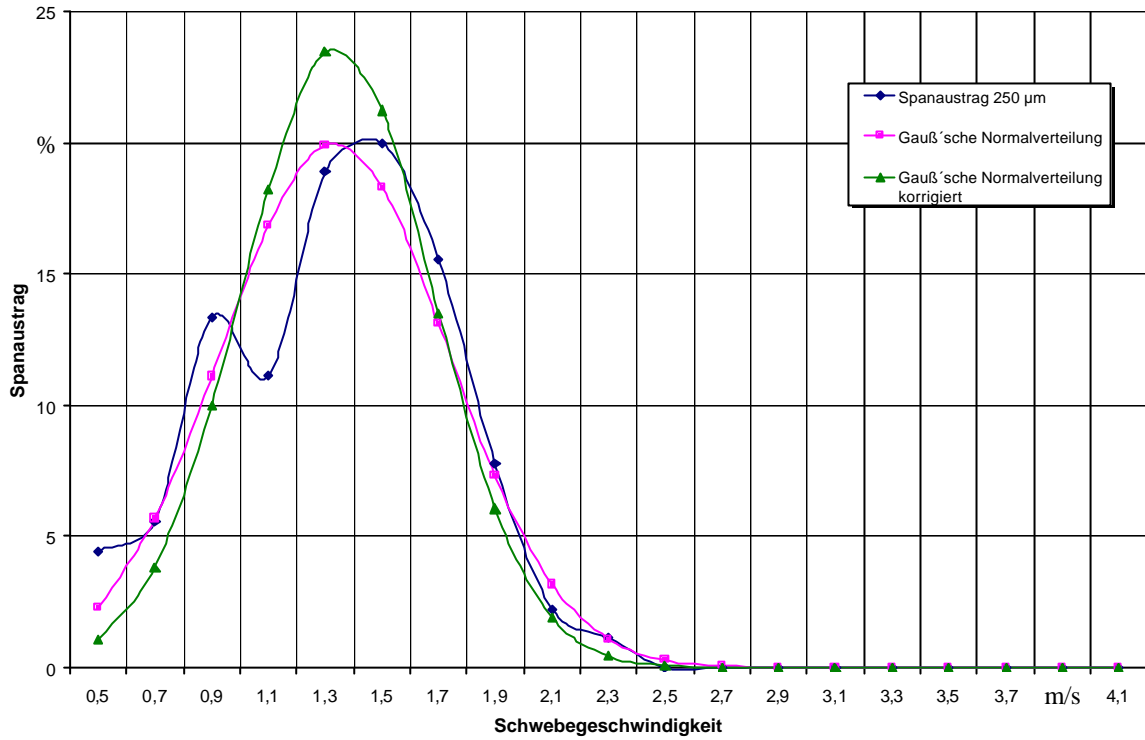
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Fräser 1000 µm



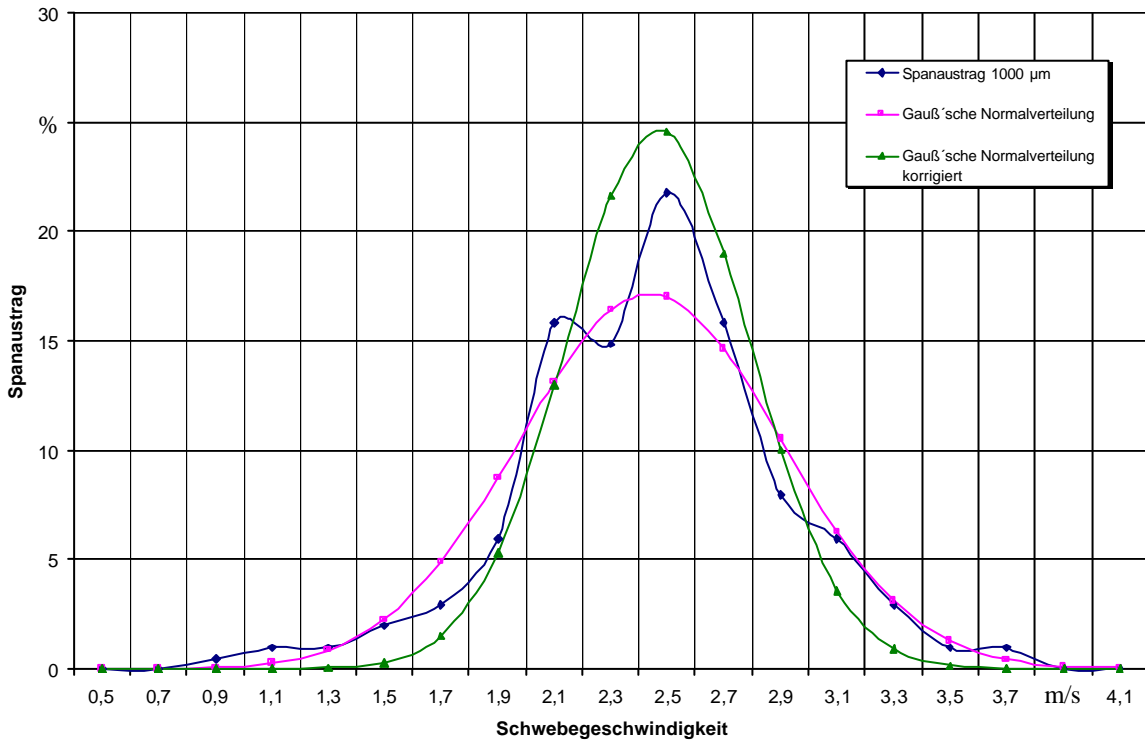
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Fräser 500 µm



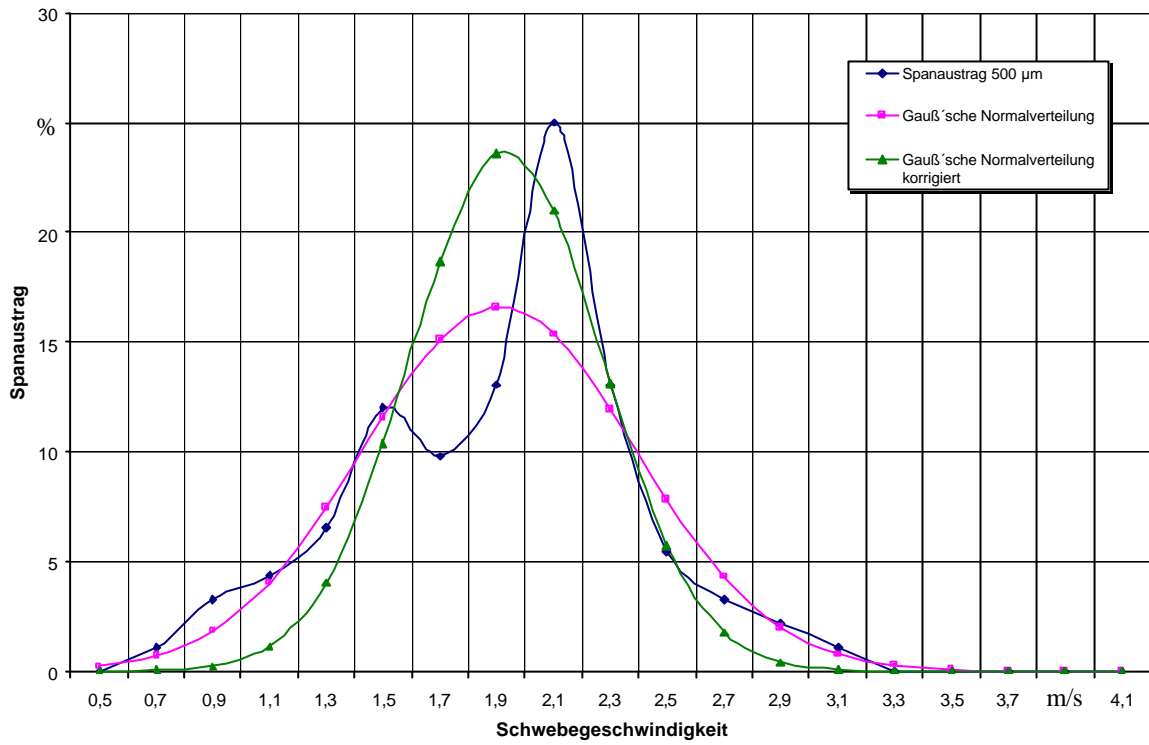
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Fräser 250 µm



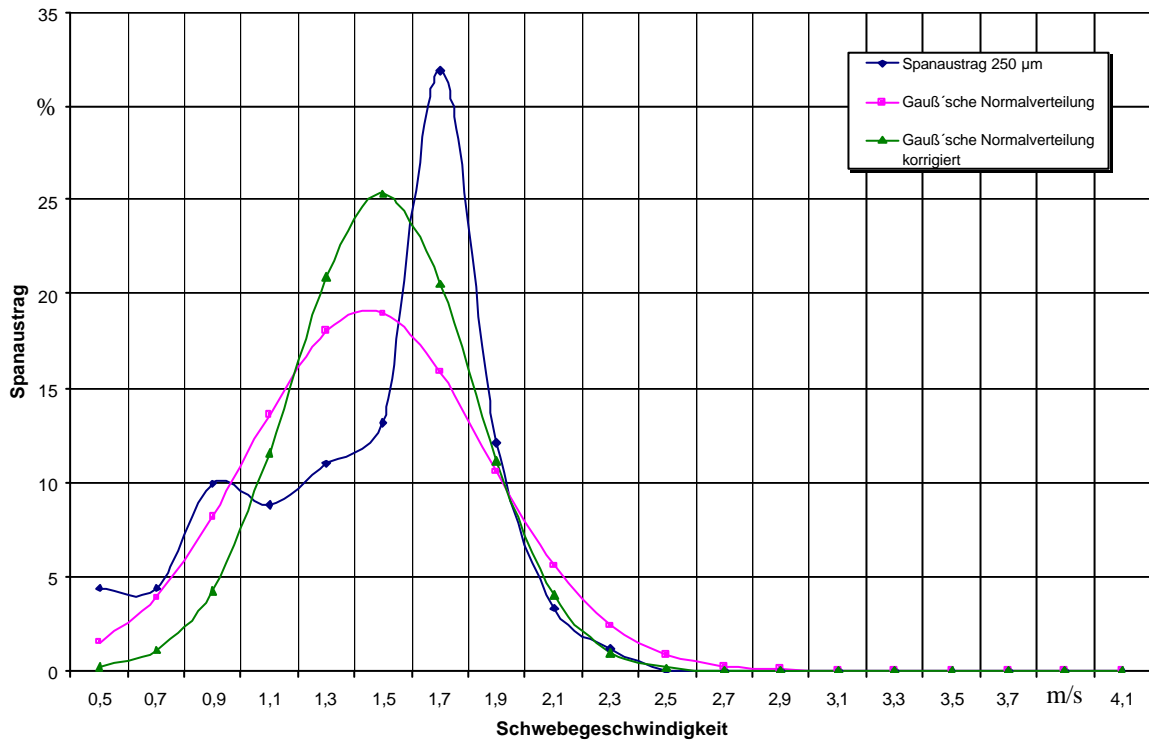
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Fräser 1000 µm



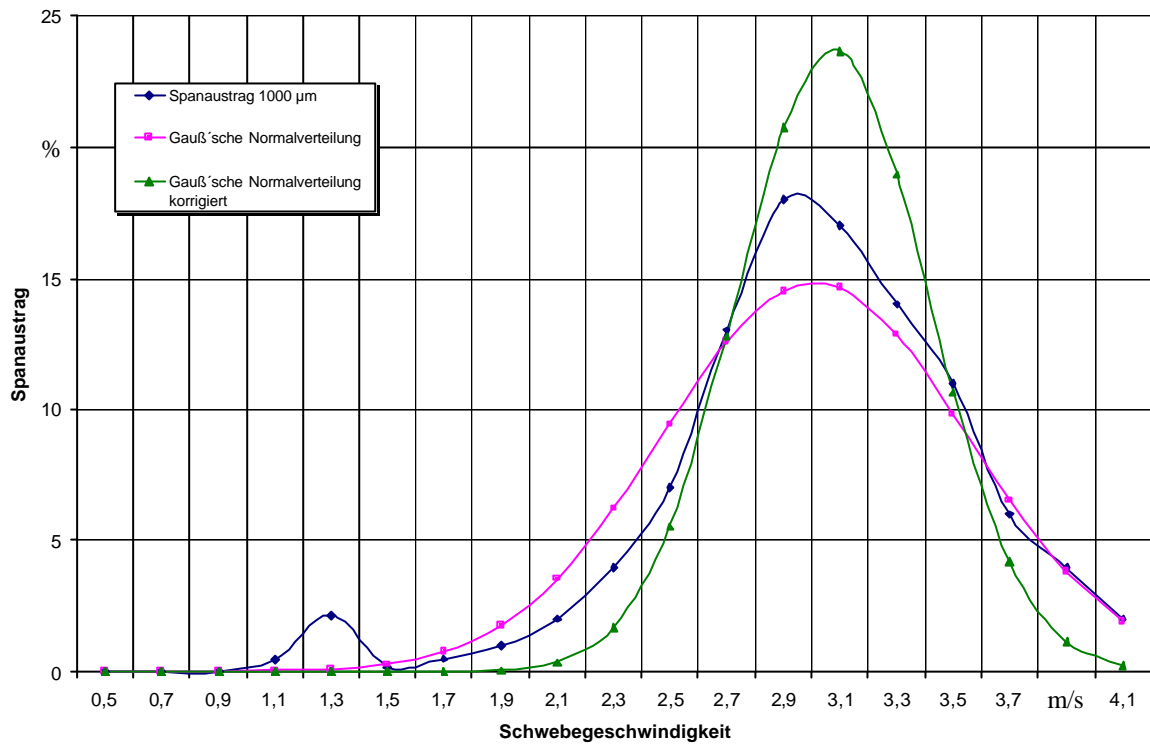
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Fräser 500 µm



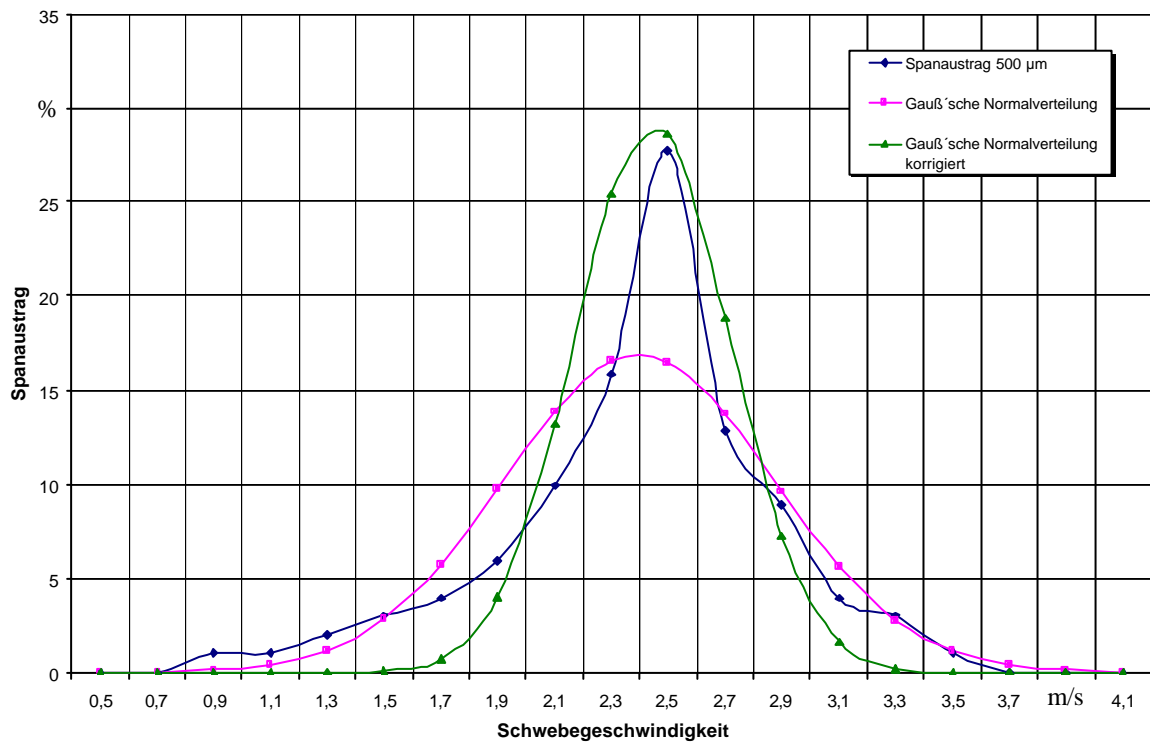
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Fräser 250 µm



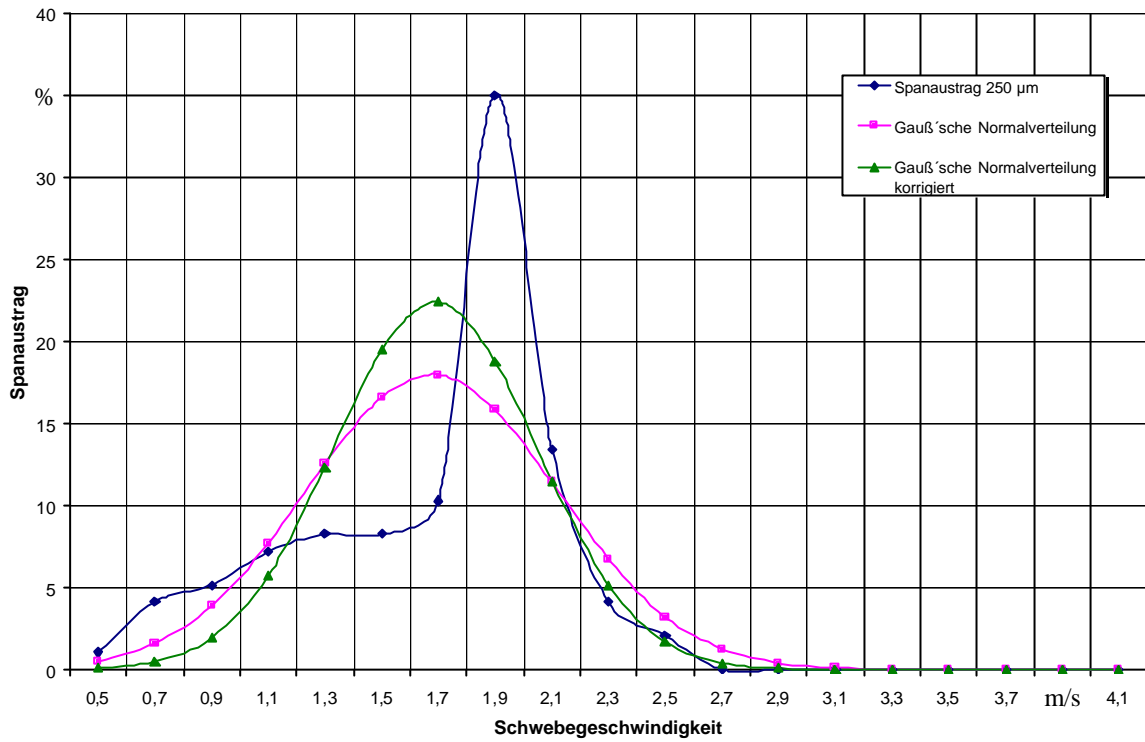
Vergleich Normalverteilung-Versuch Spanplatte Fräser 1000 µm



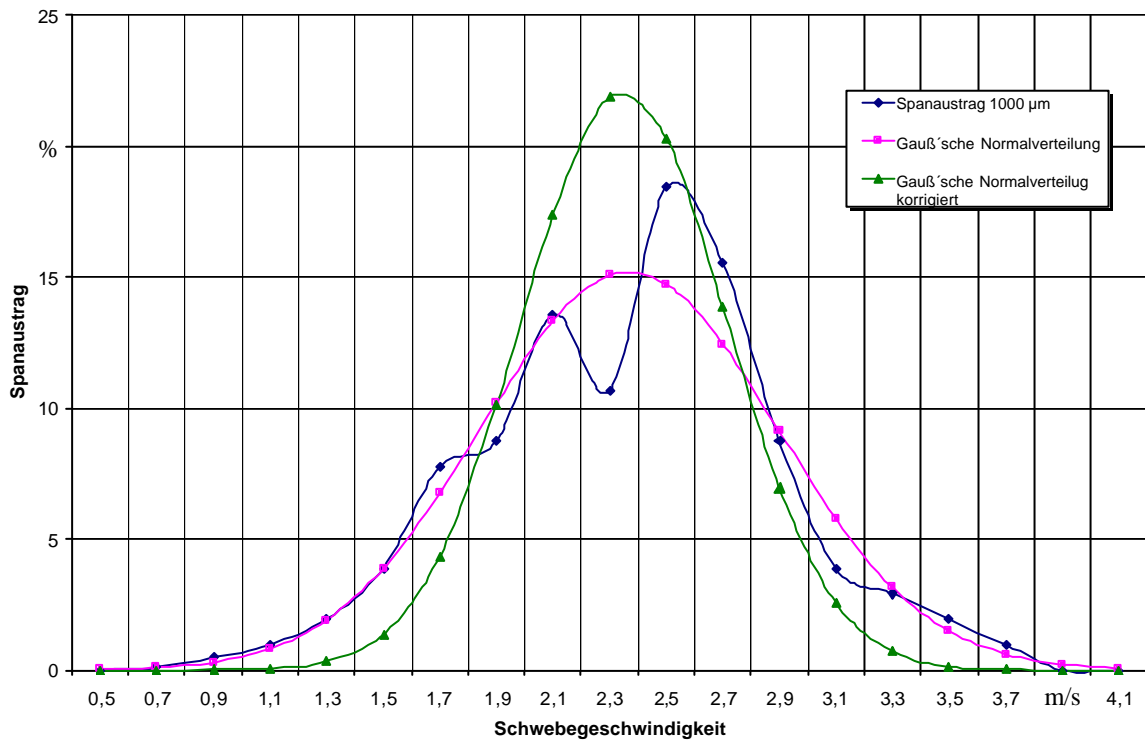
Vergleich Normalverteilung-Versuch Spanplatte Fräser 500 µm



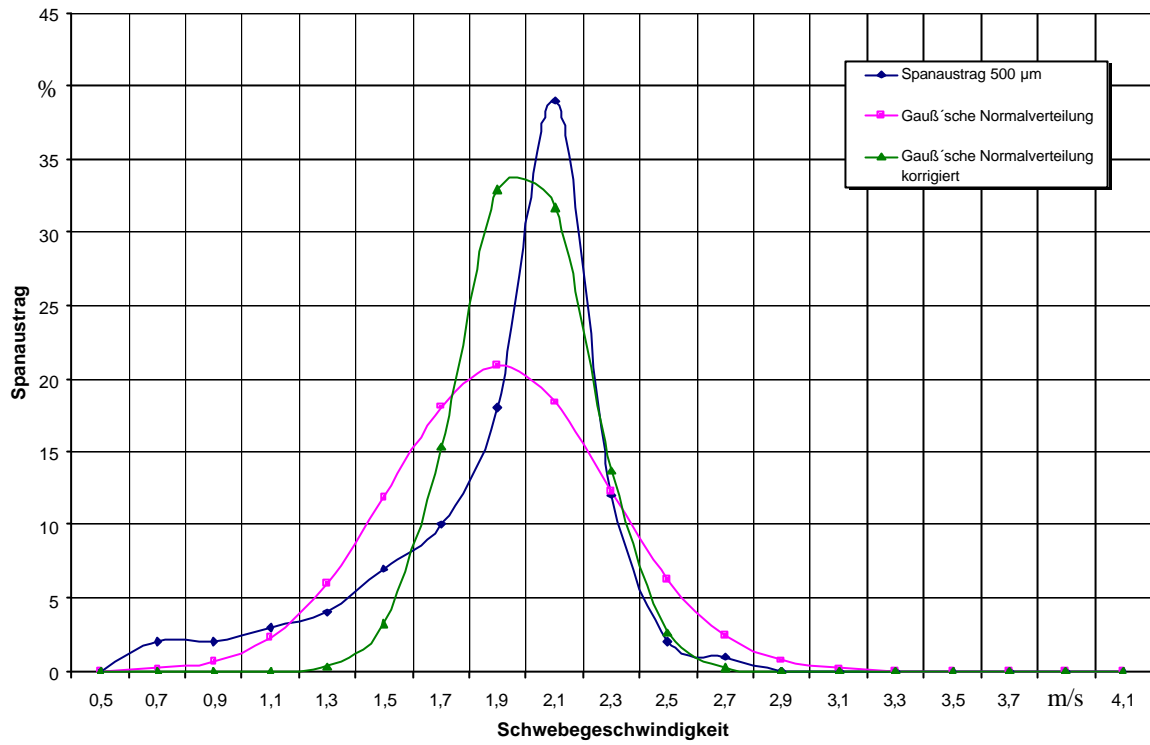
Vergleich Normalverteilung-Versuch Spanplatte Fräser 250 µm



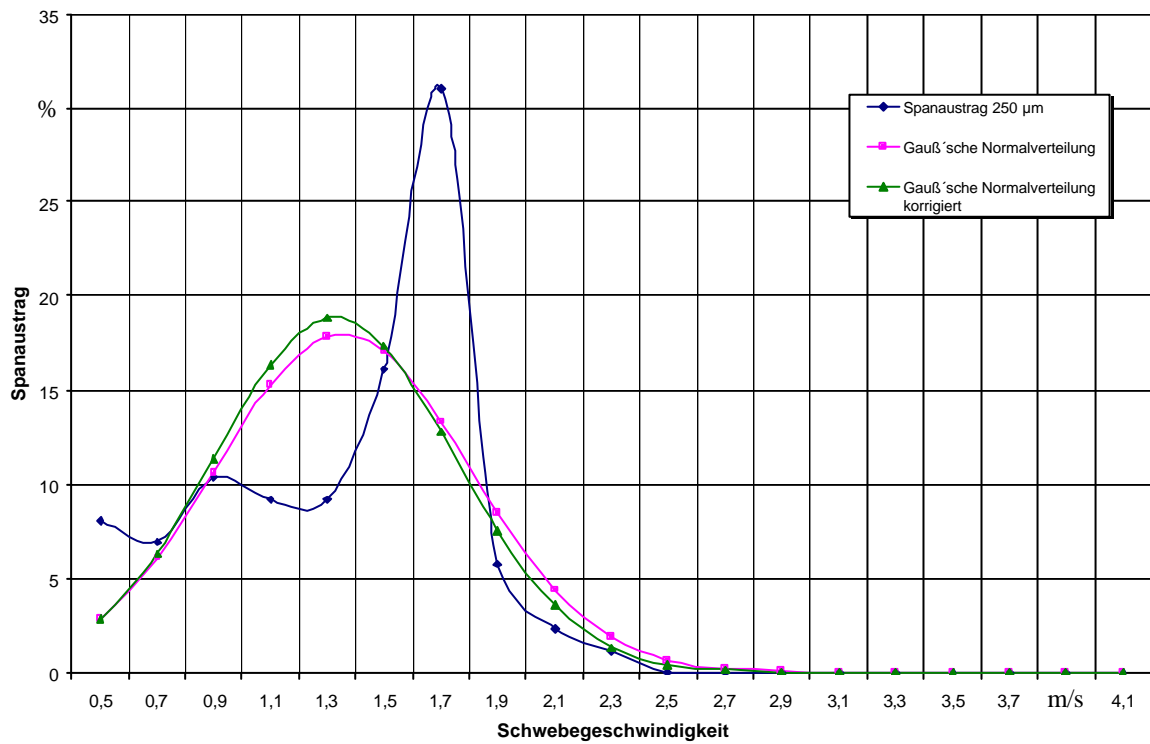
Vergleich Normalverteilung-Versuch MDF Fräser 1000 µm



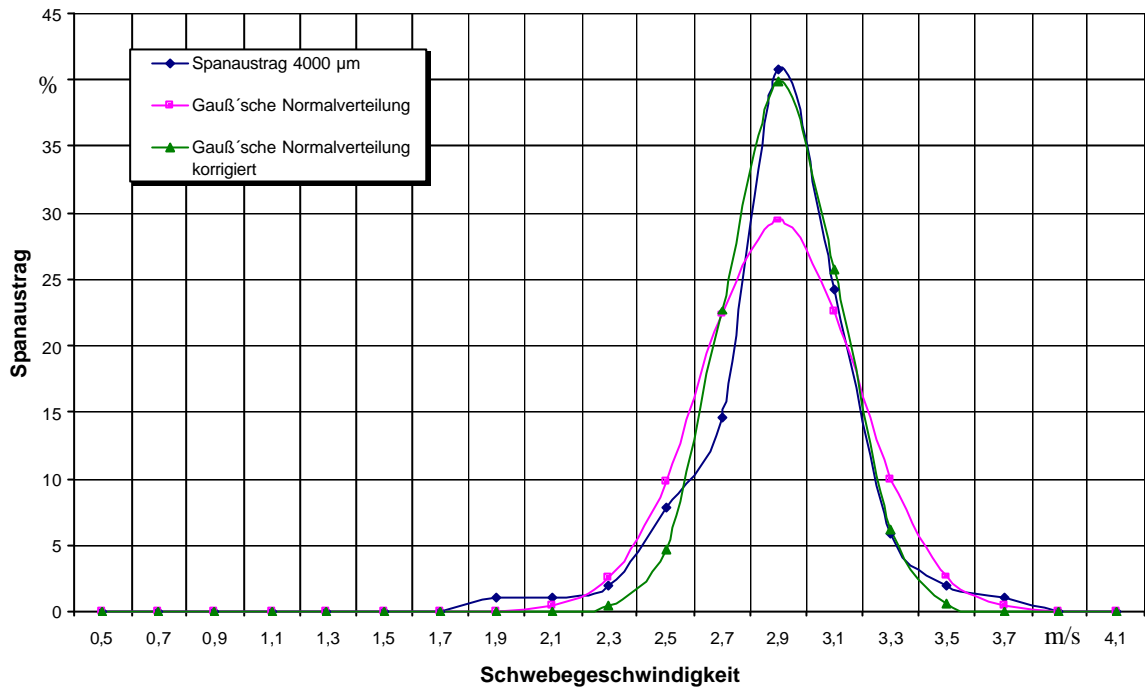
Vergleich Normalverteilung-Versuch MDF Fräser 500 µm



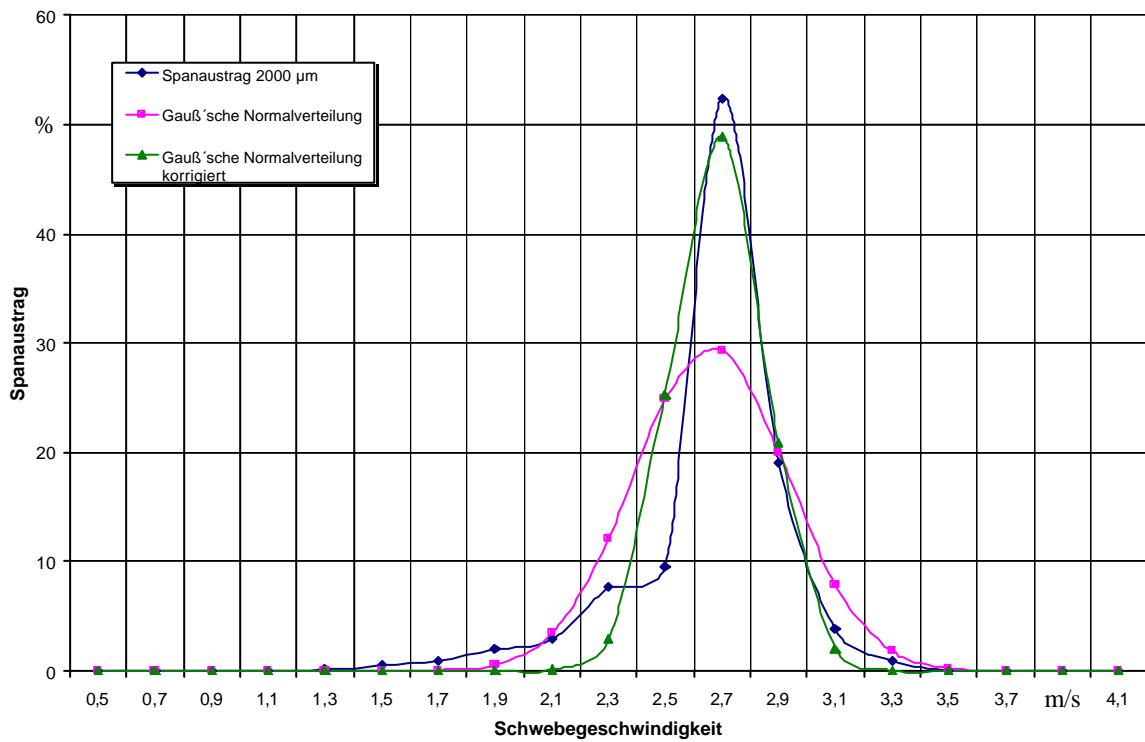
Vergleich Normalverteilung-Versuch MDF Fräser 250 µm



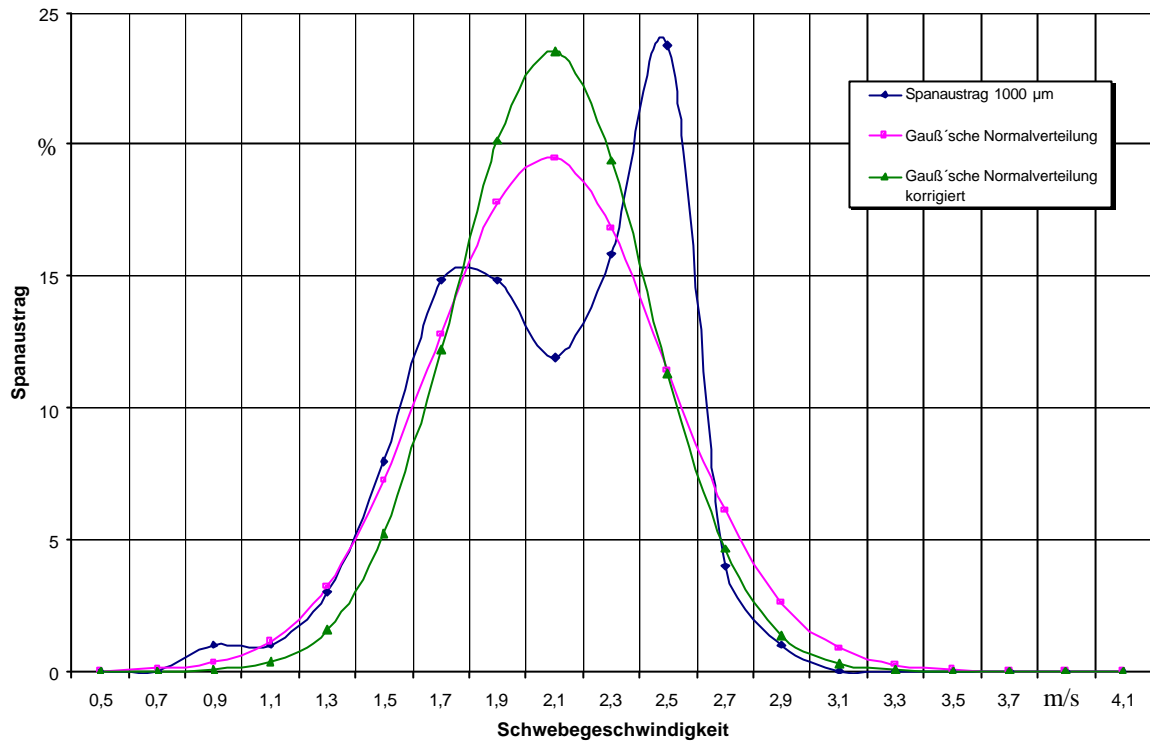
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Hobel 4000 µm



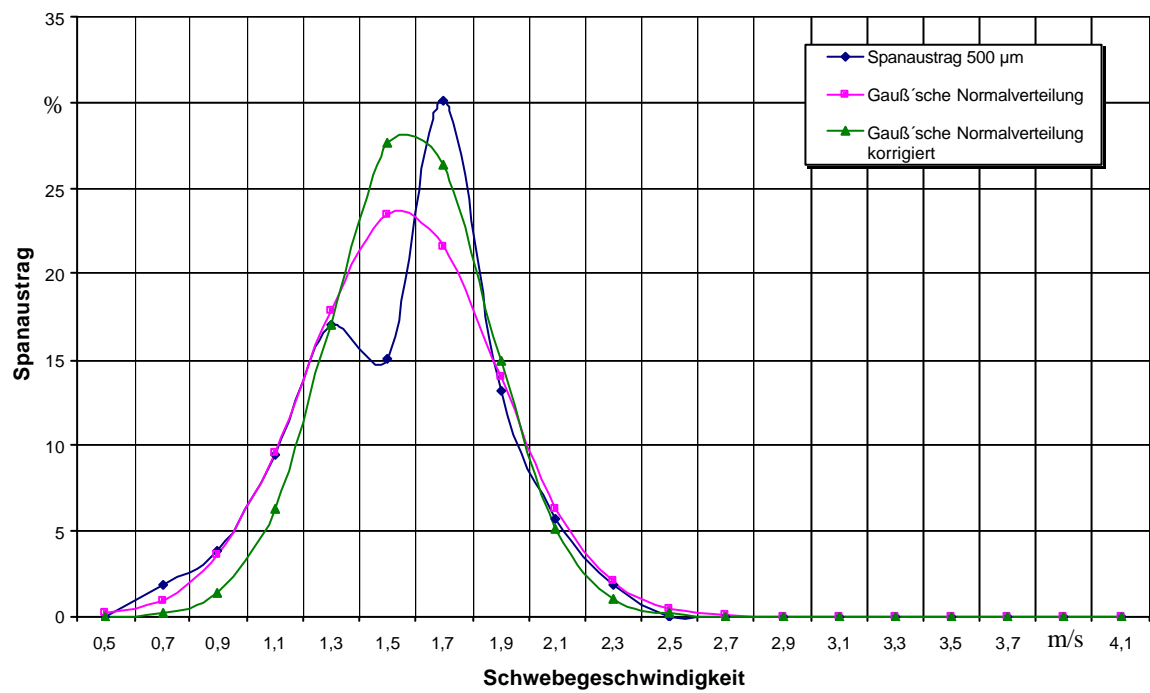
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Hobel 2000 µm



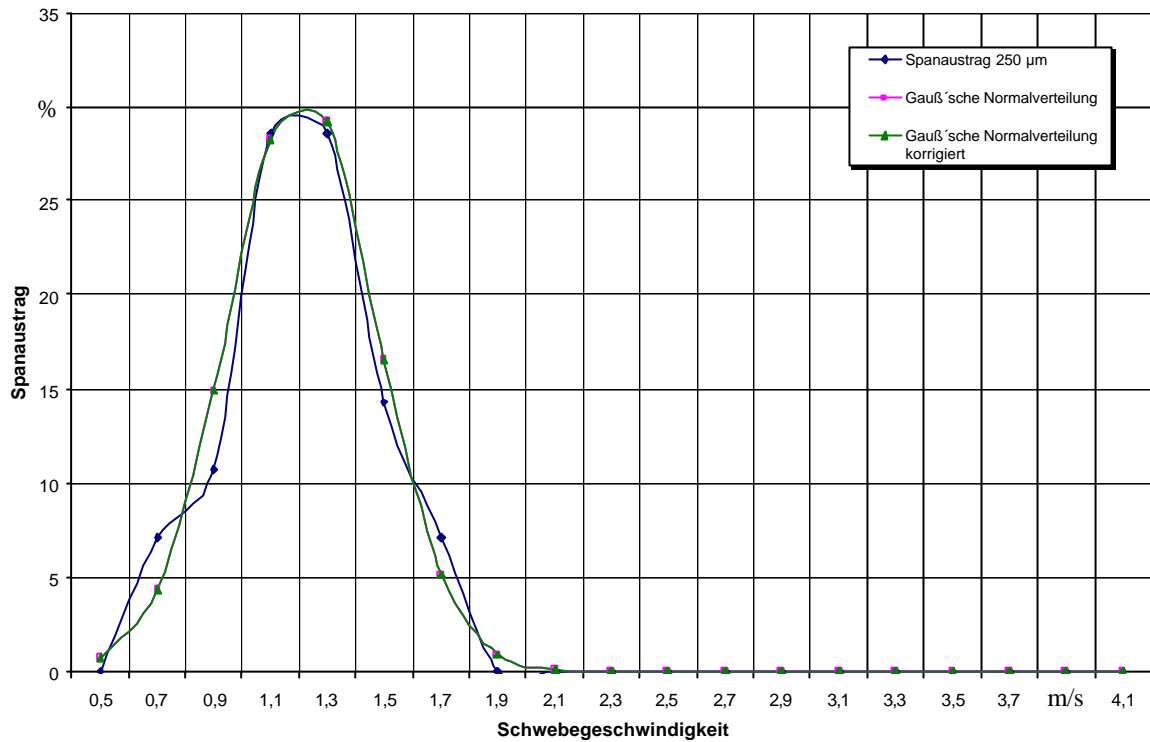
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Hobel 1000 µm



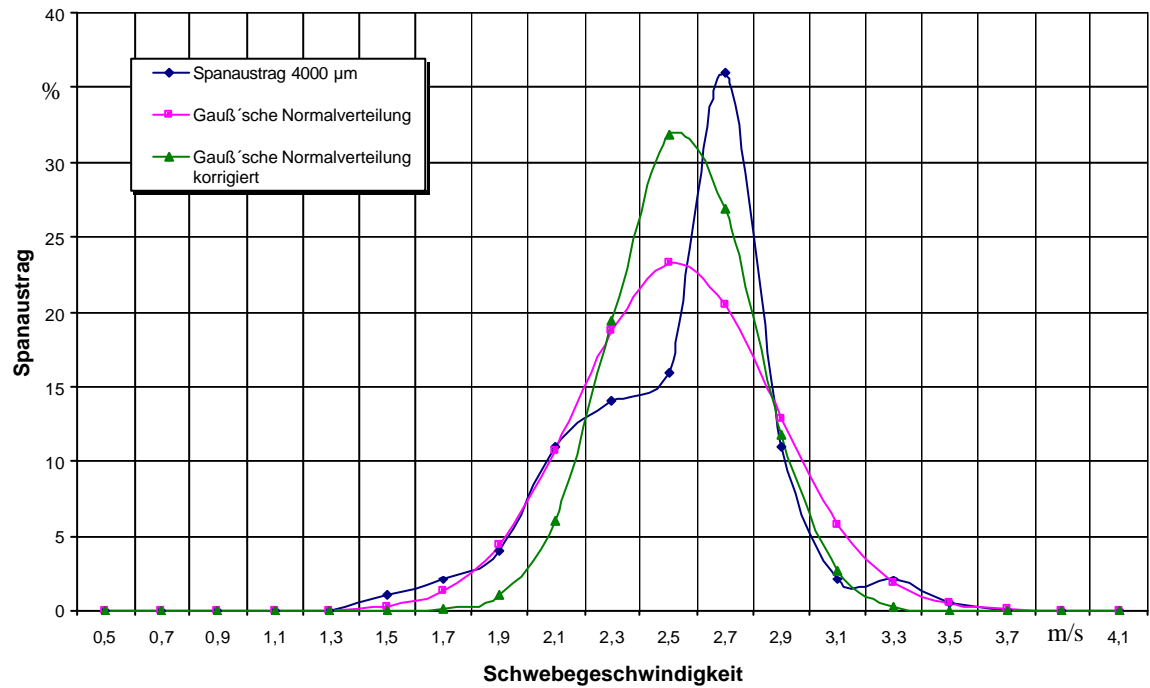
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Hobel 500 µm



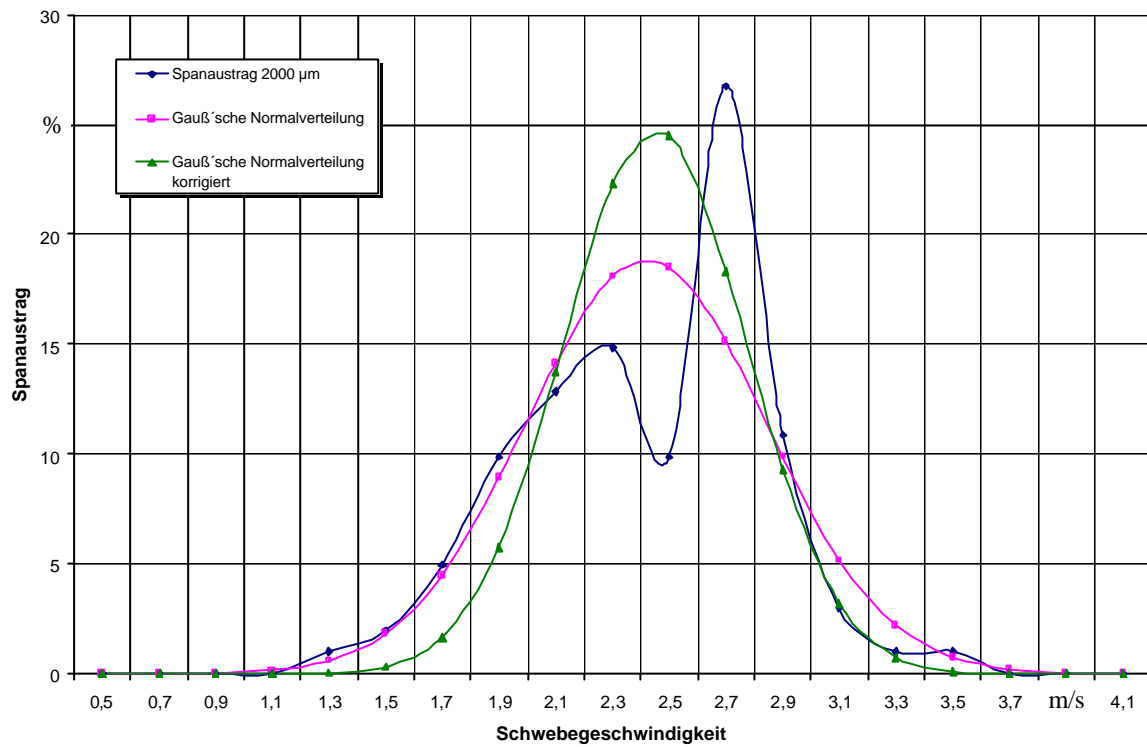
Vergleich Normalverteilung-Versuch Buche Hobel 250 µm



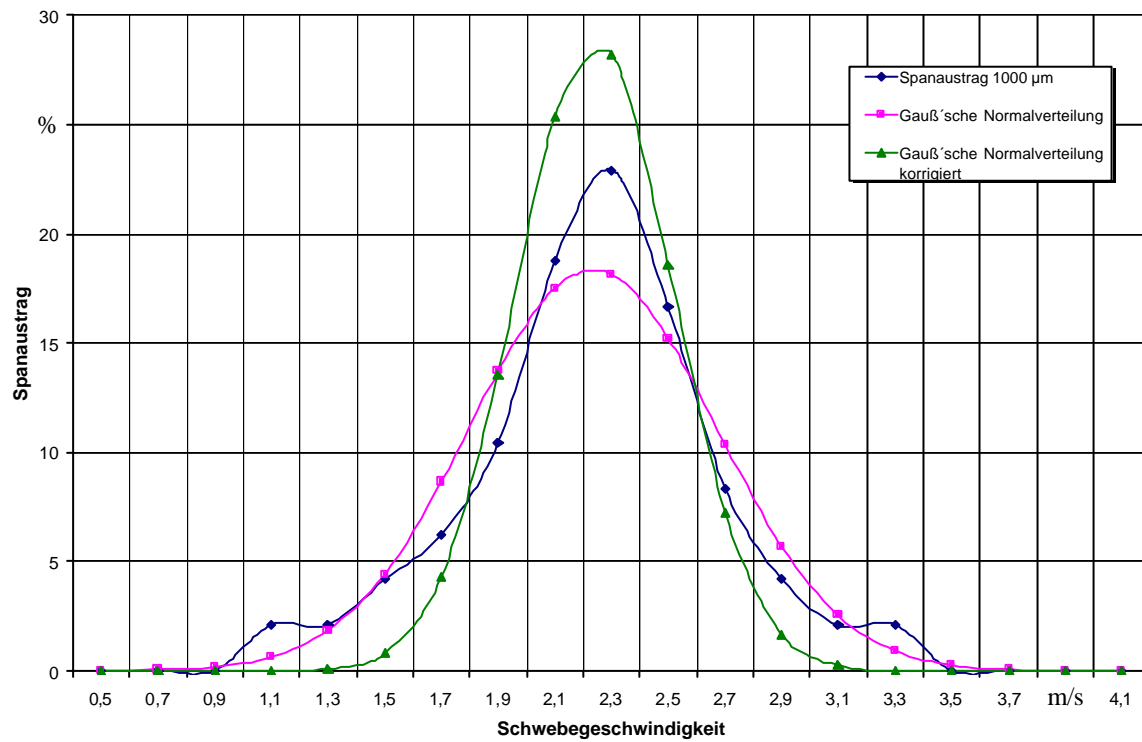
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Hobel 4000 µm

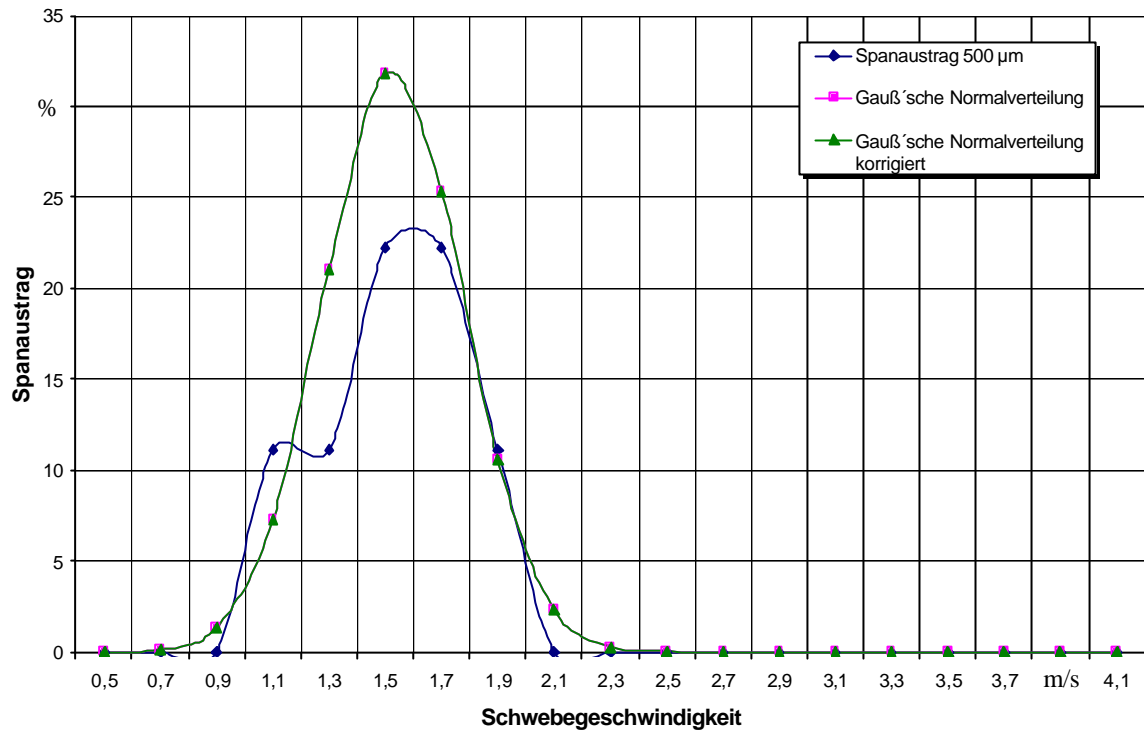


Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Hobel 2000 µm



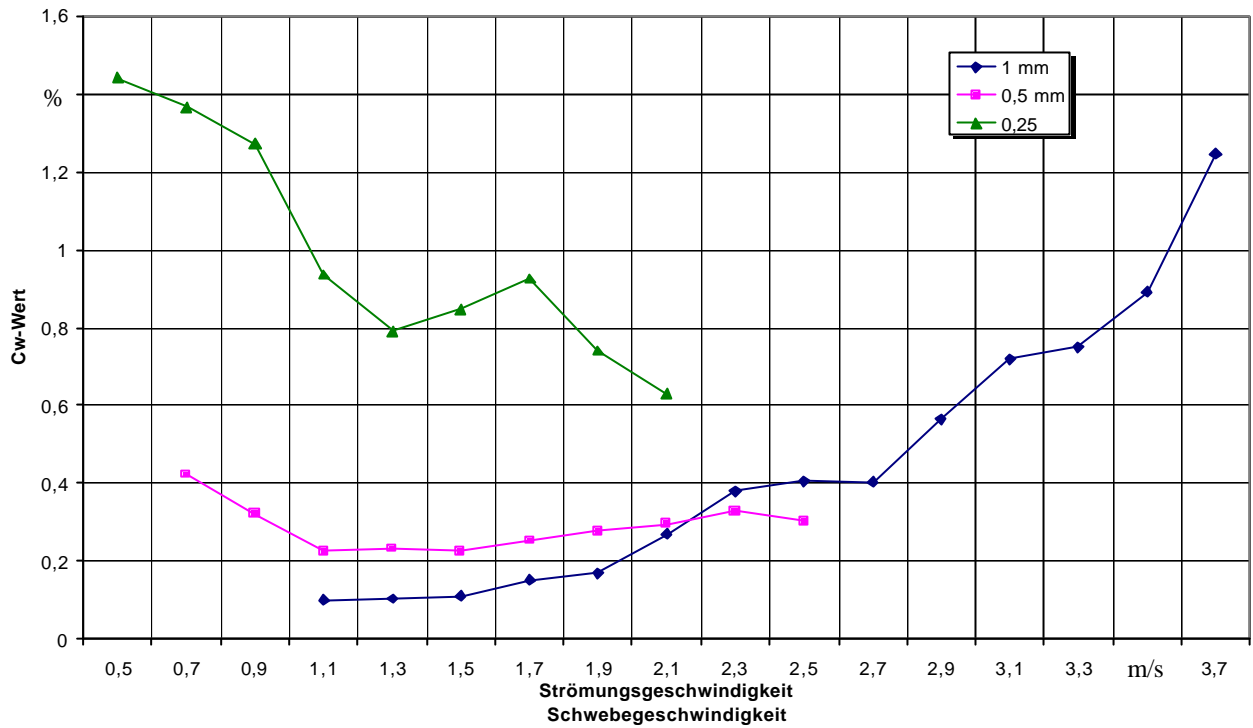
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Hobel 1000 µm



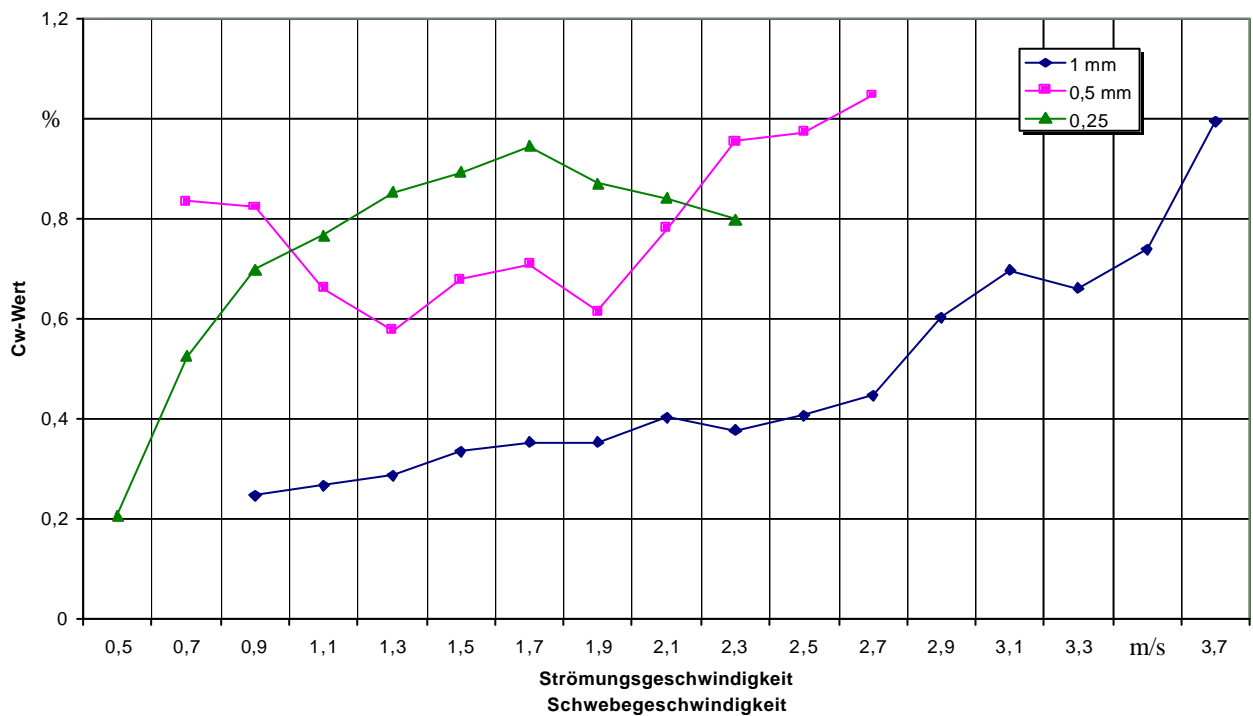
Vergleich Normalverteilung-Versuch Fichte Hobel 500 μm 

10.6 C_w-Wertverläufe

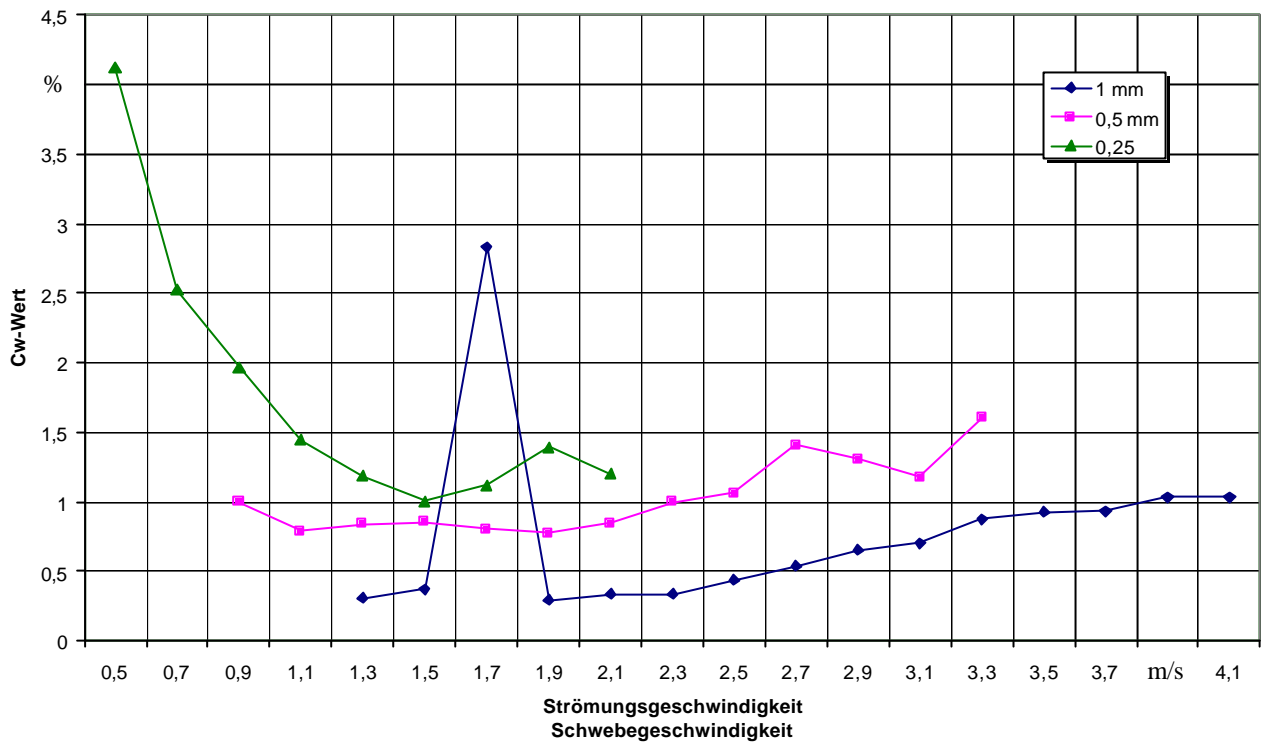
C_w-Werte Kreissägen Buche



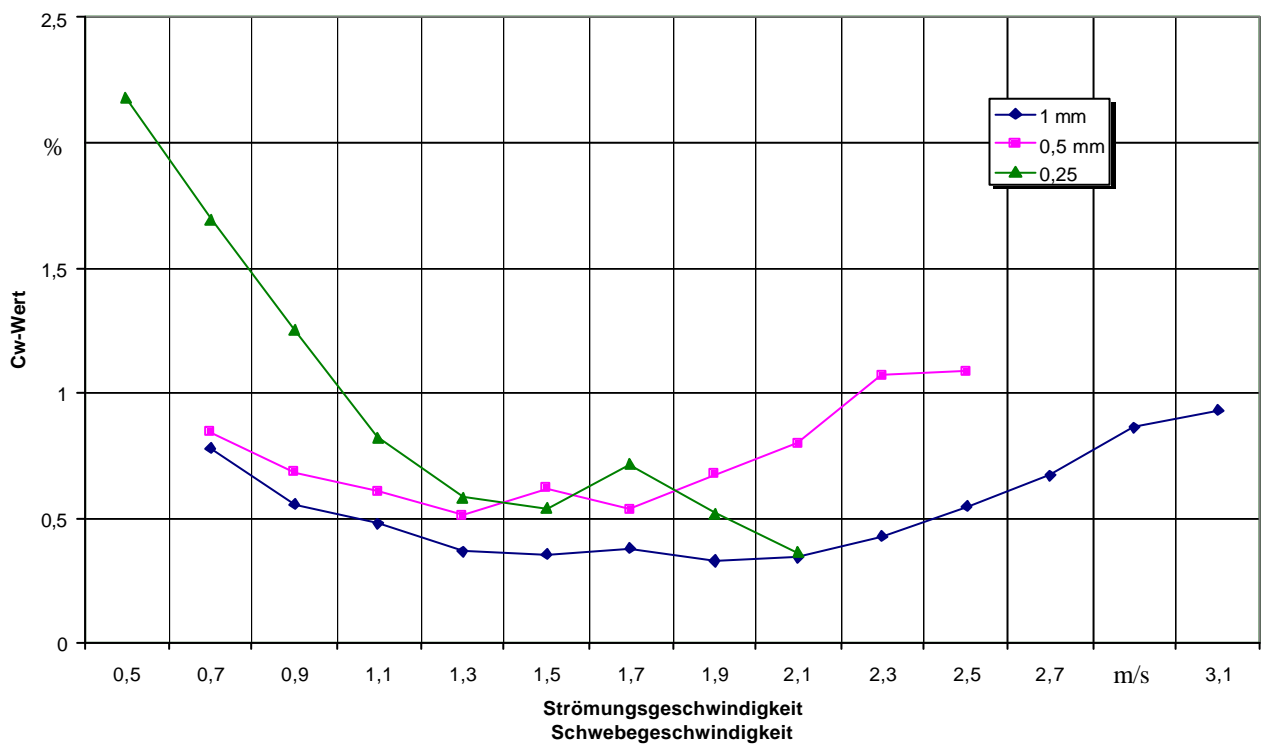
C_w-Werte Kreissägen Fichte



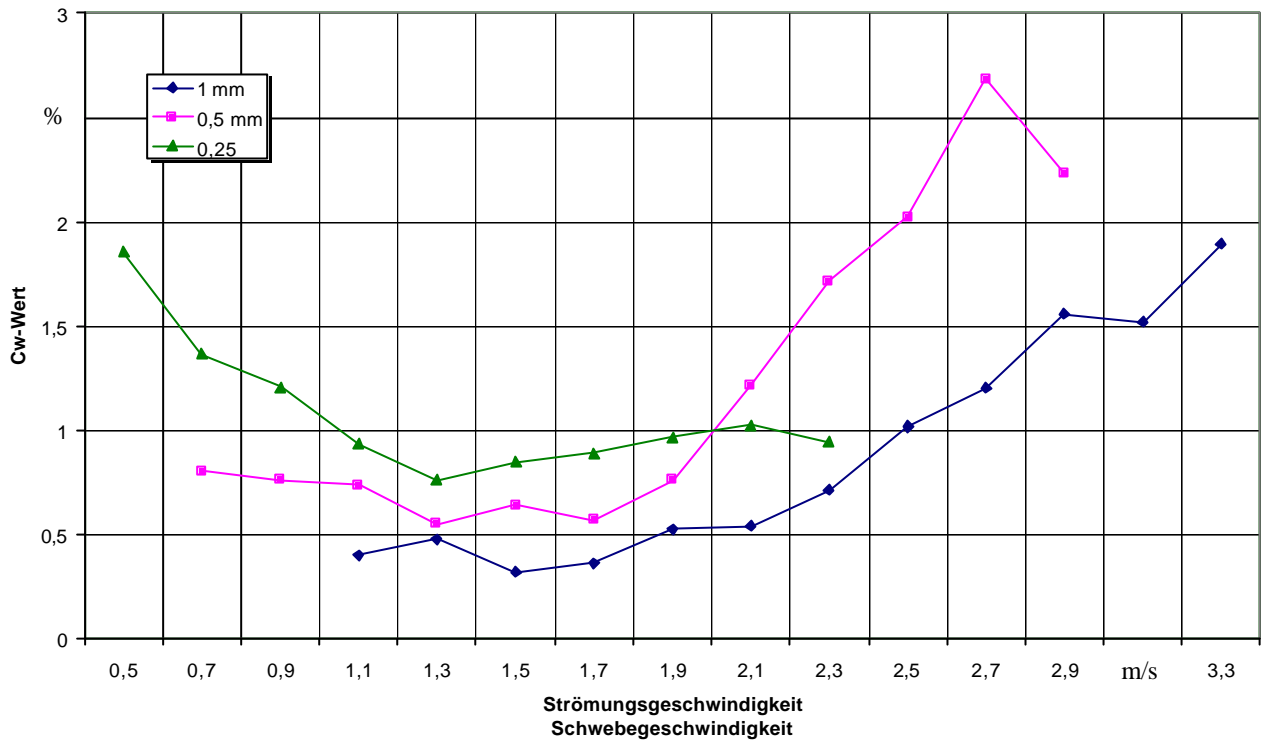
C_w-Werte Kreissägen Spanplatte



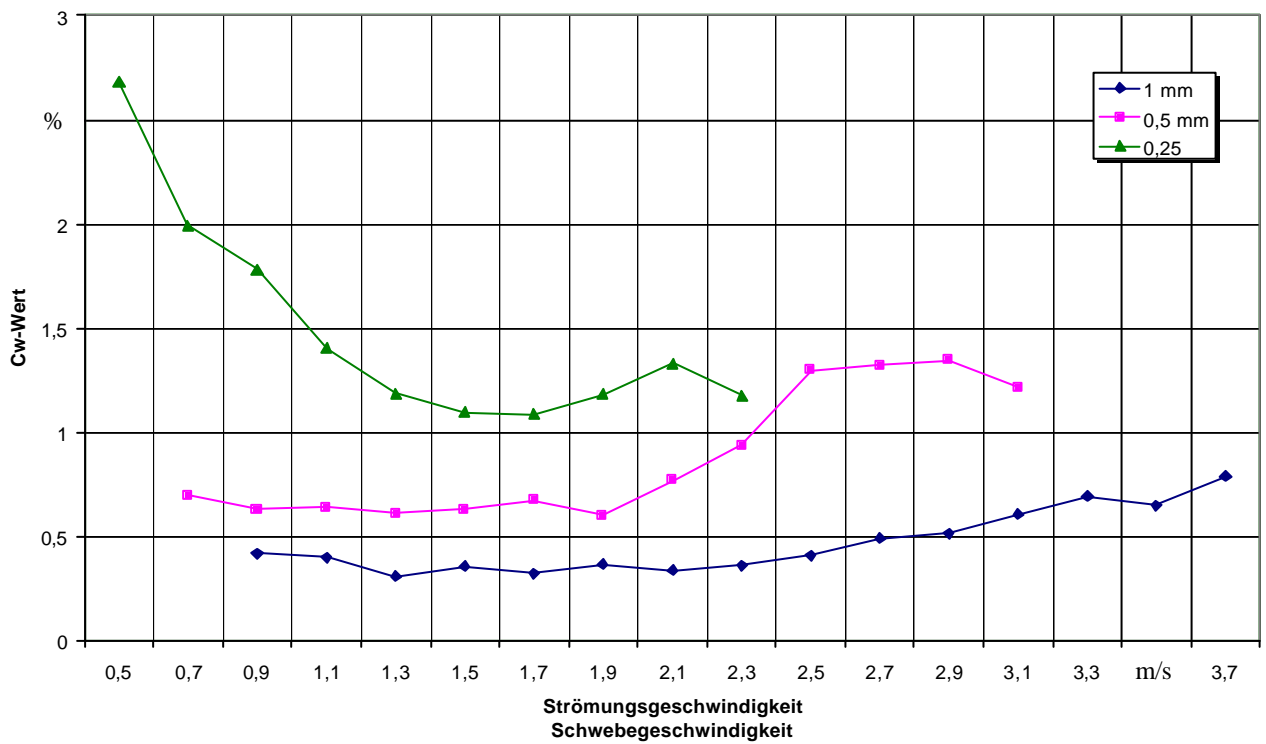
C_w-Werte Kreissägen MDF



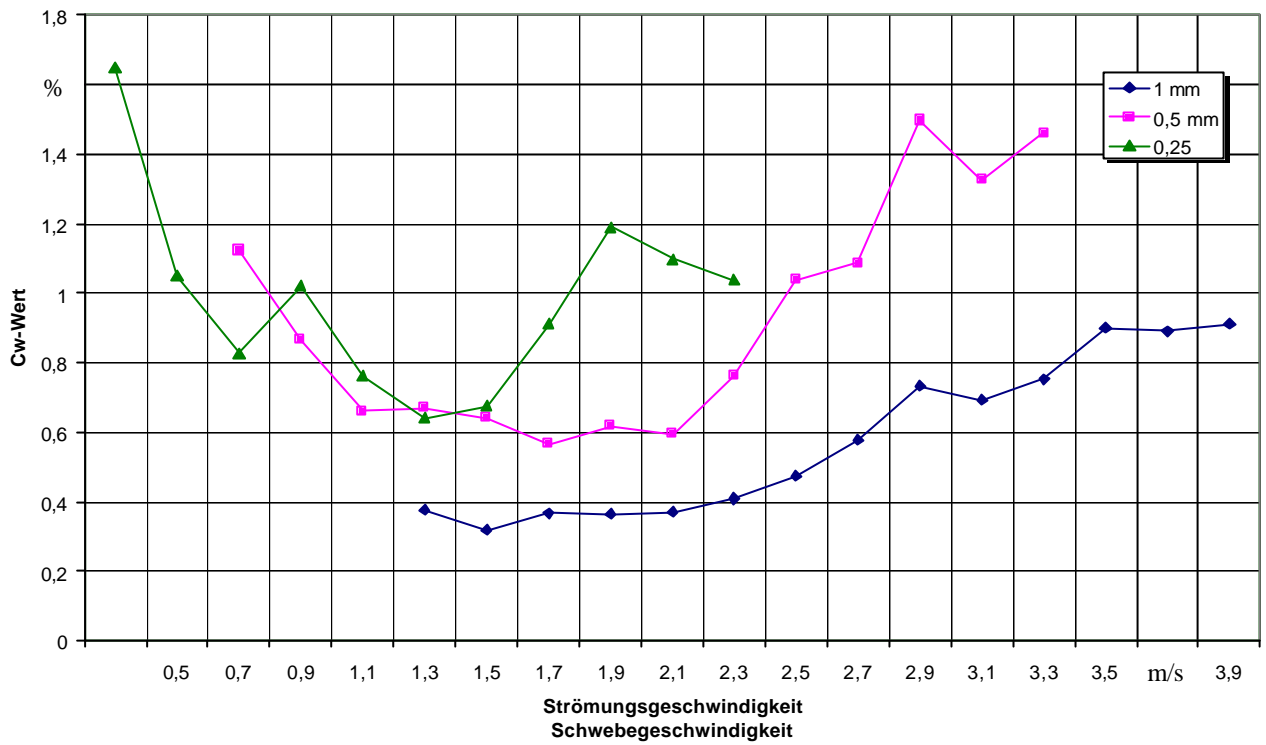
C_w-Werte Fräsen Buche



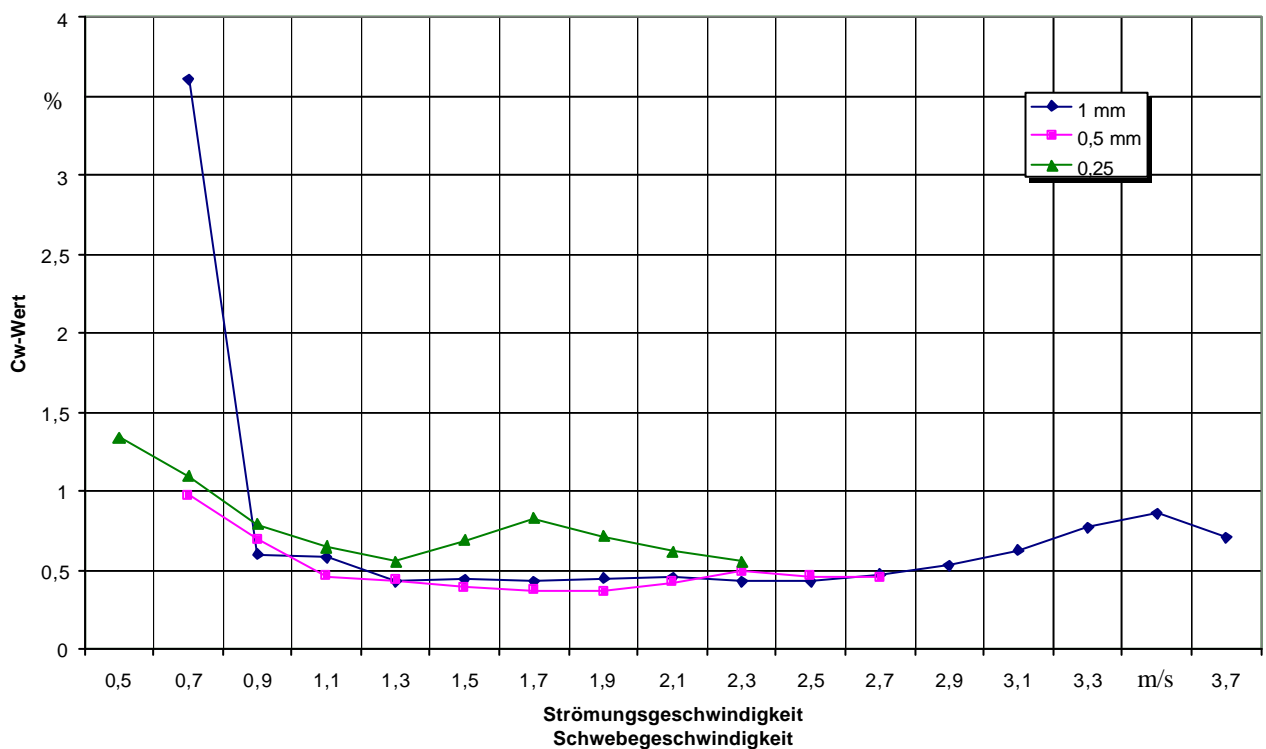
C_w-Werte Fräsen Fichte



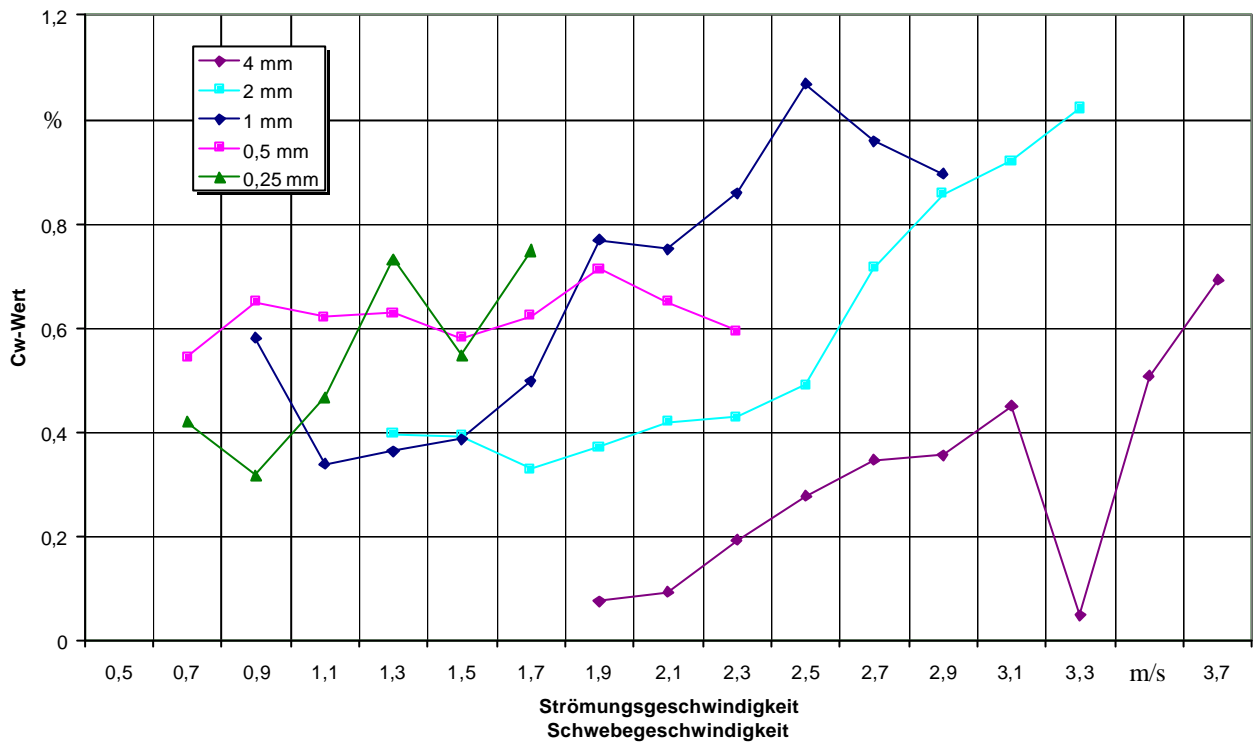
C_w-Werte Fräsen Spanplatte



C_w-Werte Fräsen MDF



C_w-Werte Hobeln Buche



C_w-Werte Hobeln Fichte

