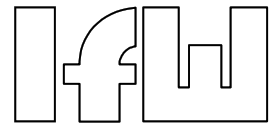


Universität Stuttgart
Institut für Werkzeugmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. U. Heisel



Studienarbeit

Hauptfach Werkzeugmaschinen

cand. mach. Martin Dressler

Matrikelnr.: 1600616

Ermittlung des Zusammenhangs zwischen theoretischem und realem Späneflug

Teil 1

Betreuer:

Dipl.-Ing. Stephan Müller

Stuttgart, März 1996

II Inhaltsverzeichnis

	Titelblatt	1
I	Aufgabenstellung	2
II	Inhaltsverzeichnis	3
III	Verwendete Formelzeichen und Einheiten	8
IV	Verzeichnis der Abbildungen	12
1	Einleitung	17
2	Stand der Forschung	20
3	Untersuchte Einflußgrößen auf den Flug des Spanes	
21		
3.1	Spanmasse	21
3.2	Abflughöhe	21
3.3	Luftgeschwindigkeit im Versuchsraum	21
3.4	Anfangsgeschwindigkeit des Partikels	21
3.5	Drehzahl des Werkzeugs	22
3.6	Spanform	22
3.7	Cw-Wert	22
4	Versuchsaufbau	23
4.1	Handkreissäge	23
4.2	Sägeblätter	25
4.3	Sägetisch	25
4.4	Vorrichtung zur Werkstückzuführung	27
4.4.1	Aufgaben der Zuführvorrichtung	28
4.4.2	Konstruktion der Zuführvorrichtung	28
4.4.3	Bedienung der Zuführvorrichtung	29
4.5	Raster zum Auffangen der Späne	29
4.6	Versuchswerkstücke	31

5	Versuchsdurchführung	32
5.1	Auswahl eines geeigneten Verfahrens der Zerspanung	32
5.2	Auswahl des Zerspanungswerkstoffes	32
5.2.1	Normung der Spanplatten	34
5.2.2	Herstellung und Eigenschaften der Spanplatten	35
5.3	Messung der Sägeblatt Drehzahl	37
5.3.1	Meßgerät zur Drehzahlmessung	37
5.3.2	Durchführung der Messung	39
5.4	Messung der Luftgeschwindigkeit	39
5.4.1	Meßgerät zur Luftgeschwindigkeitsmessung	39
5.4.2	Übersicht über die einsetzbaren Sondentypen	40
5.4.3	Ausgewählter Sondentyp	41
5.4.4	Funktionsprinzip des thermischen Strömungssensors	41
5.4.5	Einsatzbedingungen des Sensors	42
5.4.6	Fehler beim Messen mit einem thermischem Kugelsensor	42
5.5	Auswahl einer geeigneten Aufbewahrungsmöglichkeit für die Späneproben	44
5.6	Dokumentation der Siebergebnisse in einer Tabelle	44
5.7	Analyse der Spangrößenverteilung mittels Siebanalyse nach DIN 66 165	45
5.7.1	Auswahl der optimalen Siebzeit der unterschiedlichen Spänefraktionen	46
5.7.2	Mögliche Fehlerquellen während der Siebanalyse und ihre Minimierung	49
5.8	Wiegen der Analysensiebe	50
5.9	Messung der Abflugparameter einzelner Späne mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahme	51
5.9.1	Hochgeschwindigkeitskamera EKTAPRO 1000 Imager	51
5.9.2	EKTAPRO 1000 Processor	53
5.9.3	Bildschirmanzeige	54
5.9.4	Durchführung der Aufnahmen	54
5.9.5	Messung des Abflugwinkels und der Abfluggeschwindigkeit	55
5.10	Bestimmung der Spanmasse einzelner Späne	

57		
5.11	Bestimmung des Spanquerschnitts	57
6	Auswertung der Versuche	58
6.1	Verteilung des Zerspanungsgutes im Raster	58
6.1.1	Verteilung der Gesamtmasse im Raster	58
6.1.2	Partikelverteilung im Verteilungstyp I	60
6.1.3	Partikelverteilung im Verteilungstyp II	63
6.1.4	Partikelverteilung im Verteilungstyp III	65
6.1.5	Partikelverteilung im Verteilungstyp IV	68
6.1.6	Zusammenfassende Betrachtungen der Verteilungstypen I - IV	70
6.2	Verteilung der Partikelmassen quer zur Sägeblattflucht	71
6.2.1	Normalverteilung (Gauß-Laplace-Verteilung)	72
6.2.2	Vergleich der Normalverteilung mit der Partikelmassenverteilung	73
6.3	Zusammenhang zwischen Partikelform und Flugweite	76
7	Theoretischer Späneflug	80
7.1	Festlegen des Koordinatensystems	80
7.2	Betrachtung der Flugbahn ohne Reibung im luftleeren Raum unter dem Einfluß der Erdanziehungskraft	
80		
7.3.	Strömungswiderstand des Partikels	82
7.4	Flugbahn des Partikels in Abhängigkeit von der Widerstandskraft	84
7.5	Flugbahn des Partikels unter Einbeziehung der umgebenden Luftgeschwindigkeit	86
7.6	Vernachlässigte physikalische Effekte	87
7.6.1	Turbulente Umströmung des Partikels	89
7.6.2	Magnus-Effekt	89
7.6.3	Statischer Auftrieb	91
7.6.4	Dynamischer Auftrieb	
92		
7.6.5	Zusammenstoß von Partikeln	92

7.6.6	Einfluß der Spänekonzentration auf die Luftgeschwindigkeit	95
8	Vergleich des theoretischen mit dem realen Späneflug	96
8.1	Grundsätzliche Annahmen und Vereinfachungen	96
8.1.1	Verwendete Partikelfläche	96
8.1.2	Verwendete Partikelmasse	98
8.1.3	Verwendete Anfangsgeschwindigkeit	
100		
8.1.4	Verwendeter Ablugwinkel	101
8.2	Vergleich der theoretischen und realen Flugweiten	102
8.2.1	Bestimmung des C_w -Wertes	102
8.2.2	Verlauf des C_w -Wertes über die Partikelgrößen	104
8.2.3	Abhängigkeit des C_w -Wertes von der relativen Fluggeschwindigkeit	106
8.3	Fluggeschwindigkeit über dem Flugweg	113
8.3.1	Bereich der veränderlichen Fluggeschwindigkeit	113
8.3.2	Bereich der Endgeschwindigkeit	116
8.4	Direkter Vergleich der theoretischen und der realen Flugbahnen	117
9	Programmierung der Flugbahnberechnung in einer Excel-Tabelle	120
9.1	Besonderheiten des Programms Microsoft Excel	120
9.1.1	Berechnung trigonometrischer Funktionen	120
9.1.2	Grenzen der darstellbaren Datenmenge in Diagrammen	121
9.1.3	Winkelrichtige Darstellung der Flugbahn	121
9.2	Prinzipielle Gestaltung des Rechengangs	121
9.3	Programmierung der Anfangswerte im Spanentstehungspunkt	122
9.3.1	Vorgegebene Anfangswerte	122
9.3.2	Absolute Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,abs}$	124
9.3.3	Absolute Partikelgeschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,abs}$	124
9.3.4	Relative Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,rel}$	125
9.3.5	Reynoldszahl Re	127
9.3.6	C_w -Wert	127
9.4	Programmierung der Kräfte und Beschleunigungen über das	

	Weginkrement	
127		
9.4.1	Widerstandskraft F_w	127
9.4.2	Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$	128
9.4.3	Kraft auf den Partikel in x-Richtung F_x	133
9.4.4	Kraft auf den Partikel in y-Richtung F_y	134
9.4.5	Gesamtkraft F_{ges}	135
9.4.6	Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$	137
9.4.7	Partikelbeschleunigung a	137
9.4.8	Partikelbeschleunigung in x-Richtung a_x	138
9.4.9	Partikelbeschleunigung in y-Richtung a_y	138
9.5	Programmierung der Endwerte des Weginkrements	138
9.5.1	Neue absolute x-Geschwindigkeit $v_{x+1,abs}$	138
9.5.2	Flugzeit des Partikels über das Weginkrement t	139
9.5.3	Weginkrement in y-Richtung Δs_y	140
9.5.4	Neue Geschwindigkeit in y-Richtung v_{y+1}	140
9.5.5	Gesamte Flugzeit des Partikels T	143
9.6	Genauigkeit und Praktikabilität des Rechenschemas	
143		
10	Zusammenfassung und Ausblick	146
11	Literaturhinweise	148
12	Anhang	151
12.1	Anhang I: Partikelverteilungen im Auffangraster	151
12.2	Anhang II: Vergleich von berechneter und gemessener Flugbahn einzelner Späne	197
12.3	Anhang III: Technische Zeichnungen der Zuführvorrichtung	219

III Verwendete Formelgrößen und Einheiten

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	$[m^2]$	Partikelquerschnittsfläche
A_p	$[m^2]$	projizierte Partikelfläche
A_R	$[m^2]$	Fläche des betrachteten Raumes
a	$[m/s^2]$	Beschleunigung
a	$[m]$	große Halbachse einer Ellipse
a_m	$[m/s^2]$	momentane Beschleunigung
a_{mx}	$[m/s^2]$	momentane Beschleunigung in x-Richtung
a_{my}	$[m/s^2]$	momentane Beschleunigung in y-Richtung
a_x	$[m/s^2]$	Beschleunigung in x-Richtung
a_y	$[m/s^2]$	Beschleunigung in y-Richtung
b	$[m]$	kleine Halbachse einer Ellipse
C_w	-	Cw-Wert
$C_{w,\emptyset}$	-	durchschnittlicher Cw-Wert
D	$[m]$	Partikeldurchmesser
$D_\emptyset$	$[m]$	durchschnittlicher Partikeldurchmesser
D_s	$[m]$	Sägeblattdurchmesser
D_{Sieb}	$[m]$	Siebmaschenweite
E_{kin}	$[J]$	kinetische Energie
F_A	$[N]$	Auftriebskraft
F_D	$[N]$	Druckwiderstandskraft
F_g	$[N]$	Gewichtskraft
F_{ges}	$[N]$	Gesamtkraft
F_R	$[N]$	Reibkraft
F_w	$[N]$	Strömungswiderstandskraft
F_x	$[N]$	Kraft in x-Richtung
F_y	$[N]$	Kraft in y-Richtung

Symbol	Einheit	Bedeutung
g	[m/s]	Erdbeschleunigung
m	[kg]	Masse
m_p	[kg]	Masse des Partikels
n	[1/min]	Drehzahl
n	-	Anzahl der aufsummierten Werte
Δp	[Pa]	Druckgefälle
Re	-	Reynoldszahl
Δs	[m]	Weginkrement
Δs_x	[m]	Weginkrement in x-Richtung
Δs_y	[m]	Weginkrement in y-Richtung
t	[s]	Zeit
u	[m/s]	Geschwindigkeit vor dem Stoß
V	[m ³]	Partikelvolumen
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_0	[m/s]	Anfangsgeschwindigkeit des Partikels
v_{abs}	[m/s]	Absolutgeschwindigkeit des Partikels
v_c	[m/s]	Schnittgeschwindigkeit
v_F	[m/s]	Geschwindigkeit des Fluids
$v_{L,x}$	[m/s]	umgebende Luftgeschwindigkeit in x-Richtung
v_p	[m/s]	Geschwindigkeit des Partikels
v_{rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit des Partikels
$v_{rel,\emptyset}$	[m/s]	durchschnittliche Relativgeschwindigkeit
v_x	[m/s]	Geschwindigkeit in x-Richtung
$v_{x,abs}$	[m/s]	absolute Geschwindigkeit in x-Richtung
$v_{x+1,abs}$	[m/s]	absolute Geschwindigkeit in x-Richtung am Ende des Weginkrements
v_{xi}	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit im Weginkrement in x-Richtung

Symbol	Einheit	Bedeutung
v_{xi-1}	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit im vorangegangenen Weginkrement in x-Richtung
$v_{x,rel}$	[m/s]	relative Geschwindigkeit in x-Richtung
v_{yi}	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit im Weginkrement in y-Richtung
v_{yi-1}	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit im vorangegangenen Weginkrement in y-Richtung
v_y	[m/s]	Geschwindigkeit in y-Richtung
v_{y+1}	[m/s]	Geschwindigkeit in y-Richtung am Ende des Weginkrements
$v_{y,abs}$	[m/s]	absolute Geschwindigkeit in y-Richtung
$v_{y,rel}$	[m/s]	relative Geschwindigkeit in y-Richtung
W_F	-	Wertemenge
ΔW	[J]	Energie
w	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit
w_{amb}	[m/s]	umgebende Luftgeschwindigkeit
w_{ges}	[m/s]	Gesamtgeschwindigkeit
w_r	[m/s]	Rotationsgeschwindigkeit
w_{rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit zwischen Partikel und Umgebungsluft
x_0	[m]	Wurfweite
y_0	[m]	Fallhöhe
α	[°]	Erhebungswinkel
α°	[°]	Flugwinkel in Grad
α	[rad]	Flugwinkel im Bogenmaß
$\alpha_{0,abs}^\circ$	[°]	Flugwinkel im Abflugpunkt
$\hat{\alpha}_a$	[rad]	Beschleunigungswinkel im Bogenmaß
$\hat{\alpha}'_a$	[rad]	Hilfswinkel im Bogenmaß

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\hat{\alpha}_F$	[rad]	Flugwinkel im Bogenmaß
α_F	[°]	Flugwinkel in Grad
$\hat{\alpha}_{rel}$	[rad]	Relativgeschwindigkeitswinkel im Bogenmaß
$\hat{\alpha}'_{rel}$	[rad]	Hilfswinkel im Bogenmaß
μ	-	Erwartungswert
σ^2	-	Varianz
ρ_L	[kg/m ³]	Dichte der Luft
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität

Abkürzungen

BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzw	beziehungsweise
CO ₂	Kohlendioxid
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EG	Europäische Gemeinschaft
etc	et cetera
Fa	Firma
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GSG	Gerätesicherheitsgesetz
Hz	Hertz
ISO	International Organization for Standardization
MAK	Maximale-Arbeitsplatz-Konzentration
RVO	Reichsversicherungsordnung
TRGS	Technische Regel für Gefahrstoffe
TRK	Technische Richtkonzentration
z.B.	zum Beispiel

IV Verzeichnis der Abbildungen

Bild 4.1	Abbildung des Versuchsstandes	23
Bild 4.2	Die Kreissäge Bosch GKS 66 CE	24
Bild 4.3	Die Verzahnung der verwendeten Sägeblätter	25
Bild 4.4	Der Sägetisch mit Beschriftung der angebrachten Spanplatten	26
Bild 4.5	Die Zuführvorrichtung	27
Bild 4.6	Kartonstreifen des Auffangrasters	30
Bild 4.7	Die Aufstellung von Säge und Auffangraster samt Feldnumerierungen	31
Bild 5.1	Einteilung des Verfahrens Sägen nach DIN 8589, Teil 6	33
Bild 5.2	Entwicklung des Verbrauchs von mechanisch bearbeitetem Holz in den EG-Ländern von 1950 bis 1990	34
Bild 5.3	Entwicklung der prozentualen Anteile der Rohmaterialien für die Spanplattenherstellung in der BRD	35
Bild 5.4	Rohdichteprofil von Spanplatten, Lage der erwünschten Schleifebene	36
Bild 5.5	Physikalisch-technische Eigenschaften verschiedener Plattenwerkstoffe	37
Bild 5.6	Lichtblitz-Ministroboskop testo 475	38
Bild 5.7	Sekunden-Anemometer testo 452	40
Bild 5.8	Übersicht der verschiedenen Sonden und ihrer Einsatzbedingungen	41
Bild 5.9	Der Strömungssensor	42
Bild 5.10	Optimale Anströmung des Kugelsensors	43
Bild 5.11	Abweichung für verschiedene Gierwinkel	43
Bild 5.12	Beispiel eines Protokolls der Siebanalyse	45
Bild 5.13	Die einzelnen Analysensiebe	46
Bild 5.14	Beispiel eines Vorversuchs mit 90 g Spänemasse zur Ermittlung der benötigten Siebzeit bezogen auf die Probenmasse	47
Bild 5.15	Darstellung der tatsächlich notwendigen, aus Vorversuchen ermittelten, Siebzeit und der bei der Versuchsauswertung angewandten Siebzeit	48
Bild 5.16	Die Analysenwaage SARTORIUS Excellence E 12000 S	51
Bild 5.17	Die Hochgeschwindigkeitskamera	52
Bild 5.18	Der EKTAPRO 1000 Processor	53

Bild 5.19	Das Bildschirmdisplay	
54		
Bild 5.20	Auf Millimeterpapier abgetragene Flugbahnen aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme	56
Bild 6.1	Scharfe und unscharfe Partikelverteilung	58
Bild 6.2	Gewichtsverteilung der Gesamtmasse bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	
59		
Bild 6.3	Gewichtsverteilung der Gesamtmasse bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	
59		
Bild 6.4	Gewichtsverteilung der Partikelgröße $< 63 \mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	60
Bild 6.5	Prozentuale Verteilung der Partikelgröße $< 63 \mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	61
Bild 6.6	Gewichtsverteilung der Partikelgröße $< 63 \mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	62
Bild 6.7	Gewichtsverteilung der Partikelgröße $= 250 \mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	63
Bild 6.8	Prozentuale Verteilung der Partikelgröße $= 250 \mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	64
Bild 6.9	Gewichtsverteilung der Partikelgröße $= 1 \text{ mm}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	66
Bild 6.10	Prozentuale Verteilung der Partikelgröße $= 1 \text{ mm}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	67
Bild 6.11	Gewichtsverteilung der Partikelgröße $= 2 \text{ mm}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	68
Bild 6.12	Prozentuale Verteilung der Partikelgröße $= 2 \text{ mm}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen	69
Bild 6.13	Verteilung der Partikel auf die verschiedenen Verteilungstypen am Beispiel eines repräsentativen Feldes bei einem Sägeblatt mit 60 Zähnen	70
Bild 6.14	Gesamtverteilung der Partikelmassen quer zur Sägeblattflucht in der 4. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	71
Bild 6.15	Gauß-Laplace-Verteilung mit Parametern	72
Bild 6.16	Näherungswerte für das Zeichnen der Glockenkurve der	

	Gauß-Laplace-Verteilung	73
Bild 6.17	Vergleich von Partikelverteilung und Normalverteilung in der Gesamtverteilung der 1. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	74
Bild 6.18	Vergleich von Partikelverteilung und Normalverteilung in der Gesamtverteilung der 5. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	74
Bild 6.19	Vergleich von Partikelverteilung und Normalverteilung in der Gesamtverteilung der 10. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	75
Bild 6.20	Vergleich von Partikelverteilung und Normalverteilung in der Gesamtverteilung der 13. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen	75
Bild 6.21	Vergleich von Partikelverteilung und Normalverteilung quer zur Sägeblattflucht bei Partikelgröße von 250 μm und Sägeblatt mit 60 Zähnen	76
Bild 6.22	Partikel des mittleren Feldes (G1) der ersten Reihe des Rasters	77
Bild 6.23	Partikel des mittleren Feldes (G13) der letzten Reihe des Rasters	78
Bild 6.24	Partikel mit 63 μm Größe aus den Feldern (G1) und (G13)	79
Bild 7.1	Das karthesische Koordinatensystem	80
Bild 7.2	Die Flugbahn im luftleeren Raum (nicht maßstäblich)	81
Bild 7.3	Skizze des fliegenden Partikels mit Kräften und Drücken	82
Bild 7.4	Die Berechnung des neuen Erhebungswinkels α	85
Bild 7.5	Die Partikelflugbahn in ruhender Luft unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes	86
Bild 7.6	Die Funktion der umgebenden Luftgeschwindigkeit	87
Bild 7.7	Die Flugbahn des Partikels unter dem Einfluß des Luftwiderstands und der umgebenden Luftgeschwindigkeit	88
Bild 7.8	Der Magnus-Effekt am rotierenden Partikel	90
Bild 7.9	Partikel aus dem Feld G7 mit maximal 500 μm Größe	92
Bild 7.10	Beim Zerspanungsprozeß erzeugte Spänewolke	93
Bild 7.11	Die Stroboskopaufnahme eines schiefen Stoßes zweier Kugeln mit unterschiedlicher Masse	94
Bild 7.12	Fallender Partikel im Raum mit Geschwindigkeiten	95
Bild 8.1	Annäherung der Partikelfläche durch verschiedene Geometrien	98
Bild 8.2	Tabelle der gemessenen und berechneten Partikelflächen und	

	Partikelmassen	99
Bild 8.3	Gemessene und angenäherte Verläufe von Partikelgewicht zu Siebmaschenweite	100
Bild 8.4	Flugbahnberechnung zur Cw-Wert-Bestimmung mit den eingesetzten Durchschnittswerten und Partikelgröße von 250 μm	103
Bild 8.5	Flugbahnberechnung der Partikelklassen von 500 μm Größe mit Cw-Wert, der für die Partikelklasse von 250 μm Größermittelt wurde	104
Bild 8.6	Verlauf des Cw-Wertes über die unterschiedlichen Partikelklassen	105
Bild 8.7	Der Cw-Wert über der Reynoldszahl aufgetragen	106
Bild 8.8	Cw-Wert für verschiedene Körperformen über der Reynoldszahl aufgetragen	107
Bild 8.9	Diagramm der ermittelten Cw-Werte über der berechneten Re-Zahl mit approximierter Funktion	109
Bild 8.10	Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion	109
Bild 8.11	Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion	110
Bild 8.12	Verlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl	111
Bild 8.13	Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion	112
Bild 8.14	Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion	112
Bild 8.15	Fluggeschwindigkeit der Partikelklasse von 63 μm Siebmaschenweite über der Flugweite aufgetragen	113
Bild 8.16	Flugbahndarstellung der Partikelklasse von 63 μm Siebmaschenweite	113
Bild 8.17	Fluggeschwindigkeit der Partikelklasse von 250 μm Siebmaschenweite über der Flugweite aufgetragen	114
Bild 8.18	Flugbahndarstellung der Partikelklasse von 250 μm Siebmaschenweite	114
Bild 8.19	Fluggeschwindigkeit der Partikelklasse von 1000 μm Siebmaschenweite über der Flugweite aufgetragen	115
Bild 8.20	Flugbahndarstellung der Partikelklasse von 1000 μm Siebmaschenweite	115

Bild 8.21	Direkter Vergleich von gemessenen und berechneten Flugbahnen	118
Bild 8.22	Gemessene und berechnete Partikelflugbahn	
119		
Bild 8.23	Gemessene und berechnete Partikelflugbahn	
119		
Bild 9.1	Der absolute Geschwindigkeitsvektor in x-Richtung	
124		
Bild 9.2	Der Geschwindigkeitsvektor in y-Richtung	124
Bild 9.3	Vier verschiedene Möglichkeiten der relativen Geschwindigkeit in x-Richtung	128
Bild 9.4	Neue Bezeichnungen der relativen Flugwinkel	131
Bild 9.5	Kraft auf den Partikel in x-Richtung	133
Bild 9.6	Kraft auf den Partikel in y-Richtung	134
Bild 9.7	Der Beschleunigungswinkel α_a	137
Bild 9.8:	Weginkremente im Steig- bzw. Sinkflug	141

1 Einleitung

Lange Zeit galten die Stäube aus der Holzverarbeitung zwar als unangenehm für die Beschäftigten, jedoch nicht als gesundheitsgefährdend. Dies änderte sich, als in England 1965 erstmals ein erhöhtes Adenokarzinomrisiko für Beschäftigte in der Möbelindustrie festgestellt wurde. In der Bundesrepublik bestätigte eine Studie Anfang der 80er Jahre die Risikofaktoren von Nasen-Rachentumoren. Dies führte zur Aufnahme von Buchen- und Eichenholzstäuben in die Liste der Maximalen-Arbeitsplatz-Konzentrationen (MAK), da sie sich als gefährliche B-Stoffe, das heißt als Stoffe mit begründetem Verdacht auf krebserzeugendes Potential, erwiesen hatten. 1985 folgte dann die Einstufung der Eichen- und Buchenholzstäube als A1-Stoff. Sie werden somit als nachweislich krebserregend für den Menschen angesehen. Die 1987 veröffentlichten Technischen Richtkonzentrationen (TRK) schreiben hierzu maximale Staubkonzentrationen von 2 mg/m^3 für Neuanlagen und 5 mg/m^3 für Altanlagen in der Holzbearbeitung vor.

Im Jahr 1984 wurde ein Parkettleger, der an einem Adenokarzinom der inneren Nase erkrankte, von der Holz-Berufsgenossenschaft im Rahmen der Öffnungsklausel des § 551 Abs. 2 RVO wie bei einer Berufskrankheit entschädigt. Seit dem 23.3.1988 ist nun das Adenokarzinom der Nasenhaupt- und Nasennebenhöhle durch Stäube von Eichen- und Buchenholz als Berufskrankheit anerkannt. /1/ Durch die 1993 verabschiedete Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) "Holzstaub" gilt derzeit ein Wert für die Staubkonzentration von 2 mg/m^3 für alle Anlagen und alle Holzarten. Für Anlagen, die diesen Wert nicht erreichen, galt bis Ende 1995 noch übergangsweise der Grenzwert von 5 mg/m^3 . Ab 1996 jedoch müssen auch diese Maschinen den niedrigeren Grenzwert erfüllen.

Durch die oben erwähnten, ständig verschärften Richtlinien zur zulässigen Staubkonzentration in der Holzverarbeitung wird es für die Hersteller von Holzbearbeitungsmaschinen aller Art immer wichtiger, eine wirksame Staubabsaugung zu gewährleisten. Das positive Ergebnis einer staubtechnischen Prüfung dient unter anderem als Grundlage für die Anerkennung des Bearbeitungsgerätes nach Anhang II der GefStoffV. Sie befreit den Betreiber beispielsweise vor Anzeige- und Überwachungspflichten, vor Beschäftigungsbeschränkungen, sowie vor Vor-sorgeuntersuchungen beim Umgang mit krebserzeugenden Gefahrstoffen, in diesem Falle

des Holzstaubes. Des weiteren ist die staubtechnische Prüfung, als Teilprüfung im Sinne des Gerätesicherheitsgesetzes (GSG), für die Erteilung des GS-Zeichens für Maschinen mit Staubemission Voraussetzung. /2/

Neben der Einhaltung von gültigen Grenzwerten, die der Maschinenhersteller einzuhalten hat, spielt die Ergonomie eines Arbeitsgerätes zunehmend eine größere Rolle als Verkaufsargument. In den großen Bereich der Ergonomie gehört aber, neben der guten Bedienbarkeit der Maschine, auch der für den Menschen möglichst schädigungslose Betrieb derselben. /3/

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 in Form leistungsfähiger Absauganlagen zu betreiben. Da es nicht möglich ist, die abgesaugte, staubbelastete Luft wieder in den Arbeitsraum zurückzuführen, wird nach einer Abscheidung der Späne und der größeren Staubpartikel die staubhaltige Luft an die Umgebungsluft abgegeben. Mit diesem Luftstrom geht jedoch auch die gesamte, in der Luft zur Raumheizung aufgebraachte Wärmeenergie verloren.

Wäre es nun möglich, die Absaugleistung bei Einhaltung der zulässigen Staubkonzentrationen zu reduzieren, so könnte die Absauganlage kleiner dimensioniert oder die Anzahl der Maschinen, welche mit der vorhandenen Anlage entsorgt werden, vergrößert werden, was die Investitionskosten pro Maschineneinheit senken würde. Durch den geringeren Bedarf an Wärmeenergie zur Raumbeheizung wäre eine Senkung der laufenden Kosten der Betriebe erreichbar. Dies würde zum einen die Wirtschaftlichkeit der Anlagen fördern und hätte zum anderen auch Auswirkungen auf den Umweltschutz, indem durch Brennstoffeinsparung ein Beitrag zur Senkung der momentan viel diskutierten CO₂ - Emission geleistet werden könnte.

Um die benötigte Absaugleistung zu reduzieren, sind neue Konzepte der Span- und Staubentsorgung notwendig. So kann beispielsweise daran gedacht werden, den Staub weiterhin abzusaugen, die Späne und größeren Partikel dagegen sedimentieren zu lassen und separat über anderweitige Mechanismen, beispielsweise einen Späneförderer, zu entsorgen. /4/ Um diese Konzepte umzusetzen, ist die Kenntnis der Kinematik des frei beweglichen Spans und

dessen Beeinflußbarkeit von großer Bedeutung.

Die vorliegende Studienarbeit befaßt sich mit dem realen und theoretischen Flug von Holzpartikeln, die beim Sägen von Spanplatten entstanden sind. Dazu wurde ein Versuchsstand konzipiert, an welchem mit Hilfe einer modifizierten Handkreissäge aus einer beschichteten Spanplatte die zur Untersuchung benötigten Partikel erzeugt werden konnten. Diese Partikel wurden dann auf ihr Flugverhalten hin untersucht. Die praktischen Versuchsergebnisse konnten schließlich mit einem programmierten Rechenschema, welches auf den theoretischen Flugbedingungen aufbaut, verglichen werden. Dabei wurde ein Verlauf des bisher unbekannten C_w -Wertes über die Partikelgröße ermittelt.

2 Stand der Forschung

An vielen und sehr unterschiedlichen Maschinen und Anlagen müssen sich die Konstrukteure mit Erfassungselementen für Staub und Späne befassen. Dabei werden die meisten Erfassungselemente nur mit Hilfe von Versuchen oder aufgrund der gesammelten Erfahrung des Konstrukteurs entworfen, da es bislang keine Möglichkeit der rechnerischen Auslegung von Späne- und Stauberfassungseinrichtungen gibt. Eine Optimierung der Erfassungselemente über Versuche und die Herstellung unterschiedlicher Prototypen ist jedoch sehr zeitaufwendig und kostenintensiv.

Die gängigen Vorschriften zur Späneentsorgung beschränken sich lediglich auf eine vorgeschriebene Mindestabsauggeschwindigkeit am Absaugstutzen von 20 m/s, bei feuchten Spänen und Grobteilen von 28 m/s. Ebenfalls vorgeschrieben sind ist die oben erwähnte maximale Staubkonzentration von 2 mg/m³ für Holzbearbeitungsmaschinen.

Einzelne Bereiche der Absaugproblematik wurden untersucht, so ist beispielsweise die pneumatische Förderung von Partikeln bekannt. Auch gibt es Betrachtungen zum Späneablauf bei Fräsen /5/ und W. Schmutzler wendet Erkenntnisse aus der Strömungslehre und Strömungsfördertechnik auf die Erfassungselemente von Holzbearbeitungsmaschinen an. /6/

Dagegen ist der Flug des Spans noch sehr wenig untersucht. Die auf den fliegenden Span einwirkenden Kräfte sind in der Theorie zwar bekannt, doch fehlen für viele Kräfte Kenngrößen aus Versuchen, um sie bestimmen zu können. /7/

3 Untersuchte Einflußgrößen auf den Flug des Spans

3.1 Spanmasse

Um die freie Bewegung eines Körpers im Raum beschreiben und berechnen zu können, ist es erforderlich dessen Masse zu kennen.

3.2 Abflughöhe

Bei der experimentellen Ermittlung der Flugweite eines Partikels ist die Abflughöhe zwischen dem Anfangspunkt des freien Fluges und dem Aufschlagpunkt am Boden eine in die Nachrechnung der Flugweite eingehende Größe. Je nach Abflughöhe hat der Partikel eine mehr oder weniger lange Fallzeit.

3.3 Luftgeschwindigkeit im Versuchsraum

Da die Luft, welche den fliegenden Partikel umgibt, in Wechselwirkung mit dem Partikel steht, kommt es darauf an, ihre Geschwindigkeit zu kennen. So kann die Relativgeschwindigkeit der an der Oberfläche vorbeiströmenden Umgebungsluft zur Spanbewegung ermittelt und berücksichtigt werden.

3.4 Anfangsgeschwindigkeit des Partikels

Die dem Span erteilte Energie hängt neben der Spanmasse in großen Teilen von der Anfangsgeschwindigkeit des Partikels ab, da sie mit der zweiten Potenz in die Gleichung der kinetischen Energie eingeht.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3-1)$$

3.5 Drehzahl des Werkzeugs

Der Span wird durch die Schnittgeschwindigkeit der Sägezähne aus dem Werkstoffverbund herausgelöst und verläßt dann das Sägeblatt in tangentialer Richtung. Dabei entspricht die Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs der maximalen Partikelgeschwindigkeit.

3.6 Spanform

Beim spanenden Bearbeiten von Werkstoff entstehen Partikel von unterschiedlichen Dimensionen und Formen. Inwiefern diese Partikelformen das Flugverhalten beeinflussen, gilt es zu untersuchen.

3.7 Cw-Wert

Abhängig von der Spanform haben die unterschiedlichen Partikel verschiedene Luftwiderstände. Der Cw-Wert ist ein Maß für den Zusammenhang zwischen Körperform und Luftwiderstand.

4 Versuchsaufbau

Das Ziel bei der Konstruktion des Versuchsstandes war ganz allgemein, einen möglichst freien Flug der entstehenden Späne und Staubpartikel unter definierten Bedingungen zu gewährleisten.

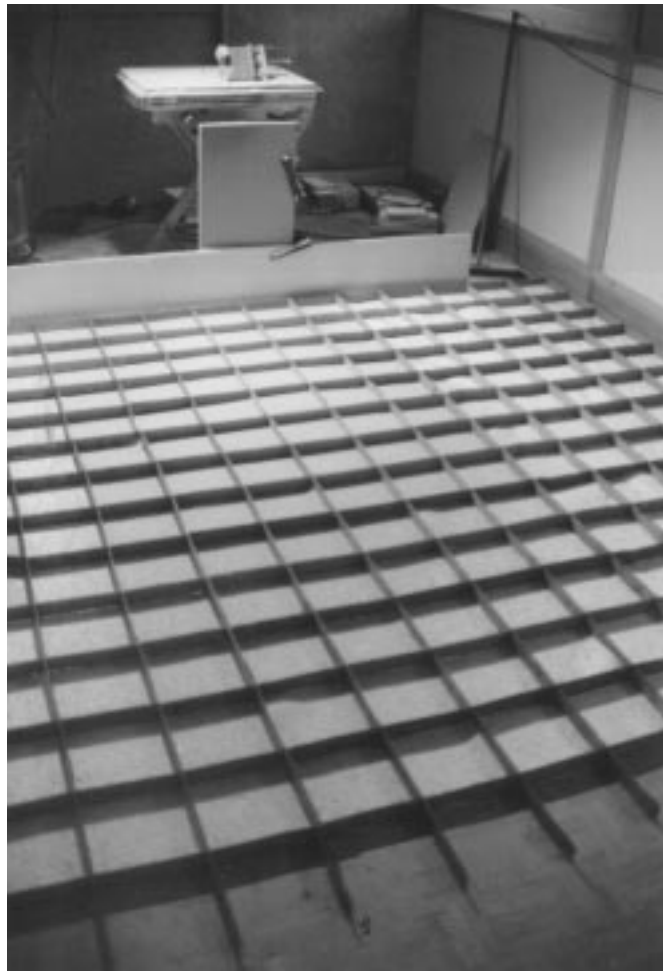


Bild 4.1: Abbildung des Versuchsstandes

4.1 Handkreissäge

Für die Zerspanung wurde eine Handkreissäge der Fa. Bosch mit der Typenbezeichnung GKS 66 CE verwendet. Das Hauptauswahlkriterium war dabei die Stabilität der Werkzeugdrehzahl, auch unter Last, durch die vorhandene Drehzahlregelung.

An der Maschine mußten verschiedene Modifikationen vorgenommen werden, um sie für die Durchführung der Versuche zu präparieren.

Normalerweise ist das Sägeblatt an Handkreissägen durch eine selbsttätig nachgeführte Schutzhaube verdeckt. Dieser Schutz öffnet sich, indem er durch das Werkstück zurückgeschoben wird. Hinter dem Werkstück schließt sich die Schutzvorrichtung dann wieder automatisch über eine Feder, so daß das Sägeblatt möglichst immer verdeckt läuft. Um einen freien Flug der Späne zu gewährleisten, mußte das Sägeblatt frei zugänglich sein. Darum wurde diese Schutzvorrichtung entfernt.

Da es sich bei Handkreissägen, aufgrund der hohen Werkzeugdrehzahl um gefahrenträchtige, handgeführte Maschinen handelt, besteht an der Maschine keine Möglichkeit der Arretierung des Einschalthebels, wie man dies beispielsweise von Handbohrmaschinen und Stichsägen etc. kennt. Zur Versuchsdurchführung wurde die Säge mit Hilfe einer Schraubzwinde arretiert, da der Einschalthebel während des Versuches nicht bedient werden konnte.

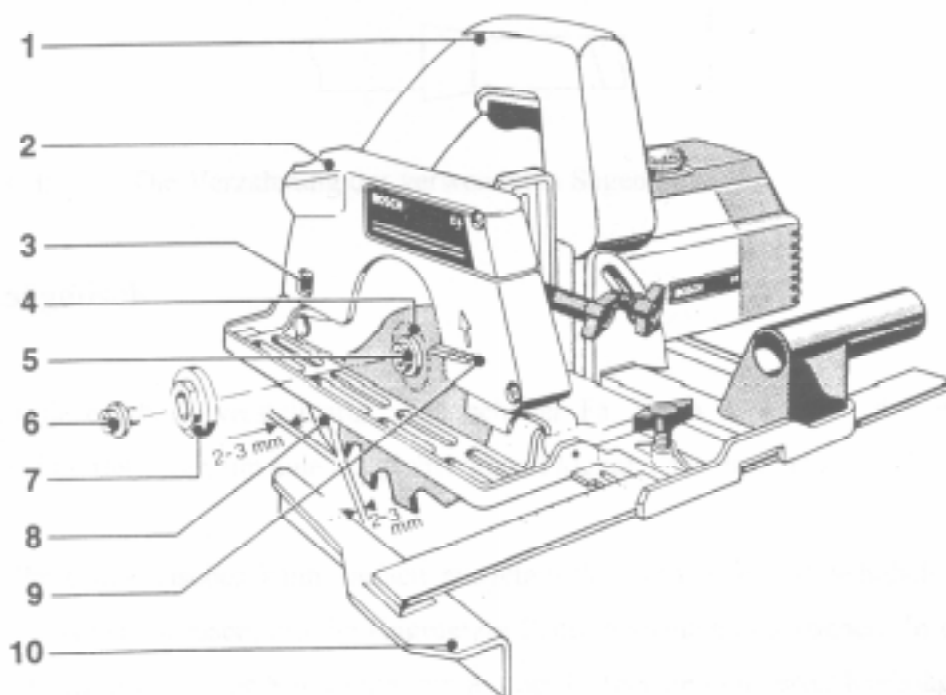


Bild 4.2: Die Kreissäge Bosch GKS 66 CE

4.2 Sägeblätter

Die Versuche wurden mit drei verschiedenen Sägeblättern der Fa. Bosch mit 16, 30 und 60 Zähnen und einem Durchmesser von 190 mm durchgeführt. Die aufgelöteten Hartmetallschneiden waren als Wechselverzahnung (Bild 4.3) ausgeführt.

Das Sägeblatt mit Wechselzahn und Hartmetallschneiden entspricht einer allgemein üblichen Standardausstattung. Ein Sägeblatt dieser Ausführung und Qualität wird üblicherweise als Lieferwerkzeug mit der Kreissägemaschine ausgeliefert.

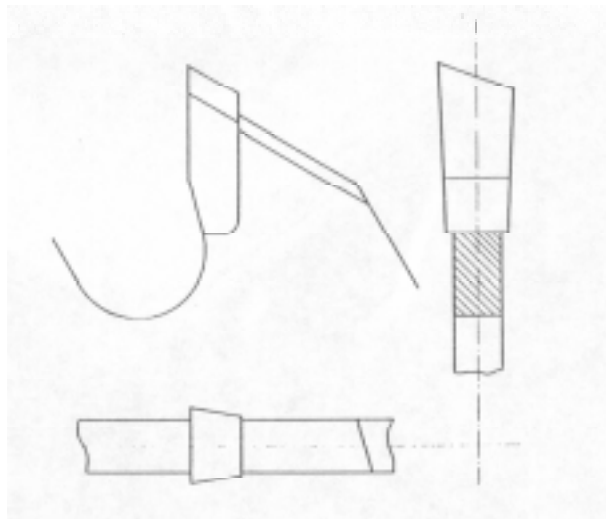


Bild 4.3: Die Verzahnung der verwendeten Sägeblätter

4.3 Sägetisch

Es wurde ein höhenverstellbarer Sägetisch der Fa. Festo verwendet, der auf die maximale Höhe eingestellt war, um eine möglichst lange Flugbahn der Partikel zu erreichen.

Die Platte des Tisches kann einfach ausgetauscht werden. Es ist lediglich notwendig, vier Holzschrauben zu lösen, um die eingesetzte Platte entnehmen zu können. In den Tisch wurde eine zurechtgeschnittene Spanplatte, mit auf der Unterseite montierter Kreissäge, eingesetzt.

In der Platte befand sich eine Aussparung in Werkstückdicke, durch welche die zugeführten Werkstücke auf den Boden fallen konnten.

Am Tischfuß wurde eine Spanplatte als Prallplatte mit einer Schraubzwinge angebracht. Sie verhinderte, daß Werkstücke ins Raster fallen konnten. Als letztes wurde noch ein Spanplattenstreifen mit der Prallplatte als Schutz vor Verfälschungen durch aufgewirbelten Staub



von den zu Boden fallenden Werkstücken, befestigt.

Bild 4.4: Der Sägetisch mit Beschriftung der angebrachten Spanplatten

Um ein Verkanten und Verklemmen der Probewerkstücke mit dem Tischgestell zu vermeiden, wurde ein Holzklötzchen als Leitholz mit einer Schraubzwinge befestigt. Es führte die durch die Tischplatte geschobenen Werkstücke, so daß diese ungehindert auf den Boden fallen

konnten.

Die zu sägenden Spanplatten konnten so über die Vorrichtung durch den Tisch geschoben werden und fielen, abgelenkt von der Prallplatte, unter den Tisch, von wo sie anschließend entnommen werden konnten.

4.4 Vorrichtung zur Werkstückzuführung

Beim regulären Arbeiten mit der Kreissäge werden die Werkstücke im Gegenlauf mit Handvorschub gegen das Sägeblatt geführt. Dabei wirkt die Schnittkraft gegen die Auflagefläche des Tisches. Das Werkstück wird dabei im Schnitt immer gegen den Tisch angedrückt und von diesem gehalten und geführt. Die Späne werden von der Sägeblattabdeckung aufgefangen und mit der Absaugung abgeführt. Bei dieser Arbeitsweise entstehen jedoch keine frei fliegenden Späne, die für eine Untersuchung der Flugbahn geeignet wären.

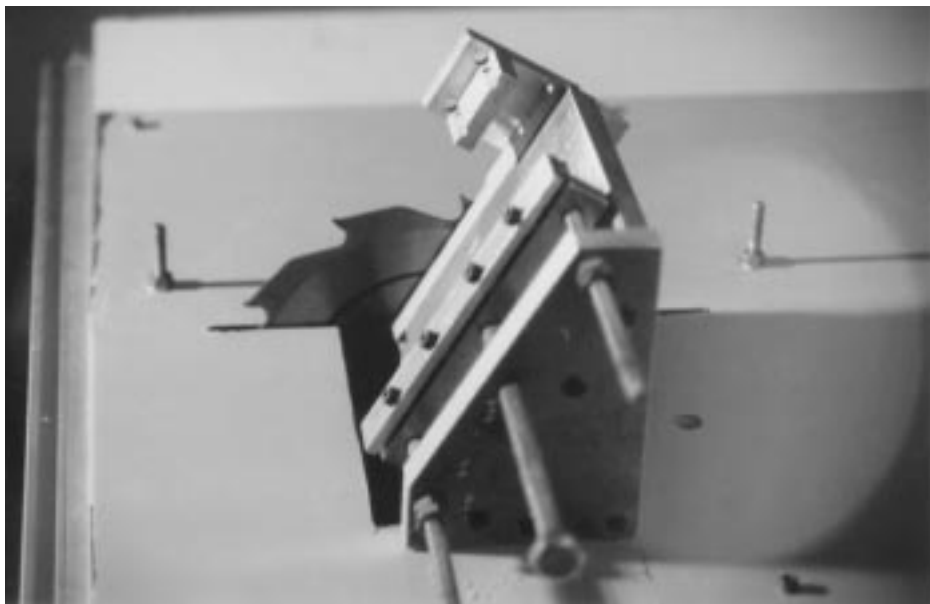


Bild 4.5: Die Zuführvorrichtung

Um mit dem Kreissägeblatt frei fliegende Späne erzeugen zu können, muß das Sägeblatt am Ende des Schnitts ins Freie austreten können. Dies bedeutet aber, daß hier das Werkstück

keine Auflage besitzen kann. Es besteht also die Gefahr des Abhebens und Wegschleuderns des Werkstücks durch die Schnittkraft. Darum wird eine Zuführvorrichtung für die Werkstücke benötigt, die dies zu verhindern in der Lage ist.

4.4.1 Aufgaben der Zuführvorrichtung

Das Werkstück muß von der Vorrichtung sauber und sicher geführt werden. Dabei muß die Führung eine einstellbare, gleichmäßige Spanbreite ermöglichen. Um die vorbereiteten Werkstücke mehrmals bearbeiten zu können, ist es notwendig, die Vorrichtung auf verschiedene Werkstückbreiten einstellen zu können. Die Vorrichtung muß auf dem Tisch verschoben werden können, damit der Spanentstehungspunkt, das bedeutet der Punkt, an dem die Schneide den Werkstoff verläßt, bezüglich des verwendeten Sägeblatts eingestellt werden kann. Darüber hinaus darf der Späneflug durch die Vorrichtung so wenig wie irgend möglich beeinträchtigt werden.

4.4.2 Konstruktion der Zuführvorrichtung

Die Vorrichtung wurde als eine nach hinten offene, dreieckigen Kastenform konstruiert, deren schräge Fläche mit 60 Grad zur Tischfläche geneigt ist. Auf dieser Fläche wird das Werkstück geführt. Für alle prismatischen Teile wurden Aluminiumplatten verwendet, die mit zum Teil versenkten Innensechskantschrauben verbunden wurden.

Auf der Oberseite wird das Werkstück durch zwei L-förmige Winkelanschlätze gegen das Abheben durch die Schnittkraft gehalten. Der vom Sägeblatt abgewandte Anschlag ist zudem auf die Breite des verwendeten Werkstücks einstellbar. Er wird durch eine Stellschraube und zwei Befestigungsschrauben verstellt und gehalten. Für die Stellschraube wurde eine M6-Sechskantschraube verwendet, da deren Steigung 1 mm beträgt. So kann durch Orientierung an den definierten Flächen des Sechskants der Anschlag millimeterweise durch ganze Umdrehungen der Stellschraube einfach und ohne Meßmittel bewerkstelligt werden. Die beiden Spannschrauben haben die Aufgabe, den Anschlag stabiler zu machen, vor allem, wenn er für kleine Werkstückbreiten weit ausgefahren ist.

Über Langlöcher kann die gesamte Vorrichtung auf dem Sägetisch entlang der Flucht des Sägeblatts verschoben werden. Damit ist es möglich, den Austrittspunkt des Sägeblatts aus dem Werkstoff, auch bei unterschiedlichen Werkstoffdicken und verschiedenen Sägeblättern, genau einzustellen.

Die Konstruktionszeichnungen sowie die Stückliste der Zuführvorrichtung für die Werkstücke befinden sich im Anhang III.

4.4.3 Bedienung der Zuführvorrichtung

Bei einem Wechsel der Werkstückdicken oder des Sägeblatts muß die Vorrichtung durch Lösen der Befestigungsschrauben so in den Langlöchern verschoben werden, daß der Austrittspunkt des Sägeblattes im höchsten Punkt der Schneidenflugbahn liegt. Außerdem sind bei größeren Dickenänderungen des Werkstücks die Winkelanschlüge auszutauschen oder anzupassen.

Vor dem Versuch wird der Anschlag auf die gewünschte Schnittbreite durch Drehen der Stellschraube eingestellt und die Befestigungsschrauben gleichmäßig mit den gekonterten Muttern gespannt. Das Werkstück wird dann entlang dem Anschlag auf das rotierende Sägeblatt zugeführt. Der Vorschub erfolgt dabei von Hand. Das Werkstück kann nach dem Bearbeitungsvorgang durch eine Aussparung durch den Tisch auf den Boden fallen, so daß eine schnelle Folge von zugeführten Werkstücken möglich ist. Dies wirkte sich besonders auf die durchgeführten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen positiv aus, da hier nur kurze Aufnahmezeiträume zur Verfügung standen.

4.5 Raster zum Auffangen der Späne

Zur Ermittlung der Flugweite der Späne wurde ein Raster auf den Boden vor dem Sägetisch ausgelegt. Die Größe des Rasters wurde in der Länge mit 2,73 m so groß gewählt, daß die Flugweite der Späne sicher abgedeckt werden konnte. In der Breite war das Maß des Rasters auf die Breite der Staubmeßkabine in welcher die Versuche stattfanden, ebenfalls 2,73 m,

beschränkt.

Das Raster bestand aus Wellpappe. Dabei wurden Streifen, wie in Bild 4-3 dargestellt, von 50 mm Breite geschnitten, welche durch Einkerbungen ineinandergesteckt werden konnten. Durch das einfache Stecken war es möglich, das Raster beim Entnehmen der Proben nach und nach abzubauen. Dies erleichterte die Entnahme der Späne wesentlich und beugte so Verfälschungen des Ergebnisses durch versehentliches Verschieben des Rasters vor.

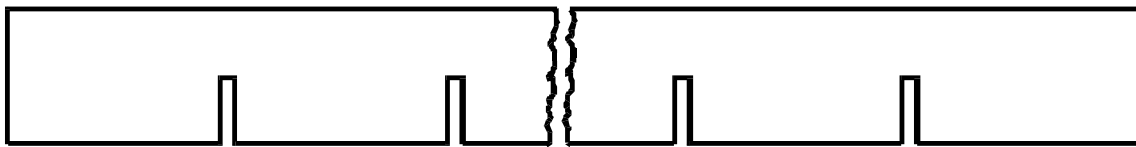


Bild 4.6: Kartonstreifen des Auffangrasters

Um die gesamte Spänefraktion mit möglichst wenig Verlustmasse in Papiertüten verpacken zu können, wurden die quadratischen Fächer des Rasters mit quadratisch geschnittenem DIN A4 - Schreibmaschinenpapier ausgelegt. Somit war das Rastermaß auf die Breite des Papiers mit 21 cm festgelegt. /8/ Diese Papierunterlage war, um Verwechslungen vorzubeugen, mit der jeweiligen Feldnummer beschriftet.

Die Numerierung der Rasterfelder, vom Sägeblatt aus betrachtet, begann in der vorderen, linken Ecke mit Feldnummer "A 1" und endete in der hinteren, rechten Ecke mit der Feldnummer "M 13". Die Flucht des Sägeblatts befand sich genau mittig zu den mittleren Felder "G1" bis "G13".

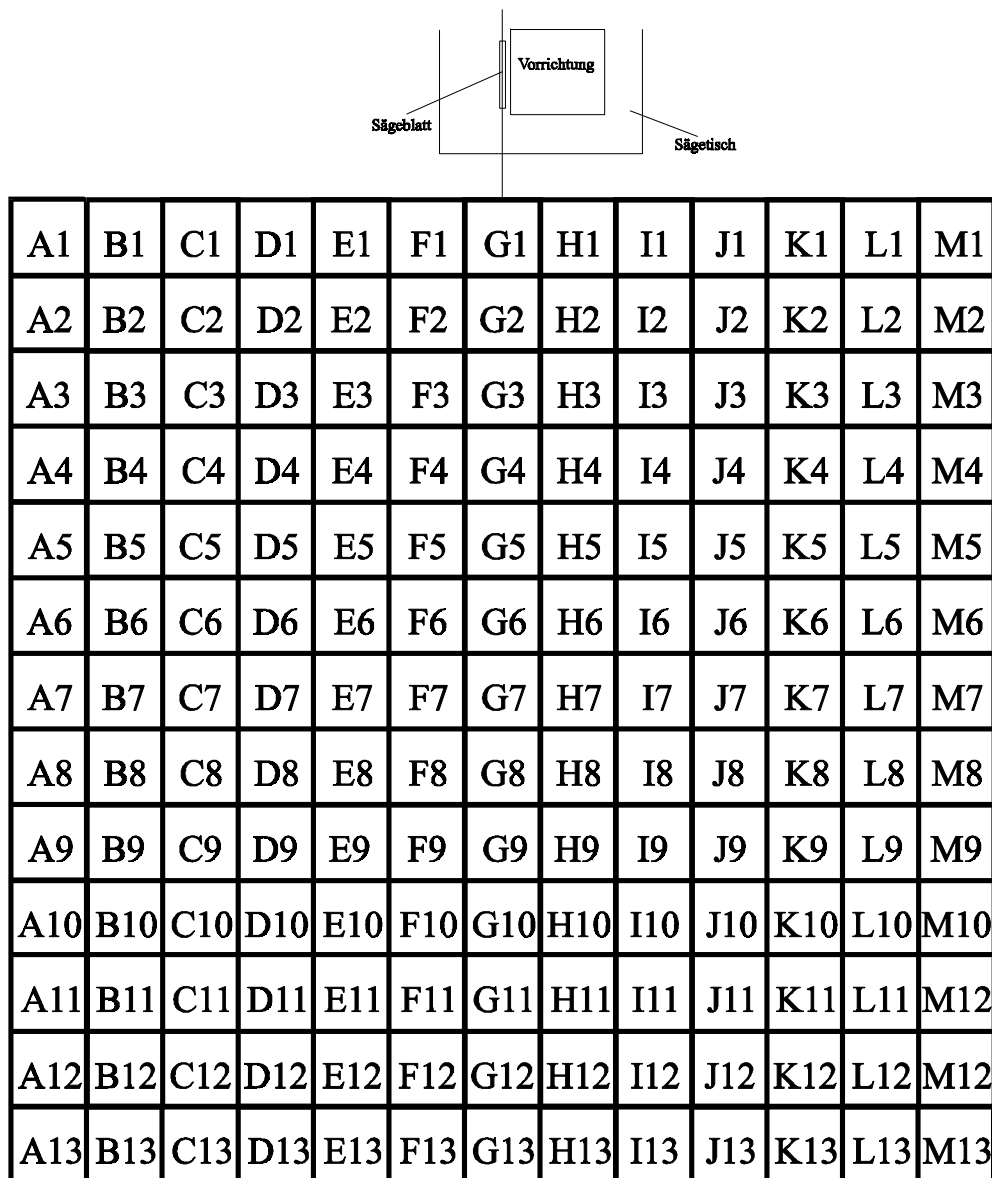


Bild 4.7: Die Aufstellung von Säge und Auffangraster samt Feldnumerierungen

4.6 Versuchswerkstücke

Die verwendeten 19 mm starken Spanplatten wurden in Versuchswerkstücke von 220 x 130 mm geschnitten. Vor allem das Längenmaß konnte nicht größer gewählt werden, da die Werkstücke sonst nicht mehr ungehindert durch den Tisch auf den Boden hätten fallen können.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Auswahl eines geeigneten Verfahrens der Zerspanung

Aus der Sicht des Arbeitsmediziners sind die feinen Stäube, also die lungengängigen Holzpartikel mit einem Partikeldurchmesser $< 5 \mu\text{m}$ (alveolengängiger Staub), besonders kritisch, da diese das Krebsrisiko verursachen. Für die Späneerfassung in der Absaugung hingegen erweisen sich Partikel mit hoher Anfangsgeschwindigkeit und größerer Masse als problematisch, da eine große Absaugleistung benötigt wird, um sie zu erfassen. Beim ausgewählten Verfahren sollten also möglichst beide Partikelgruppen entstehen.

Bei den sonst üblichen Verfahren der Holzbearbeitung entstehen zumeist nicht beide gewünschte Spanarten. So werden beim Verfahren Schleifen zwar große Mengen feinsten Partikel erzeugt, doch fehlen die großen Partikel gänzlich. Beim Umfangsplanfräsen, unter den Schreibern auch als Hobeln bezeichnet, verhält es sich genau konträr, es entstehen große, jedoch nicht in ausreichendem Maße feine Partikel. Einzig beim Fräsen entstehen beide Spänegruppen. Hier kann jedoch bei Handvorschub kein ausreichend großer Werkzeugdurchmesser realisiert werden, um einen entsprechend weit von Tisch und Maschine entfernt liegenden Spanentstehungspunkt zu erreichen.

So erweist sich das Verfahren des Kreissägens als idealstes Verfahren, zumal durch den großen Werkzeugdurchmesser bei entsprechender Verwendung einer Handkreissäge ein möglichst freier Flug der entstehenden Späne ermöglicht werden kann. Zudem entstehen sowohl feinste als auch größere Partikel, wie in einer früheren Untersuchung festgestellt wurde. /9/

Das Verfahren Sägen lässt sich nach DIN 8589, Teil 6 in der Kategorie "Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden" in der Hauptgruppe "Trennen" einordnen, wie nachfolgendes Bild 5.1 dies verdeutlicht. /10 /

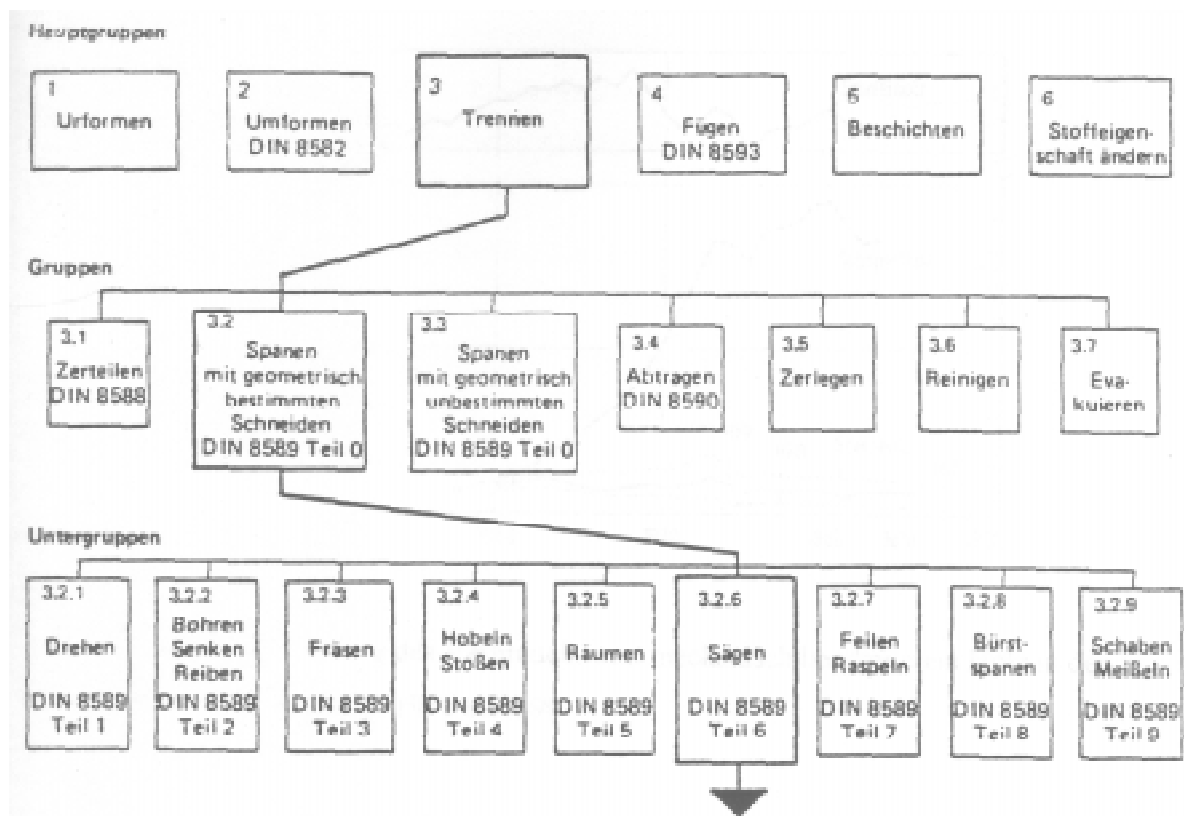


Bild 5.1: Einteilung des Verfahrens Sägen nach DIN 8589, Teil 6

5.2 Auswahl des Zerspanungswerkstoffes

Für die Auswahl des Werkstoffes war es wichtig, einen möglichst homogenen Werkstoff auszuwählen, um bei allen Schnitten gleiche, definierte Schnittbedingungen zu gewährleisten. Deshalb kamen alle Massivhölzer, aufgrund ihrer inhomogenen Struktur, nicht in Betracht. Schließt man die Massivhölzer aus, so verbleiben immer noch eine große Anzahl von verschiedenen Holzwerkstoffen zur Wahl.

Unter den Holzwerkstoffen fiel die Wahl auf melaminbeschichtete Spanplatten, die es sich nicht zuletzt auch deshalb zu betrachten lohnt, da diese Platten sehr breite Anwendung finden. Wie sich aus Bild 5.2 entnehmen läßt, sind Spanplatten, nach dem Schnittholz, die mit großem Abstand am häufigsten verwendeten Holzwerkstoffe. Der Pro-Kopf-Verbrauch in der BRD liegt bei 60-70 kg Spanplatten jährlich, was ca. 0,1 m³ Spanplattenvolumen entspricht.

/11/

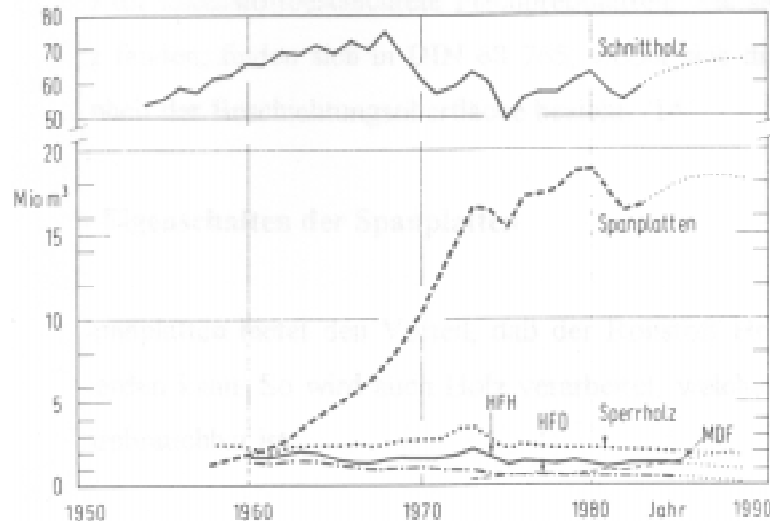


Bild 5.2: Entwicklung des Verbrauchs von mechanisch bearbeitetem Holz in den EG-Ländern von 1950 bis 1990

Es lag also nahe, mit melaminbeschichteten Spanplatten einen Werkstoff zu wählen, der sehr häufig, vor allem in der industriellen Möbel- und Küchenfertigung, bearbeitet werden muß.

5.2.1 Normung der Spanplatten

Da Holzwerkstoffe, wie Spanplatten, keine reinen Naturprodukte, sondern technologisch produzierte Werkstoffe mit Holz als Basiswerkstoff sind, lassen sie sich durch die Normung in ihren Eigenschaften vereinheitlichen und standardisieren.

Die Eigenschaften der Flachpreßplatten für allgemeine Zwecke werden in DIN 68 761, Teil 1 als sogenannte FPY-Platten, sowie mit verschärften Ansprüchen an die feinspanige Oberfläche für Beschichtungszwecke in DIN 68 761, Teil 4 als FPO-Platten definiert. /12/

Die Vorzugsmaße der Nenndicken für Spanplatten werden in DIN 68 760 festgelegt. /13/

Weitere Bestimmungen für kunststoffbeschichtete Flachpreßplatten, wie sie bei den Zerspanversuchen Verwendung fanden, finden sich in DIN 68 765, wobei sich diese Norm in erster Linie auf die Beschaffenheit der Beschichtungsoberfläche bezieht. /14/

5.2.2 Herstellung und Eigenschaften der Spanplatten

Die Herstellung von Spanplatten bietet den Vorteil, daß der Rohstoff Holz wesentlich vollständiger ausgenutzt werden kann. So wird auch Holz verarbeitet, welches für die klassische Sägewerkstechnologie unbrauchbar ist.

Außerdem werden zur Herstellung der Späne inzwischen zunehmend Althölzer auf Kosten des Waldholzes eingesetzt, wie Bild 5.3 dies verdeutlicht.

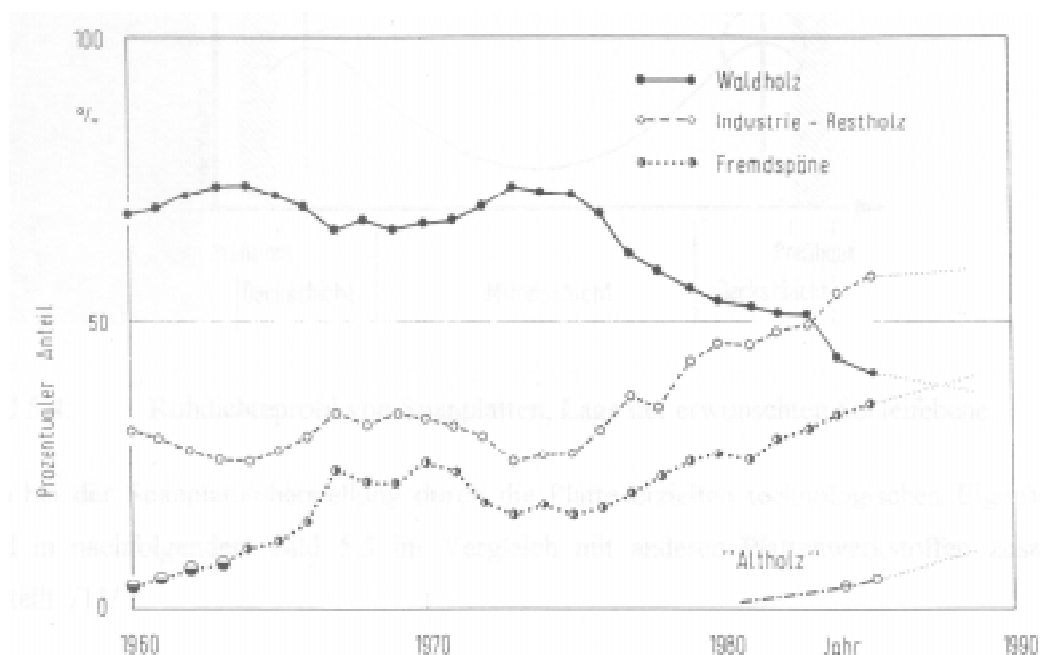


Bild 5.3: Entwicklung der prozentualen Anteile der Rohmaterialien für die Spanplattenherstellung in der BRD

Die eingesetzten Hölzer werden zuerst unter Einsatz verschiedener Technologien bis auf Spangröße zerkleinert, um anschließend in Düsenrohr- oder Trommeltrocknern auf die

notwendige Holzfeuchte heruntergetrocknet zu werden.

Um aus den getrockneten Spänen eine Platte herzustellen, müssen diese mit einem Bindemittel, normalerweise mit Harnstoff-Formaldehydharz, in Verbindung gebracht werden. Diese Be-leimung der Späne geschieht in der Regel in Röhrenmischern.

Auf einen Spanträger werden dann in verschiedenen Schichten die Späne zu einem Spanvlies gestreut, bevor sie mit einer Heißpresse verdichtet werden und der Leim dadurch ausgehärtet wird. Nach dem Abkühlen werden die Platten mit Breitbandschleifmaschinen auf ihre Endstärke kalibriert. Dabei wird eine eventuell locker sitzende Preßhaut entfernt und die Oberfläche der Platte in einen Bereich maximaler Rohdichte gelegt, was Bild 5.4 zeigt.

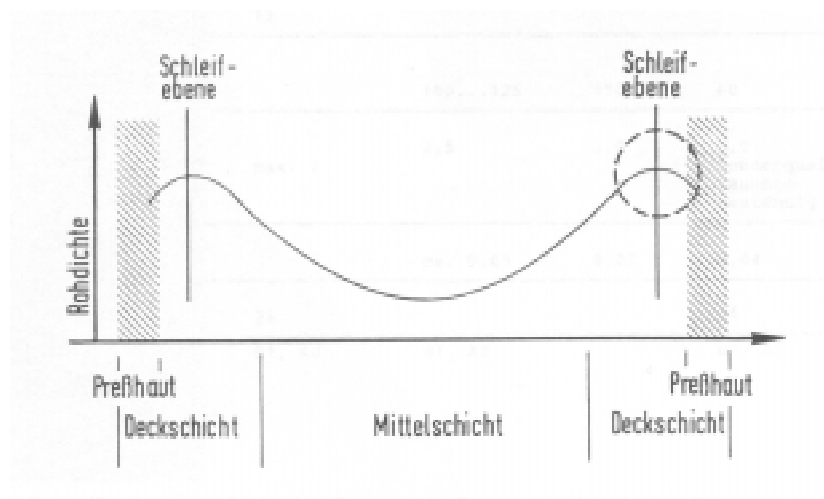


Bild 5.4: Rohdichteprofil von Spanplatten, Lage der erwünschten Schleifebene

Die bei der Spanplattenherstellung durch die Platte erzielten technologischen Eigenschaften sind in nachfolgendem Bild 5.5 im Vergleich mit anderen Plattenwerkstoffen zusammengestellt. /11/

	kunstharzgeb. Holzspanplatte	sementgeb. Holzspanplatte	gipsgeb. Holzspanplatte	Gipsfaser- platte	Gipskarton- platte	Asbestzement- tafel
Dicke (mm)	8...38	8...28	12,5	12,5	9,5...25	4...20
Rohdichte (kg/m³)	610...735	max. 1250	1000...1200	1150	850...1100	über 1700
Biegefestigkeit (N/mm²)	8...20	9...13	5...11	5,5	1,2...6,6	mind. 20
Elastizitätsmodul (N/mm² · 10³)	2,4...4,5	mind. 3	2,5...4,5	3	3...5	mind. 18
Quersugfestigkeit (N/mm²)	0,07...0,4	mind. 0,4	0,25...0,4	0,2		
Abhebefestigkeit (N/mm²)	0,8...1		0,25...0,35	0,22	0,24	
Druckfestigkeit (N/mm²)	1,3...3,4	15				mind. 100
Impact- Festigkeit, BS5669 (mm)	ca. 300		100...125	110	60	
Dickenquellung (%) nach 2 h nach 24 h Wasserlagerung	8 12...15	max. 2	2,5	3,0	3,0 Sonderqual. feuchte- beständig	
Lineare Ausdehnung 20°/30% - 20°/85%	ca. 0,25		ca. 0,09	0,07	0,04	
Schalldämmung dB	24...28	32			26	26
Brandverhalten	B1, B2	B1, B2	B1, A2		B1, A2	A1

Bild 5.5: Physikalisch-technische Eigenschaften verschiedener Plattenwerkstoffe

5.3 Messung der Sägeblattdrehzahl

5.3.1 Meßgerät zur Drehzahlmessung

Zur Messung der Werkzeugdrehzahl wurde das Lichtblitz-Ministroboskop testo 475 verwendet (Bild 5.6).

Das Gerät besteht aus einem handlichen Lichtblitzgeber, etwa in der Größe einer Taschenlampe. Die einstellbare Blitzfrequenz liegt zwischen 1,66 und 333,3 Hz, so daß ein Meßbereich von 100 bis 20.000 Umdrehungen pro Minute gegeben ist.

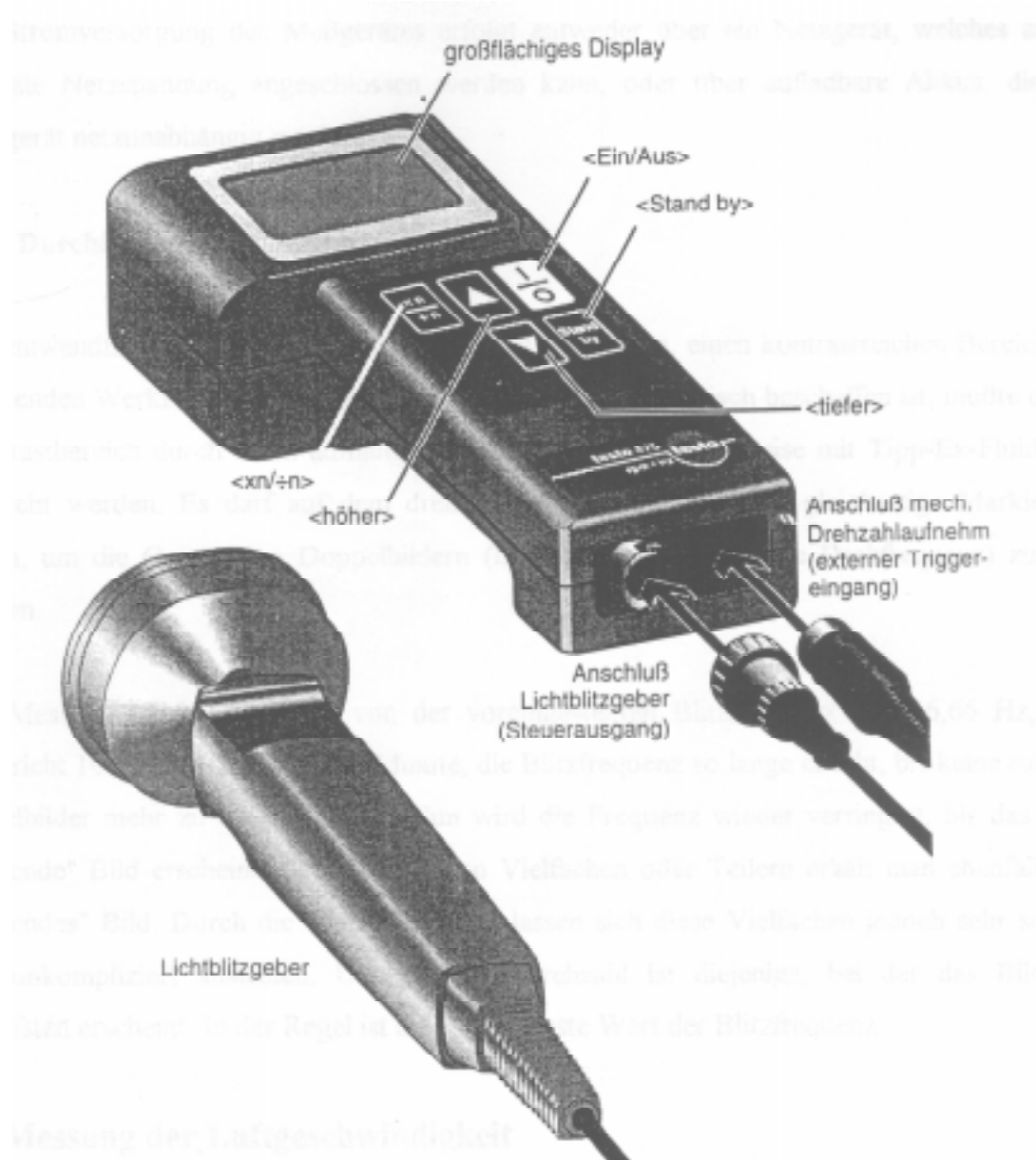


Bild 5.6: Lichtblitz-Ministroboskop testo 475

Die Anzeige der Einstellungen erfolgt mit Hilfe eines Meßgeräts mit Display. Über zwei Frequenz Tasten (höher und tiefer) läßt sich die Blitzfrequenz des Lichtblitzgebers beeinflussen. Des weiteren besitzt das Gerät eine Fastfinder-Taste, mit der schnell über die Frequenz Tasten Vielfache der eingestellten Frequenz realisiert werden können.

Die Stromversorgung des Meßgerätes erfolgt entweder über ein Netzgerät, welches an die normale Netzspannung angeschlossen werden kann, oder über aufladbare Akkus, die das Meßgerät netzunabhängig machen.

5.3.2 Durchführung der Messung

Um einwandfreie Meßergebnisse zu erzielen, ist es wichtig, einen kontrastreichen Bereich des rotierenden Werkzeugs anzublitzen. Da das Sägeblatt symmetrisch beschaffen ist, mußte dieser Kontrastbereich durch einen auffälligen, weißen Strich beispielsweise mit Tipp-Ex-Fluid aufgebracht werden. Es darf auf dem drehenden Werkzeug nur eine gleichartige Markierung geben, um die Gefahr von Doppelbildern (Blitzfrequenz = doppelte Drehfrequenz) zu vermeiden.

Zur Messung wird, ausgehend von der voreingestellten Blitzfrequenz von 16,66 Hz, dies entspricht 1000 Umdrehungen pro Minute, die Blitzfrequenz so lange erhöht, bis keine ruhigen Einzelbilder mehr zu erkennen sind. Nun wird die Frequenz wieder verringert, bis das erste "stehende" Bild erscheint. Bei ganzzahligen Vielfachen oder Teilern erhält man ebenfalls ein "stehendes" Bild. Durch die Fastfinder-Taste lassen sich diese Vielfachen jedoch sehr schnell und unkompliziert austesten. Die gesuchte Drehzahl ist diejenige, bei der das Bild am schärfsten erscheint. In der Regel ist dies der höchste Wert der Blitzfrequenz.

5.4 Messung der Luftgeschwindigkeit

5.4.1 Meßgerät zur Luftgeschwindigkeitsmessung

Bei der Messung der Luftgeschwindigkeit hinter dem Sägeblatt kam ein Sekunden-Anemometer testo 452 zum Einsatz (Bild 5.7). 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.

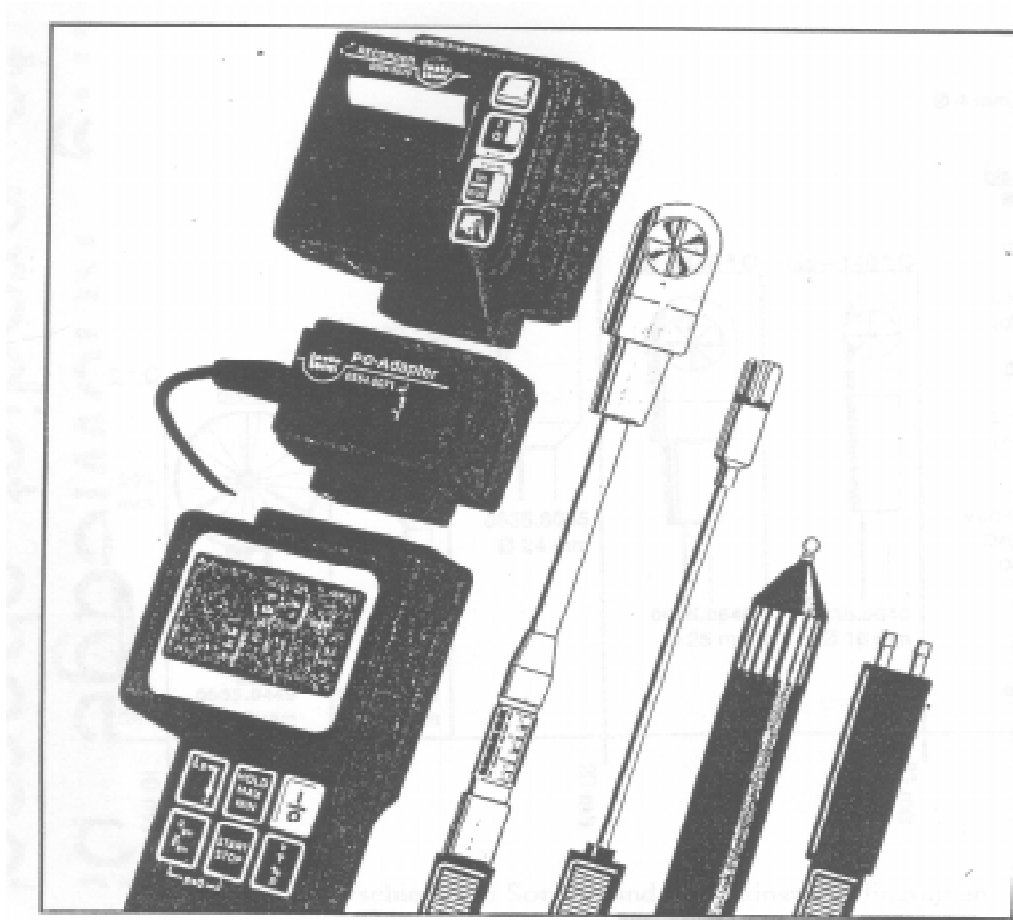


Bild 5.7: Sekunden-Anemometer testo 452

5.4.2 Übersicht über die einsetzbaren Sondentypen

Im folgenden Bild 5.8 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.

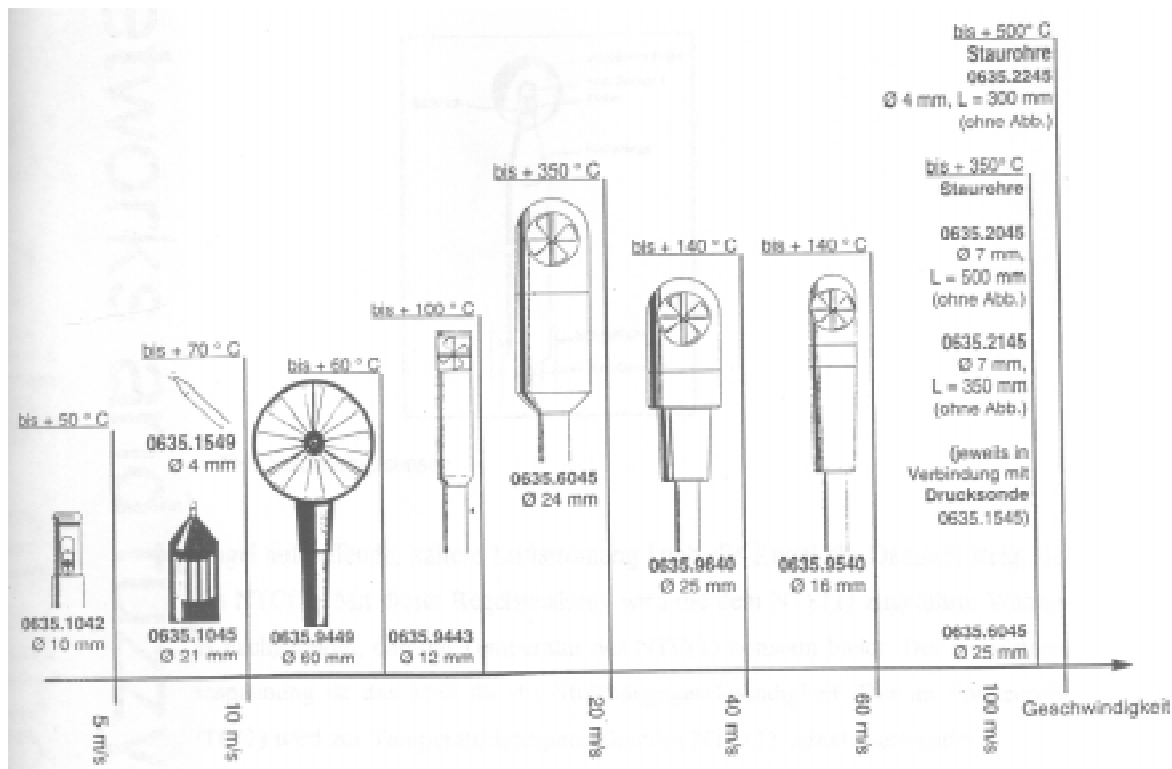


Bild 5.8: Übersicht der verschiedenen Sonden und ihrer Einsatzbedingungen

5.4.3 Ausgewählter Sondentyp

Der Strömungsmeßbereich des Gerätes von 0 bis 100 m/s kann nicht mit einer einzigen Sonde abgedeckt werden. Vielmehr gibt es für jeden Geschwindigkeitsbereich einen optimalen Sondentypus. Für die Luftgeschwindigkeitsmessung um das Sägeblatt kann der thermische Aufnehmer, welcher besonders für genaue Messungen zwischen 0 und 10 m/s geeignet ist, als besonders geeignet angesehen werden.

5.4.4 Funktionsprinzip des thermischen Strömungssensors

Der Strömungssensor besteht aus einer Aluminium-Kugel, die in einem Sackloch einen NTC(1)-Temperatursensor enthält. Dieser wird mit elektrischem Strom auf eine Temperatur von 100 °C erhitzt. Die joulsche Wärme wird kugelsymmetrisch an das Aluminium abgeführt.

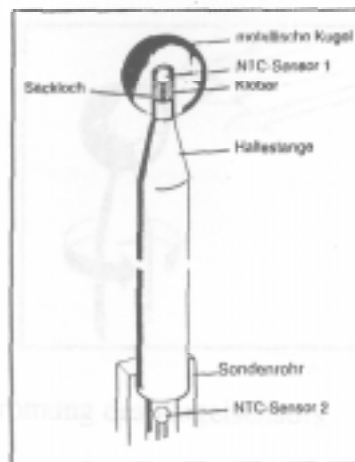


Bild 5.9: Der Strömungssensor

Die auf die Kugel auftreffende, kältere Luftströmung kühlt die Kugel ab. Dadurch steigt der Widerstand des NTC(1). Mit dieser Regelschaltung wird die dem NTC(1) zugeführte Wärmeleistung derart nachgeregelt, daß die Temperatur des NTC(1) konstant bleibt. Der Regelstrom bzw. die Heizspannung ist das Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Der im Sondenrohr eingebaute NTC(2) wird zur Temperaturkompensation des NTC(1)-signals verwendet.

5.4.5 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, muß dieser Anströmungszustand möglichst eingehalten werden.

5.4.6 Fehler beim Messen mit einem thermischem Kugelsensor

Beim Drehen des Kugelsensors um die Haltestange, bei senkrechter Strömung bezüglich der Stange, ist die Meßwertabweichung $< 2,5 \%$ des realen Meßwerts. Dargestellt ist diese Position in Bild 5.10. Die Umströmung der Haltestange hat in dieser Lage keinen Einfluß auf die Luftgeschwindigkeitsmessung durch den thermischen Strömungssensor.

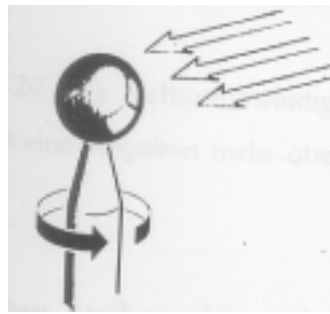


Bild 5.10: Optimale Anströmung des Kugelsensors

Wird der Kugelsensor jedoch, wie in Bild 5.11 dargestellt, mit der Haltestange verkippt, (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. Im Bild 5.11 sind die Abweichungen für verschiedene Gierwinkel ablesbar.

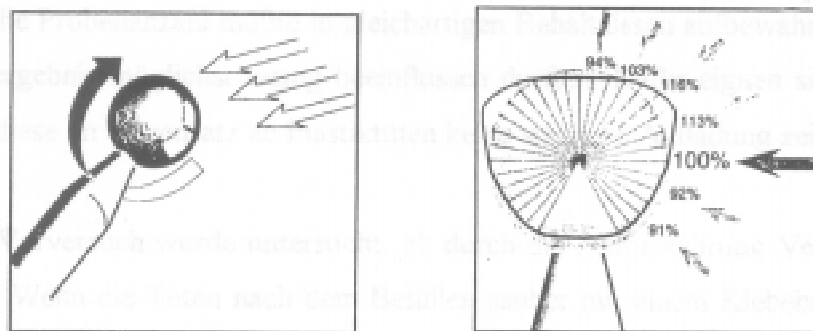


Bild 5.11: Abweichungen für verschiedene Gierwinkel

Trotz dieser genauen Kenntnis der unvermeidlichen Meßwertabweichung kann nicht genau gesagt werden, wie groß die Abweichung der Luftgeschwindigkeitsmessung hinter dem Sägeblatt tatsächlich ist. Zwar wurde die Haltestange senkrecht zur Sägeblattachse gehalten, doch kommt es durch die zweifelsfrei turbulente Strömung zur schrägen Anströmung der Kugel, 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.

Messungen zwischen 10 und 20 m/s Luftgeschwindigkeit sind möglich, es werden vom Hersteller jedoch ausdrücklich keine Angaben mehr über die Genauigkeit in diesem Bereich gemacht.

5.5 Auswahl einer geeigneten Aufbewahrungsmöglichkeit für die Späneproben

Da es aus Zeitgründen nicht möglich war, die gewonnenen Proben sofort nach dem Versuch mittels der Siebanalyse auszuwerten, mußte eine Möglichkeit gefunden werden, die Späneproben in geeigneter Weise aufzubewahren. Bei jedem der drei auszuwertenden Versuche sind jeweils 169 unterschiedliche Proben auszuwerten.

Diese große Probenanzahl mußte in gleichartigen Behältnissen aufbewahrt werden, welche das Versuchsergebnis möglichst wenig beeinflussen durften. Dafür eignen sich besonders Papier-tüten, da diese im Gegensatz zu Plastiktüten keine statische Aufladung zeigen.

In einem Vorversuch wurde untersucht, ob durch die Aufbewahrung Verluste beim Umfüllen entstehen. Wenn die Tüten nach dem Befüllen sauber mit einem Klebeband verschlossen und beim Entleeren der geklebte Falz gelöst wurde, konnte kein Verlust an Probenmasse durch Wiegen ermittelt werden. Die allenfalls feinsten Stäube, die der Tüte noch anhaften konnten, waren weit unter der Wägegenauigkeit.

5.6 Dokumentation der Siebergebnisse in einer Tabelle

Das ermittelte Gewicht der einzelnen Siebe, der nachfolgend genauer 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 Späne-fraktion an der Gesamtprobe, sowie die Gewichts Differenz der eingesetzten Probemasse zur Summe der ermittelten Einzelmassen errechnet. Des weiteren wurde die

Siebzeit vermerkt.

Das folgende Bild 5.12 zeigt beispielhaft eines der 507 erstellten Siebprotokolle.

Feld G8:				
Probemasse:	27,2			
Siebzeit:	28 min			
Einheiten:	g	g	g	%
Maschenweite:	Leergewicht:	Siebgewicht:	Einzelmassen	Prozentualer Anteil
Wanne	251,8	256,1	4,3	15,81
63µm	336,3	344	7,7	28,31
125µm	343,5	349,5	6	22,06
250µm	358,6	360,7	2,1	7,72
500µm	385,4	390,5	5,1	18,75
1mm	365	366,8	1,8	6,62
2mm	564,9	565,1	0,2	0,74
Gesamtmasse:	27,2			100
Massendifferenz:	0			

Bild 5.12: Beispiel eines Protokolls der Siebanalyse

5.7 Analyse der Spangrößenverteilung mittels Siebanalyse nach DIN 66 165

Die Spänefraktionen der einzelnen Felder wurden mittels Maschinensiebung mit bewegtem Siebsatz in gasförmigem, ruhendem Fluid nach DIN 66 165 durchgeführt. Dabei fand eine Vibrationssiebmaschine der Fa. RETSCH Anwendung. Es wurden Analysensiebe des gleichen Herstellers nach DIN ISO 3310, Teil 1 aus der Hauptreihe R 20/3, der Nennmaschenweiten 63, 125, 250 und 500 µm, sowie der Nennmaschenweiten von 1 und 2 mm benutzt.

Die Siebe sind auf dem folgenden Bild 5.13 dargestellt. Zusätzlich zu den oben erwähnten Sieben sind auf dem Bild noch die Auffangwanne, die die Partikel enthält die auch das feinste Sieb passieren konnten und das Sieb mit 4 mm Siebmaschenweite zu sehen, welches jedoch nicht weiter betrachtet wurde, da es keine auswertbaren Partikel enthielt.

Die Einzelsiebe wurden der Größe nach geordnet aufeinandergesetzt und als Siebsatz verwendet. Die Siebmaschine war dabei auf 70% der maximalen Siebamplitude und Intervallbetrieb eingestellt.

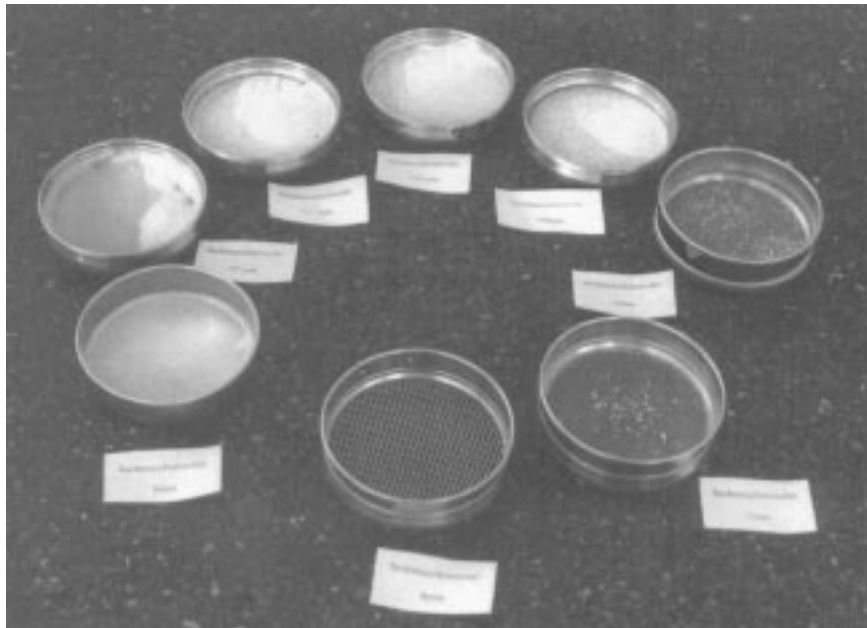


Bild 5.13: Die einzelnen Analysensiebe

Der Intervallbetrieb erwies sich als vorteilhafter, da es sich zeigte, daß die Partikel bei abnehmendem Siebintervall durch die Maschen der Analysensiebe fielen, während sie bei Permanentbetrieb durch die Stöße der bewegten Siebe zurückgeworfen wurden. Im Permanentbetrieb können die Partikel das Siebgitter nur passieren, wenn sie lagerichtig auftreffen. Im Intervallbetrieb hingegen nimmt die Energie gegen Ende des Intervalls immer mehr ab, so daß die Partikel, nicht mehr so heftig zurückgeworfen, sich selbst zentrieren und das Siebgitter passieren können. Es wurden keine Siebhilfen verwendet.

An allen Analysensieben wurde Anhaften von feinem Siebgute am Sieb durch elektrostatische Aufladung bemerkt, die sich auch durch Erdung des Siebsatzes nicht völlig vermeiden ließ.

5.7.1 Auswahl der optimalen Siebzeit der unterschiedlichen Spänefraktionen

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 66 165 ist die Siebzeit erreicht, wenn pro Minute weniger als 0,1 % des Aufgabegutes durch das betrachtete Sieb fällt.

Die Siebzeit für die unterschiedlich großen Proben der verschiedenen Felder wurde durch Vorversuche ermittelt. Es wurden Aufgabemengen von 5, 15, 30, 45, 60 und 90 Gramm untersucht.

Die Proben wurde 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.

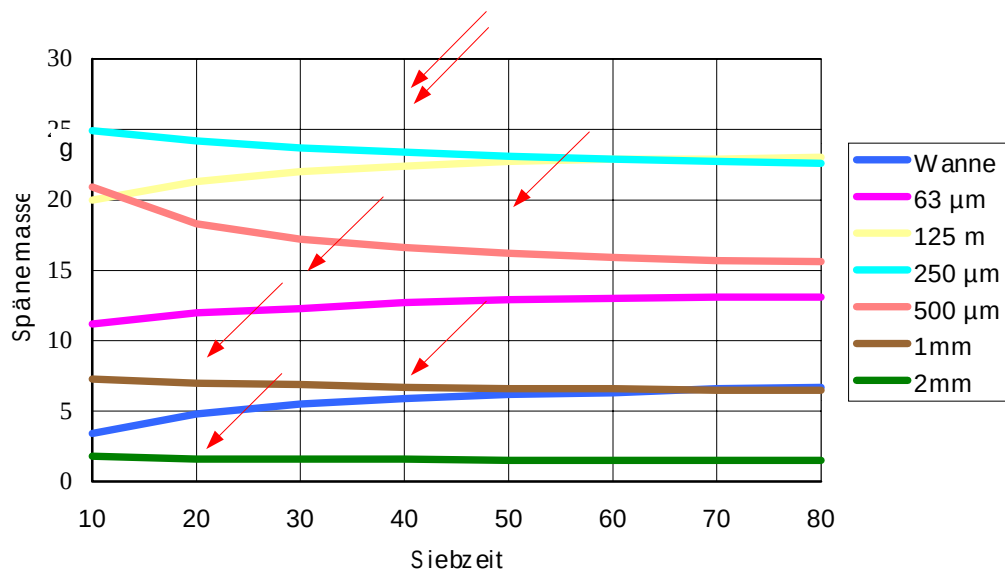


Bild 5.14: Beispiel eines Vorversuchs mit 90 g Spänemasse zur Ermittlung der benötigten Siebzeit bezogen auf die Probenmasse

Dabei stellte sich ein linearer Zusammenhang zwischen Siebzeit und Aufgabemasse heraus, wie das folgende Bild 5.15 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 massenunabhängigen Mindestsiebzeit von 5 Minuten bei Probenmassen unter 5 Gramm und mit einer massenabhängigen Siebzeit von 1 Minute pro Gramm Aufgabemenge bei Proben über 5 Gramm, höchstens jedoch mit 60

Minuten Siebzeit, gesiebt.

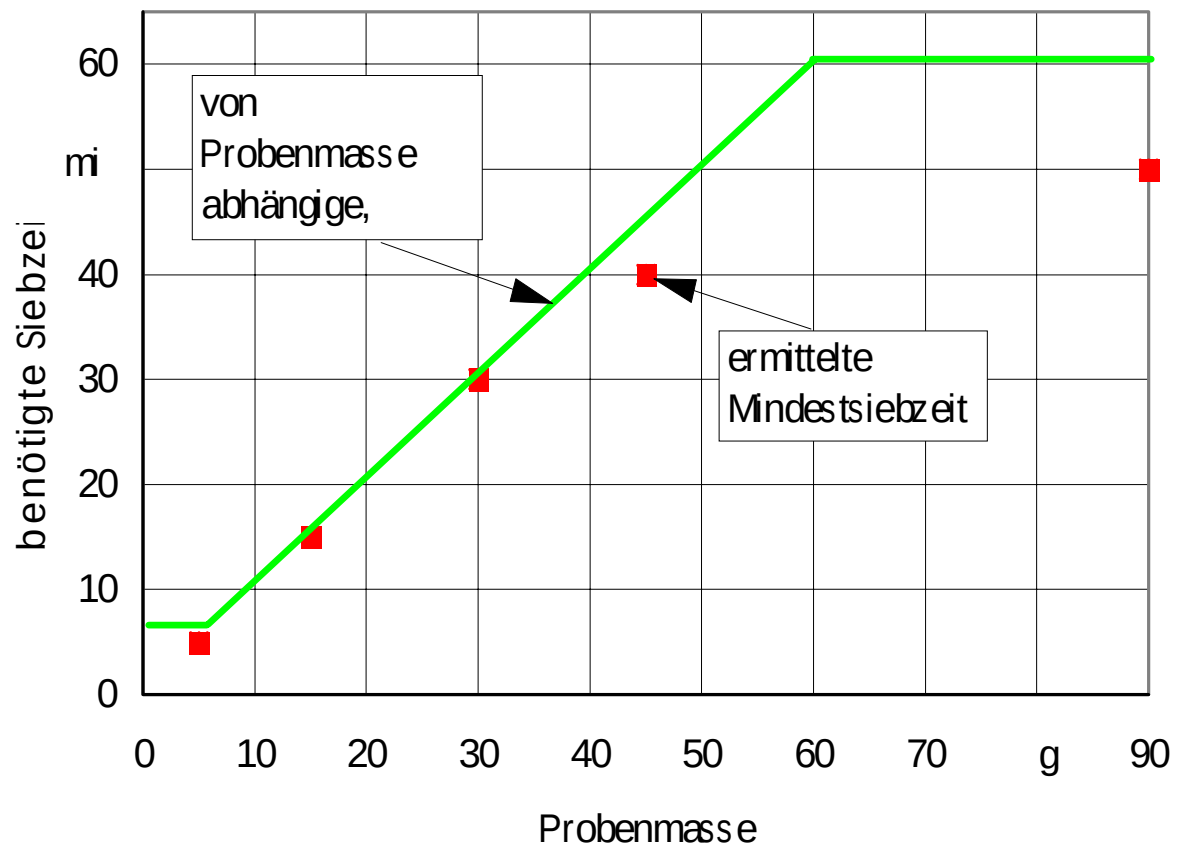


Bild 5.15: Darstellung der tatsächlich notwendigen, aus Vorversuchen ermittelten, Siebzeit und der bei der Versuchsauswertung angewandten Siebzeit.

5.7.2 Mögliche Fehlerquellen während der Siebanalyse und ihre Minimierung

a) Fehler beim Wiegen

Bei der Auswertung der Randfelder des Auffangrasters werden nur noch wenige zehntel Gramm an Probenmasse pro Versuch gewonnen. Dadurch waren die ermittelten Partikelmassen pro Sieb teilweise so klein, daß man an die Wägegenauigkeit der Analysenwaage geriet.

Zur Minimierung der Wägefehler 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 Analysensieben

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

c) Fehler bei der Trenngrenzenermittlung

Es wurde bei großer Aufgabemasse 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. Von diesem Phänomen geht wahrscheinlich ein kleiner Fehler im meßbaren Bereich aus.

Vermeiden ließe sich dieser Fehler beispielsweise durch die Verkleinerung der Aufgabemenge. Da sich jedoch die Späne in den zur Aufbewahrung verwendeten Papiertüten nicht als homogene Masse befinden, sondern sich durch den Transport teilweise nach unterschiedlichen Spangrößen entmischen, wäre der Fehler bei Verwendung nur eines Teils

der Späne pro Rasterfeld sicher größer.

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

Durch den Kontakt mit den Sieben könnte sich das Siebgut durch Zerbrechen und Abrieb zerkleinern. Dieser Fehler ist jedoch sicher unterhalb der Wägegenauigkeit, da die Späne hinsichtlich der kleinen Massenkkräfte am einzelnen Span die beim Sieben auftreten, genügend abriebfest sind.

e) Fehler durch Anhaften des Siebgutes am Analysensieb

Das Anhaften am Sieb durch elektrostatische Aufladung kann durch Erden nicht vollständig verhindert werden. Durch das Wiegen der leeren Siebe vor jedem Versuch werden die noch vom vorherigen Versuch anhaftenden Partikel mit erfaßt und somit der Fehler auf ein Minimum reduziert. Der Fehler durch anhaftende Partikel befindet sich nicht im meßbaren Bereich.

5.8 Wiegen der Analysensiebe

Die bei der unter 5.7 beschriebenen Siebanalyse verwendeten Siebböden wurden mit einer Analysenwaage SARTORIUS Excellence E 12000 S (Bild 5.16) ausgewogen. Die Anzeigegenauigkeit 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.

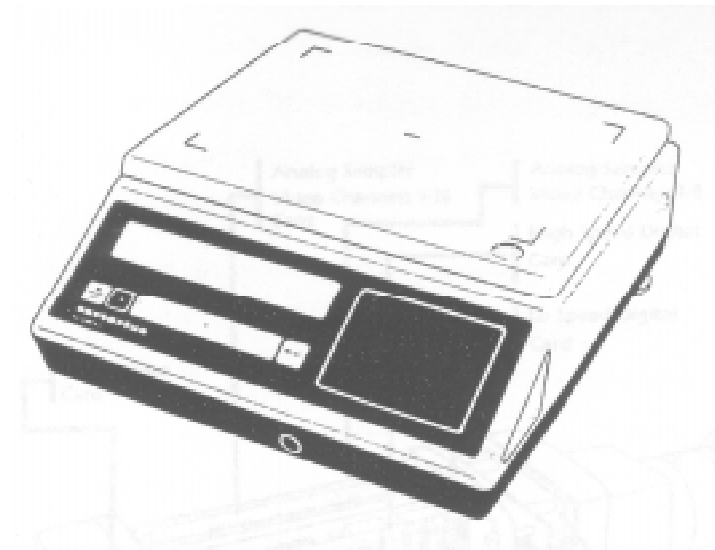


Bild 5.16: Die Analysenwaage SARTORIUS Excellence E 12000 S

5.9 Messung der Abflugparameter einzelner Späne mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahme

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme wurde mit einer Kamera Ektapro 1000 Imager, sowie einem Ektapro 1000 Processor, beide von der Firma Kodak, durchgeführt. Die Aufnahmen wurden auf Video überspielt, um dann ausgewertet zu werden. Die Aufnahme kann dabei auf einem Monitor beobachtet werden. In den Monitor wird zusätzlich zum aufgenommenen Bild noch ein Display eingeblendet, welches die Aufnahmedaten enthält.

5.9.1 Hochgeschwindigkeitskamera EKTAPRO 1000 Imager

Durch die Linse dringt das Licht in die Kamera ein und wird dort über einen Sensor in ein Videosignal umgewandelt. Dabei folgt das elektrische Signal exakt der Veränderung der eingefangenen Lichtintensität. Das in der Kamera erzeugte Signal wird verstärkt und umgesetzt, so daß es über das Kamerakabel an den Prozessor übermittelt werden kann.

Das Herzstück der Kamera stellt der EKTAPRO 1000 Sensor dar. Der Sensor ist ein "solid state imaging array". Dies bedeutet, im Sensor sind tausende von lichtempfindlichen Zellen

angeordnet, die das von der Linse fokussierte Licht in verarbeitbare elektrische Ladungen umwandeln.

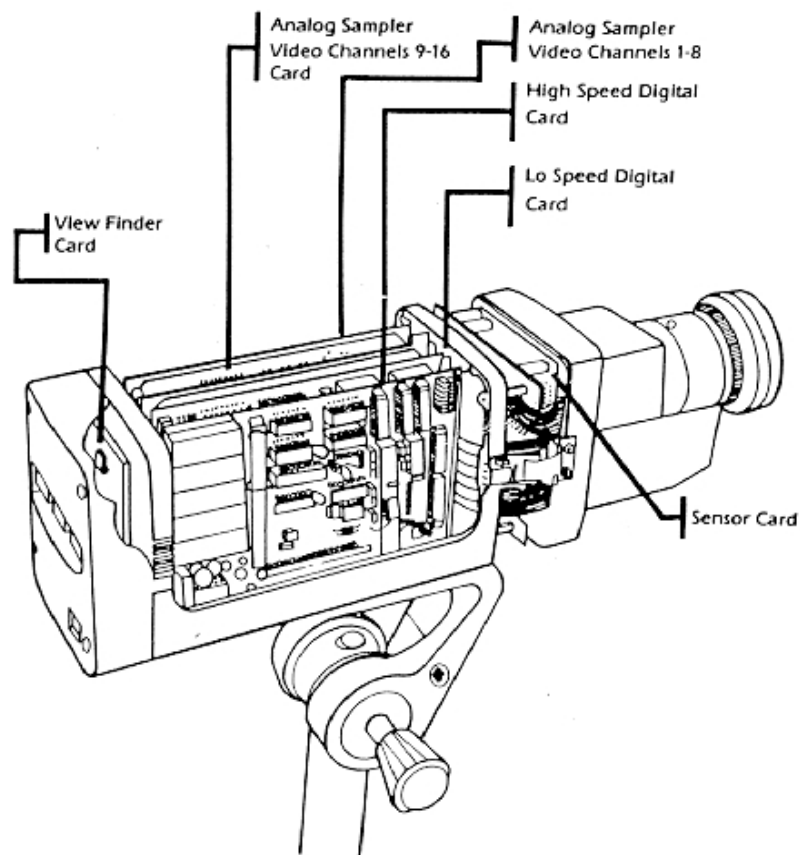


Bild 5.17: Die Hochgeschwindigkeitskamera

Der Betrag der Ladungen ändert sich mit der an der Zelle ankommenden Lichtintensität. Die in den einzelnen Zellen, die auch als Pixel bezeichnet werden, gespeicherte elektrische Ladungen sind ein Maß für das auftreffende Licht pro Zelle. Die gespeicherte Ladung jeder Zelle wird einmal pro Aufnahme von einem Abtastprozeß erfaßt und nacheinander in die Matrix übertragen. Dabei werden die Ladungen gelöscht. Sind alle Zellen abgetastet, kann die lichtabhängige Aufladung der Zellen für die nächste Aufnahme beginnen. Das Videosignal besteht somit aus einer linearen Sequenz von unterschiedlichen Ladungsbeträgen, abgetastet von den einzelnen Pixeln.

Die Matrix ist aus 240 Spalten und 192 Reihen aufgebaut. Bei der konventionellen Aufnahmetechnik wird ein Pixel nach dem anderen in der ersten Reihe abgelesen, bevor die Pixel der zweiten Reihe in der selben Art und Weise gelesen werden. Dieser Prozeß fährt fort, bis alle 192 Reihen mit jeweils 240 Pixeln abgelesen sind.

Da pro Bild 46 080 Pixel abgelesen werden müssen, ist es mit konventioneller Aufnahmetechnik hier nur möglich, 60 Aufnahmen pro Sekunde zu realisieren. Um 1000 Aufnahmen pro Sekunde machen zu können, muß die Ablesung 16 mal schneller geschehen. Der KODAK EKTAPRO 1000 Motion Analyser verwirklicht diese hohe Bildfrequenz, indem über 16 Kanäle 12 Blöcke von je 16 Reihen simultan abgetastet werden.

5.9.2 EKTAPRO 1000 Processor

Im EKTAPRO 1000 Processor werden die übertragenen Signale auf ein Band, welches mit 250 Inch pro Sekunde bewegt wird, aufgezeichnet. Für die Zeitlupenwiedergabe kann das Band nach Rückspulen der Kassette mit 7,5 Inch pro Sekunde abgespielt werden.

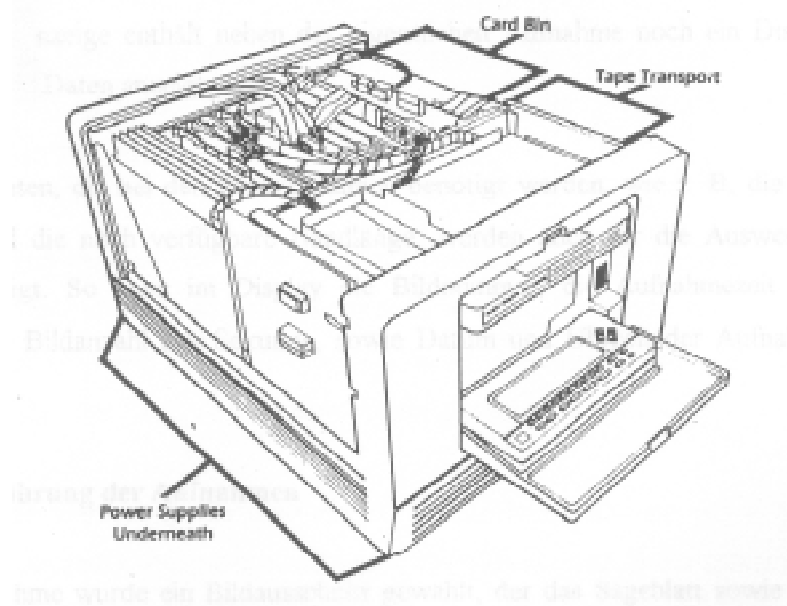


Bild 5.18: Der EKTAPRO 1000 Processor

Darüberhinaus kontrolliert und steuert der EKTAPRO 1000 Processor sämtliche Funktionen der Hochgeschwindigkeitsaufnahme vom Eintreffen des Signals bis zu dessen Aufzeichnung auf Band und der Ausgabe des Bildes auf dem Monitor.

5.9.3 Die Bildschirmanzeige

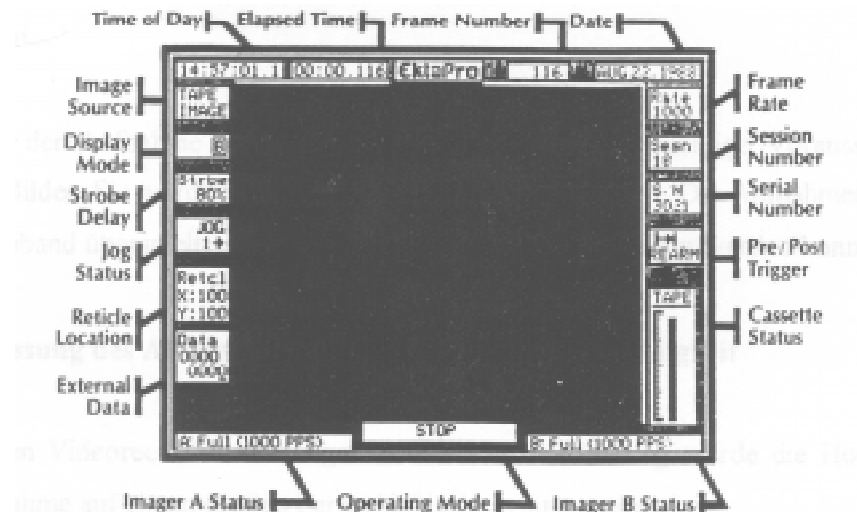


Bild 5.19: Das Bildschirmdisplay

Die Bildschirmanzeige enthält neben der eigentlichen Aufnahme noch ein Display, das eine ganze Reihe von Daten anzeigt.

Neben den Daten, die bei den Filmaufnahmen benötigt werden, wie z. B. die aktuellen Einstellungen und die noch verfügbare Bandlänge, werden auch für die Auswertung wichtige Daten angezeigt. So kann im Display die Bildnummer, die Aufnahmezeit in tausendstel Sekunden, die Bildanzahl pro Sekunde, sowie Datum und Uhrzeit der Aufnahme abgelesen werden.

5.9.4 Durchführung der Aufnahmen

Für die Aufnahme wurde ein Bildausschnitt gewählt, der das Sägeblatt sowie einen Teil der Vorrichtung als Vergleichsmaß einschließt. Dabei wurde der Bildausschnitt so groß wie möglich gewählt, um einen möglichst großen Teil der Partikelflugbahn zu erfassen. Die Größe des Bildausschnitts wurde jedoch durch die Partikelgröße begrenzt.

Um scharfe Abbildungen der Partikel zu erhalten muß die Bildanzahl pro Sekunde so groß wie möglich sein. Es wurde die Bildrate von 1000 Bildern pro Sekunde gewählt. Es sind zwar höhere Bildraten möglich, jedoch wird dabei der Bildschirm geteilt. Dadurch wird der Bildausschnitt auf die Hälfte reduziert und erlaubt nur noch einen kleinen Teil der Flugbahn zu betrachten.

Während der Aufnahme war eine gute Ausleuchtung eine wichtige Voraussetzung für gelungene Bilder. Sie wurde durch zwei Halogenstrahler realisiert. Die Aufnahmen wurden sofort auf Videoband überspielt, von dem aus sie schließlich ausgewertet werden konnten.

5.9.5 Messung des Abflugwinkels und der Abfluggeschwindigkeit

Über einen Videorecorder mit eingebauter Einzelbildschaltung wurde die Hochgeschwindigkeitsaufnahme auf einem großen Fernsehbildschirm ausgegeben.

Zur Aufzeichnung der Flugbahn wurde nun eine transparente Folie auf den Fernsehbildschirm geheftet und die Kontur des Sägeblatts und eines Anschlages der Zuführvorrichtung darauf übertragen. Diese Konturen wurden zur Umrechnung der Wegstrecken von Bildschirmflugbahn zu realer Flugbahn als Kontrollmaß benötigt.

Die Flugbahn von deutlich sichtbaren Partikeln konnten damit als einzelne Punkte unter Angabe der Bildnummer auf der Folie abgetragen werden. So lassen sich später, nach einer Übertragung der Flugbahn auf Millimeterpapier aus den Wegstrecken und der Bildnummer die Geschwindigkeiten des Partikels über dem Flugweg berechnen.

Als letzte Stufe wurden die aufgezeichneten Punkte bezüglich des ersten aufgezeichneten Punktes genau ausgemessen und in eine Excel-Tabelle übertragen, damit später deren Flugbahn im Vergleich zur rechnerischen Flugbahn gezeichnet werden kann. Da das Millimeterpapier

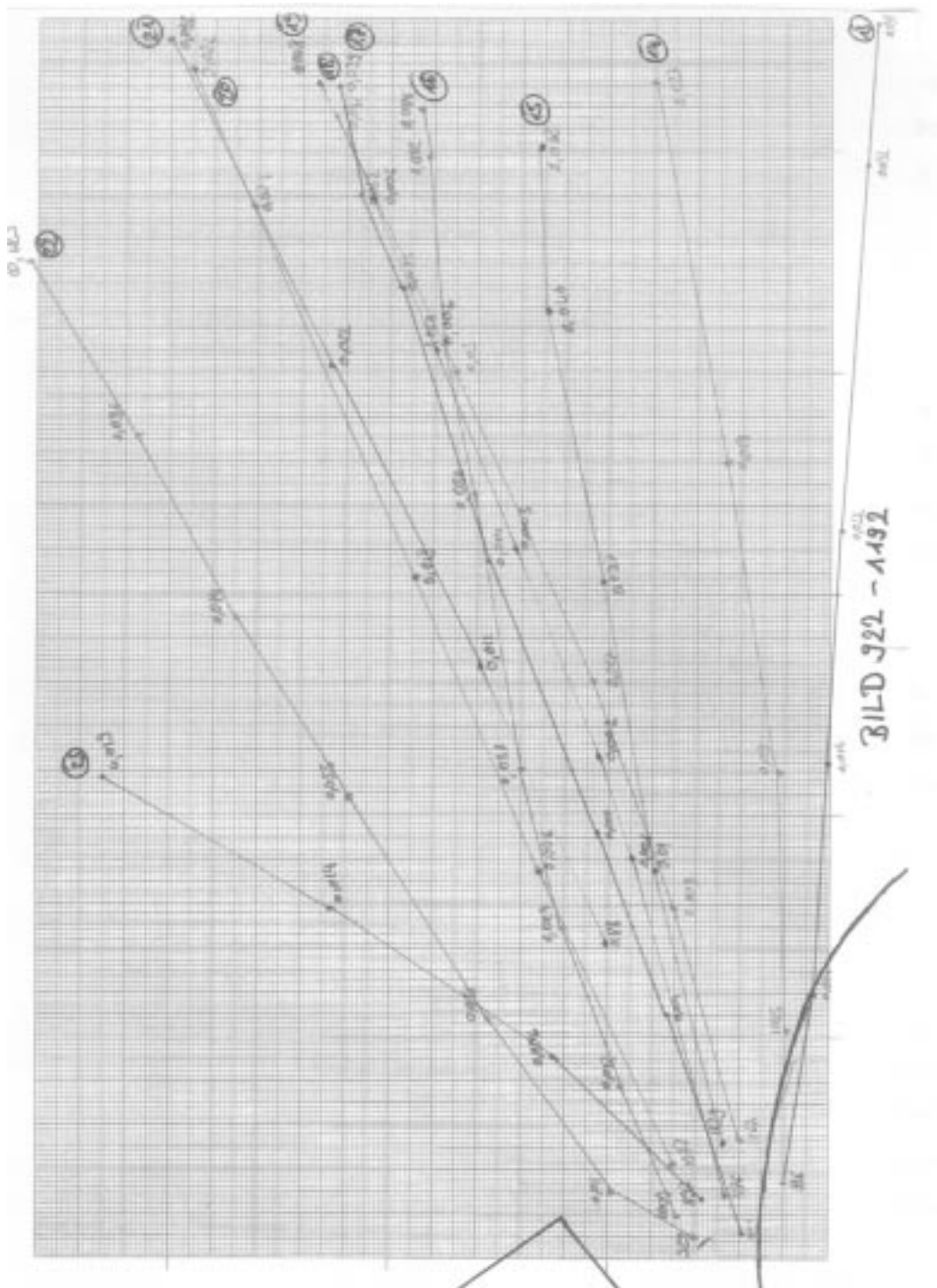


Bild 5.20: Auf Millimeterpapier abgetragene Flugbahnen aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme

verhältnismäßig große Maßabweichungen aufwies, wurden die aufgezeichneten Punkte mit

einem Meßschieber ausgemessen. Dadurch konnte der Fehler des ungenauen Millimeterrasters ausgeglichen werden. Die gewonnenen Flugbahnen finden sich im Anhang II zu dieser Arbeit.

Das Bild 5.20 zeigt ein Beispiel der auf Millimeterpapier abgetragenen Flugbahnen.

5.10 Bestimmung der Spanmasse einzelner Späne

Die Einzelspäne wurden auf einer Analysenwaage der Fa. Mettler ausgewogen. Dabei wurden von den Spänen der Siebmaschenweiten 2 mm bis 500 μm jeweils 10 Partikel auf die Waagschale der Analysenwaage gezählt und das so ermittelte Gewicht durch die Partikelanzahl geteilt.

Die Partikelklassen $< 500 \mu\text{m}$ wurden in loser Steuerung auf ein zuvor ausgewogenes Stück Papier gestreut. Nach dem Wiegevorgang wurde die Partikelzahl durch Auszählen mit einer Meßlupe ermittelt, um die durchschnittliche Partikelmasse wie bei den größeren Partikeln zu bestimmen.

5.11 Bestimmung des Spanquerschnitts

Der Partikeldurchmesser wurden mit einer Bügelmeßschraube des Meßbereichs 0 - 25 mm gemessen. Dazu wurde der zu vermessende Partikel auf den Amboß der Meßschraube gelegt und die Skalentrommel gedreht, bis zwischen Span und Meßfläche kein Lichtspalt mehr sichtbar war. Eine Messung mit der Rutschkupplung in der Meßschraube ist nicht möglich, da sie durch Deformation des Spans, bei einer eingestellten Meßkraft von 5 - 10 N, zu Meßfehlern führen würde.

6 Auswertung der Versuche

6.1 Verteilung des Zerspanungsgutes im Raster

Aus den Versuchsprotokollen der Siebanalyse wurden die ermittelten Ergebnisse in Excel-Tabellen zusammengetragen und daraus dreidimensionale Balkendiagramme erstellt. Sämtliche erstellte Balkendiagramme für die durchgeführten Versuche finden sich im Anhang I. Die Form der Balkendiagramme wurde gewählt, da in ihnen die Werte am eindeutigsten abzulesen sind.

Beim Vergleich der Balkendiagramme aus den drei verschiedenen Zerspanversuchen mit Sägeblättern von 16, 30 und 60 Zähnen stellten sich keine grundlegenden Unterschiede zwischen den Partikelverteilungen der gleichen Siebmaschenweite heraus. Beim genauen Vergleich der Balkendiagramme der verschiedenen Partikelgrößen ergeben sich jedoch Unterschiede, die Rückschlüsse auf den Zerspanprozeß zulassen. Neben der Gesamtverteilung läßt sich die absolute und die prozentuale Verteilung der Späneklassen in vier sich deutlich unterscheidende Verteilungstypen (I bis IV) unterteilen, auf die im folgenden näher eingegangen wird. Es wird an mehreren Stellen die Verteilung als unscharf oder scharf bezeichnet. Die Definition beider Begriffe erläutert das folgende Bild 6.1.



Bild 6.1: Scharfe und unscharfe Partikelverteilung

6.1.1 Verteilung der Gesamtmasse im Raster

Wie aus den Bildern 6.2 und 6.3 ersichtlich ist ergibt sich unabhängig von der Zähnezahl des Sägeblatts eine scharf begrenzte Verteilung der Gesamtmasse mit einem deutlichen Maximum, welches sich bei 0,84 m Flugweite im Raster in der Flucht zum Sägeblatt befindet. Dies bedeutet eine Flugweite für die Späne im Maximum von 1,14 m, wenn die 0,3 m

Abstand von Spanentstehungspunkt zu Rastervorderkante hinzugerechnet werden.

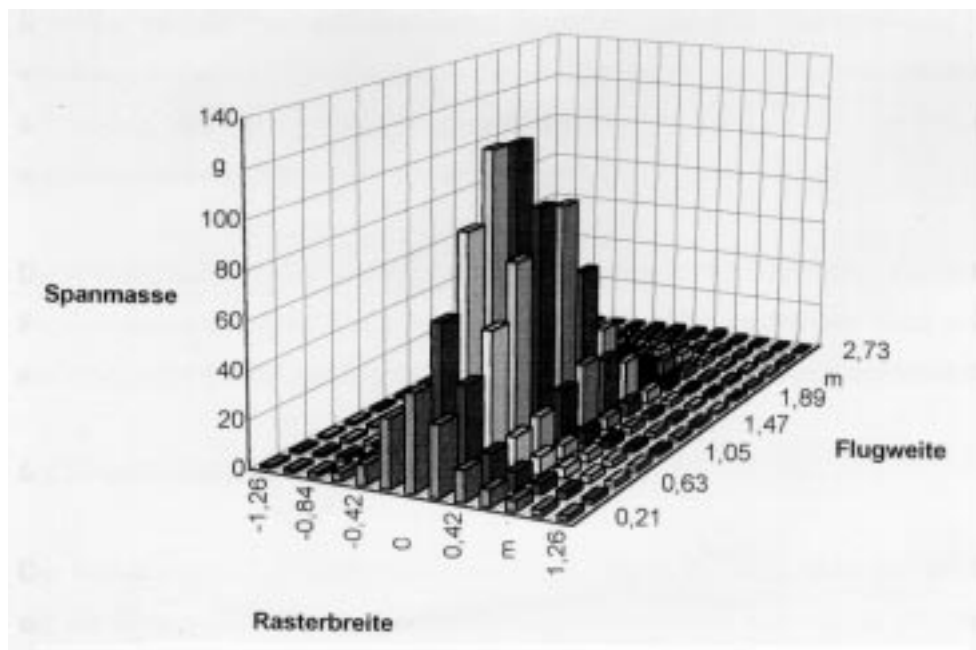


Bild 6.2: Gewichtsverteilung der Gesamtmasse bei Sägeblatt mit 60 Zähnen

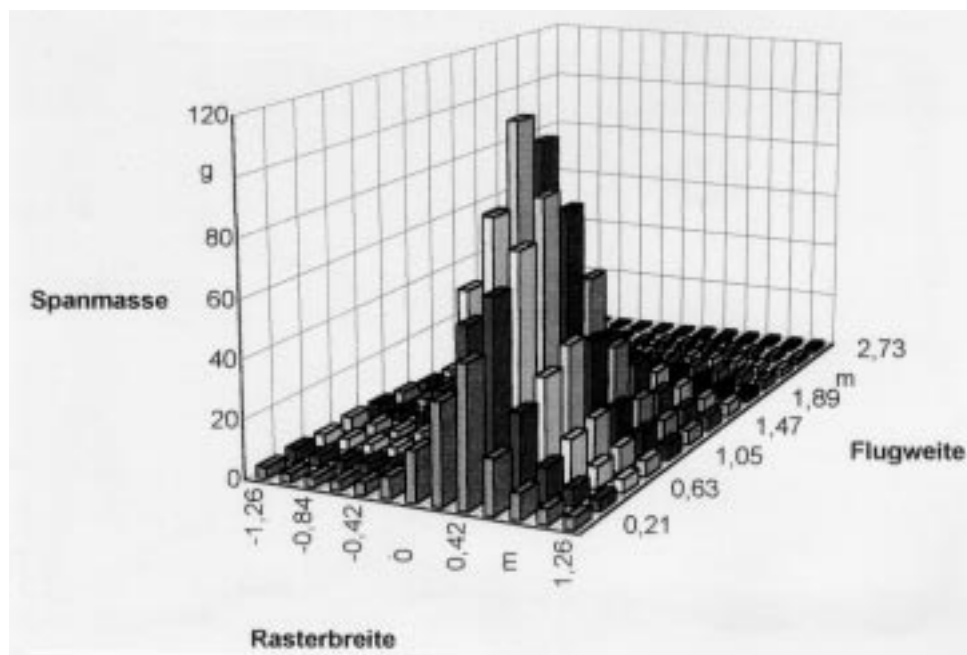


Bild 6.3: Gewichtsverteilung der Gesamtmasse bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Je kleiner die Zähnezahl des verwendeten Sägeblatts wird, desto unschärfer wird die Partikelverteilung, vor allem gegen die vordere rechte Ecke des Rasters,. Dies lässt sich deutlich in Bild 6.3 ansehen. Auf die Gründe der größeren Unschärfe wird später bei der Betrachtung der einzelnen Siebfractionen noch näher eingegangen.

Darüber hinaus wird bei kleiner werdender Zähnezahl des Sägeblatts das Maximum der Partikelverteilung aus der Flucht des Sägeblatts nach rechts verschoben. Auch auf diese Verschiebung wird bei den nachfolgenden Betrachtungen der Späneklassen eingegangen.

6.1.2 Partikelverteilung im Verteilungstyp I

Der Verteilungstyp I erstreckt sich über die sehr kleinen Partikelgrößen, also den Feinststaub, der alle Siebe passieren kann, und die Partikel, die im letzten Sieb mit der Maschenweite von $63\text{ }\mu\text{m}$ verbleiben.

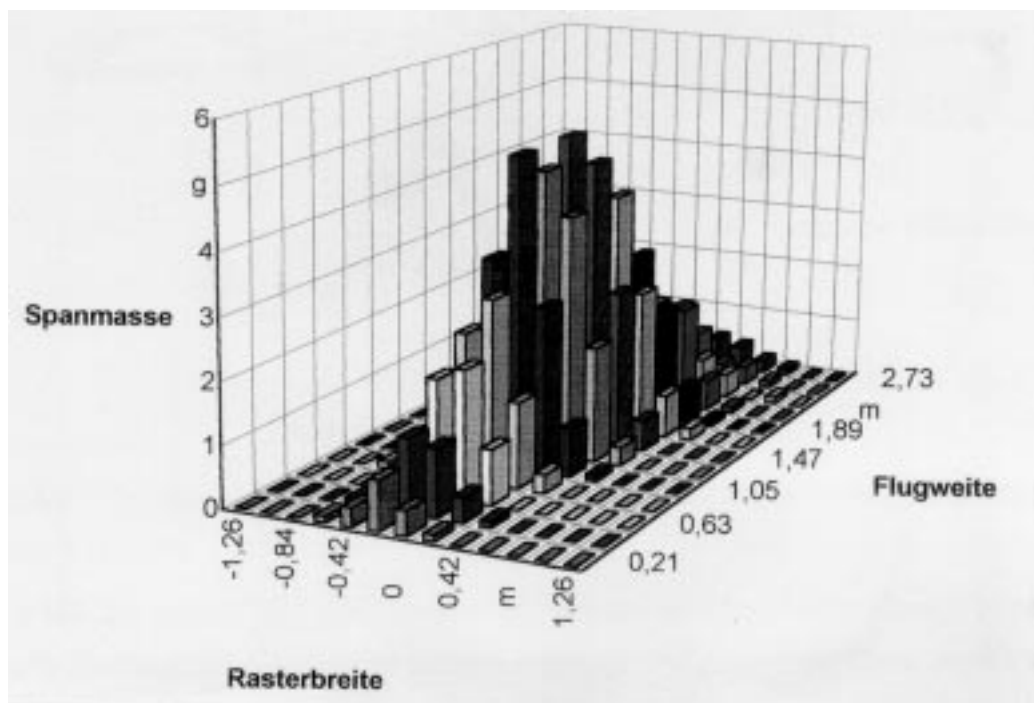


Bild 6.4: Gewichtsverteilung der Partikelgröße $< 63\text{ }\mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 60 Zähnen

Die Gewichtsverteilung entspricht im vorderen Teil des Rasters sehr gut der Gewichtsverteilung der Gesamtmasse. Im hinteren Teil des Rasters sind die Partikelmassen jedoch deutlich erhöht. Dadurch entsteht eine Partikelverteilung, die der Verteilung der Gesamtmasse ähnlich sieht, aber klar nach hinten verschoben ist.

In der prozentualen Partikelverteilung wird der überproportional hohe Partikelanteil der kleinen Partikel im hinteren Teil des Rasters besonders deutlich, wie dies Bild 6.5 zeigt. Die Anteile der Partikelgröße $< 63\mu\text{m}$ mit bis zu 30 % und der Anteil der Partikelgröße von $63\mu\text{m}$ von bis zu 60 % (siehe Diagramm im Anhang I) ergeben sich für Partikelgrößen bis einschließlich $63\mu\text{m}$ Siebmaschenweite Anteile von bis zu 90 % in diesem Bereich.

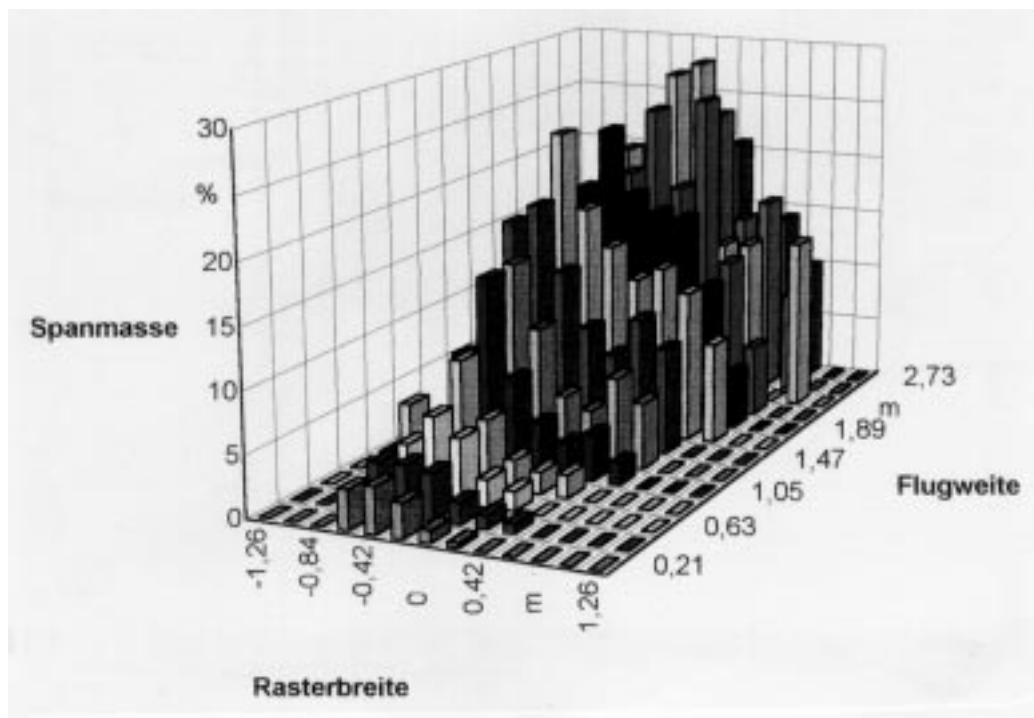


Bild 6.5: Prozentuale Verteilung der Partikelgröße $< 63\mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 60 Zähnen

Dies läßt darauf schließen, daß die kleinen Partikel, die wegen ihrer kleinen Masse eigentlich eine kurze Flugbahn beschreiben müßten, entweder aufgrund ihrer Form einen kleineren Cw-Wert haben, oder aber von der umgebenden Luftströmung mitgetragen werden.

Es ist anzunehmen, daß beide Punkte eine Rolle spielen. Zum einen dürften die sehr kleinen

Partikel eine annähernd kugelförmige Gestalt aufweisen und somit einen kleineren C_w -Wert als die sehr unregelmäßig geformten, großen Partikel aufweisen. Zum anderen sind Partikel ab einer gewissen kleinen Masse schwebfähig und setzen sich nur sehr langsam ab. Die Partikel werden von der Luftströmung, welche das rotierende Sägeblatt erzeugt, weit nach hinten getragen.

Auch bei diesem Verteilungstyp wird analog zur Gesamtverteilung das Verschieben der Maxima nach rechts bei kleiner werdender Zähnezahl beobachtet, wie aus Bild 6.6 entnommen werden kann.

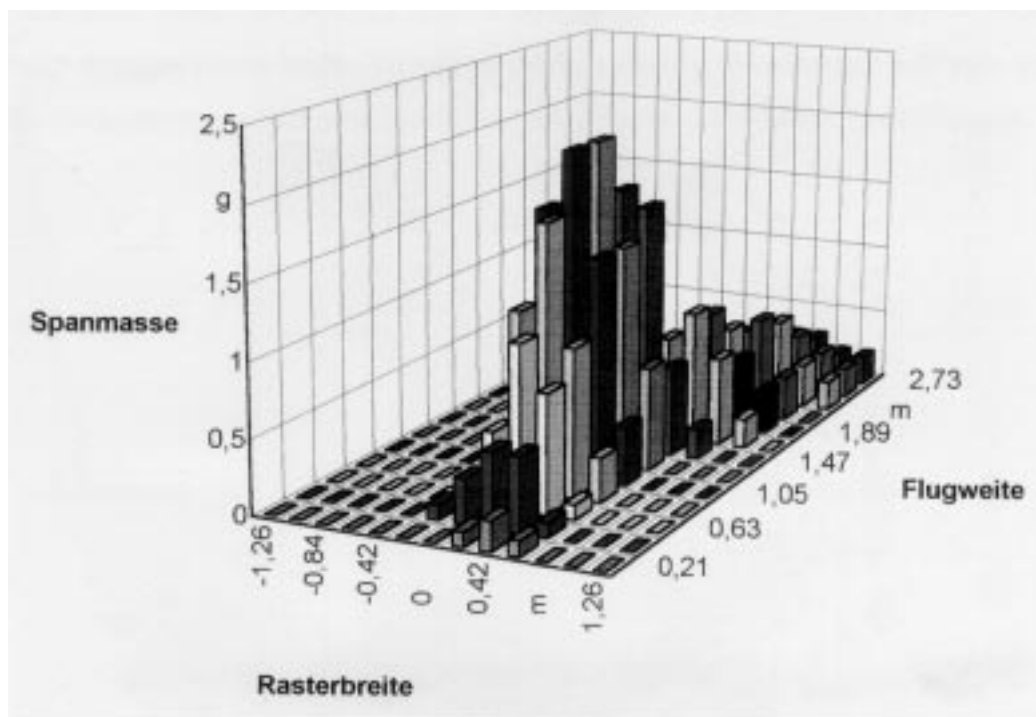


Bild 6.6: Gewichtsverteilung der Partikelgröße $< 63\mu\text{m}$ bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Im Vergleich zwischen den verschiedenen Sägeblättern wird an den Bildern 6.4 und 6.6 deutlich, daß bei größer werdender Zähnezahl der Anteil der sehr kleinen Partikel zunimmt. Das Maximum der absoluten Masse nimmt von ca. 2,5 g bei 16zähniem Sägeblatt auf ca. 6 g bei 60zähniem Sägeblatt zu, wobei bei der Gewichtsverteilung der Gesamtmassen die Maxima für alle Sägeblätter ungefähr gleich groß sind. Die gleiche steigende Tendenz ist auch bei Partikelgrößen von $63\mu\text{m}$ von ca. 8 g bei 16 zähniem Sägeblatt auf ca. 18 g Partikelmasse für das Maxima des 60zähniem Sägeblatts zu erkennen.

Im Vergleich zur Gesamtmasse der Späne fallen die sehr kleinen Partikelgrößen des Verteilungstyps I nur wenig ins Gewicht. Die Bereiche, in denen hohe prozentuale Anteile festzustellen sind, sind in der Gesamtverteilung mit sehr kleinen Spanmengen belegt.

6.1.3 Partikelverteilung im Verteilungstyp II

Der Verteilungstyp II erstreckt sich über Partikelgrößen von 125 μm Durchmesser bis zu Größen von 500 μm Durchmesser. Zwischen 125 μm und 63 μm Partikelgröße findet man eine deutliche Trennung zwischen den Verteilungstypen I und II. Die Partikelgröße von 500 μm zeigt dagegen schon leichte Übergangstendenzen vom Verteilungstyp II zum Verteilungstyp III. Dadurch ist die Trennung zwischen diesen beiden Verteilungstypen fließend.

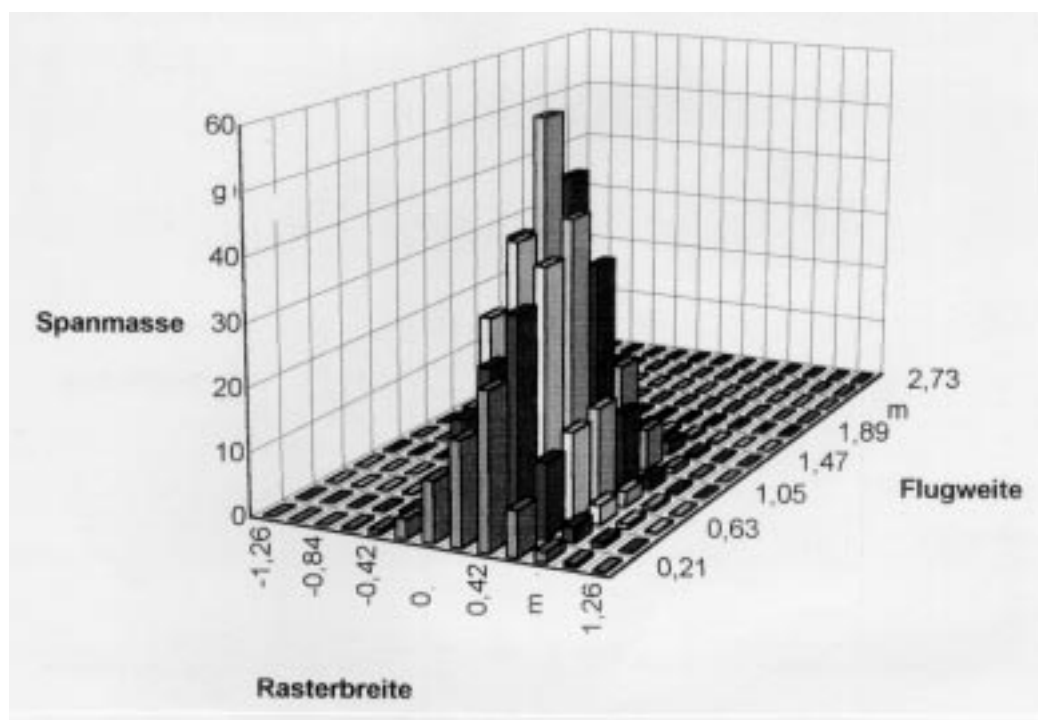


Bild 6.7: Gewichtsverteilung der Partikelgröße = 250 μm bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Der Verteilungstyp ist charakterisiert durch ein sehr scharf begrenztes Maximum im Bereich des Rasters, in welchem sich auch bei der Gesamtmassenverteilung das Maximum befindet. Hinter dem Maximalwert fallen die Partikelmassen sehr abrupt auf sehr kleine Werte im Verhältnis zum Maximum ab.

Von 125 μm Partikelgröße zu 250 μm Partikelgröße ist keine eindeutig längere Flugbahn festzustellen, obwohl eine größere Masse eine längere Flugbahn zur Folge haben müßte, wenn die übrigen Werte, wie beispielsweise der Cw-Wert, gleich sind. Erst beim Übergang zu 500 μm Partikelgröße läßt sich eine Verlängerung der Flugbahn durch eine Verschiebung des Maximas nach hinten feststellen.

In der prozentualen Verteilung (Bild 6.8) läßt sich dann erkennen, daß die Anteile der Partikel im Bereich der Maxima der Gesamtmassenverteilung in diesen Größenklassen zwischen 40% und 50% liegen. Dies bedeutet, daß die Partikelgrößen dieses Verteilungstyps zusammen über 90% Anteil im zentralen vorderen Rasterbereich betragen. Sie stellen also mengenmäßig die häufigsten und damit für die Auswertung die wichtigsten Partikelklassen dar.

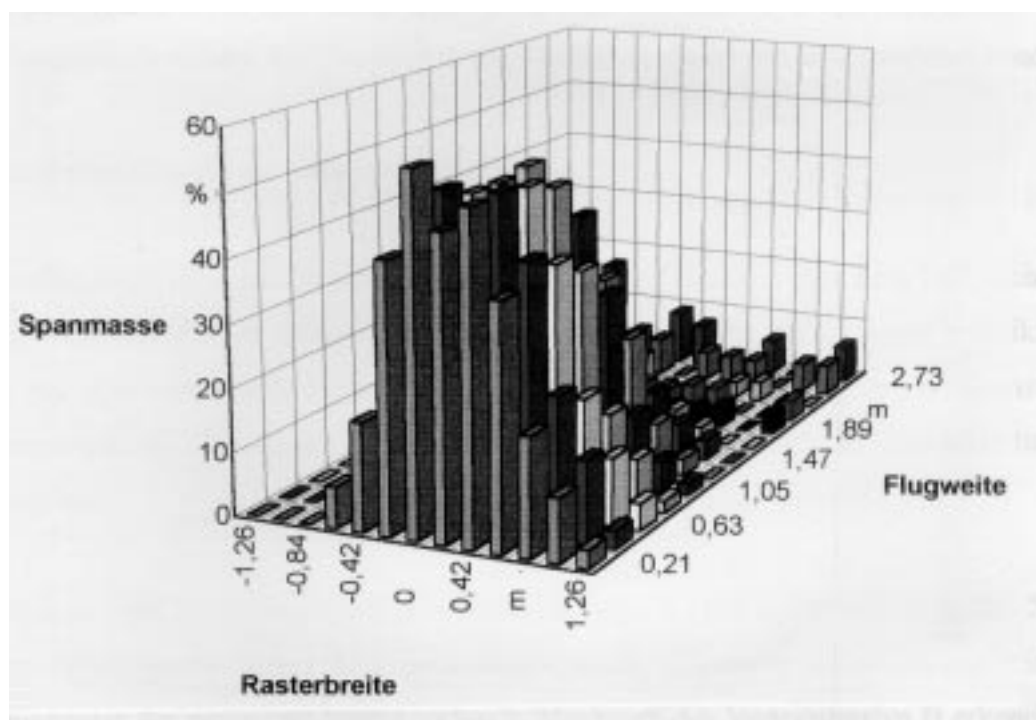


Bild 6.8: Prozentuale Verteilung der Partikelgröße = 250 μm bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Im Bereich des Verteilungstyps II findet eine Umkehr des Verhältnisses von Gewichtsmaximum zu Zähnezahl des Sägeblatts statt. Bei 125 μm Partikelgröße ist noch ein leichtes Ansteigen des Maximums von ca. 30 g bei 16 Zähnen auf ca. 45 g bei 60 Zähnen des Sägeblatts zu erkennen. Bei 250 μm Partikelgröße stagniert dieser Anstieg jedoch und kehrt

sich um, indem bei 500 μm Partikelgröße das Maximum von ca. 25 g bei 16 Zähnen auf ca. 16 g bei 60 Zähnen fällt.

Damit bestätigt sich, daß bei kleinen Zähnezahlen des Sägeblatts mehr größere Partikel, bei großen Zähnezahlen des Sägeblatts hingegen mehr kleine Partikel entstehen, was zu erwarten war.

Wie auch beim Verteilungstyp I und bei der Gesamtmassenverteilung ist auch hier wiederum ein Verschieben der Maxima im Raster nach rechts, bei kleiner werdender Zähnezahl, zu beobachten.

Beim Verteilungstyp II handelt es sich um die am schärfsten abgegrenzte Verteilung von allen Typen. Auch enthält dieser Typ die größte Spanmenge. Deshalb bietet er beispielsweise für die rechnerische Untersuchung des Cw-Wertes der Partikel die beste und eindeutigste Grundlage.

6.1.4 Partikelverteilung im Verteilungstyp III

Der Verteilungstyp III erstreckt sich über die Partikel der Größe 1 mm zum Teil auch bis zu Partikelgrößen von 500 μm . Obwohl der Verteilungstyp III sowie der folgende Verteilungstyp IV sich nur über eine Partikelgröße erstrecken, sind sie doch eindeutig als eigenständige Verteilungstypen zu identifizieren und treten bei allen drei verwendeten Sägeblättern gleich ausgeprägt auf.

Der Übergang vom Verteilungstyp II zum Verteilungstyp III dürfte fließend zwischen 500 μm und 1 mm Partikelgröße liegen, denn beim Sägeblatt mit 60 Zähnen (siehe Anhang I) ist noch andeutungsweise das zentral im Raster stehende Maximum des Verteilungstyp II erkennbar. Es ist aber durch die größere durchschnittliche Masse der Partikel weiter nach hinten verschoben.

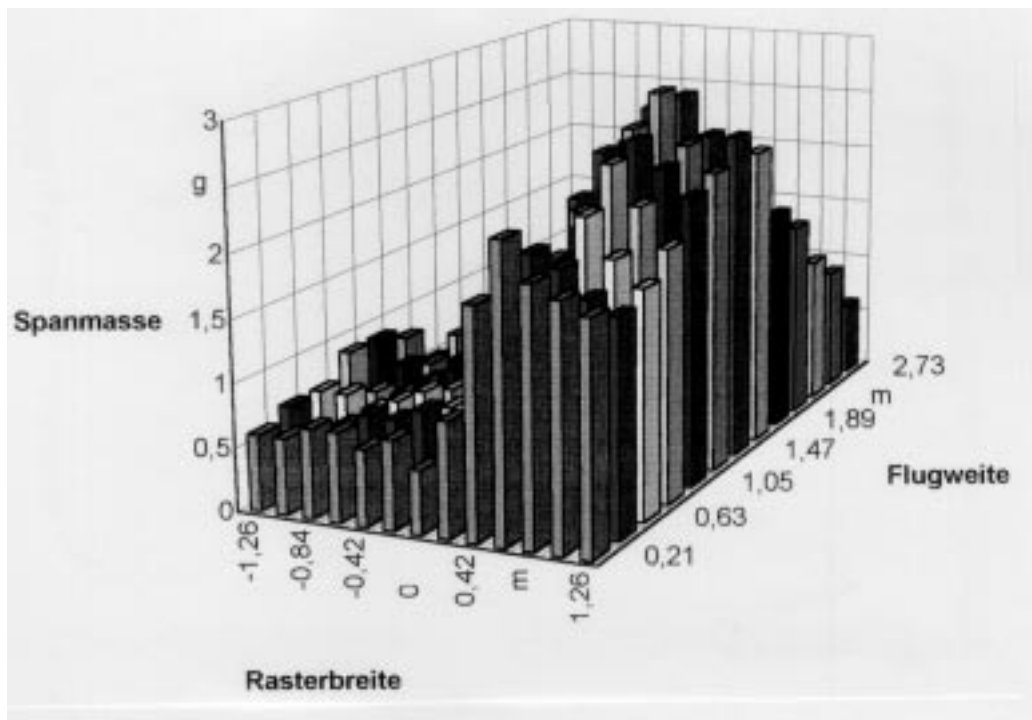


Bild 6.9: Gewichtsverteilung der Partikelgröße = 1mm bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Charakteristisch für den Verteilungstyp III ist ein Maximum auf der rechten Seite des Rasters. Die Verteilung der Partikelmasse ist bei diesem Verteilungstyp III nicht mehr scharf begrenzt, sondern weit gestreut (Bild 6.9). Dabei ist aber zu beachten, daß die Massen dieser Späneklasse im Verhältnis zur Gesamtmasse sehr klein sind. Auch hier setzt sich die Tendenz der höheren Massenanteile für die Verteilung der kleinen Zähnezahl gegenüber der Verteilung der großen Zähnezahl des Sägeblatts fort. So steigt das Maximum von ca. 2,5 g bei 60 Zähnen auf ca. 3 g bei 16 Zähnen des Sägeblatts.

In der prozentualen Verteilung zeigt sich gegenüber den bisherigen Partikelgrößen, ein deutlich erhöhter Partikelanteil an den Rändern des Rasters, wie Bild 6.10 entnommen werden kann. Obwohl an den Rändern nicht die höchsten absoluten Späneanteile vorhanden sind, ist doch der Großteil der Partikel in diesen Bereichen größer als 500 µm Durchmesser.

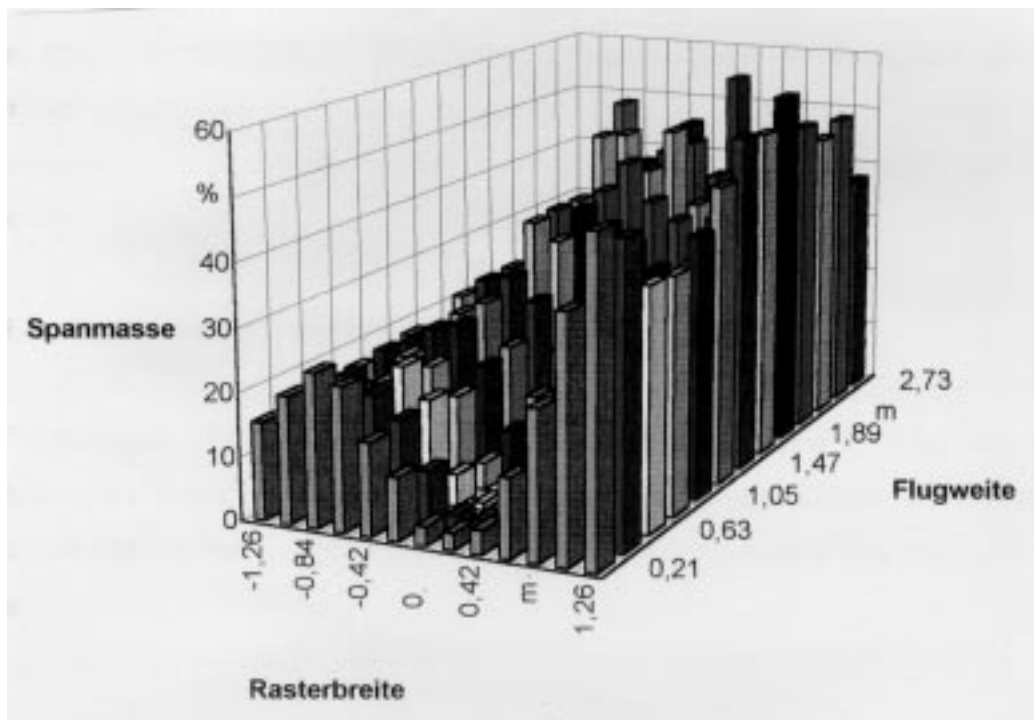


Bild 6.10: Prozentuale Verteilung der Partikelgröße = 1mm bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Der erhöhte Anteil der großen Partikel auf der rechten Seite läßt sich dadurch erklären, daß große Partikel, die aus dem Spanraum des Sägeblatts herausgedrängt werden, nur auf die rechte Seite entweichen können. Nach der linken Seite ist für die Späne ein Entweichen erst möglich, wenn der Sägezahn den Schnitt beendet und aus dem Werkstoff ausgetreten ist. So müssen alle Späne, die den Spanraum während des Schnittes verlassen, zwangsläufig eine Beschleunigung nach rechts erfahren.

Die Unschärfe der Verteilung am rechten Rand des Maximums in der Gesamtmassenverteilung bei Sägeblättern mit wenigen Zähnen ist darauf zurückzuführen, daß die großen Späne den Spanraum nach rechts verlassen. Betrachtet man zusätzlich noch das Verschieben des Maximums nach rechts bei kleiner werdender Sägeblattzähnezahl, so würde dies bedeuten, daß vor allem große Partikel schon während des Schnittes aus dem Spanraum verdrängt werden, die kleinen Späne jedoch im Spanraum verbleiben und diesen erst nach Beendigung des Schnittes verlassen. Dies erklärt das Verschieben des Maximums, da bei Sägeblättern mit wenigen Zähnen aufgrund der größeren Schnitttiefe pro Zahn bei gleichem Zerspanungs-volumen mehr große Partikel, die aus dem Spanraum verdrängt werden,

entstehen. Um diese These jedoch zu bestätigen ist eine genauere Untersuchung des Verhaltens der Späne im Spanraum während der Zerspanung notwendig. Die bei den Versuchen verwendete Hochge-schwindigkeitskamera konnte hierzu nicht die notwendige Bildfrequenz und Auflösung erreichen.

6.1.5 Partikelverteilung im Verteilungstyp IV

Der Verteilungstyp IV erstreckt sich über die Partikelgröße $> 1\text{mm}$. Es zeigt sich ein deutlich größerer Anteil dieser Späneklasse bei Sägeblättern mit wenigen Zähnen. So ergeben sich bei 16 Zähnen Maximalwerte von ca. 4 g, beim Sägeblatt mit 60 Zähnen aber nur ca. 0,9 g Späne-masse.

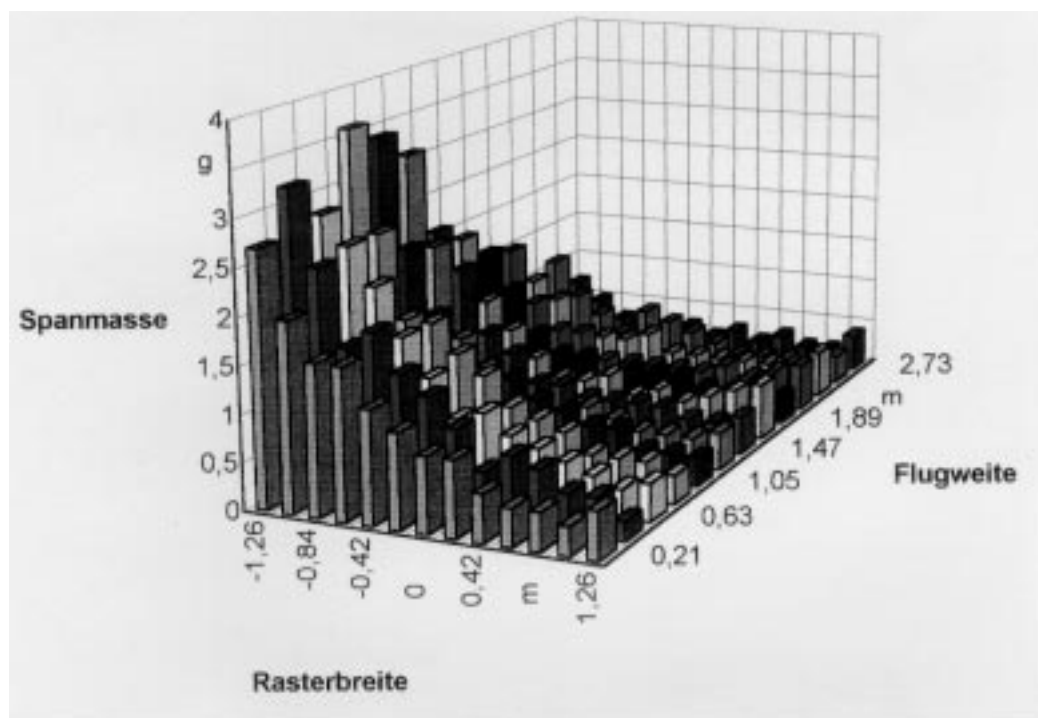


Bild 6-11: Gewichtsverteilung der Partikelgröße = 2mm bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Charakteristisch für den Verteilungstyp IV ist der deutlich erhöhte Partikelanteil auf der

linken Seite des Rasters. Auch in der prozentualen Verteilung erreichen die Rasterfelder am linken Rand sehr hohe Anteile dieser Späneklasse.

In den linken Randfeldern des Rasters findet sich eine große Anzahl an beschichteten Partikeln aus der Spanplattenoberfläche. Der hohe Anteil auf der linken Seite läßt sich dadurch erklären, daß das Sägeblatt beim Durchstoßen der Spanplattenoberfläche große Partikel der Beschichtung mit der feinspanigen, homogenen Deckschicht (siehe Kap. 5.2.2, Herstellung der Spanplatte) nach links herausbricht. Würde das Sägeblatt die linke Kante des Werkstücks be-arbeiten, so müßten sich die großen Randpartikel auf der rechten Seite des Rasters wieder-finden.

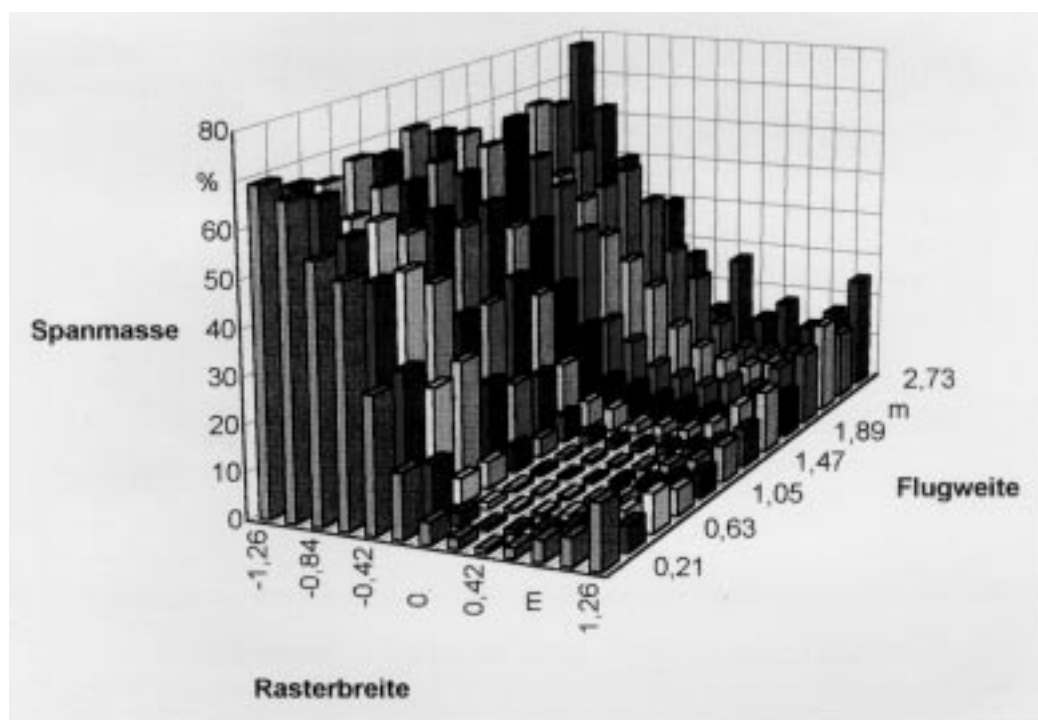


Bild 6.12: Prozentuale Verteilung der Partikelgröße = 2mm bei Sägeblatt mit 16 Zähnen

Es ist anzunehmen, daß aus der Unterseite der Spanplatte kleinere, beschichtungsbehaftete Partikel entstehen, da hier die Beschichtung beim Schnitt von dem dahinterliegenden Werkstoff gestützt werden kann. Beim Austritt des Sägeblatts hingegen wird die Deckschicht in größeren Stücken ausgebrochen, da keine Abstützung erfolgt. Dies führt dann auch zu den

Kanten-ausbrüchen, die an den Werkstücken beobachtet wurden und die größer als die Schnitttiefe der einzelnen Zähne waren.

Es kann somit darauf geschlossen werden, daß die Partikel aus der Deckschicht der Spanplattenunterseite, die ganz am Anfang während des Schnittes erzeugt werden, aus der Zahn-lücke nach rechts verdrängt werden und sich somit auch auf der rechten Seite des Rasters wiederfinden dürften. Die Partikel, die aus der Oberfläche der Spanplattenoberseite ausbrechen, müßten sich demnach, aufgrund des Wegklappens beim Durchstoßen der Spanplattenoberfläche durch den Sägezahn, auf der linken Rasterseite wiederfinden. Sicher nachweisen ließe sich dies jedoch nur durch Versuche mit unterschiedlich eingefärbten Beschichtungen der Spanplatte.

6.1.6 Zusammenfassende Betrachtungen der Verteilungstypen I - IV

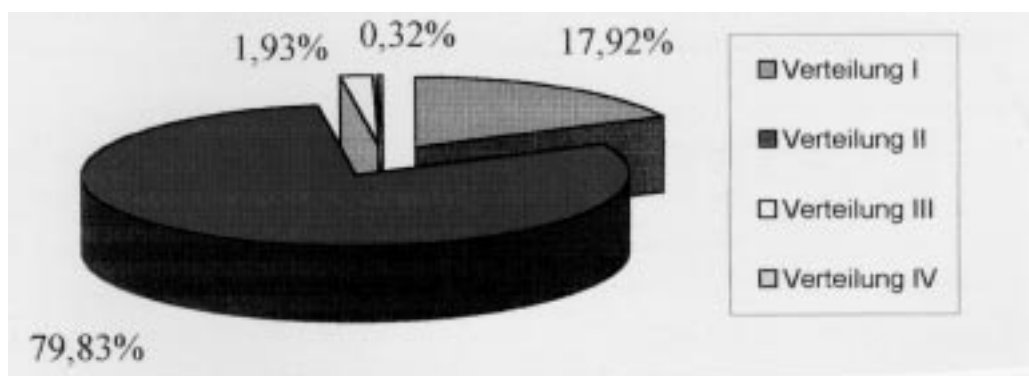


Bild 6.13: Verteilung der Partikel auf die verschiedenen Verteilungstypen am Beispiel eines repräsentativen Feldes bei einem Sägeblatt mit 60 Zähnen

Die Hauptmasse der Späne befindet sich in der Flucht des Sägeblatts, bei kleineren Sägeblatt-zähnezahlen auch leicht nach rechts versetzt. Den größten Anteil dieser Masse bilden die Späne des Verteilungstyps II, also Partikel mit einem Durchmesser von 125 µm bis 500 µm, wie aus obigem Bild 6.13 zu ersehen ist. Diese Partikel dürften bis auf eine kleine Rechtsabweichung somit auch der durchschnittlichen Flugbahn am ehesten entsprechen.

An den rechten und linken Rändern des Rasters finden sich zu hohen Anteilen große Partikel.

Sie dürften zum Teil nach den oben beschriebenen Mechanismen in diese Bereiche gedrängt worden sein. Zum Teil könnten sie aber auch aufgrund der angreifenden Luftkräfte durch ihre flachen Form und die Rotation um die erste Hauptträgheitsachse dorthin gelangt sein. Ob und wie stark diese beiden Mechanismen zu den verstärkten Anteilen großer Partikel in den Randbereichen des Rasters beitragen, läßt sich mit den durchgeführten Versuchen jedoch nicht nachweisen.

Im hinteren Teil des Rasters finden sich verstärkt Partikel des Verteilungstyps I. Da kleine Partikel eine kleine Masse aufweisen und somit durch die Luftwiderstandskraft schnell abgebremst werden müßten, ist davon auszugehen, daß sie durch die Luftgeschwindigkeit, die vom Sägeblatt erzeugt wird, mitgetragen werden und deshalb eine überproportionale Häufigkeit in diesen Feldern erlangen.

6.2 Verteilung der Partikelmassen quer zur Sägeblattflucht

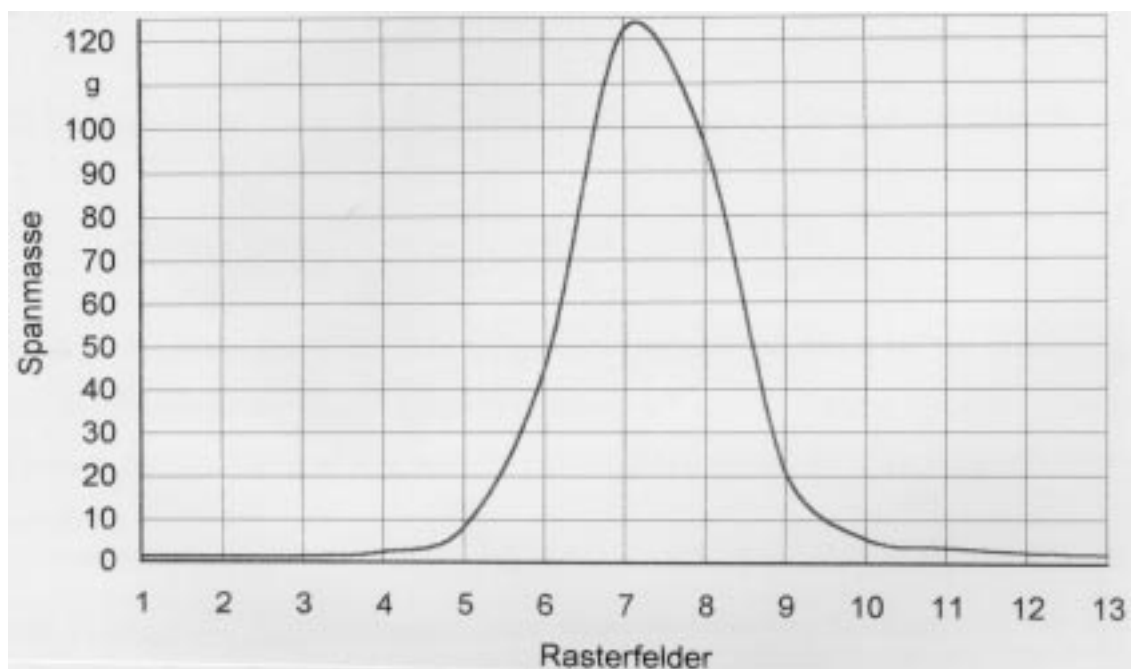


Bild 6.14: Gesamtverteilung der Partikelmassen quer zur Sägeblattflucht in der 4. Reihe des Rasters bei einem Sägeblatt mit 60 Zähnen

Betrachtet man die Verteilung der Partikelmassen quer zur Sägeblattflucht, wie sie in Bild

6.14 dargestellt ist, so liegt der Beschreibungsversuch durch eine Normalverteilung nahe. In der technischen Praxis oder bei der Messung physikalischer Größen tritt vor allem die Normalverteilung, die auch als Gauß-Laplace-Verteilung bezeichnet wird, auf.

6.2.1 Normalverteilung (Gauß-Laplace-Verteilung)

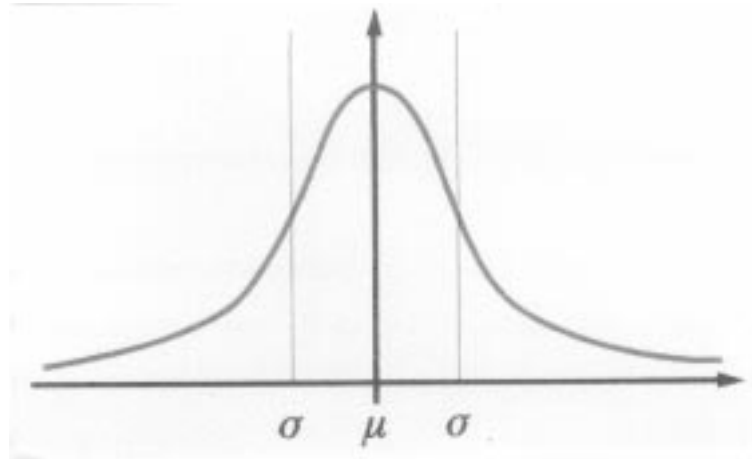


Bild 6.15: Gauß-Laplace-Verteilung mit Parametern

Die Gaußsche Dichtefunktion, auch Glockenfunktion genannt, definiert sich folgendermaßen:

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6-1)$$

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 Verteilungsfunktion auf der x-Achse.

Zum Zeichnen der Normalverteilung kann diese aus Gleichung 6-1 berechnet werden. Dabei entspricht der errechnete Maximalwert der Normalverteilung dem Maximalwert der Partikelmasse. Indem beide Faktoren durcheinander dividiert werden, erhält man einen Umrechnungsfaktor für eine Einheit der Normalverteilung und damit die errechneten Normalverteilungswerte in Partikelmassen umgerechnet. Der einfachere Weg, die Normalverteilung zu zeichnen, ist jedoch die Verwendung der Näherungswerte die Bild 6.16 in Tabellenform zeigt. /15/

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

Bild 6.16: Näherungswerte für das Zeichnen der Glockenkurve der Gauß-Laplace-Verteilung

6.2.2 Vergleich der Normalverteilung mit der Partikelmassenverteilung

Zum Vergleich der Normalverteilung (Bild 6.15) mit der Partikelmassenverteilung (Bild 6.14) setzt man den Erwartungswert beim Wert $\mu = 0$ gleich dem x-Wert der Partikelverteilung. Damit wird der Maximalwert der Normalverteilung wie bei der Partikelverteilung auf die Mitte des Rasters festgelegt. Für einen außer der Mitte befindlichen Maximalwert der Partikelverteilung muß der maximale x-Wert der Verteilung für $\mu \neq 0$ eingesetzt werden. Der Wert der Varianz für den Wendepunkt σ wird aus dem geglätteten Diagramm der Partikelmassenverteilung geschätzt, indem der Wert entweder vom Wert μ subtrahiert, oder zu ihm addiert wird, je nachdem, ob σ rechts oder links von μ auf der x-Achse liegen soll.

Mit zunehmender Rastertiefe nimmt die Varianz zuerst leicht ab, um dann wieder, jedoch stärker, anzusteigen. In der betrachteten Gesamtmassenverteilung des Versuchs mit 60zähni-gem Sägeblatt beginnt sie in der 1. Reihe bei 0,25 m und fällt dann auf 0,2 m ab. Bis zur letzten Reihe steigt die Varianz schließlich wieder auf 0,5 m an.

Setzt man diese Werte nun in die Formel 6-1 ein und trägt die auf die Partikelmassen bezogene Kurve ebenfalls im Diagramm ein, so erhält man die Bilder 6.17 bis 6.20. Die Bilder zeigen die Vergleiche der Normalverteilung mit der ermittelten Partikelmassenverteilung senkrecht zur Sägeblattflucht in den verschiedenen Reihen des Rasters. Es zeigt sich, daß diese Verteilung sehr gut durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann.

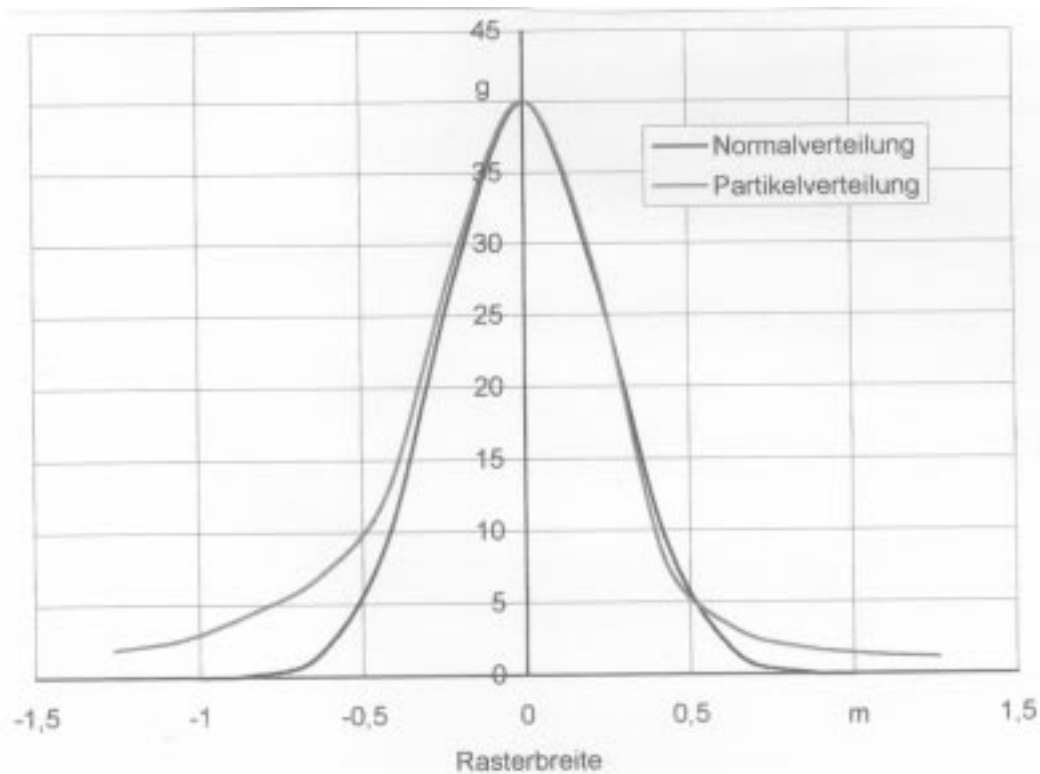


Bild 6.17: Vergleich von Partikelverteilung der Gesamtmasse und Normalverteilung in der 1. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen

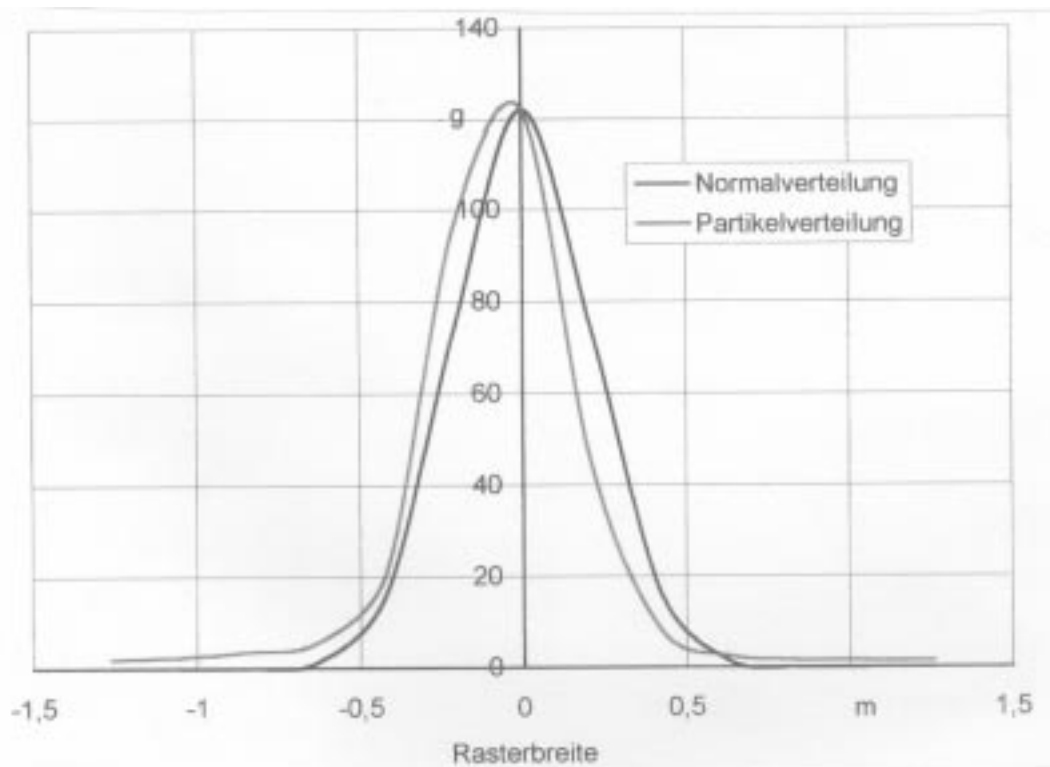


Bild 6.18: Vergleich von Partikelverteilung der Gesamtmasse und Normalverteilung in der 5. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen

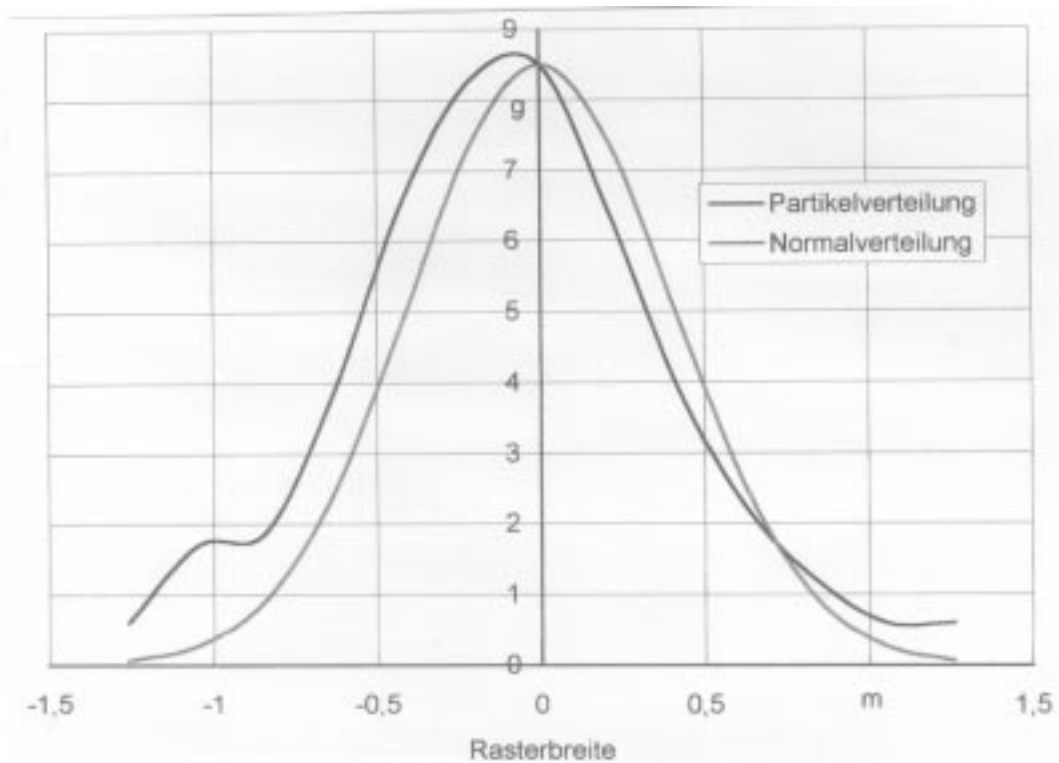


Bild 6.19: Vergleich von Partikelverteilung der Gesamtmasse und Normalverteilung in der 10. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen

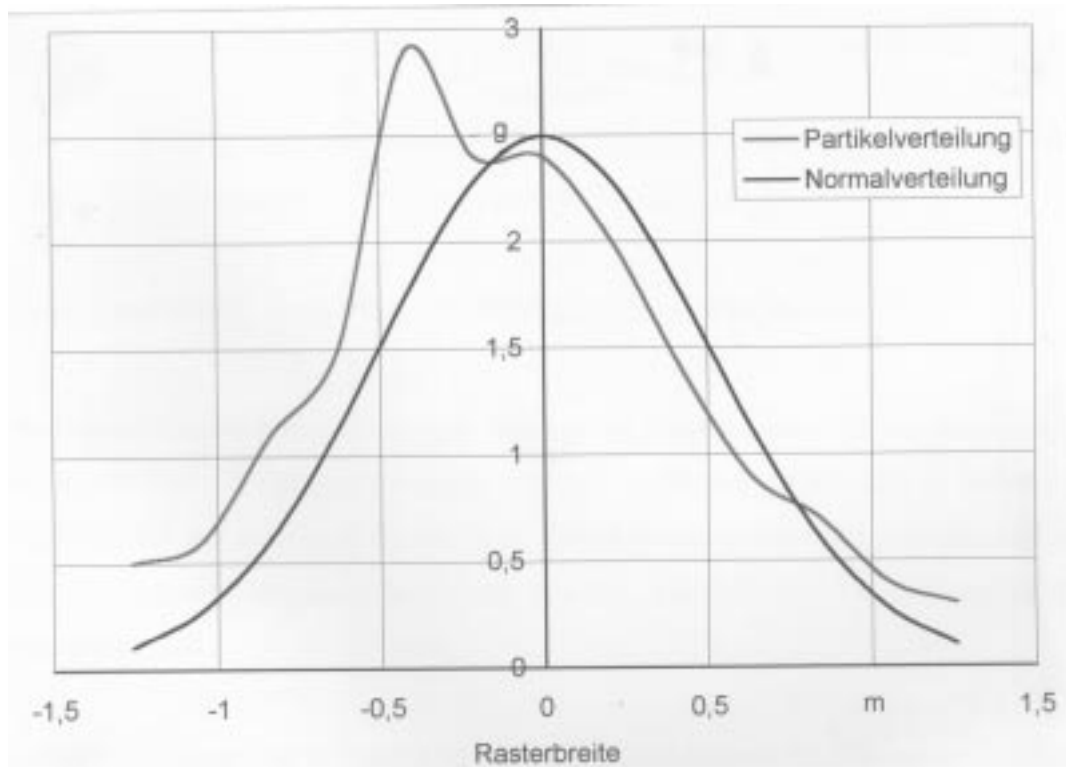


Bild 6.20: Vergleich von Partikelverteilung der Gesamtmasse und Normalverteilung in der 13. Reihe des Rasters bei Sägeblatt mit 60 Zähnen

Auch die Partikelverteilungen der Partikelgrößen bis 250 μm im Verteilungstyp II lassen sich

noch gut mit der Normalverteilung näherungsweise beschreiben. Dies wird in Bild 6.21 exemplarisch dargestellt.

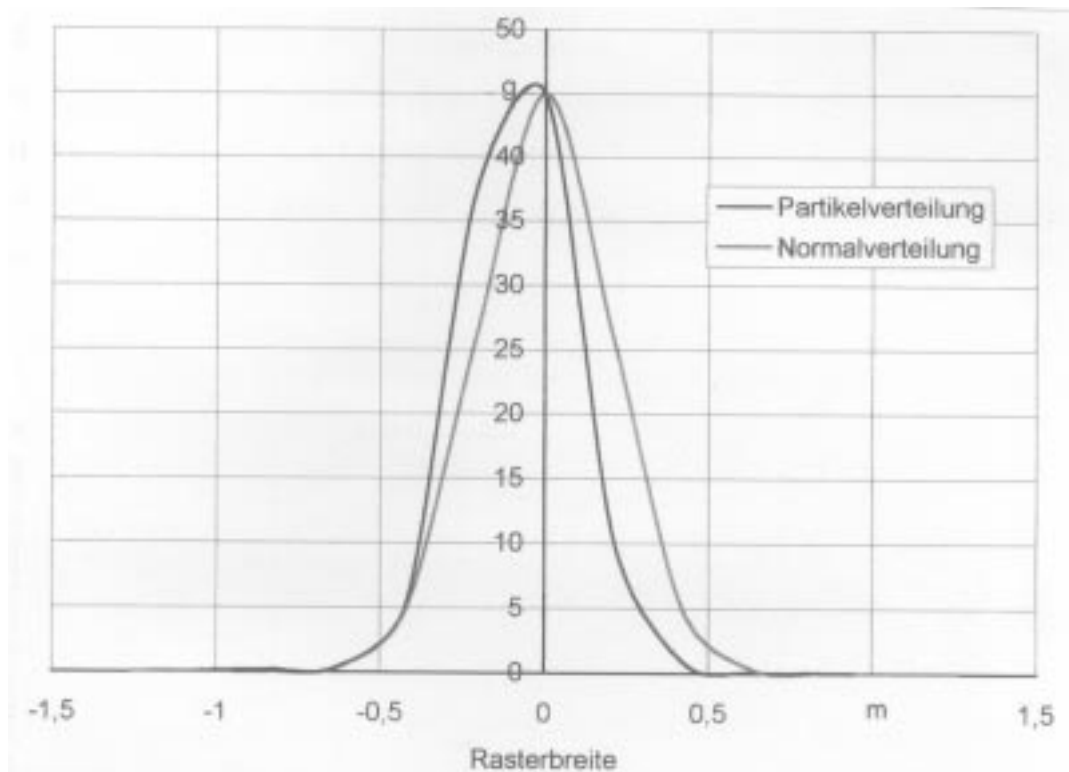


Bild 6.21: Vergleich der Partikelverteilung und Normalverteilung quer zur Sägeblattflucht bei Partikelgröße von $250\ \mu\text{m}$ und Sägeblatt mit 60 Zähnen

6.3 Zusammenhang zwischen Partikelform und Flugweite

Geht man einmal davon aus, daß bei einer bestimmten Siebmaschenweite die durchschnittlichen Partikelmassen und die durchschnittlichen Querschnittsflächen gleich sind, so hängt die Flugweite der Partikel nur noch vom C_w -Wert ab. Dabei wird angenommen, daß der Abflugwinkel und die Abfluggeschwindigkeit, statistisch gesehen, ebenfalls für das betrachtete Partikel-kollektiv gleich sind.

Die Partikelform hängt eng mit dem C_w -Wert des Spans zusammen. Der unterschiedliche C_w -Wert läßt sich zumindest qualitativ an den Partikelformen in den einzelnen Rasterfelder sehen. So sind die Späne der vorderen Felder unregelmäßig geformt. Sie weichen in allen 3 Raumebenen stark von einer symmetrischen Körperform ab.

Die Späne der hinteren Rasterfelder hingegen haben annähernd symmetrische Gestalt. Sie weisen wenig scharfe Kanten und Ecken auf und lassen sich als Kugeln oder Ellipsoide auffassen. Durch die insgesamt glattere Gestalt ist der Cw-Wert dieser Partikel kleiner als der Cw-Wert der Partikel in den vorderen Feldern. Sie fliegen dadurch bei gleichen Abflugbedingungen weiter.

Die unterschiedlichen Partikelformen aus der gleichen Spalte des Rasters sind aus den folgenden Bildern 6.22 und 6.23 ersichtlich.

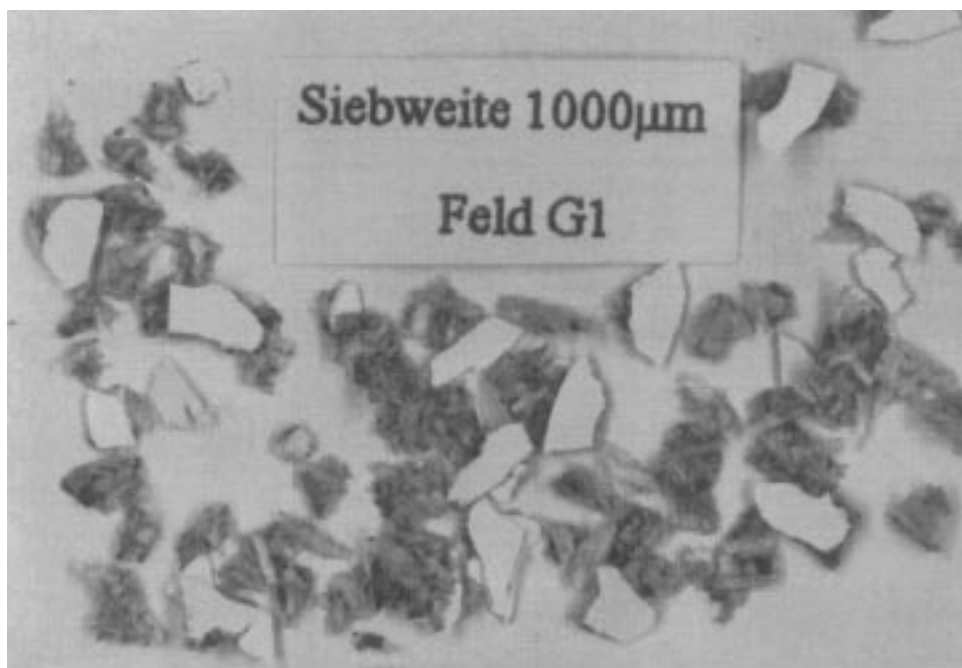


Bild 6.22: Partikel des mittleren Feldes (G1) der ersten Reihe des Rasters

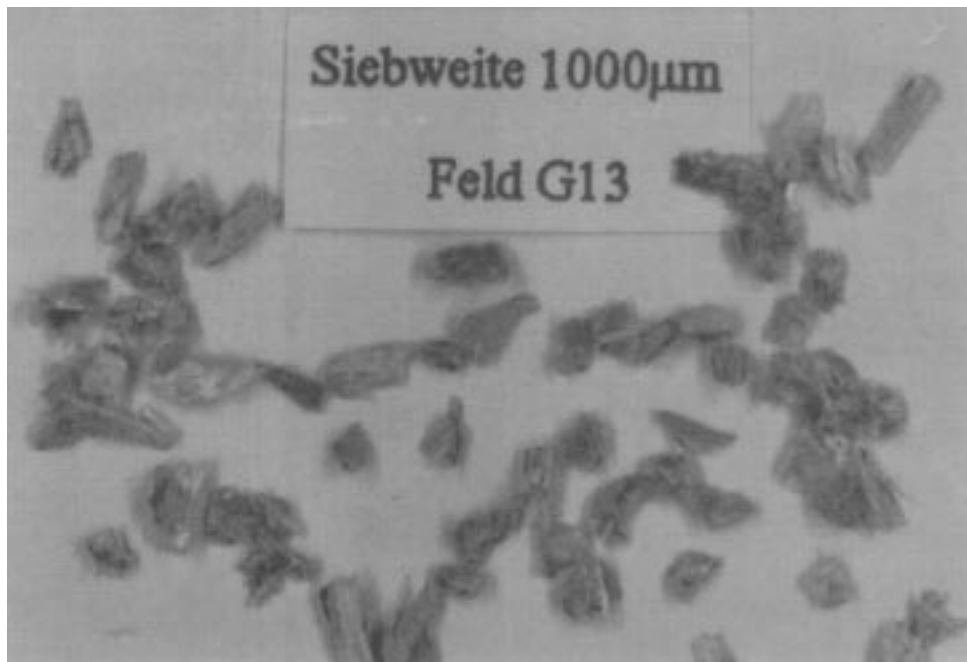


Bild 6.23: Partikel des mittleren Feldes (G13) der letzten Reihe des Rasters

Genau die entgegengesetzte Erscheinung tritt bei den sehr kleinen Partikeln auf. Hier sieht man in Bild 6.24 andeutungsweise, daß die Partikel aus den hinteren Bereichen des Rasters (G13) flauschiger gegenüber den körnigen Partikeln des vorderen Rasterbereichs (G1) aussehen. Das flauschige Aussehen läßt somit auf eine undifferenzierte Gestalt schließen, was nach obiger Betrachtung eine kürzere Flugbahn aufgrund eines höheren C_w -Wertes zur Folge hätte.

Diese Beobachtung läßt sich eigentlich nur durch eine sehr kleine Sinkgeschwindigkeit der kleinen Partikel und ein daraus resultierendes, langes Mittragen in der Luftströmung erklären. Bei größeren Partikeln tritt dies nicht mehr auf, da dort die Fallgeschwindigkeit gegenüber dem Einfluß der Luftströmung dominiert. Bei kleiner Fallzeit kann somit die umgebende Luft den Partikel auch nur kurze Zeit beeinflussen.

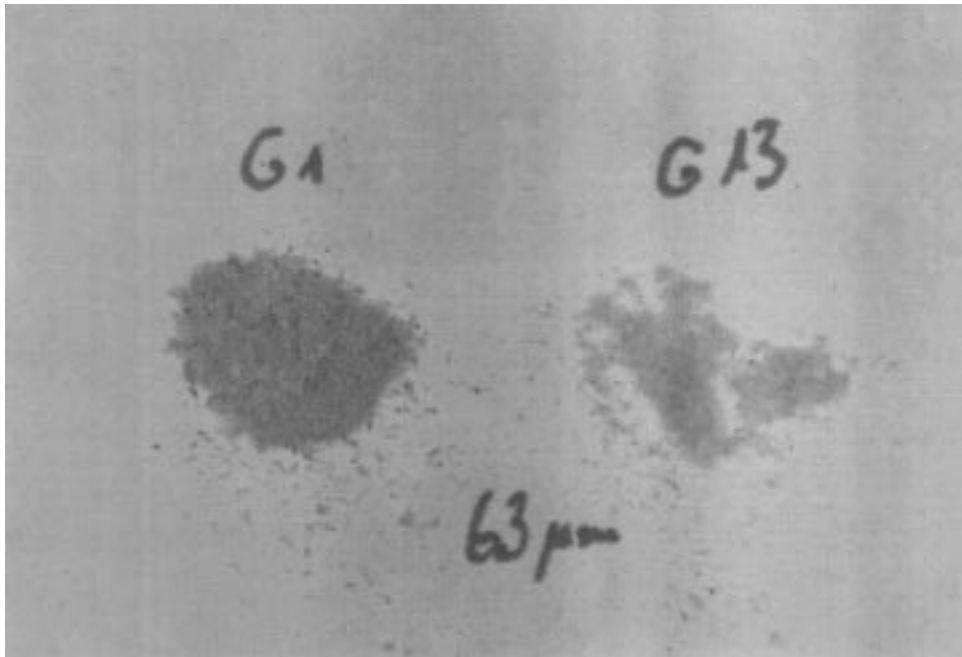


Bild 6-24: Partikel mit 63µm Größe aus den Feldern G1 und G13

7 Theoretischer Späneflug

7.1 Festlegen des Koordinatensystems

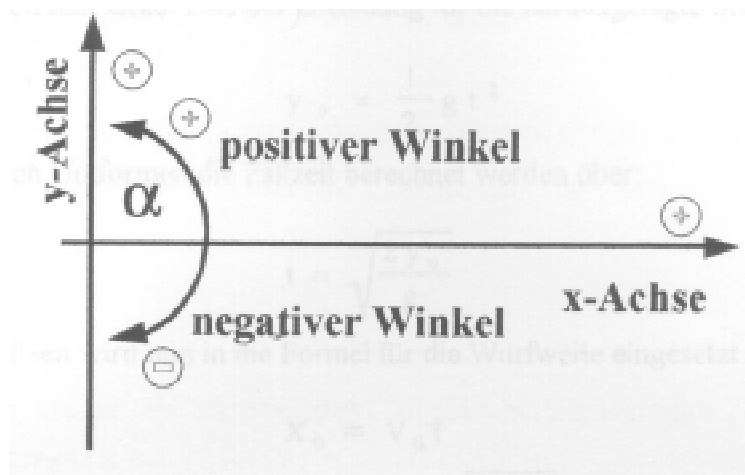


Bild 7.1: Das karthesische Koordinatensystem

Für die Berechnung der Flugbahn eines Partikels wurde der Ursprung des kartesischen Koordinatensystems an den Austrittspunkt der Schneide aus dem Holzwerkstoff, dem sogenannten Spanentstehungspunkt, gelegt. Die x-Achse wird nach rechts und die y-Achse nach oben als positiv angenommen. Der Winkel α wird im mathematisch positiven Sinn von der positiven x-Achse aus als positiv definiert. Alle folgenden Betrachtungen und Berechnungen von Flugbahnen beziehen sich nun auf diese Festlegung des Koordinatensystems.

7.2 Betrachtung der Flugbahn ohne Reibung im luftleeren Raum unter dem Einfluß der Erdanziehungskraft

Es wird zunächst angenommen, daß die Partikel an der Austrittsstelle des Sägeblattes aus dem Werkstoff, dem Spanentstehungspunkt, das Sägeblatt mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0=10\text{m/s}$ verlassen. Die maximale Fallhöhe y_0 beträgt 84 cm und entspricht damit der senkrechten Entfernung des Spanabflugpunktes zur Oberkante des Auffangrasters. Der Einfluß der Luftgeschwindigkeit, die durch das Sägeblatt verursacht wird, soll vorerst noch

nicht betrachtet werden. Ebenso sei Reibungsfreiheit angenommen.

Unter diesen Voraussetzungen gelten die Formeln des horizontalen Wurfs bei einem Abflugwinkel von null Grad. Aus der Gleichung für die zurückgelegte Strecke in y-Richtung,

$$y_0 = \frac{1}{2} g t^2 \quad (7-1)$$

kann durch Umformen die Fallzeit berechnet werden über:

$$t = \sqrt{\frac{2 y_0}{g}} \quad (7-2)$$

Diese Fallzeit wird nun in die Formel für die Wurfweite eingesetzt.

$$x_0 = v_0 t$$

$$x_0 = v_0 \sqrt{\frac{2 y_0}{g}} \quad (7-3)$$

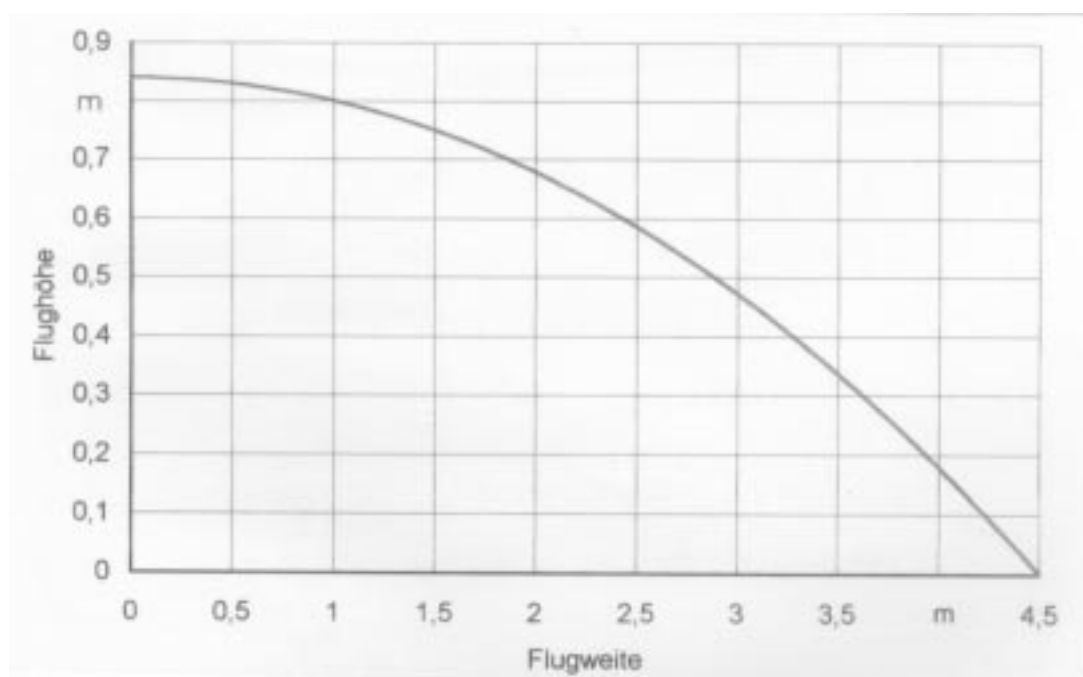


Bild 7.2: Die Flugbahn im luftleeren Raum (nicht maßstäblich)

Setzt man nun die gemessenen Daten von $y_0 = 0,84$ m und eine Abfluggeschwindigkeit v_0 in m/s in die Gleichung ein, so erhält man die entsprechende Wurfweite x_0 . Die Form der Flugbahn ergibt einen Ast einer Parabel mit nach unten geöffneten Schenkeln.

7.3 Strömungswiderstand des Partikels

Zunächst soll der Einfluß der Luftgeschwindigkeit der Umgebungsluft weiterhin nicht berücksichtigt werden. Das bedeutet, die Luft als umgebendes Medium soll als ruhend angesehen werden.

Durch das Druckgefälle Δp am umströmten Partikel ist der statische Druck an der Partikelrückseite kleiner als im Staupunkt an der Partikelstirnseite /16/. Weiter ist die Luftgeschwindigkeit im Staupunkt des Partikels gleich null. Somit ergibt sich nach Bernoulli folgende Druckdifferenz Δp :

$$\Delta p = \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \quad (7-4)$$

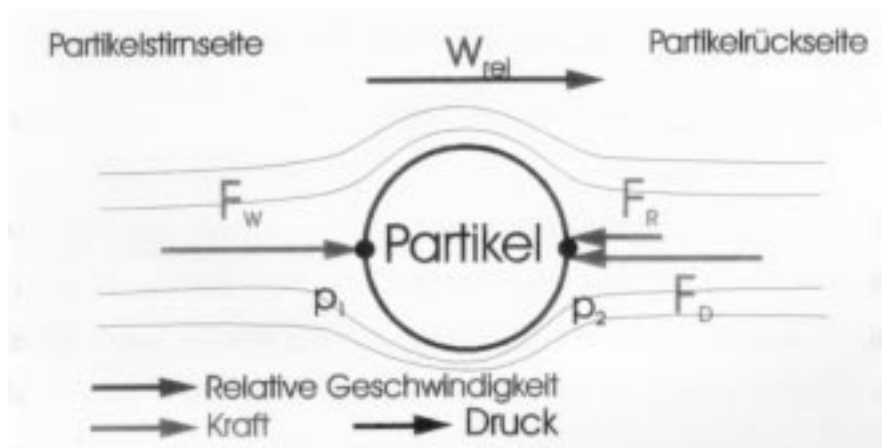


Bild 7.3: Skizze des fliegenden Partikels mit Kräften und Drücken

Die Geschwindigkeit w_{rel} ist die Geschwindigkeit zwischen dem Partikel und der umgebenden ruhenden 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 Körper-formen 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:

$$F_D = C_D \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A. \quad (7-5)$$

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

$$F_W = F_R + F_D$$

$$F_W = F_R + C_D \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A \quad (7-6)$$

Am fliegenden Partikel müssen also Reibkraft und Druckwiderstand überwunden werden.

In der Praxis läßt sich meist nur wenig über die Reibkraft aussagen /16/. 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:

$$F_W = C_W \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A \quad (7-7)$$

In dieser Gleichung zur Berechnung der Widerstandskraft F_W sind, bis auf den Widerstandsbeiwert C_W , alle Variablen auf der rechten Seite der Gleichung für den Abflugzeitpunkt bekannt.

.Im folgenden soll der Widerstandsbeiwert C_w zunächst als konstant angenommen werden, obwohl er eigentlich von der Reynoldszahl abhängig ist. Direkt berechnen läßt sich der C_w -Wert nur in einigen wenigen Ausnahmefällen, die sich zumeist auf sehr kleine Re -Zahlen beschränken, über Näherungsfunktionen. /18/

7.4 Flugbahn des Partikels in Abhängigkeit von der Widerstandskraft

Aus der gefundenen Kraft F_w kann die Beschleunigung a des Partikels aus der Grundgleichung der Mechanik errechnet werden.

$$a = \frac{F_w}{m_p} \quad (7-8)$$

Es ist jedoch darauf zu achten, daß die Beschleunigung a aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der verwendeten Kraft streng genommen nur für den gerade betrachteten Zeitpunkt gilt.

Damit ergeben die Bewegungsformeln, unter Verwendung des aktuellen Erhebungswinkels α der Flugbahn, in den beiden Koordinatenrichtungen die Momentanbeschleunigungen:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -a \cos \alpha = a_{mx} \\ \frac{dv_y}{dt} &= a \sin \alpha + g = a_{my} \end{aligned} \quad (7-9)$$

Somit sind die momentanen Beschleunigungen des Partikels a_m sowohl in die x - als auch in die y -Koordinatenrichtung bekannt. Aus diesen momentanen Beschleunigungen lassen sich über ein Weginkrement Δs die jeweils neuen Geschwindigkeiten des Partikels in beiden Koordinatenrichtungen über die Formel für beschleunigte Bewegungen mit Anfangsgeschwindigkeit berechnen.

$$\begin{aligned} v_{xi} &= \sqrt{v_{xi-1}^2 + 2a_{mx}\Delta s} \\ v_{yi} &= \sqrt{v_{yi-1}^2 + 2a_{my}\Delta s} \end{aligned} \quad (7-10)$$

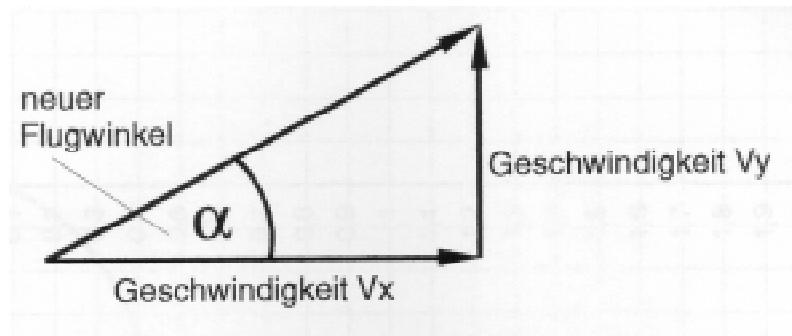


Bild 7.4: Die Berechnung des neuen Erhebungswinkels α

Addiert man die beiden neu errechneten Geschwindigkeiten nun vektoriell, so kann der daraus

resultierende neue Winkel, unter welchem sich der Partikel weiterbewegt, berechnet werden.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (7-11)$$

Aus den beiden ermittelten Momentangeschwindigkeiten kann der Betrag der neuen Fluggeschwindigkeit mit

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (7-12)$$

errechnet werden.

Teilt man die Wegstrecke in genügend kleine Weginkremente Δs , so erhält man durch Wiederholung der Rechenoperationen von Gleichung 7.8 bis 7.12 über eben diese Weginkremente die Flugbahn des Partikels in Abhängigkeit von dessen C_w -Wert, wenn man die zurückgelegten Wegstrecken für die einzelnen Berechnungsschritte auf beiden Achsen aufsummiert und in einem Diagramm abträgt (siehe Bild 7.5).

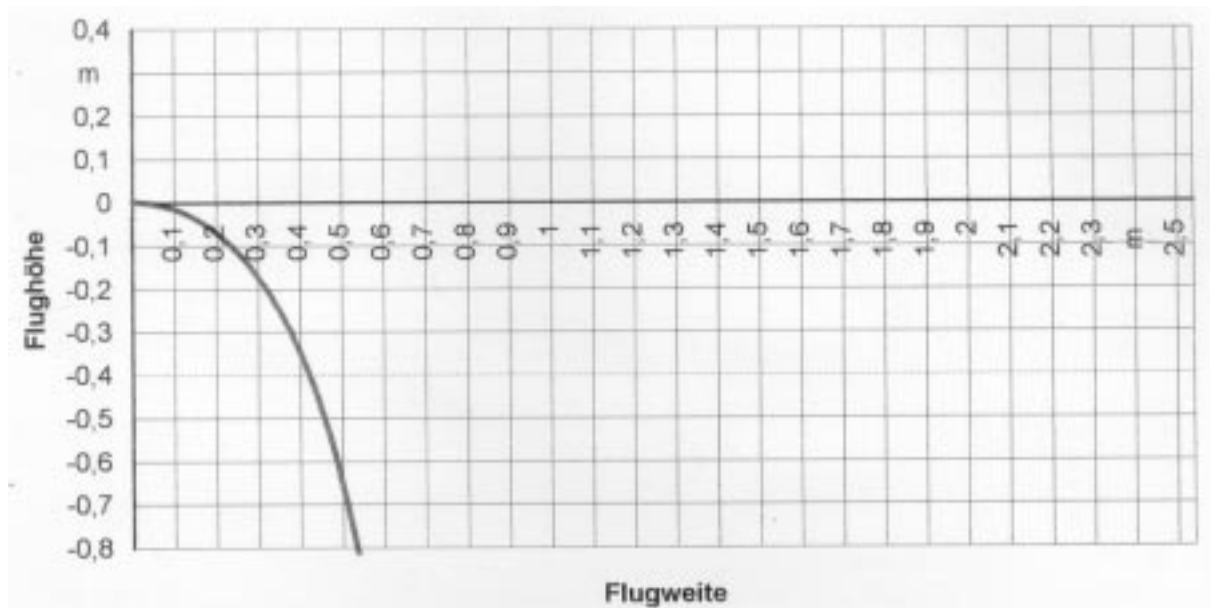


Bild 7.5: Die Partikelflugbahn in ruhender Luft unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes

7.5 Flugbahn des Partikels unter Einbeziehung der umgebenden Luftgeschwindigkeit

Da die umgebende Luft durch das sich drehende Sägeblatt in Bewegung versetzt wird, darf die Berechnung der Flugbahn nicht mit der Absolutgeschwindigkeit des Partikels durchgeführt werden, sondern nur mit der relativen Geschwindigkeit von Partikel zu umgebender Luft.

Für die Messung der umgebenden Luftgeschwindigkeiten (Kapitel 5) an verschiedenen Punkten im Raum lassen sich keine festen Luftgeschwindigkeiten ermitteln, da die Strömungsform der Luft eindeutig turbulent ist. Dies bedeutet notwendigerweise eine starke Steuerung der momentan gemessenen Luftgeschwindigkeitsbeträge. So wurden in einem Diagramm (Bild 7.6) Durchschnittswerte der Luftgeschwindigkeit aufgezeichnete und die daraus resultierende Kurve durch eine stetige Funktion ersetzt, da diese einfacher zu handhaben ist.

Es wird vermutlich kein großer Fehler durch die Approximation der tatsächlichen Kurve durch eine Logarithmusfunktion begangen, da der einzelne Span während seines Fluges eine

zufällige Konstellation an Luftgeschwindigkeitswerten der umgebenden Luft erfährt, die ihn beeinflussen.

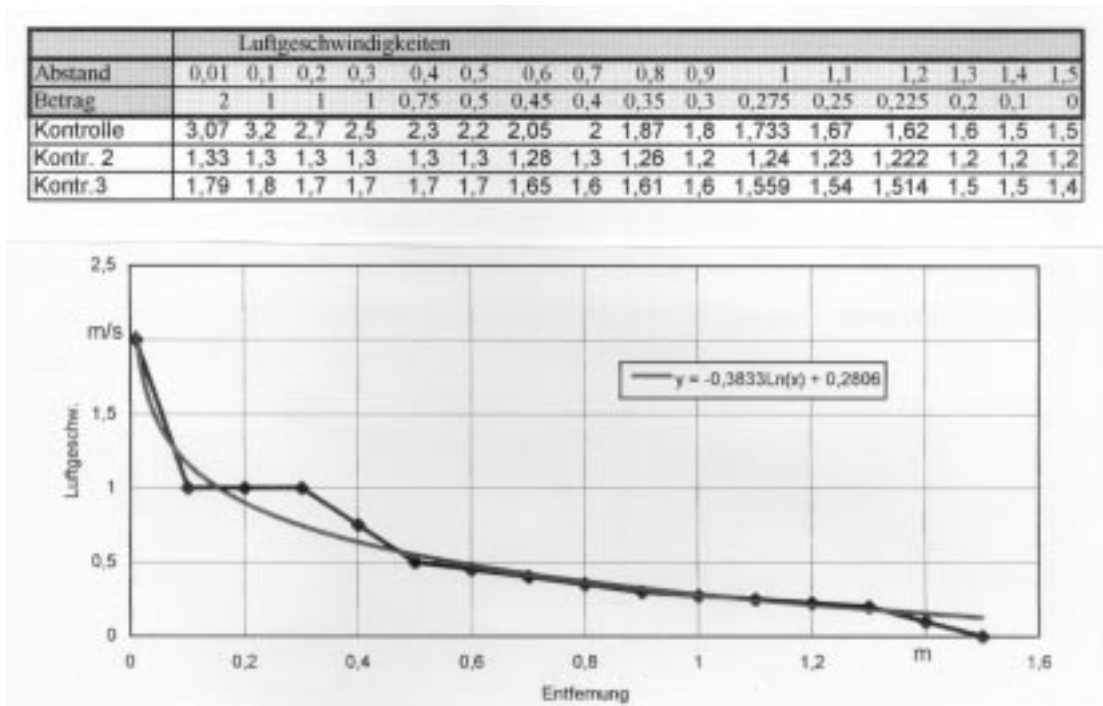


Bild 7-6: Die Funktion der umgebenden Luftgeschwindigkeit

Durch Einsetzen der jeweiligen x-Koordinate in die gefundene Funktion lässt sich nun schnell ein Wert für die durchschnittlich zu erwartende Luftgeschwindigkeit an jeder Stelle der Flugbahn ermitteln.

Für die Berechnung der Widerstandskraft findet somit in Gleichung 7-7 anstelle der absoluten Partikelgeschwindigkeit w die relative Geschwindigkeit des Partikels zur umgebenden Luft w_{rel} Verwendung, da nur diese am Span spürbar ist.

$$F_w = C_w \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w_{\text{rel}}^2 \cdot A \quad (7-13)$$

Dabei errechnet sich w_{rel} aus:

$$w_{\text{rel}} = w - w_{\text{amb}} \quad (7-14)$$

Für die umgebende Luftgeschwindigkeit w_{amb} läßt sich nach obigem Diagramm

$$w_{\text{amb}} = -0,3833 \cdot \ln(x) + 0,2806 \quad (7-15)$$

schreiben.

Die weitere Berechnung der Flugbahn läuft nun ab Gleichung 7-8 analog der Berechnung aus Kapitel 7.4. Es ist allerdings darauf zu achten, daß in Gleichung 7-10 für v_{xi-1}^2 die absolute Geschwindigkeit in x-Richtung eingesetzt werden muß. Man erhält somit aus dieser Gleichung die neue absolute Geschwindigkeit in dieser Richtung, mit welcher das Diagramm der Flugbahn gezeichnet werden kann (Bild 7.7).

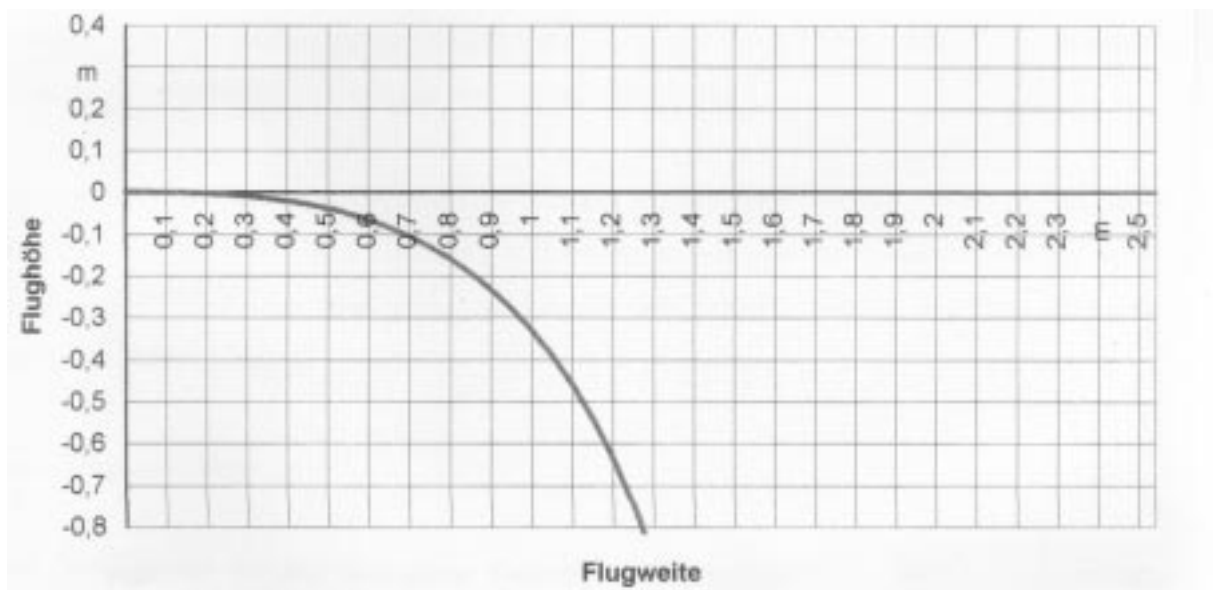


Bild 7.7: Die Flugbahn des Partikels unter dem Einfluß des Luftwiderstands und der umgebenden Luftgeschwindigkeit

7.6 Vernachlässigte physikalische Effekte

Es gibt noch eine Reihe zusätzlicher physikalischer Effekte, die unberücksichtigt bleiben müssen. Teils, weil es sich um vernachlässigbar kleine Beeinflussungen der Flugbahn handelt, teils, weil die notwendigen Daten für ihre Bestimmung fehlen. Der Vollständigkeit halber sollen sie aber dennoch erwähnt werden. Es wird beim einen oder anderen Effekt sicher möglich sein, die benötigten Werte durch zusätzliche Untersuchungen zu ermitteln.

7.6.1 Turbulente Umströmung des Partikels

Durch Ablösungserscheinungen und Wirbelbildung an scharfen Kanten des Partikels wirken nicht, wie angenommen, durch die umgebende Luftströmung nur Kräfte in x-Richtung auf den Partikel. Die turbulente Umströmung des Spanes hat vielmehr auch vertikale Kräfte zur Folge.

Wie groß diese vertikalen Kräfte auf den Körper sind, läßt sich aber genausowenig wie deren Richtung im Raum aus den durchgeführten Versuchen ermitteln. Zudem wird die nicht in x-Richtung wirkende Kraftkomponente durch die Turbulenz der Strömung und die Rotation des Partikels sich permanent in Richtung und Betrag verändern.

Die vertikalen Kraftkomponenten der Umströmung werden vernachlässigt, indem angenommen wird, daß sich deren zufällige Verteilung statistisch gesehen über die Gesamtmenge der Späne die Waage hält. Der Einzelspan erfährt so eventuell eine Bahnabweichung, das Gesamtkollektiv der Späne jedoch nicht.

7.6.2 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,

bedingt 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 so aus:

$$w_{\text{ges1}} = w_{\text{rel}} + w_R \quad (7-16)$$

$$w_{\text{ges2}} = w_{\text{rel}} - w_R \quad (7-17)$$

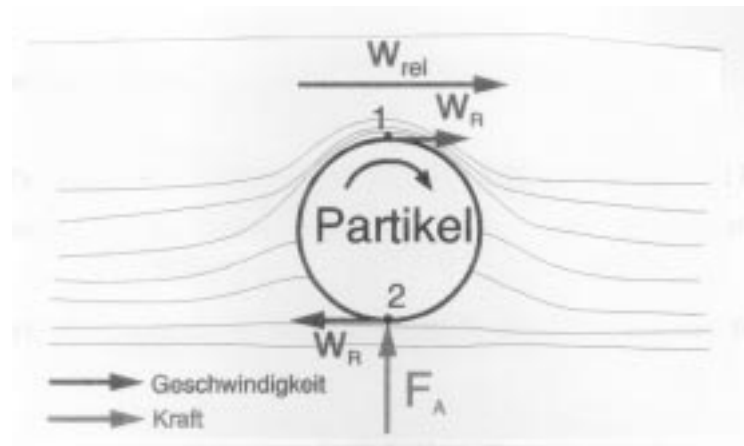


Bild 7.8: Der Magnus-Effekt am rotierenden Partikel

Damit ergibt sich nach Bernoulli analog der Gleichung 7-4 eine Druckdifferenz:

$$p_1 < p_2 \quad (7-18)$$

Durch diesen Druckunterschied wird am rotierenden Zylinder eine Querkraft F_q erzeugt. Sie wirkt rechtwinklig zur Strömungsrichtung und wirkt, je nach der Drehrichtung des Partikels, flugbahnverlängernd oder flugbahnverkürzend.

Nach dem Entdecker dieses Effekts, dem deutschen Physiker H. G. Magnus (1802 bis 1870), spricht man hier vom Magnus-Effekt. /16/

Zur rechnerischen Bestimmung der durch den Magnus-Effekt induzierten Querkraft fehlen brauchbare Aussagen über die Rotationsgeschwindigkeit des Partikels. Um diese zu gewinnen, wären schärfere Bilder aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Kapitel 5) notwendig, aus welchen dann eine Rotationsgeschwindigkeit ermittelt werden könnte.

Die Eigendrehung könnte an entsprechend unsymmetrischen Spänen, die beim Zerspanen aus den beschichteten Deckschichten der Spanplatten entstehen, beobachtet werden.

7.6.3 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 rechnerische Ermittlung der statischen Auftriebskraft läßt sich nach folgender Formel bestimmen:

$$F_A = V \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot g \quad (7-19)$$

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 auf die weitaus größere Masse des Partikels kaum einen Einfluß. Darum kann die statische Auftriebskraft für die Flugbahnberechnung vernachlässigt werden.

7.6.4 Dynamischer Auftrieb

Abhängig von der Körperform ergibt sich beim Flug des Partikels eine dynamische Auftriebskraft mit positivem oder negativem Vorzeichen. Diese hängt nach Gleichung 7-4 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 Partikel aus den Zerspanversuchen läßt jedoch keinen genauen Schluß über die Geschwindigkeitsverteilungen 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.

Es ist anzunehmen, daß ein großer Teil der Späne eine annähernd symmetrische Form hat, wie aus nachfolgendem Bild 7.9 ersichtlich ist. Lediglich die großen Späne, vor allem wenn sie noch Teile der Beschichtung beinhalten, weichen sehr stark von einer symmetrischen Struktur ab. Ein symmetrischer Körper jedoch erfährt beim Flug in ausgerichtetem Zustand ohne Rotation keine dynamische Auftriebskraft. So dürfte die Vernachlässigung keinen großen Fehler in der Flugbahnberechnung verursachen.



Bild 7.9: Partikel aus dem Feld G7 mit maximal 500 µm Größe

7.6.5 Zusammenstoß von Partikeln

Bei der Berechnung der Flugbahn wird von einem einzelnen fliegenden Partikel ausgegangen. Tatsächlich handelt es sich jedoch in der Realität um eine Partikelwolke, wie nachfolgendes Bild 7-10 deutlich macht. 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

$$v_1 = v_2 = \frac{m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2}{m_1 + m_2} \quad (7-20)$$

und den total elastischen Stoß mit

$$v_1 = 2 \frac{m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2}{m_1 + m_2} - u_1 \quad (7-21)$$

$$v_2 = 2 \frac{m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2}{m_1 + m_2} - u_2 \quad (7-22)$$

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

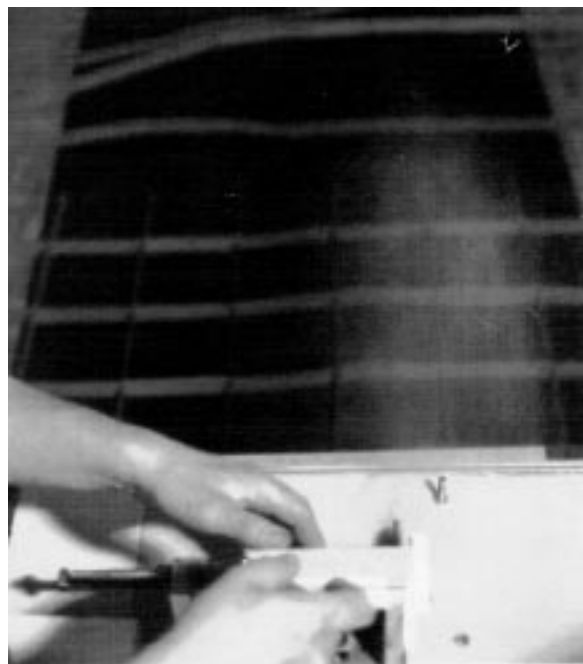


Bild 7.10: Beim Zerspanungsprozeß erzeugte Spänewolke

Zusammenstöße von Körpern erfolgen jedoch streng genommen nie nach diesen reinen Stoßformen. Beim Stoß wird kinetische Energie in Wärme und in irreversible Verformung umgewandelt. Diese Energien werden als ΔW zusammengefaßt. Die Mischform der beiden oben genannten Stoßformen wird als teilelastischer Stoß bezeichnet. Der Energiesatz des teil-

elastischen Stoßes lautet:

$$\frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2 = \Delta W + \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \quad (7-23)$$

Die Geschwindigkeiten der Körper beim teilelastischen Stoß lassen sich kaum berechnen, da für die in andere Energieformen umgewandelte kinetische Energie 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. Nachfolgendes Bild 7.11 zeigt eine Stroboskopaufnahme eines solchen schiefen Stoßes zweier Kugeln von unterschiedlicher Masse, wie er auf fliegende Partikel übertragen werden könnte.

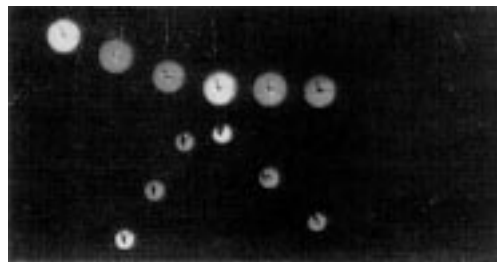


Bild 7.11: Die Stroboskopaufnahme eines schiefen Stoßes zweier Kugeln mit unterschiedlicher Masse /17/

7.6.6 Einfluß der Spänekonzentration auf die Luftgeschwindigkeit

Je mehr Partikel sich simultan in einer Ebene senkrecht zur Flugrichtung bewegen, desto kleiner wird der Zwischenraum zwischen den Partikeln, durch den die verdrängte Luft entweichen kann. Bei kleiner werdendem Partikelzwischenraum wird somit die umgebende Fluidgeschwindigkeit größer.

Aus der Massenbilanz folgt eine Gleichung für die verminderte Sinkgeschwindigkeit, die einer verminderten absoluten Fluggeschwindigkeit bei frei im Raum fallenden Partikeln entspricht:

$$v_p = v_F \cdot \frac{A_R}{A_p} \quad (7-24)$$

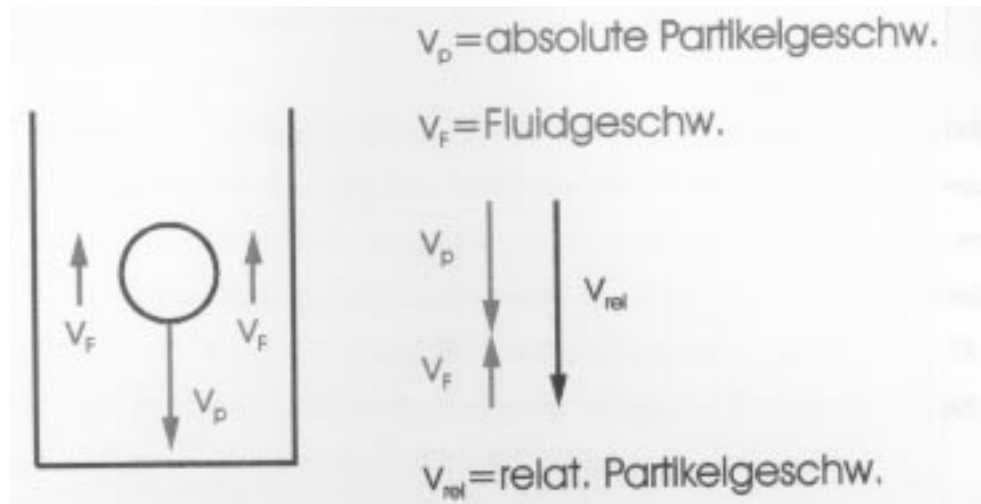


Bild 7.12: Fallender Partikel im Raum mit Geschwindigkeiten

Dabei steht A_R für die Fläche des betrachteten Raumes. Es ist darauf zu achten, einen Raum auszuwählen, über dem die Spänekonzentration annähernd gleich groß ist, da der umgebende Raum während des Fluges, als Ganzes betrachtet, gegenüber dem Span gegen unendlich geht. Die Variable A_p steht für die projizierte Fläche des Partikels.

Ist die umgebende Luftgeschwindigkeit jedoch mit der Fluggeschwindigkeit des Partikels gleichgerichtet, so ergibt sich eine höhere Partikelgeschwindigkeit durch eine höhere beschleunigende umgebende Fluidgeschwindigkeit.

Die Grenze der Vernachlässigbarkeit ist erreicht, wenn der mittlere Teilchenabstand kleiner als der sechsfache Partikeldurchmesser ist. Wie groß die Partikelkonzentration während des Versuchs jedoch tatsächlich war, kann nicht festgestellt werden. Es wird für die weiteren Betrachtungen aber angenommen, daß der Einfluß der Partikelkonzentration auf die umgebende Fluidgeschwindigkeit vernachlässigt werden kann.

8 Vergleich des theoretischen mit dem realen Späneflug

8.1 Grundsätzliche Annahmen und Vereinfachungen

Für den Vergleich der ermittelten realen Flugdaten, die wie in Kapitel 5 beschrieben aufgenommen wurden, und den theoretischen Flugdaten, die in Kapitel 7 hergeleitet wurden, sind einige Annahmen und Verallgemeinerungen für verschiedene Werte zu treffen. Es ist das Ziel, durch den Vergleich des theoretischen und des realen Spanflugs die Werte und Beziehungen zu bestimmen, die für die Programmierung der Flugbahnberechnung noch fehlen. Dies ist ein brauchbarer Wert für die Partikelfläche, die Partikelmasse, die Anfangsgeschwindigkeit und den Abflugwinkel, sowie eine Beziehung für den C_w -Wert.

8.1.1 Verwendete Partikelfläche

Wollte man die tatsächlich wirksame Partikelfläche ermitteln, müssten zuerst einmal die Hauptträgheitsachsen des Partikels gefunden werden. Die Kontur senkrecht zur 1. Hauptträgheitsachse wäre dann als wirksame Partikelfläche auszumessen und in die Rechnung einzusetzen. Darüber hinaus ist es notwendig, die Partikelflächen an einer Vielzahl von Partikeln zu bestimmen, um einen realen Durchschnittswert für eine bestimmte Spanklasse zu erhalten, da die Körperformen der einzelnen Partikel sich sehr stark unterscheiden.

Es ist überdies zweifelhaft, ob die exakte Ermittlung der wirksamen Partikelfläche aus den Hauptträgheitsachsen wirklich einen realitätsnahen Wert ergeben kann, da die einzelnen Partikel während des Fluges rotieren und somit die wirksame Partikelfläche sich permanent verändert.

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

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (8-1)$$

Um festzustellen, wo die durchschnittliche Partikelgröße der einzelnen Siebfractionen liegt, wurde eine Anzahl verschiedener Partikel aus der Siebfraction der Siebmaschenweite mit einer Feinmeßschraube, wie in Kapitel 5 beschrieben, ausgemessen. Diese Partikeldurchmesser wurden aufsummiert und durch die Anzahl der vermessenen Partikel geteilt.

$$D_{\varnothing} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (8-2)$$

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

Da die gemessenen Durchschnittswerte der Partikel kleiner als die Siebmaschenweite des Siebes in dem sie sich befanden waren, ist anzunehmen, daß die Partikel beim Messen auf dem Meßamboß der Meßschraube sich in ihre stabile Gleichgewichtslage gedreht hatten. Dies bedeutet, daß der kleinste Durchmesser des Partikels gemessen wurde. 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 66 165 größtenteils gewährleistet ist.

Mit der Kenntnis von zwei Außenmaßen, der Siebmaschenweite und dem statistisch gemittelten, gemessenen Außenmaß, ist es sinnvoll, als Partikelfläche eine Ellipse anzunehmen.

Sie stellt, neben dem Rechteck, die einzige mit zwei unterschiedlichen Außenmaßen eindeutig beschreibbare einfache geometrischen Fläche dar. Dabei erhält man bei Verwendung des Rechtecks sicher eine zu große Fläche, da das Rechteck die größtmögliche Fläche verkörpert.

Somit wird die wirksame Partikelfläche in der theoretischen Flugbahnberechnung durch eine Ellipse angenähert. Dabei bildet die Siebmaschenweite die größere Achse und der gemessene Durchmesser, die kleinere Achse.

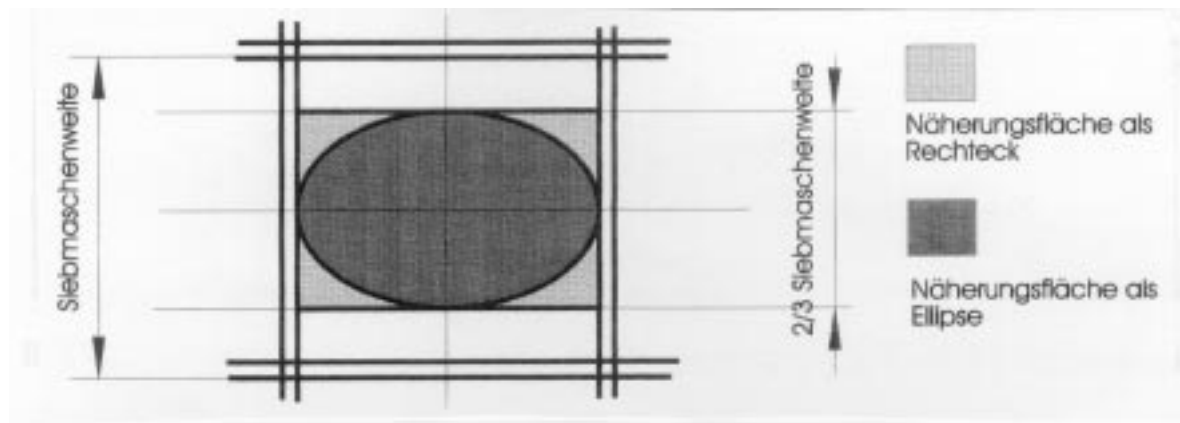


Bild 8.1: Annäherung der Partikelfläche durch verschiedene Geometrien

Die Partikelfläche berechnet sich somit aus:

$$A = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot \frac{D_{\text{Sieb}}}{2} \cdot \left(\frac{D_{\text{Sieb}} + D_{\text{Sieb}-1}}{4} \right) \quad (8-3)$$

Eine Zusammenstellung der so errechneten, durchschnittlichen Partikelflächen findet sich in Bild 8.2.

8.1.2 Verwendete Partikelmasse

Die durchschnittlichen Partikelmassen sind über den gesamten Bereich von 2 mm bis 63 µm nicht mit einer einfachen Funktion beschreibbar. Vor allem im Bereich der kleinen Siebmaschenweiten, wo die Werte eng beieinander liegen, sind die Näherungsfunktionen unbrauchbar. Sie verlaufen bei den meisten Polynomen gerade hier im negativen Bereich und sind deshalb nicht anwendbar. Um jedoch die kleinen Partikel separat durch eine Funktion zu approximieren, fehlen gemessene Werte und Abmessungen.

Auch ein Zusammenhang zwischen dem Radius aus der Siebmaschenweite mit dem Partikelgewicht läßt sich nicht herstellen. Er führt, wie die folgende Tabelle in der letzten Spalte deutlich macht, zu viel zu kleinen Partikelmassen.

in μm	in m^2	in m^2	in kg	in kg	in %	in kg
Siebmaschenweite	Aus Maschenweite errechnete Partikelfläche (Kugel)	errechnete Partikelfläche (Ellipse)	Durchschnittliches Gewicht (gemessen)	interpoliertes Gewicht	prozentuale Abweichung	Gewicht bezogen auf den Radius
2000	3,14159E-06	2,35619E-06	5,19E-05	5,00E-05	3,70	5,19E-05
1000	7,85398E-07	5,89049E-07	1,35E-05	5,00E-06	170,87	1,94445E-08
500	1,9635E-07	1,47262E-07	2,13E-06	5,00E-07	326,00	1,45834E-11
250	4,90874E-08	3,68155E-08	3,94E-08	5,00E-08	-21,20	2,18751E-14
125	1,22718E-08	9,22843E-09	4,80E-09	5,00E-09	-4,00	8,58252E-17
63	3,11725E-09	1,55862E-09	?	5,00E-10	?	3,96927E-19
0	0	0	?	5,00E-11	?	2,36266E-21

Bild 8.2: Tabelle der gemessenen und berechneten Partikelflächen und Partikelmassen

Diese eklatante Abweichung von den gemessenen Werten kann nur auf verschiedene, nicht kugelhähnlichen Körperformen der Partikel der verschiedenen Siebfraktionen zurückzuführen sein, die aber dennoch nicht unbedingt einen Einfluß auf andere Werte, wie beispielsweise den C_w -Wert, haben müssen. So ist es durchaus denkbar, daß bei stabförmigen Partikeln die Stablänge über verschiedene Siebfraktionen gleich bleibt, sich der Durchmesser des Partikels aber und mit ihm Werte wie die Partikelmasse und der C_w -Wert fraktionsabhängig ändern.

Aus dieser Problemstellung heraus wurde als Näherung, bei einer Halbierung der Siebmaschenweite, das Gewicht um den Faktor 10 reduziert. Es ergeben sich dabei, wie in Bild 8.2 zu erkennen ist, Abweichungen von der gemessenen Masse bis zu 326 %. Jedoch lassen sich, sowohl für die großen, als auch für die kleinen Partikelgrößen, gute Näherungen angeben. Gerade auf die kleinen Partikelgrößen, die aufgrund der Betrachtungen aus dem 6. Kapitel für die Berechnung sehr wichtig sind, ist diese Methode gut anwendbar.

Das folgende Bild 8.3 zeigt die Verläufe der gemessenen und der angenäherten Partikelmassen.

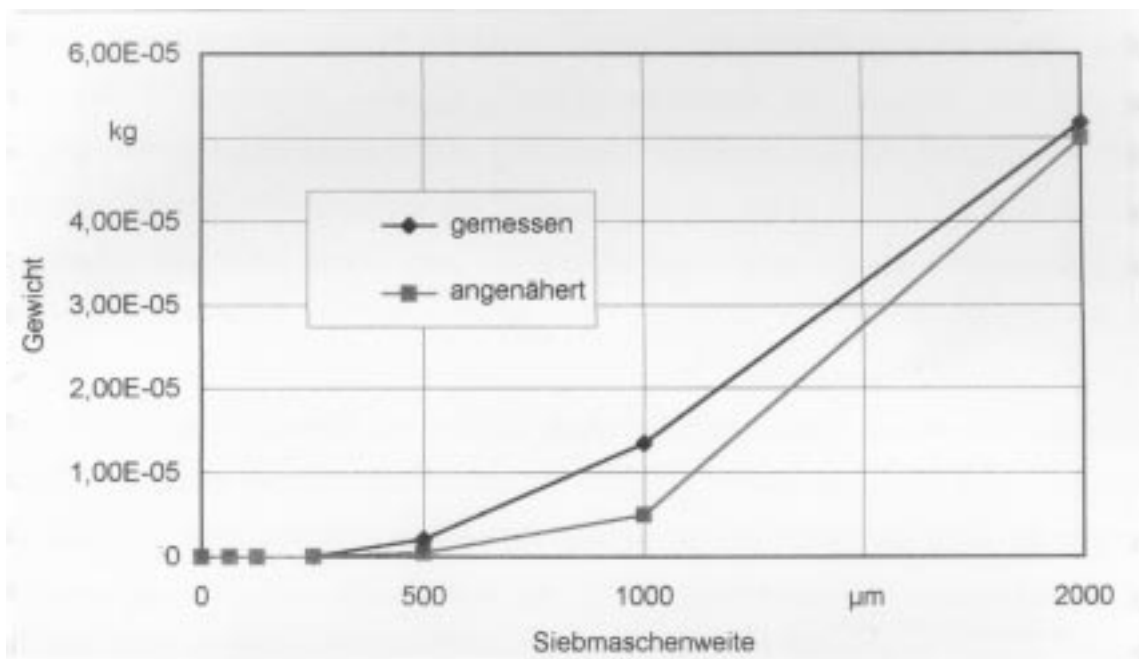


Bild 8.3: Gemessene und angenäherte Verläufe von Partikelgewicht zu Siebmaschenweite

8.1.3 Verwendete Anfangsgeschwindigkeit

Die Kenntnis einer Anfangsgeschwindigkeit ist für die Rechnung unumgänglich. Die einzigen Werte über die realen Anfangsgeschwindigkeiten liegen aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme, auf die in Kapitel 5.8 eingegangen wurde, vor.

Die aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen errechneten Anfangsgeschwindigkeiten schwanken stark und liegen im Bereich von 0,88 m/s bis 83,16 m/s. Ihr arithmetischer Mittelwert befindet sich bei 15,92 m/s.

Berechnet man die Schnittgeschwindigkeit v_c des Kreissägeblatts mit der Formel

$$v_c = \pi \cdot n \cdot D \quad (8-4)$$

so erhält man mit der gemessenen Drehzahl n von 4225 Umdrehungen pro Minute eine Schnittgeschwindigkeit von 42 m/s, was ca. das 2,5fache der gemessenen durchschnittlichen

Anfangsgeschwindigkeit bedeutet.

Betrachtet man den Streubereich der gemessenen Anfangsgeschwindigkeiten, so zeigt sich, daß die maximale gemessene Anfangsgeschwindigkeit beinahe das Doppelte der berechneten Schnittgeschwindigkeit beträgt. Dies läßt darauf schließen, daß die Messung der Abfluggeschwindigkeiten recht ungenau und fehlerbehaftet war, da es unwahrscheinlich ist, daß die rotierenden Sägezähne einen Span auf das Doppelte ihrer eigenen Geschwindigkeit beschleunigen können.

Der weit streuende Bereich der Anfangsgeschwindigkeiten zeigt zudem, daß nur mit einer statistischen gemittelten Durchschnittsgeschwindigkeit gerechnet werden kann, jedoch nicht mit der Schnittgeschwindigkeit. Darüber hinaus ist ungeklärt, ob diese Durchschnittsgeschwindigkeit für alle Spanklassen das gleiche Verhältnis zur Schnittgeschwindigkeit aufweist, oder ob beispielsweise kleine Späne mit geringer Masse eine Beschleunigung auf größere Geschwindigkeiten erfahren als größere Partikel mit großer Masse. Dies konnte mit der vorhandenen Meßtechnik der Hochgeschwindigkeitsaufnahme nicht geklärt werden, da die Auflösung nicht ausreichte, um die Partikelgröße der entsprechenden Partikel zu bestimmen. Zudem konnten nur große Partikel beobachtet werden. Es ist also kein Vergleich der Anfangsgeschwindigkeiten verschiedener Partikelgrößen möglich.

In Ermangelung genauerer Werte muß vereinfachend angenommen werden, daß das Verhältnis der Anfangsgeschwindigkeiten zur Schnittgeschwindigkeit bei allen Partikelklassen gleich ist. Als Anfangsgeschwindigkeit wird in die Rechnung der ermittelte arithmetische Mittelwert der gemessenen Anfangsgeschwindigkeiten verwendet und davon ausgegangen, daß zusammen mit dem nachfolgend behandelten Abflugwinkel, mit diesen Durchschnittswerten eine Flugweite erzielt wird, die dem Maximum der Partikelverteilung entspricht.

8.1.4 Verwendeter Abflugwinkel

Beim Abflugwinkel wird genauso vorgegangen wie bei der Anfangsgeschwindigkeit. Aus den Abflugwinkeln der vermessenen Späne wird das arithmetische Mittel bestimmt und dieses als durchschnittlicher Abflugwinkel in die Rechnung eingesetzt.

Wie auch bei der Anfangsgeschwindigkeit kann hinsichtlich des Abflugwinkels nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob der gemessene Winkel tatsächlich dem in die Rechnung einzusetzenden Winkel entspricht. So weist gerade der Flugwinkel des ersten gemessenen Segments häufig deutliche Abweichungen von den Winkeln der nachfolgenden Segmente auf. Es bleibt ungeklärt, woher diese Winkelabweichung stammt, ob sie aus Fehlern des Meßverfahrens entspringt oder eine physikalische Ursache hat. Dies läßt sich eindeutig wohl nur durch genauere Untersuchungen der näheren Umgebung des Sägeblatts feststellen.

Für die Rechnung wird das arithmetische Mittel der gemessenen Abflugwinkel verwendet. Dabei stellt die Auswahl der betrachteten Partikel einen weiteren Unsicherheitsfaktor dar. Sie kann bezüglich des Abflugwinkels nicht mit Sicherheit als repräsentativ gelten. Da auf eine Folie mehrere Flugbahnen aufgezeichnet wurden bestand immer die Gefahr einer selektiven Auswahl an Partikelflugbahnen, abhängig von den bereits zuvor aufgezeichneten Flugbahnen auf der Folie. Für den statistisch genauen Abflugwinkel wäre eine Vielzahl an Winkelbestimmungen auf einzelnen Folien notwendig.

Trotz dieser teils unvermeidlichen Ungenauigkeiten bei der Winkelbestimmung dürfte der verwendete Mittelwert zumindest nicht gravierend vom tatsächlichen Mittelwert des Abflugwinkels abweichen.

Als Abflugwinkel wurde in die Rechnung ein Winkel von 21,21 Grad eingesetzt.

8.2 Vergleich der theoretischen und realen Flugweiten

8.2.1 Bestimmung des C_w -Wertes

Für die theoretische Flugbahnberechnung ist nun nur noch die Kenntnis des C_w -Wertes nötig. Doch läßt sich der Widerstandsbeiwert, wie in Kapitel 7.3 bereits beschrieben, nicht unmittelbar errechnen, sondern muß über Versuche ermittelt werden.

Zur Bestimmung des C_w -Wertes eignen sich in besonderer Weise die Partikelverteilungen des Verteilungstyps II, wie dies in Kapitel 6.1.3 ausführlich dargestellt wurde, da sie eine sehr scharf begrenzte Verteilung aufweisen.

Zur Bestimmung des C_w -Wertes wurde zuerst exemplarisch die Partikelverteilung (Kapitel 6) der Spanklasse von 250 μm Siebmaschenweite des Sägeblatts mit 16 Zähnen verwendet. Das Maximum der Verteilung befindet sich in der vierten Reihe des Rasters. Nimmt man die Mitte dieses Rasterfeldes als Aufschlagpunkt des Partikels an, so ist seine Flugweite 1,035 m.

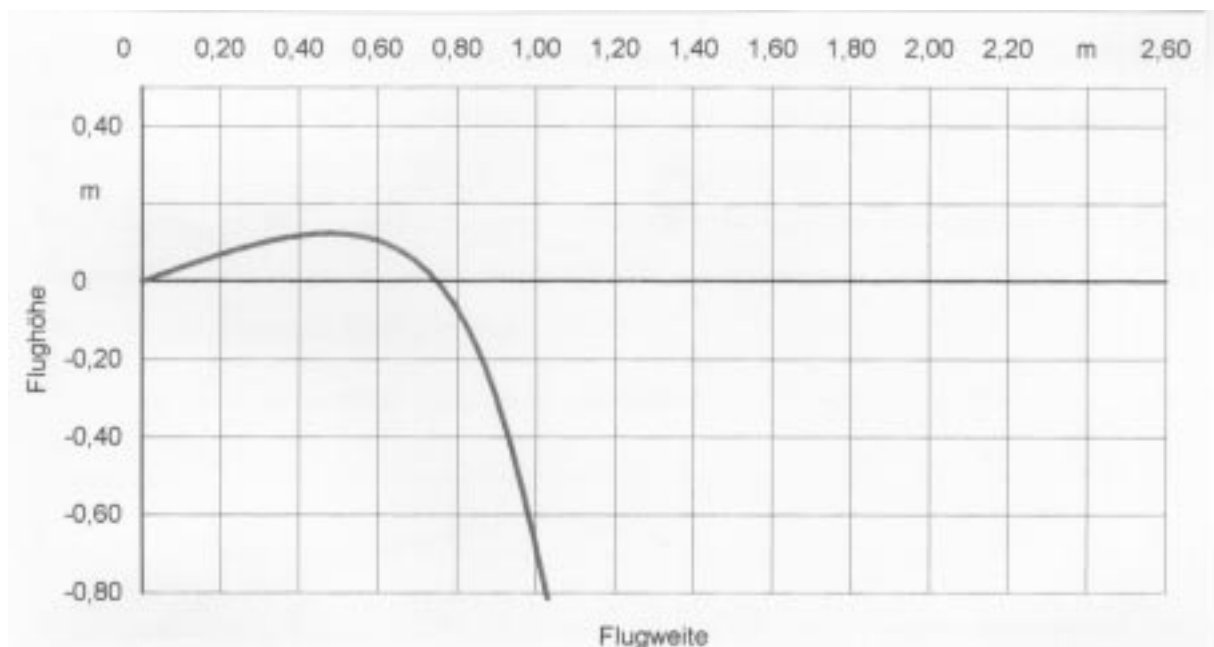


Bild 8.4: Flugbahnberechnung zur C_w -Wert-Bestimmung mit den eingesetzten Durchschnittswerten und Partikelgröße von 250 μm

Für den Vergleich der berechneten mit der realen Flugweite wird das programmierte Rechen-schema, welches im folgenden 9. Kapitel beschrieben wird, in seiner Urform verwendet. Ein fester C_w -Wert wird nach Einsetzen der Durchschnittswerte für Partikelfläche, Anfangsgeschwindigkeit und Abflugwinkel zunächst durch Variation bestimmt. Das bedeutet, der C_w -Wert wird so lange verändert, bis die berechnete Flugweite mit der Flugweite des Verteilungsmaximums übereinstimmt.

Bei $C_w = 9,5$ stimmt schließlich die berechnete Flugweite und das Maximum der Partikelverteilung überein.

8.2.2 Verlauf des C_w -Wertes über die Partikelgrößen

Mit der Variation des C_w -Wertes und dem Vergleich der berechneten und der realen Flugweiten, wurde ein ganz spezifischer fester C_w -Wert für die Partikelgröße von $250\text{ }\mu\text{m}$ Siebmaschenweite gefunden.

Versucht man nun die Flugweite der anderen Partikelklassen mit dem gleichen C_w -Wert zu berechnen, so ist festzustellen, daß die Flugweiten nicht mehr mit den ermittelten Maxima der Partikelverteilungen übereinstimmen. Dies wird beispielsweise an Bild 8.6 deutlich, das die Partikelklasse mit $500\text{ }\mu\text{m}$ Siebmaschenweite und dem C_w -Wert der Partikelklasse mit $250\text{ }\mu\text{m}$ Siebmaschenweite zeigt. Die ermittelte Flugweite am Verteilungsmaximum beträgt $1,245\text{ m}$, die errechnete Flugweite hingegen ergibt $1,87\text{ m}$.

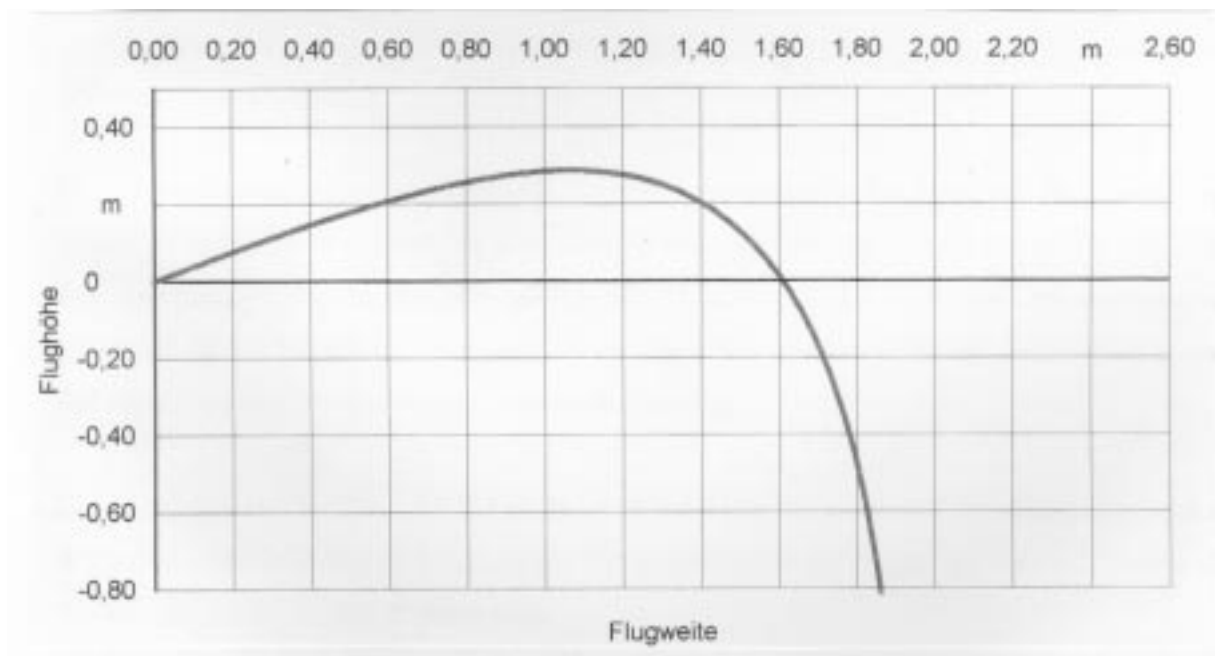


Bild 8.5: Flugbahnberechnung der Partikelklasse von $500\text{ }\mu\text{m}$ Größe mit C_w -Wert, der für die Partikelklasse von $250\text{ }\mu\text{m}$ Größe ermittelt wurde

Variiert man nun bei allen Partikelklassen, bei denen ein Vergleich von rechnerischer und realer Flugbahn möglich ist, den Cw-Wert so lange, bis die gemessenen Flugweiten errechnet werden, so ergibt sich ein Verlauf von Cw-Werten, der in Bild 8.6 dargestellt ist.

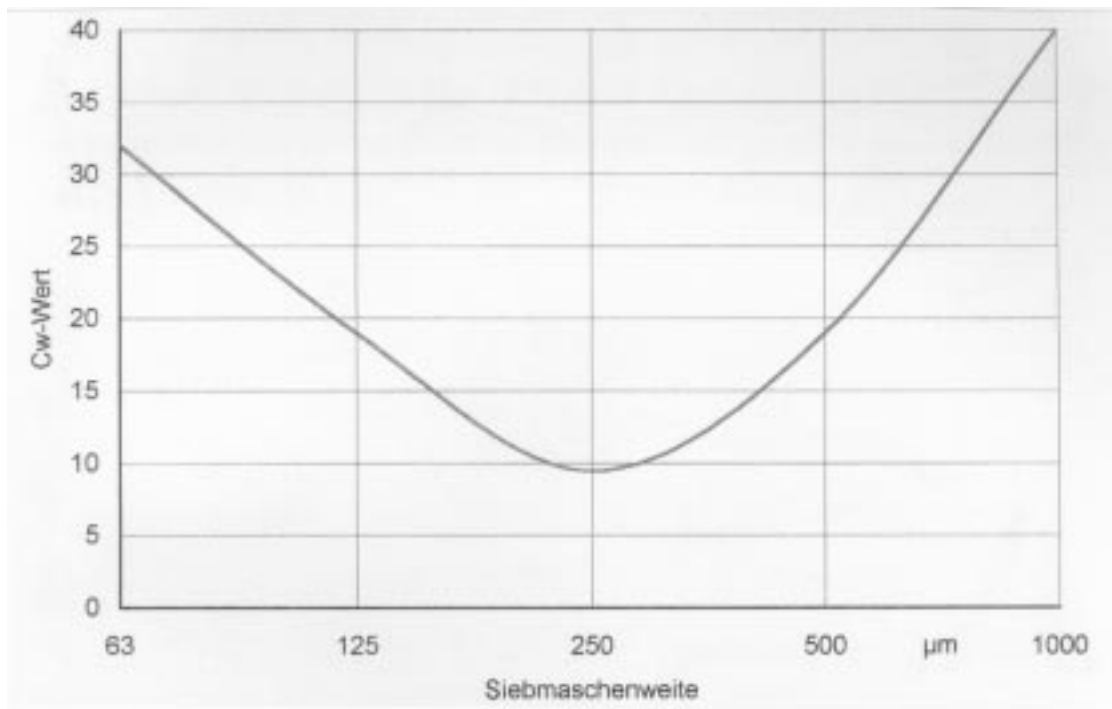


Bild 8.6: Verlauf des Cw-Wertes über die unterschiedlichen Partikelklassen

Bei der Partikelverteilung von Partikeln der Siebmaschenweite von 2 mm ist die Ermittlung eines Cw-Wertes nicht möglich, da es in dieser Verteilung kein eindeutiges Maximum gibt. Bei den Verteilungen der Partikel, die kleiner als 63 µm sind, läßt sich zwar ein eindeutiges Maximum in der Verteilung erkennen, jedoch fehlen hier die Werte für die Partikelgröße, so daß ebenfalls kein Cw-Wert bestimmt werden kann.

Üblicherweise werden die Cw-Werte im Verhältnis zur Reynoldszahl in einem Diagramm dargestellt (Bild 8.7). Dazu muß als erstes die Reynoldszahl des fliegenden Partikels bestimmt werden. Sie errechnet sich allgemein aus:

$$Re = \frac{w_{rel} \cdot D}{\nu} \quad (8-5)$$

Die einzusetzenden Größen sind w_{rel} als relative Partikelgeschwindigkeit und ν als kinematische Viskosität der Luft, sowie die Siebmaschenweite als charakteristische Größe D .

Wobei hier für die Berechnung der Reynoldszahl die projizierte Partikelfläche als kreisförmig angenommen wird, da für die Berechnung mit elliptischer Partikelfläche keine Formel verfügbar ist.

Trägt man nun die durch Variation gewonnenen C_w -Werte über den berechneten Reynoldszahlen in einem doppellogarithmischen Diagramm auf, so erhält man den in Bild 8.7 dargestellten C_w -Wert-Verlauf.

Bild 8.7: Der C_w -Wert über der Reynoldszahl aufgetragen

8.2.3 Abhängigkeit des C_w -Wertes von der relativen Fluggeschwindigkeit

Das eigentliche Problem der Flugbahnberechnung liegt jedoch nicht darin, einen konstanten C_w -Wert für die unterschiedlichen Partikelgrößen zu bestimmen, sondern in der deutlichen Abhängigkeit des C_w -Wertes von der Reynoldszahl und wiederum deren Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit. Da die Fluggeschwindigkeit sich über die Flugbahn stark verändert, ändert sich somit auch der C_w -Wert über die Flugbahn stark. Der oben bestimmte C_w -Wert ist somit nur ein fiktiver konstanter C_w -Wert.

Für verschiedene prismatische Körper und einige Rotationskörper kann prinzipiell eine Aussage über den Verlauf des C_w -Wertes über der Re-Zahl aus experimentellen Unter-

suchungen getroffen werden (siehe Bild 8.8). Jedoch lassen sich die erzeugten Partikel weder einwandfrei einer dort untersuchten Körperform zuordnen, noch läßt sich der Einfluß der Oberflächenrauigkeit der Partikel mit der dazugehörigen Reibkraft näher bestimmen.

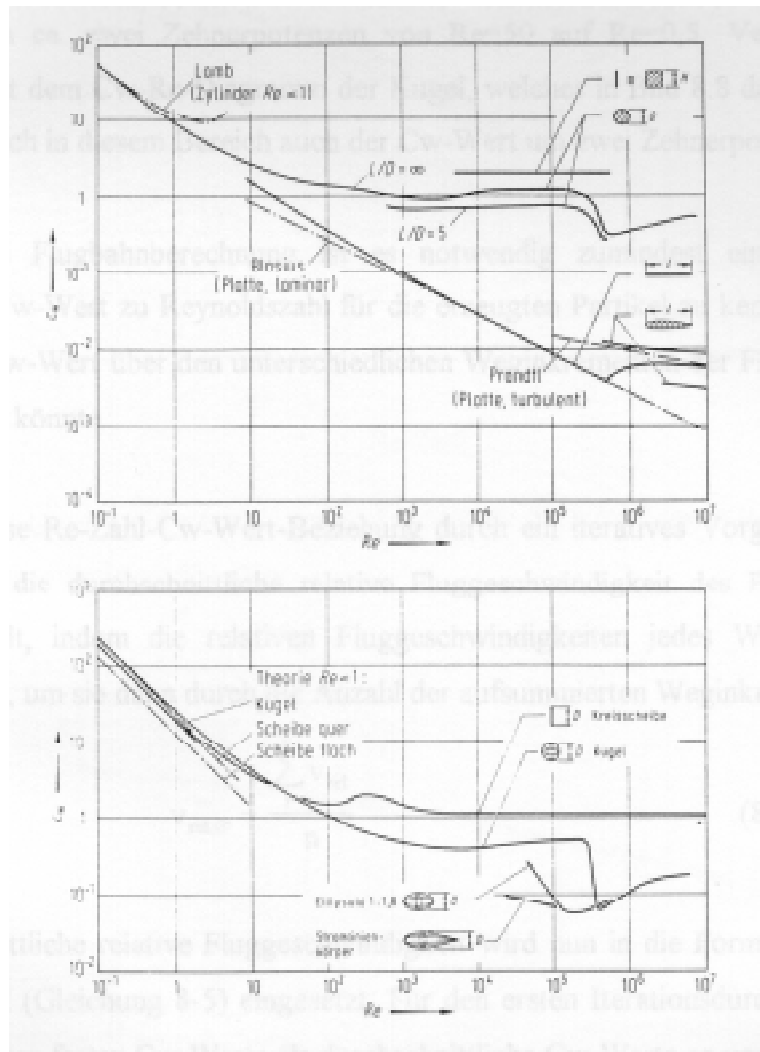


Bild 8.8: C_w -Wert für verschiedene Körperformen über der Reynoldszahl aufgetragen

/18/

Es kann also bisher keine Aussage über den wirklichen Verlauf des C_w -Wertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl getroffen werden, da das Diagramm aus Bild 8.7 nicht mit konstanten Geschwindigkeiten ermittelt wurde.

Je kleiner die Partikel werden, desto extremer ändert sich die Geschwindigkeit über den Flugweg. So wird beispielsweise die relative Fluggeschwindigkeit eines 63- μm -Partikels, bei Berechnung mit festem C_w -Wert, schon im ersten Weginkrement von 12 m/s auf unter 1 m/s

abgebremst. Das bedeutet, der Partikel schwebt sofort mit der ihn umgebenden Luftgeschwindigkeit mit. Durch diese Veränderung der relativen Geschwindigkeit ändert sich die Reynoldszahl um ca. zwei Zehnerpotenzen von $Re=50$ auf $Re=0,5$. Vergleicht man dies beispielsweise mit dem C_w - Re -Diagramm der Kugel, welches in Bild 8.8 dargestellt ist, so ist ersichtlich, daß sich in diesem Bereich auch der C_w -Wert um zwei Zehnerpotenzen verändert.

Für eine exakte Flugbahnberechnung ist es notwendig zumindest eine näherungsweise Beziehung von C_w -Wert zu Reynoldszahl für die erzeugten Partikel zu kennen, da über diese Beziehung der C_w -Wert über den unterschiedlichen Weginkrementen der Fluggeschwindigkeit angepaßt werden könnte.

Man erreicht diese Re -Zahl- C_w -Wert-Beziehung durch ein iteratives Vorgehen. Hierzu wird zunächst einmal die durchschnittliche relative Fluggeschwindigkeit des Partikels über dem Flugweg ermittelt, indem die relativen Fluggeschwindigkeiten jedes Weginkrements aufsummiert werden, um sie dann durch die Anzahl der aufsummierten Weginkremente zu teilen.

$$v_{rel,\emptyset} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{rel}}{n} \quad (8-6)$$

Diese durchschnittliche relative Fluggeschwindigkeit wird nun in die Formel zur Berechnung der Reynoldszahl (Gleichung 8-5) eingesetzt. Für den ersten Iterationsdurchgang nimmt man nun die berechneten festen C_w -Werte als durchschnittliche C_w -Werte an und trägt diese Werte in einem doppellogarithmischen Diagramm auf, wie dies in Bild 8.9 geschehen ist.

Daraufhin muß die gezeichnete Kurve durch eine angenäherte Funktion approximiert werden. Da dies mit der gesamten Kurve nur sehr ungenügend möglich ist (siehe Bild 8.9), wird die Kurve in zwei Teilabschnitte aufgeteilt und diese Teile durch entsprechende Funktionen approximiert, wie dies in den nachfolgenden Bildern 9.10 und 9.11 dargestellt wird. Die roten Kurven stellen jeweils die ermittelten C_w -Wert-Verläufe dar, die blauen Kurven stellen die approximierten Funktionen dar.

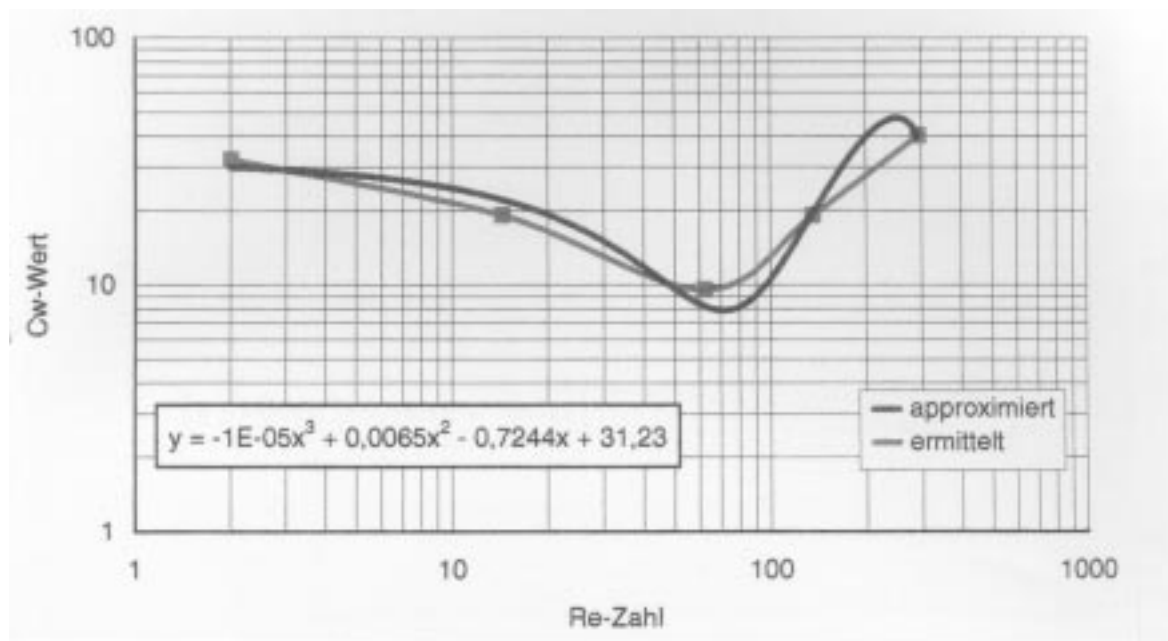


Bild 8.9: Diagramm der ermittelten Cw-Werte über der berechneten Re-Zahl mit approximierter Funktion

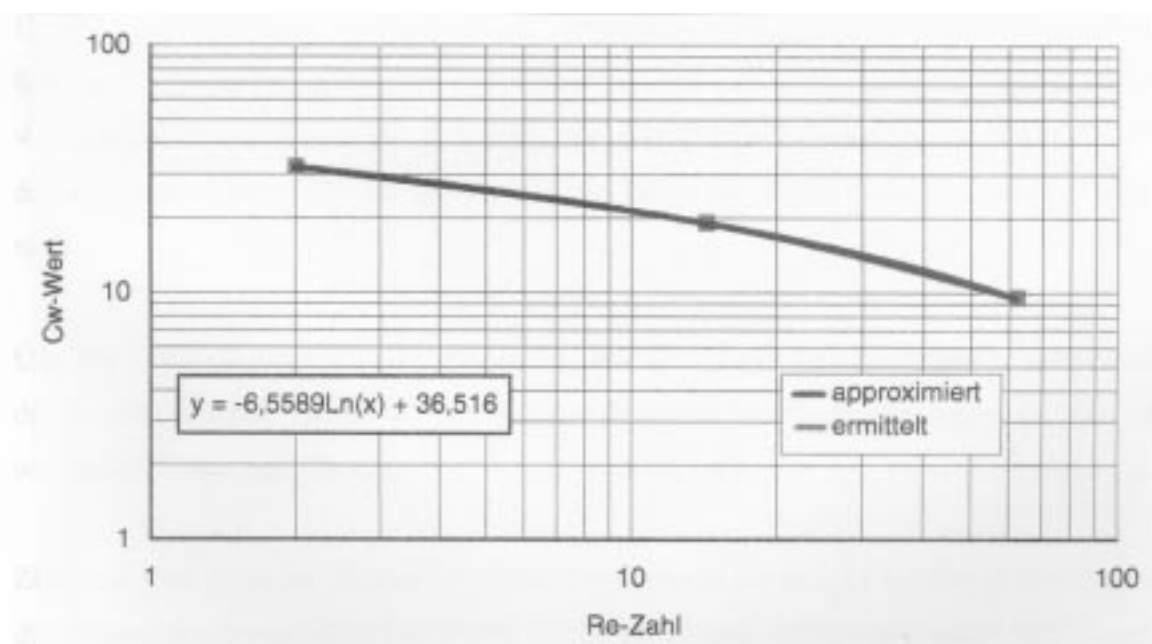


Bild 8.10: Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion

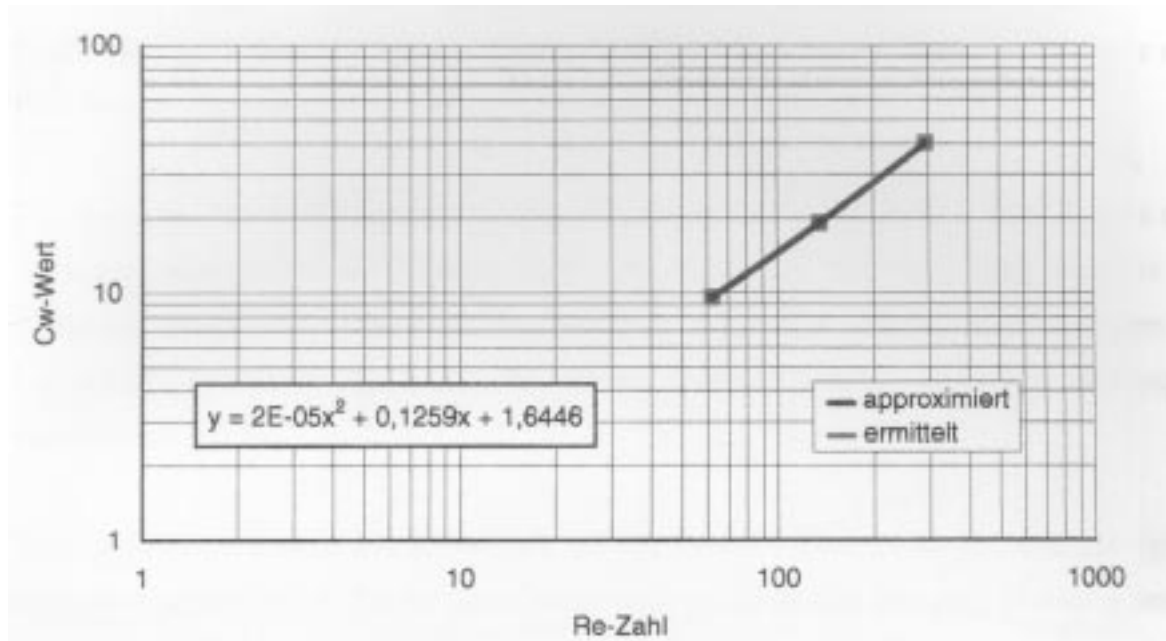


Bild 8.11: Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion

Die Reynoldszahl kann recht einfach mit der relativen Fluggeschwindigkeit ermittelt werden. Setzt man nun die beiden ermittelten Näherungsfunktionen in das Rechenschema des folgenden 9. Kapitels ein, so kann die Rechnung für alle Partikelgrößen mit variablen Cw-Werten durchgeführt werden. Die korrekte ermittelte Flugweite ergibt diese Rechnung jedoch noch nicht.

Um die korrekte ermittelte Flugweite zu erhalten, muß der Rechengang noch mehrmals durchlaufen werden. Dabei werden die verwendeten Werte jeweils angepaßt, bis die gewünschten Werte erreicht sind.

Zunächst wird dazu der durchschnittliche Cw-Wert der vorherigen Rechnung ermittelt, indem die einzelnen verwendeten Cw-Werte aufsummiert und durch die Anzahl der summierten Werte geteilt werden.

$$C_{w,\emptyset} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{w,i}}{n} \quad (8-7)$$

In der gleichen Weise wird nun die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit des Partikels nach

Gleichung 8-6 ermittelt.

Nun betrachtet man die in der Rechnung erzielte Flugweite. Je nachdem ob diese zu kurz oder zu lang ist, wird nun der durchschnittliche C_w -Wert nach oben oder nach unten korrigiert und wiederum in das doppellogarithmische Diagramm eingetragen. Ersetzt man wiederum die Kurve durch eine Näherungsfunktion, so kann mit diesen Funktionen der erneute Rechengang durchgeführt werden.

Nach mehreren Durchgängen konvergiert die C_w -Wert-Funktion recht gut, und es ergeben sich Näherungsfunktionen für die Berechnung des C_w -Wertes, die eine gute Übereinstimmung von berechneter und ermittelter Flugweite ergeben.

Die C_w -Re-Diagramme werden in den folgenden Bildern 8.12 bis 8.14 dargestellt.

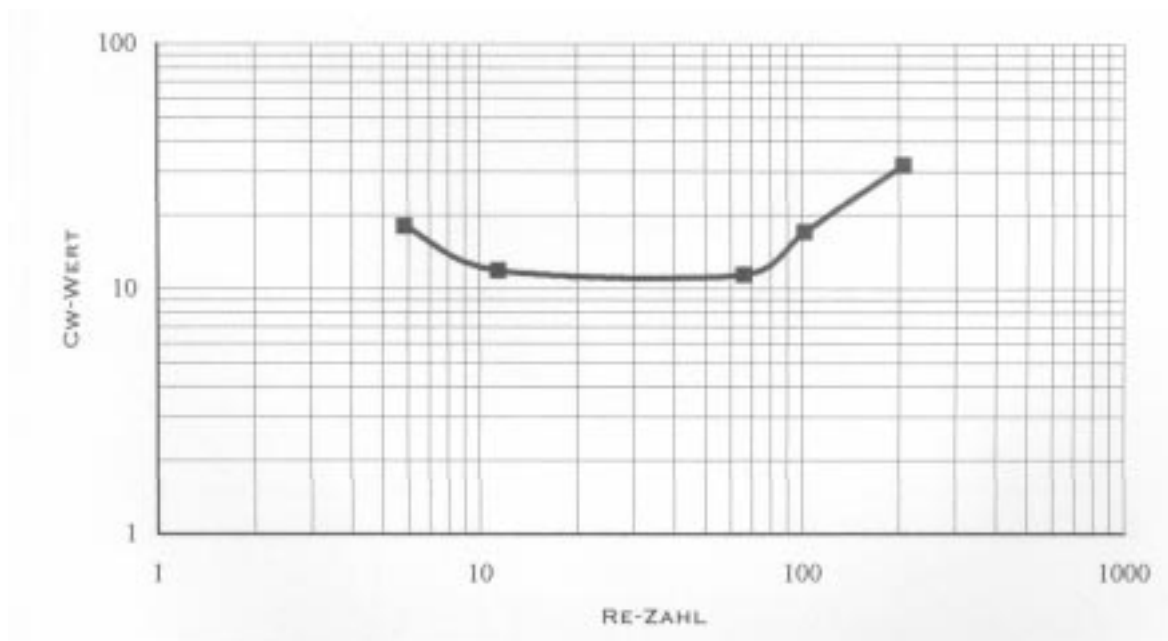


Bild 8.12: Verlauf des C_w -Wertes über der Re-Zahl

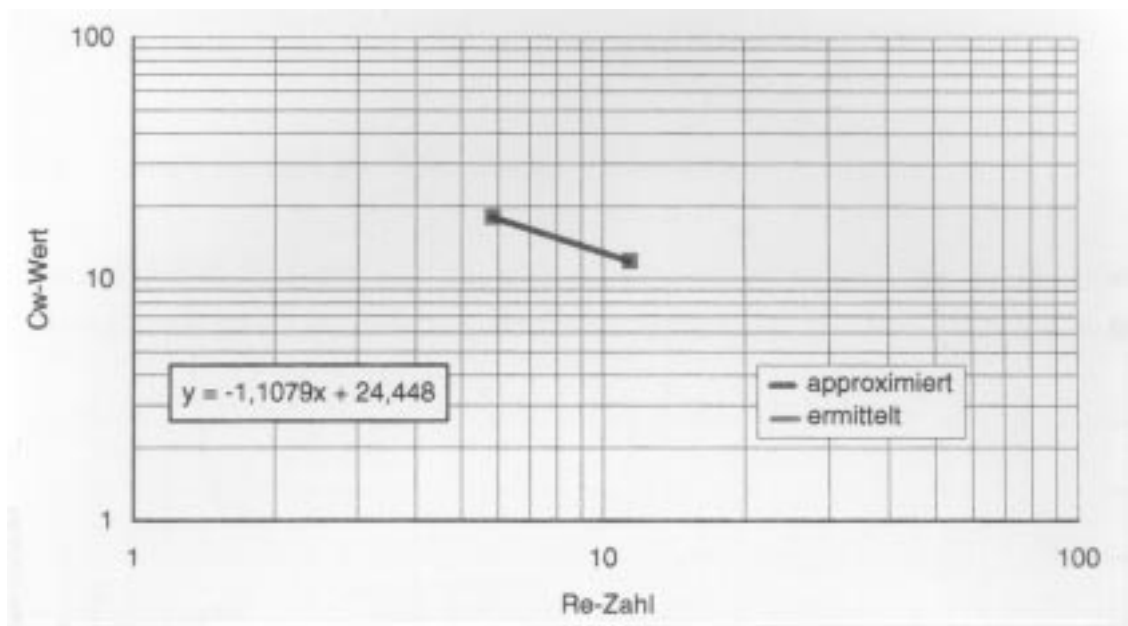


Bild 8.13: Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion

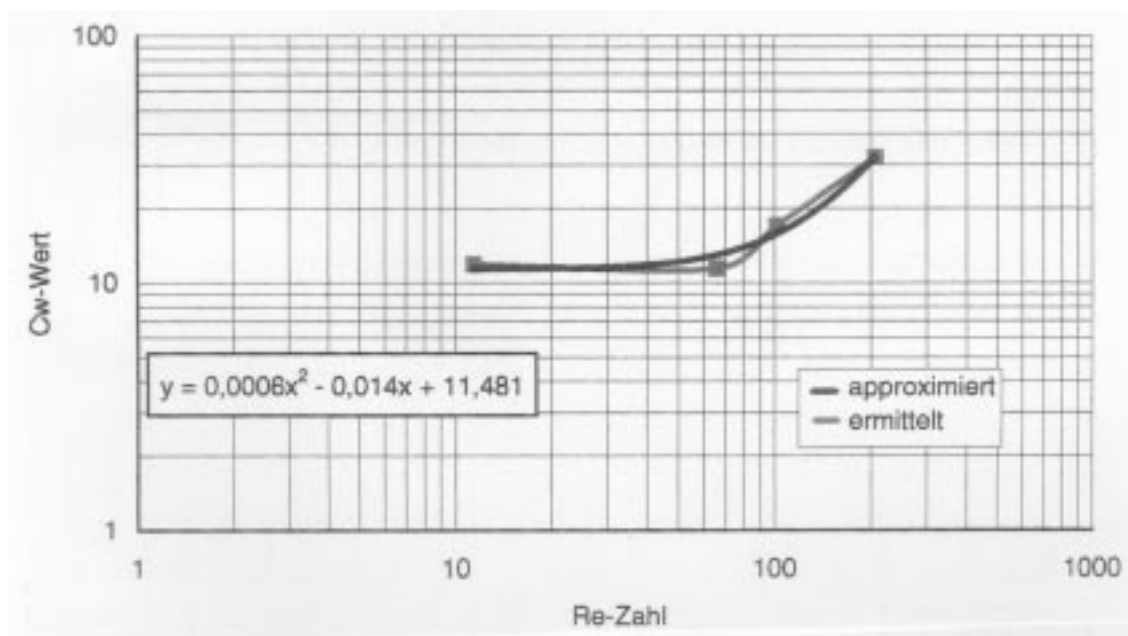


Bild 8.14: Teilverlauf des Cw-Wertes über der Re-Zahl und die zugehörige Funktion

8.3 Fluggeschwindigkeit über dem Flugweg

8.3.1 Bereich der veränderlichen Fluggeschwindigkeit

Vergleicht man die Bilder 8.15 bis 8.20 auf den folgenden Seiten, die die Flugbahnen der Partikel sowie die Geschwindigkeitsverläufe der Partikel über dem Flugweg zeigen, so lässt

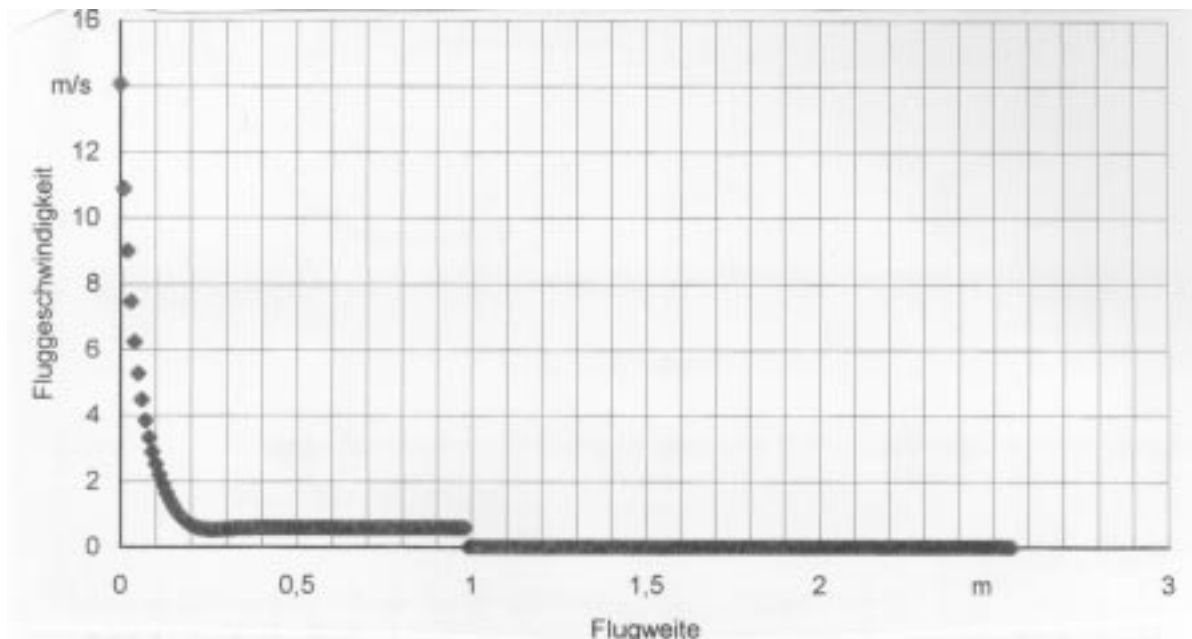


Bild 8.15: Fluggeschwindigkeit der Partikelklasse von 63 µm Siebmaschenweite über der Flugweite aufgetragen

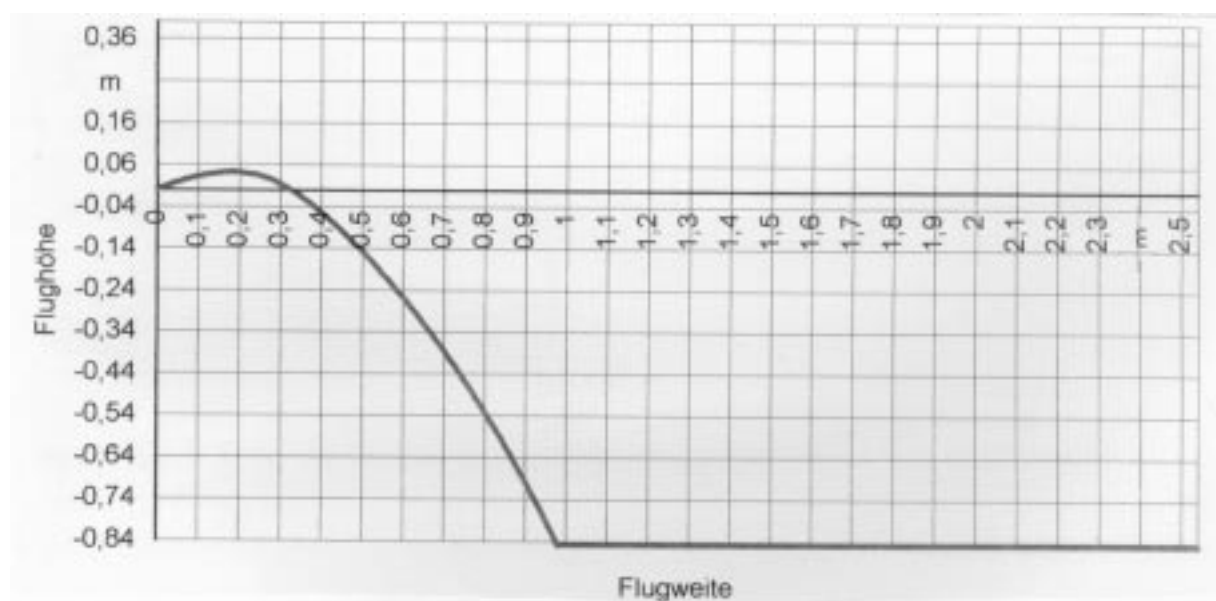


Bild 8.16: Flugbahndarstellung der Partikelklasse von 63 µm Siebmaschenweite

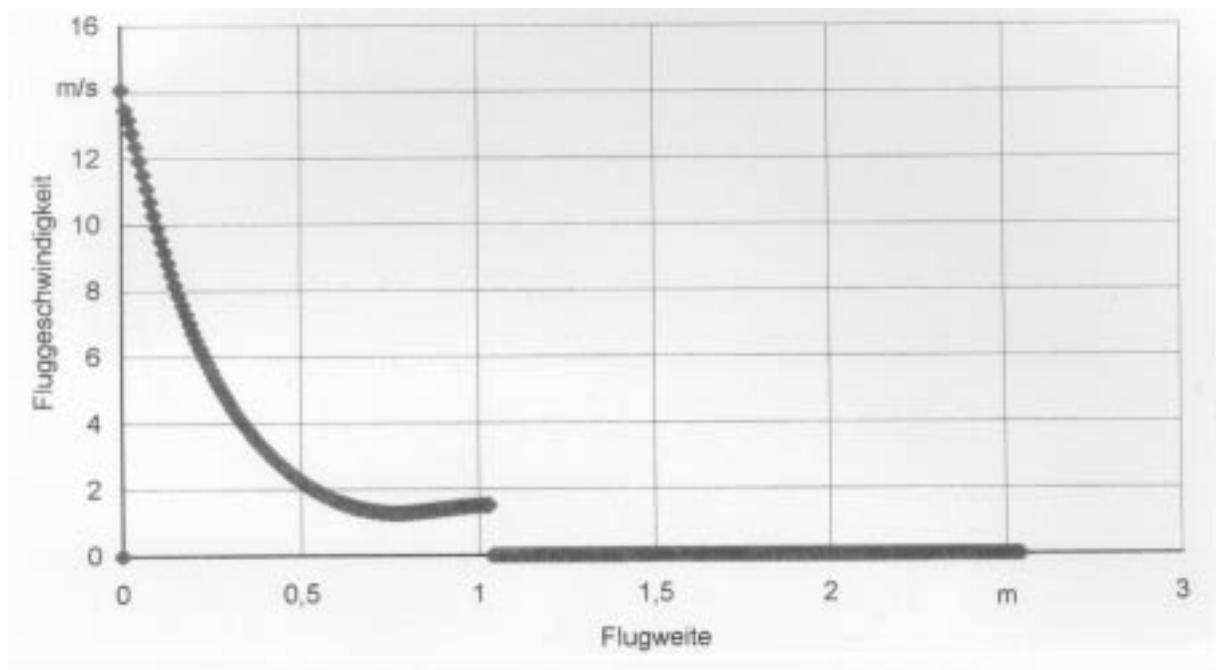


Bild 8.17: Fluggeschwindigkeit der Partikelklasse von 250 μm Siebmaschenweite über der Flugweite aufgetragen

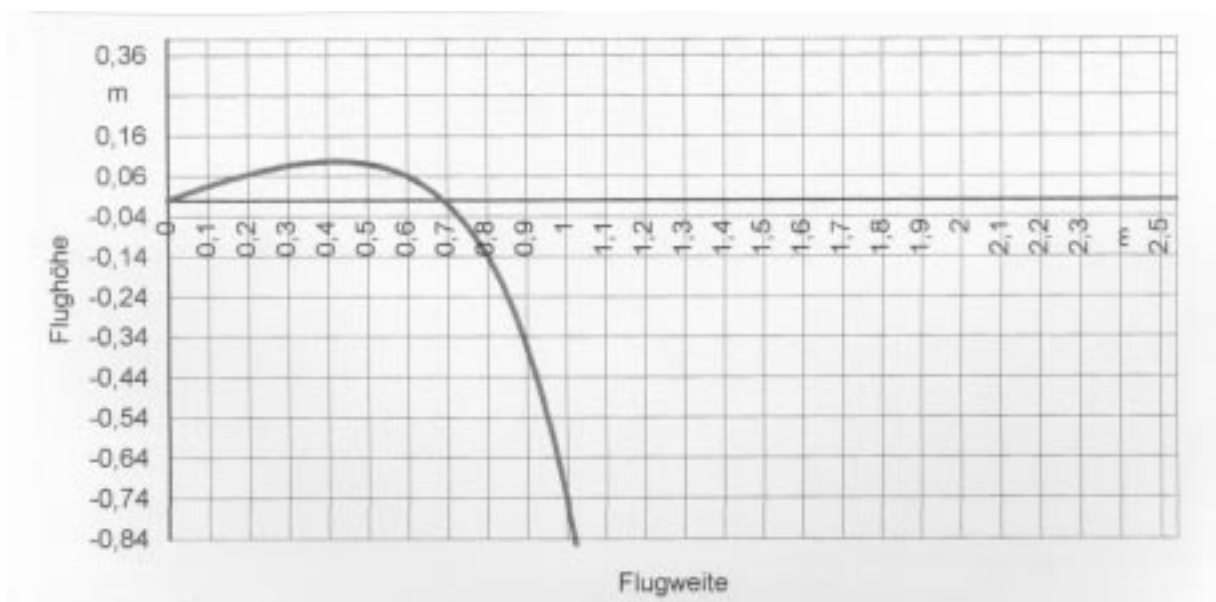


Bild 8.18: Flugbahndarstellung der Partikelklasse von 250 μm Siebmaschenweite

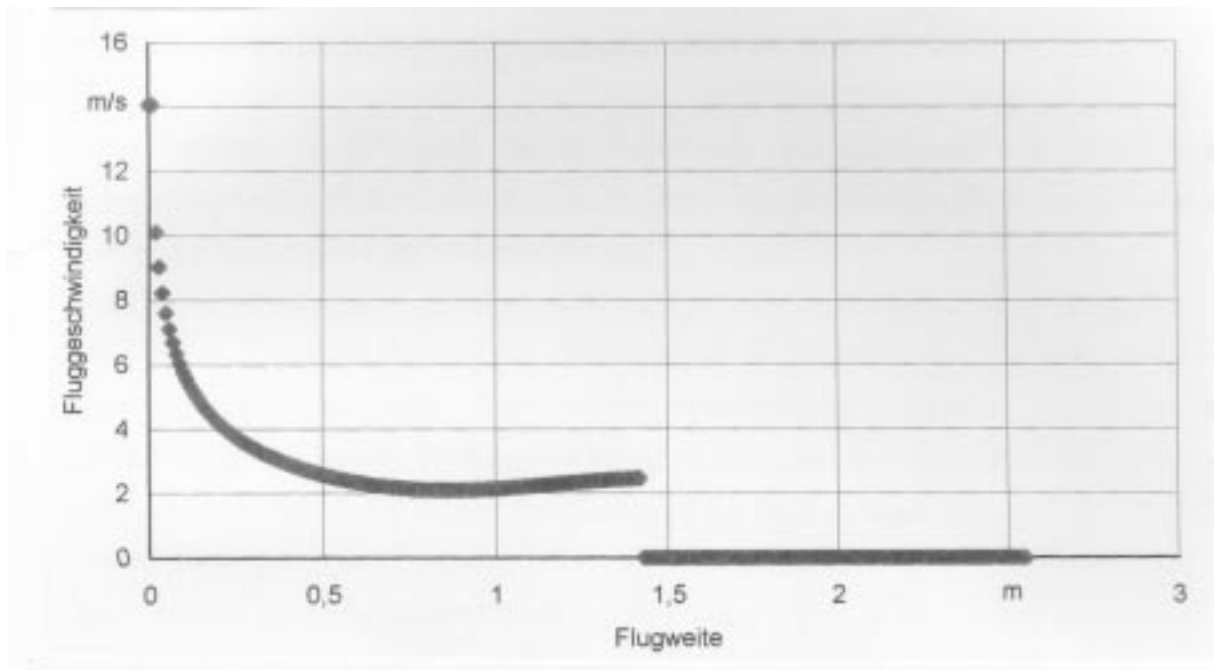


Bild 8.19: Fluggeschwindigkeit der Partikelklasse von 1000 μm Siebmaschenweite über der Flugweite aufgetragen

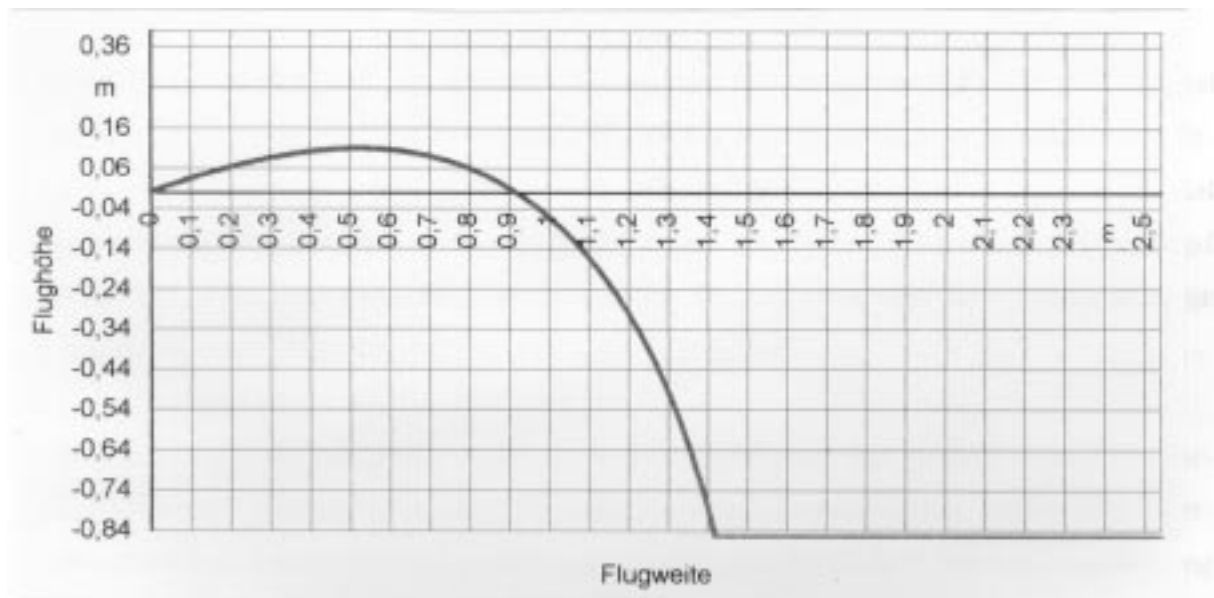


Bild 8.20: Flugbahndarstellung der Partikelklasse von 1000 μm Siebmaschenweite

sich deutlich der Einfluß des C_w -Wertes erkennen. Die Partikel mit großem C_w -Wert verlieren wesentlich schneller an Geschwindigkeit als die Partikel mit kleinerem C_w -Wert.

Beim Vergleich der Bilder 8.15 und 8.19 zeigt sich erwartungsgemäß ein kleinerer Geschwindigkeitsabfall bei Partikeln mit größerer Masse aber ähnlichen C_w -Werten, aufgrund der größeren Massenträgheit der schweren Partikel.

Wie Bild 8.15 verdeutlicht, wird der Partikel durch den Luftwiderstand zunächst stark abgebremst, bevor er nochmals leicht beschleunigt seine Endgeschwindigkeit erreicht. Dabei ist auffallend, daß die kleinste Partikelgeschwindigkeit nicht mit dem höchsten Punkt der Flugbahn zusammenfällt, sondern hinter dem Hochpunkt der Flugbahn liegt.

8.3.2 Bereich der Endgeschwindigkeit

Führt man die Rechnung über eine genügend lange Flugbahn durch, so gelangt der Partikel nach einer gewissen Zeit zu seiner Endgeschwindigkeit.

Diese Endgeschwindigkeit ist mit der Sink- oder Schwebegeschwindigkeit der Partikel identisch. Sie ist für die Eigenbewegung der Partikel eine charakteristische Größe. Die Ergebnisse der Rechnung zeigen prinzipiell die richtige Tendenz. Die kleinen leichten Partikel erreichen eine kleine Schwebegeschwindigkeit, wobei die großen Partikel eine entsprechend höhere Schwebegeschwindigkeit erreichen, sofern die Rechnung über eine genügend lange Flugbahn durchgeführt wird.

Ob die rechnerisch bestimmte Schwebegeschwindigkeit mit der tatsächlichen Schwebegeschwindigkeit übereinstimmt, müssen weiterführende Untersuchungen zeigen. Ein Übereinstimmen von berechneter und gemessener Schwebegeschwindigkeit wäre eine Bestätigung der ermittelten C_w -Werte bezogen auf die Re-Zahl.

8.4 Direkter Vergleich der theoretischen und der realen Flugbahnen

Über die aufgenommenen Flugbahnen aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Kapitel 5) wird ein direkter Vergleich der realen Flugbahnen mit den berechneten Flugbahnen, wenn auch nur in einem beschränkten Flugbahnbereich kurz hinter dem Sägeblatt, möglich. Dazu wurden die aus Videobildern auf Folie übertragene Flugbahnen mit den berechneten Flugbahnen zusammen in einem Diagramm maßstäblich aufgetragen.

Die theoretischen Flugbahnen wurden unter der Annahme es seien 1mm-Partikel gerechnet. Diese Annahme kann zwar durch die Hochgeschwindigkeitsaufnahme nicht belegt werden, da die Auflösung für eine Bestimmung des Partikeldurchmessers zu grob war, doch muß es sich bei den vermessenen Flugbahnen zweifellos um Partikel dieser Größenordnung handeln, da diese sonst auf den Videobildern nicht erkennbar gewesen wären.

In die Rechnung wurden nicht die Abflugwinkel und die Geschwindigkeiten zwischen den ersten beiden gemessenen Punkten der Partikelflugbahn verwendet, da diese sich oft von den Werten der nachfolgenden Winkel und Geschwindigkeiten stark unterschieden. Es wurde vielmehr ein Mittelwert der ersten beiden ermittelten Flugwinkel und Geschwindigkeiten als Anfangsbedingungen eingesetzt.

In dem folgenden Bild 8.21 sind die Unterschiede der Flugbahnen bei verschiedenen eingesetzten Anfangsbedingungen in der Rechnung dargestellt. Die rote Kurve stellt die gemessene Flugbahn dar. Die markierten Punkte sind dabei die Stellen, an denen der Partikel auf einem Bild der Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit der zugehörigen Flugzeit lokalisiert wurde. Die blaue Flugbahn wurde mit den ermittelten Anfangswerten des ersten Wegstücks der gemessenen Partikelflugbahn berechnet. Die grüne Flugbahn hingegen wurde mit den oben beschriebenen gemittelten Werten, wie auch die restlichen Flugbahnen im Anhang II berechnet.

Vergleicht man nun die beiden Flugbahnen der im Anhang II zusammengestellten Diagramme, so fällt auf, daß es gemessene Partikelflugbahnen gibt, die sehr gut mit den

berechneten Flugbahnen übereinstimmen (Bild 8.22). Auf der anderen Seite findet man aber auch Flugbahnen, die deutliche Abweichungen von den berechneten Flugbahnen aufweisen (Bild 8.23).

Die Ursachen für die sehr unterschiedlichen Übereinstimmungen der Flugbahnen konnten nicht eindeutig geklärt werden, dürften aber vermutlich in der ungenauen Messung der Anfangsbedingungen und der Partikelflugbahn aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme liegen. Zum einen sind in den gemessenen Flugbahnen teilweise recht unrealistische Knicke (Bild 8.21), zum anderen schwanken die aus den Aufnahmen berechneten Wert für die Flugwinkel um mehrer Winkelgrade und die ermittelten Geschwindigkeiten gar um über 20 m/s.

Eine eindeutige Klärung dieser Flugbahnabweichungen muß somit weiterführenden Untersuchungen mit besseren Meßmitteln, mit denen die Vorgänge in der Nähe des Sägeblatts besser erfaßt werden können vorbehalten bleiben. Nur bei einer genaueren Messung der Partikel-flugbahn kann sicher gesagt werden ob die Abweichungen zwischen gemessener Flugbahn und berechneter Flugbahn auf Meßungenauigkeiten oder auf physikalische Ursachen zurück-zuführen sind.

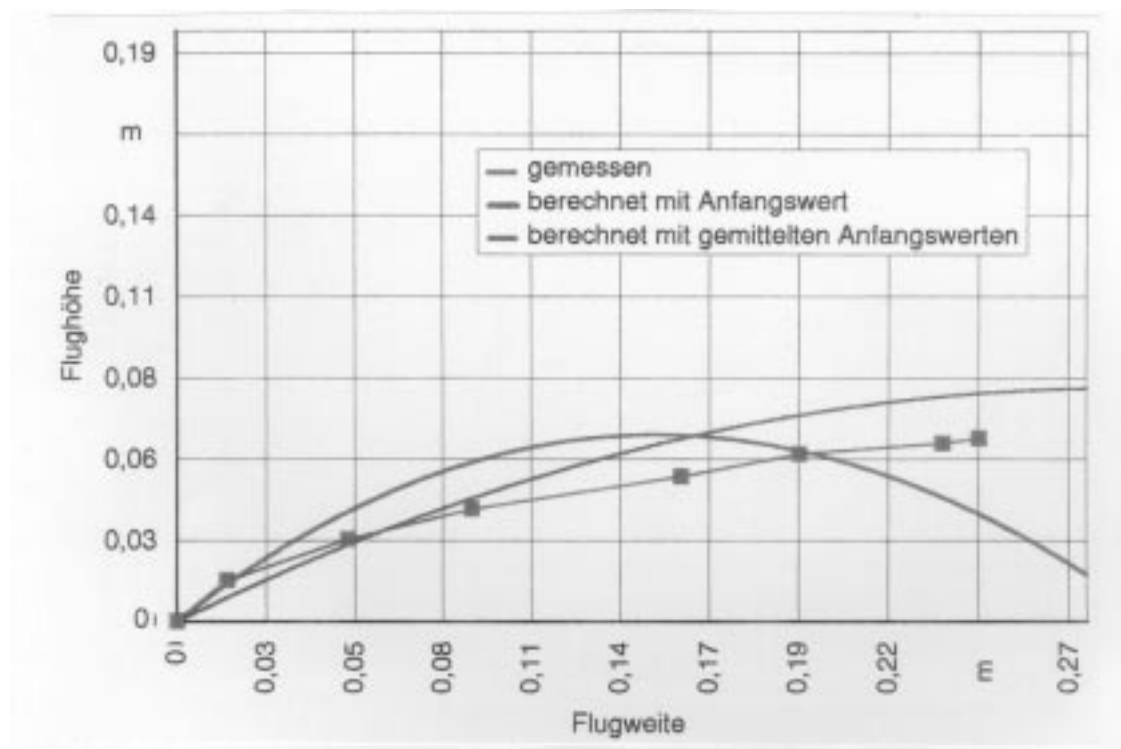


Bild 8.21: Direkter Vergleich von gemessenen und berechneten Flugbahnen

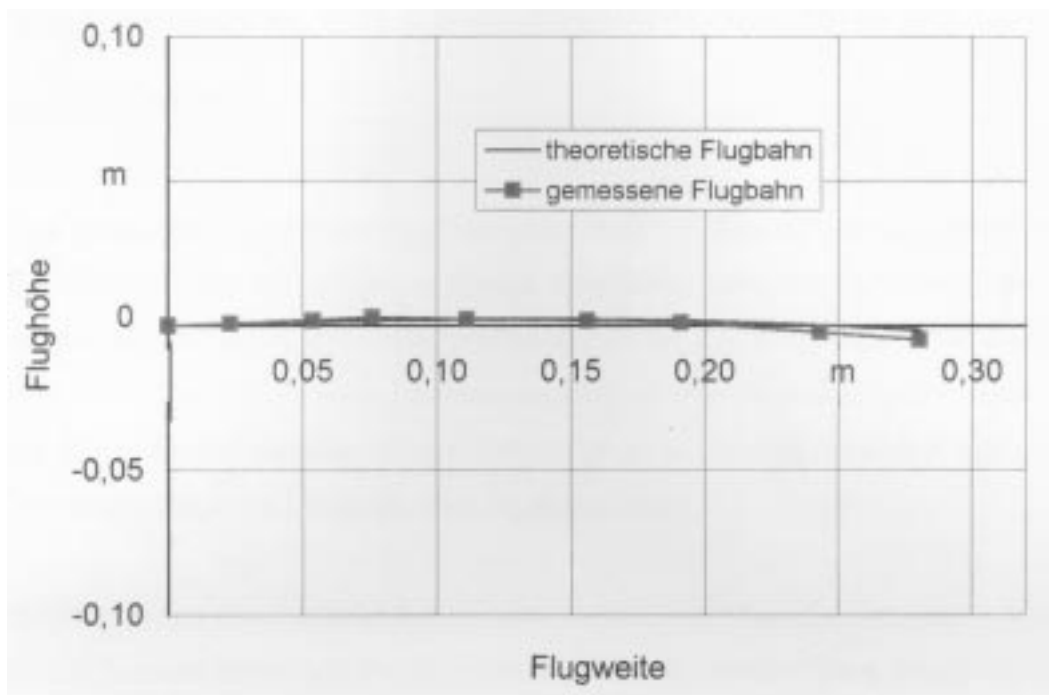


Bild 8.22: Gemessene und berechnete Partikelflugbahn (Beispiel 1)

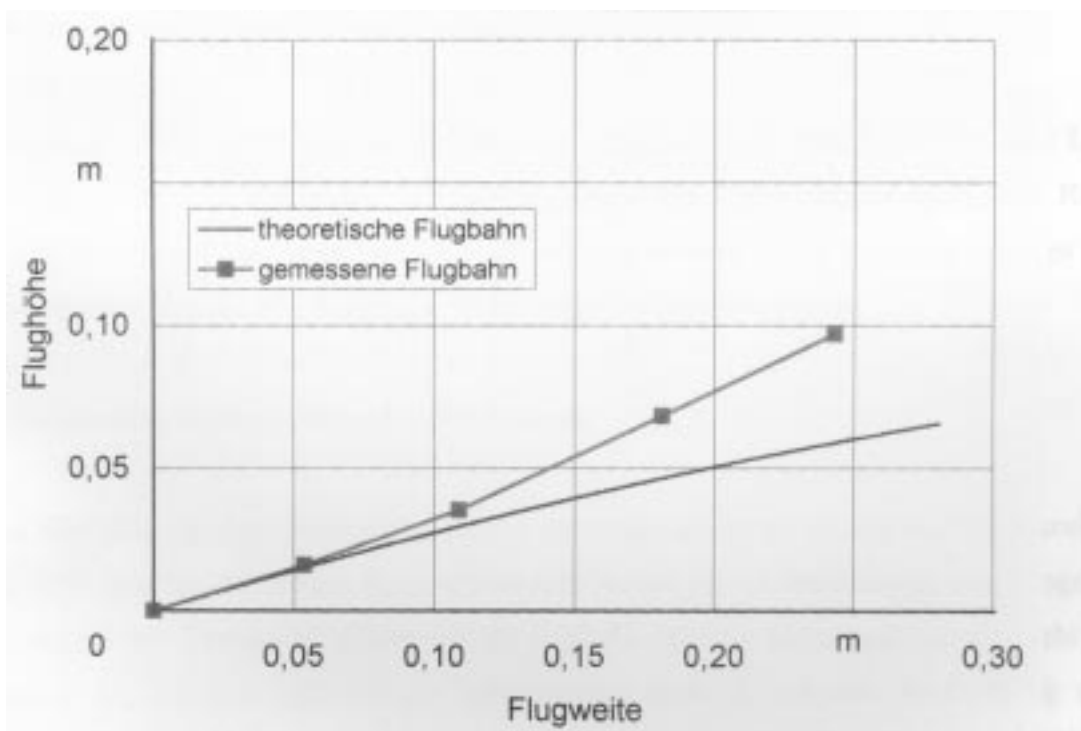


Bild 8.23: Gemessene und berechnete Partikelflugbahn (Beispiel 2)

9 Programmieren der Flugbahnberechnung in einer Excel-Tabelle

Um eine genaue Berechnung der Flugbahn eines Partikels durchführen zu können, ist es notwendig, die Rechnung mit möglichst kleinen Weginkrementen durchzuführen. Dies führt jedoch notwendigerweise zu einer sehr großen Anzahl an Rechenzyklen um genügend Punkte zur graphischen Darstellung einer Flugbahn zu erhalten. Für die exakte rechnerische Flugbahn muß die Länge des verwendeten Weginkrements gegen null gehen, zumindest aber sollte es so klein wie möglich sein um ihr möglichst nahe zu kommen. Um die Berechnung der Flugbahn nun zu vereinfachen, wurde der Rechengang in einer Excel-Tabelle mit Formeln hinterlegt. Durch Darstellung der Ergebnisse dieser Iterationsrechnung in einem Diagramm, kann dann die Flugbahn aufgezeichnet werden.

9.1 Besonderheiten des Programms Microsoft Excel

Das Programm Microsoft Excel enthält mit einer maximalen Tabellengröße von über 16384 Zeilen und 256 Spalten viel Raum für die Programmierung einer Iterationsrechnung. Es gilt dabei jedoch einige Besonderheiten zu beachten, die sowohl in der Rechenweise des Programms, sowie in dessen Möglichkeiten, Diagramme darzustellen, liegen.

9.1.1 Berechnung trigonometrischer Funktionen

Bei der Hinterlegung von trigonometrischen Funktionen ist darauf zu achten, daß Excel alle Winkel im Bogenmaß berechnet. Auch müssen alle Winkel für die Berechnung dem Programm im Bogenmaß zur Verfügung stehen. Da die Winkelangabe im Bogenmaß jedoch nicht sehr anschaulich ist, ist eine Umrechnung ins Gradmaß sinnvoll, um den Rechengang überschaubarer, aber vor allem, um ihn kontrollierbar zu gestalten. Die Umrechnung der Winkelangaben erfolgt nach der Formel

$$\alpha^{\circ} = \frac{180^{\circ} \cdot \hat{\alpha}}{\pi} \quad (9-1)$$

und hat außer der oben genannten Vorteile keine weitere Funktion für den Rechengang.

9.1.2 Grenzen der darstellbaren Datenmenge in Diagrammen

Excel kann Diagramme bis maximal 255 Datenreihen darstellen, deshalb wurde die Tabelle der Rechengangprogrammierung auf diese Anzahl an Rechendurchgängen beschränkt. Wenn die verfügbaren 255 Rechendurchgänge bei gewähltem, festem Weginkrement in x-Richtung nicht bis zum rechnerischen Auftreffen des Partikels auf dem Boden reicht, so muß das Weginkrement der Rechnung größer gewählt werden. Bei einem gewählten Weginkrement von 1 cm Länge kann die Flugbahn bis zu einer Länge von 2,55 m berechnet werden, was ausreichend ist, den im Versuch abgedeckten Rasterbereich zu berechnen. Für den direkten Vergleich von rechnerischer Flugbahn mit der experimentell ermittelten Flugbahn aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme kann das verwendete Weginkrement noch einmal stark verkleinert werden, da der Aufnahmebereich der Kamera nur wenige Dezimeter Länge umfaßt.

9.1.3 Winkelrichtige Darstellung der Flugbahn

Es ist im Excel nicht möglich auf beiden Achsen gleiche Einheiten mit gleichen Skalenweiten automatisch zu erzeugen. Für die winkelrichtige Darstellung der Flugbahn ist dies jedoch unabdingbar. Die praktikabelste Lösung ist hier die Festlegung einiger Grunddiagramme als Formatvorlagen. Den später erstellten Diagrammen braucht nun lediglich diese gespeicherte Formatvorlage zugewiesen zu werden. Durch dieses Verfahren werden allerdings die Skalierungen der Achsen auf wenige Möglichkeiten beschränkt. Die Folge sind Diagramme, die große nicht benötigte leere Bereiche enthalten.

9.2 Prinzipielle Gestaltung des Rechengangs

Die Rechnung ist als ein sich laufend wiederholendes Rechenschema aufgebaut. Dadurch werden die sich ständig ändernden Werte der Rechnung berücksichtigt. Die Schrittweite des Weginkrements in x-Richtung wird dabei konstant gehalten.

Bei jedem Durchlauf des Schemas wird von Anfangswerten ausgehend der Flug des Partikels über ein kleines Weginkrement in Flugrichtung betrachtet. Die Beschleunigung wird dabei über das Weginkrement als konstant angenommen. Mit der Rechnung unter diesen Annahmen ergeben sich schließlich neue Werte für das Ende der betrachteten Flugstrecke, die gleichfalls die Anfangswerte des nächsten Rechendurchgangs darstellen.

Im folgenden werden die Anfangswerte den Index x oder y und die Endwerte den Index $x+1$ oder $y+1$ tragen, sofern dies zur eindeutigen Unterscheidung notwendig ist. In den Bildern sind die Vektoren, die bestimmt werden sollen mit der dazugehörenden Beschriftung durch rote Farbe hervorgehoben.

Das Rechenschema muß auf mehrere Zeilen pro Rechendurchgang aufgeteilt werden, da sich ansonsten im Excel Zirkelbezüge ergeben können, die das Programm nicht auflösen kann. Durch das Auseinanderziehen des Rechengangs auf 5 Zeilen können sowohl die Zirkelbezüge vermieden, wie auch die Übersichtlichkeit der Tabelle entsprechend verbessert werden.

Es werden in der Rechnung im übrigen auch Werte berechnet, die nicht notwendigerweise für den Rechengang benötigt werden, aber doch sehr zu Verständnis und Anschaulichkeit der Vor-gänge beitragen.

9.3 Programmierung der Anfangswerte im Spanentstehungspunkt

9.3.1 Vorgegebene Anfangswerte

Als Ausgangswerte für die Rechnung müssen einige Anfangswerte bekannt sein, die aber ohne allzu großen Aufwand ermittelt werden können. Zum zweiten kann dieses Rechenschema auch dazu verwendet werden, auszutesten, wie ein ganz bestimmter hypothetischer Span oder eine hypothetische Spanklasse sich bei der Variation bestimmter Eingangsgrößen hinsichtlich seiner Flugbahn verhält.

Als einfach zu ermittelnde Spangrößen müssen die Spanmasse m_p , sowie die senkrecht zur Flugrichtung gemessene Spanfläche A bekannt sein. Die Ermittlung dieser Werte stellt in der Regel keine große Schwierigkeit dar und wurde bereits in Kapitel 5 und 8 eingehend beschrieben.

Um den zu betrachtenden Bereich der Flugbahn festzulegen, über den die Rechnung ausgeführt werden soll, muß das verwendete konstante Weginkrement in x-Richtung Δs_x , festgelegt werden.

Ein in der Regel schwer festzulegender Anfangswert ist die absolute Anfangsgeschwindigkeit $v_{0,abs}$, welche aber zumindest näherungsweise nach Kapitel 8.1.3 mit 40% der Werkzeugdrehzahl angenommen werden kann.

Als Wert ist noch der Flugwinkel im Abflugpunkt $\alpha_{0,abs}^0$, notwendig. Wie aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme zu ersehen ist, variiert der Abflugwinkel recht breit. Für die Berechnung wird deshalb ein gemittelter Flugwinkel verwendet. Es lassen sich jedoch auch beliebige andere Flugwinkel einsetzen. Der Flugwinkel im Abflugpunkt ist der einzige Wert, welcher im Gradmaß in die Tabelle direkt eingegeben wird. Er wird jedoch für die Rechnung durch die Umkehrung obiger Formel 9-1 ins Bogenmaß umgerechnet.

Für den Verlauf des C_w -Wertes wird die in Kapitel 8 gefundene Näherung eingesetzt.

9.3.2 Absolute Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,abs}$

Von der absolute Fluggeschwindigkeit des Partikels v_{abs} wird die absolute Geschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,abs}$ mit dem Flugwinkel $\hat{\alpha}_F$ durch

$$v_{x,abs} = v_{abs} \cdot \cos \hat{\alpha}_F \quad (9-2)$$

berechnet. (Bild 9.1)

Für die Flugwinkel $\hat{\alpha}_F > 0$ sowie $\hat{\alpha}_F < 0$ ergeben sich im Bereich von $-\frac{\pi}{2} < \hat{\alpha}_F < \frac{\pi}{2}$ positive

Geschwindigkeiten für $v_{x,abs}$. Die Winkel für $\hat{\alpha}_F > \frac{\pi}{2}$ und $\hat{\alpha}_F < -\frac{\pi}{2}$ müssen nicht betrachtet werden, da auf den Partikel keine Kräfte einwirken, die ihn vollständig abbremsten und in die entgegengesetzte Richtung beschleunigen können. Im extremsten Fall wird die absolute Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung Null. Dann befindet sich der Partikel im freien Fall.

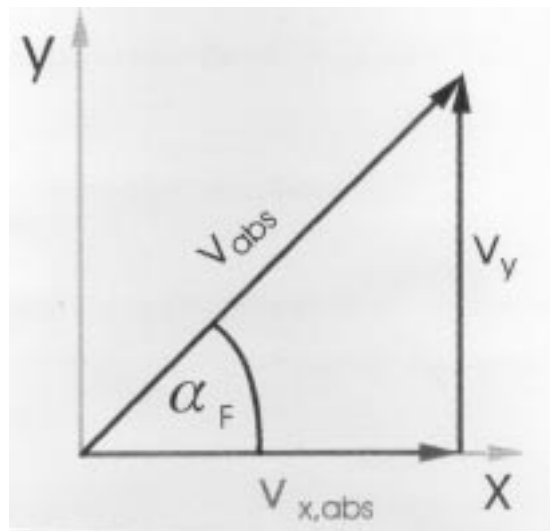


Bild 9.1: Der absolute Geschwindigkeitsvektor in x-Richtung

9.3.3 Absolute Partikelgeschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,abs}$:

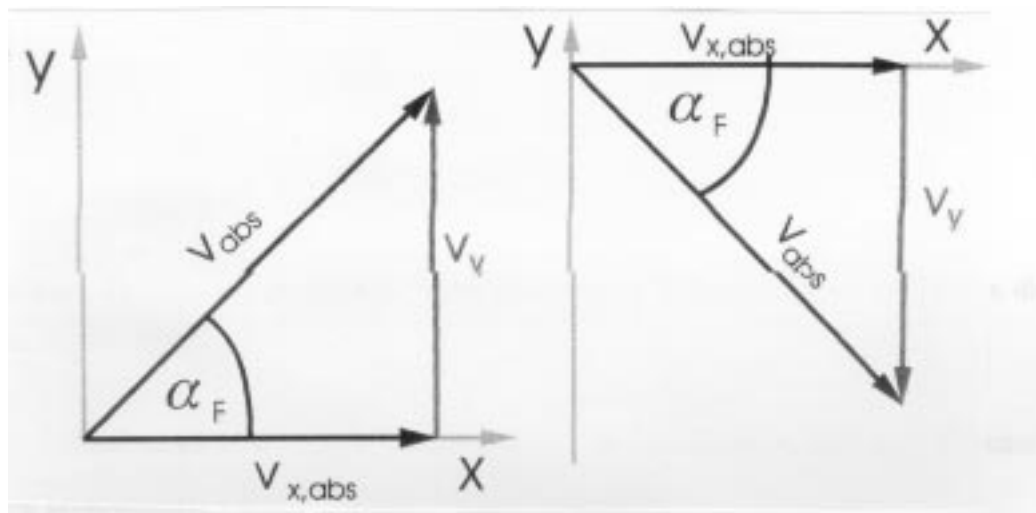


Bild 9.2: Der Geschwindigkeitsvektor in y-Richtung

Die Berechnung der absoluten Fluggeschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,abs}$ geschieht aufgrund der gleichen Dreiecksbetrachtung nach Bild 9.2. Daraus ergibt sich die mit der absoluten Flug-

geschwindigkeit v_{abs} des Partikels und dessen Flugwinkel $\hat{\alpha}_F$ die Formel:

$$v_{y,\text{abs}} = v_{\text{abs}} \cdot \sin \hat{\alpha}_F \quad (9-3)$$

Das richtige Vorzeichen von $v_{y,\text{abs}}$ ergibt sich ebenfalls automatisch durch die Sinusfunktion.

Bei positivem Flugwinkel $\hat{\alpha}_F$ ist $v_{y,\text{abs}}$ positiv, bei negativem Flugwinkel entsprechend

negativ. Dies gilt im gesamten möglichen Bereich für den Flugwinkel von $-\frac{\pi}{2} < \hat{\alpha}_F < \frac{\pi}{2}$.

9.3.4 Relative Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,\text{rel}}$:

Um die Kräfte, die auf den Partikel im Flug einwirken, zu erhalten, ist es notwendig die relative Geschwindigkeit v_{rel} des Partikels zur Umgebungsluft zu kennen, da diese für die Widerstandskraft ausschlaggebend ist.

Dazu ist es notwendig, sich noch einmal mit der Funktion der umgebenden Luftgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{L,x}$ zu befassen. Es muß sichergestellt sein, daß die umgebende Luftgeschwindigkeit nie negativ wird. Der Grenzfall, den diese Luftgeschwindigkeit erreichen darf, ist $v_{L,x} = 0$. Setzt man die in Kapitel 7.5 gefundene empirische Formel gleich Null, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} 0 &= -0,3833 \cdot \ln(x) + 0,2806 \\ x &= e^{\left(\frac{0,2806}{0,3833}\right)} = e^{0,7321} \\ x &= 2,08 \end{aligned} \quad (9-4)$$

Dies bedeutet, da sich an diesem Punkt keine Extremstelle befindet, daß ab $x = 2,08$ m die Funktion negativ wird.

Um eine positive umgebende Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$ zu gewährleisten, muß eine Fallunterscheidung programmiert werden. Die Fallunterscheidung lautet:

$$\text{Für } -0,3833 \cdot \ln(x) + 0,2806 \geq 0 \text{ gilt: } v_{L,x} = -0,3833 \cdot \ln(x) + 0,2806. \quad (9-5)$$

$$\text{Für } -0,3833 \cdot \ln(x) + 0,2806 < 0 \text{ gilt: } v_{L,x} = 0.$$

Betrachtet man die Funktion der umgebenden Luftgeschwindigkeit für kleine x -Werte, also für x gegen 0, so stellt man beim Einsetzen von kleinen x -Werten fest, daß die Funktion wesentlich größer als die gemessenen 2 m/s Luftgeschwindigkeit werden kann. Um dies auszuschalten, wird die empirische Formel aus Kapitel 7.5 gleich der gemessenen Luftgeschwindigkeit von 2 m/s gesetzt und nach x aufgelöst.

$$\begin{aligned} 2 &= -0,3833 \cdot \ln x + 0,2806 \\ \ln x &= 4,4858 \\ x &= e^{-4,4858} \\ x &= 0,0113 \end{aligned} \tag{9-6}$$

Im Bereich von $0 \leq x \leq 0,0113\text{m}$ muß die Funktion somit gleich dem gemessenen Anfangswert der Luftgeschwindigkeit mit 2 m/s gesetzt werden. Dies ist wiederum mit obiger Fallunterscheidung realisierbar, da die umgebende Luftgeschwindigkeit nicht größer als der gemessene Maximalwert von 2 m/s werden kann.

$$\text{Für } -0,3833 \cdot \ln x + 0,2806 \geq 2 \quad \text{gilt: } v_{L,x} = 2 \tag{9-7}$$

$$\text{Für } -0,3833 \cdot \ln x + 0,2806 < 2 \quad \text{gilt: } v_{L,x} = -0,3833 \cdot \ln x + 0,2806$$

Die relative Geschwindigkeit des Partikels $v_{x,\text{rel}}$, das bedeutet die Geschwindigkeit zwischen Partikel und Umgebungsluft, ergibt sich, wenn die Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$ von der absoluten Partikelgeschwindigkeit in x -Richtung $v_{x,\text{abs}}$ abgezogen wird.

$$v_{x,\text{rel}} = v_{x,\text{abs}} - v_{L,x} \tag{9-8}$$

Sowohl $v_{x,\text{abs}}$ wie auch $v_{L,x}$ sind größer oder gleich null, woraus folgt:

$$v_{x,\text{rel}} \geq 0, \text{ wenn } v_{x,\text{abs}} \geq v_{L,x} \tag{9-9}$$

$$v_{x,\text{rel}} < 0, \text{ wenn } v_{x,\text{abs}} < v_{L,x}.$$

Die relative Geschwindigkeit des Partikels zur Umgebungsluft wird also ab dem Zeitpunkt negativ, ab dem die absolute Geschwindigkeit in x -Richtung kleiner als die umgebende Luftgeschwindigkeit wird. Diese Bedingung ist für die Programmierung des weiteren Rechenganges wichtig und wird noch häufig für Fallunterscheidungen gebraucht werden.

Der Betrag der relativen Partikelgeschwindigkeit v_{rel} läßt sich aus dem Satz des Pythagoras

ermitteln

$$v_{\text{rel}} = \sqrt{v_{x,\text{rel}}^2 + v_{y,\text{abs}}^2} \quad (9-10)$$

9.3.5 Reynoldszahl Re

Für die Berechnung des C_w -Wertes ist die Kenntnis der Re-Zahl wichtig, da der C_w -Wert eine Funktion der Re-Zahl darstellt. Die Re-Zahl berechnet sich aus der relativen Flugeschwindigkeit, der kinematischen Viskosität der Luft und einer charakteristischen Größe des Partikels, nämlich dem Partikeldurchmesser D zu:

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{rel}} \cdot D}{\nu} \quad (9-11)$$

9.3.6 C_w -Wert

Mit der Reynoldszahl, die bei jedem Iterationsschritt in Abhängigkeit von der relativen Flugeschwindigkeit neu berechnet wird, läßt sich nun der C_w -Wert des fliegenden Partikels näherungsweise mit den in Kapitel 8.2.3 gefundenen Funktionen mit einer Fallunterscheidung berechnen.

$$\text{Für } \text{Re} < 12 \text{ gilt:} \quad C_w = -0,6494 \cdot \text{Re} + 16,89 \quad (9-12)$$

$$\text{Für } \text{Re} > 12 \text{ gilt:} \quad C_w = 0,0004 \cdot \text{Re}^2 + 0,014 \cdot \text{Re} + 9,245 \quad (9-13)$$

9.4 Programmierung der Kräfte und Beschleunigungen über das Weginkrement

9.4.1 Widerstandskraft F_w

Mit der nun errechneten relativen Geschwindigkeit v_{rel} kann die Widerstandskraft F_w nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot v_{\text{rel}}^2 \cdot A \quad (9-14)$$

Die Widerstandskraft greift parallel der relativen Geschwindigkeit v_{rel} am Partikel an.

9.4.2 Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$

Da die Kraft F_w entlang der relativen Partikelgeschwindigkeit v_{rel} und nicht entlang der Flugbahn angreift, muß der Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ der relativen Partikelgeschwindigkeit zu den Achsen bestimmt werden.

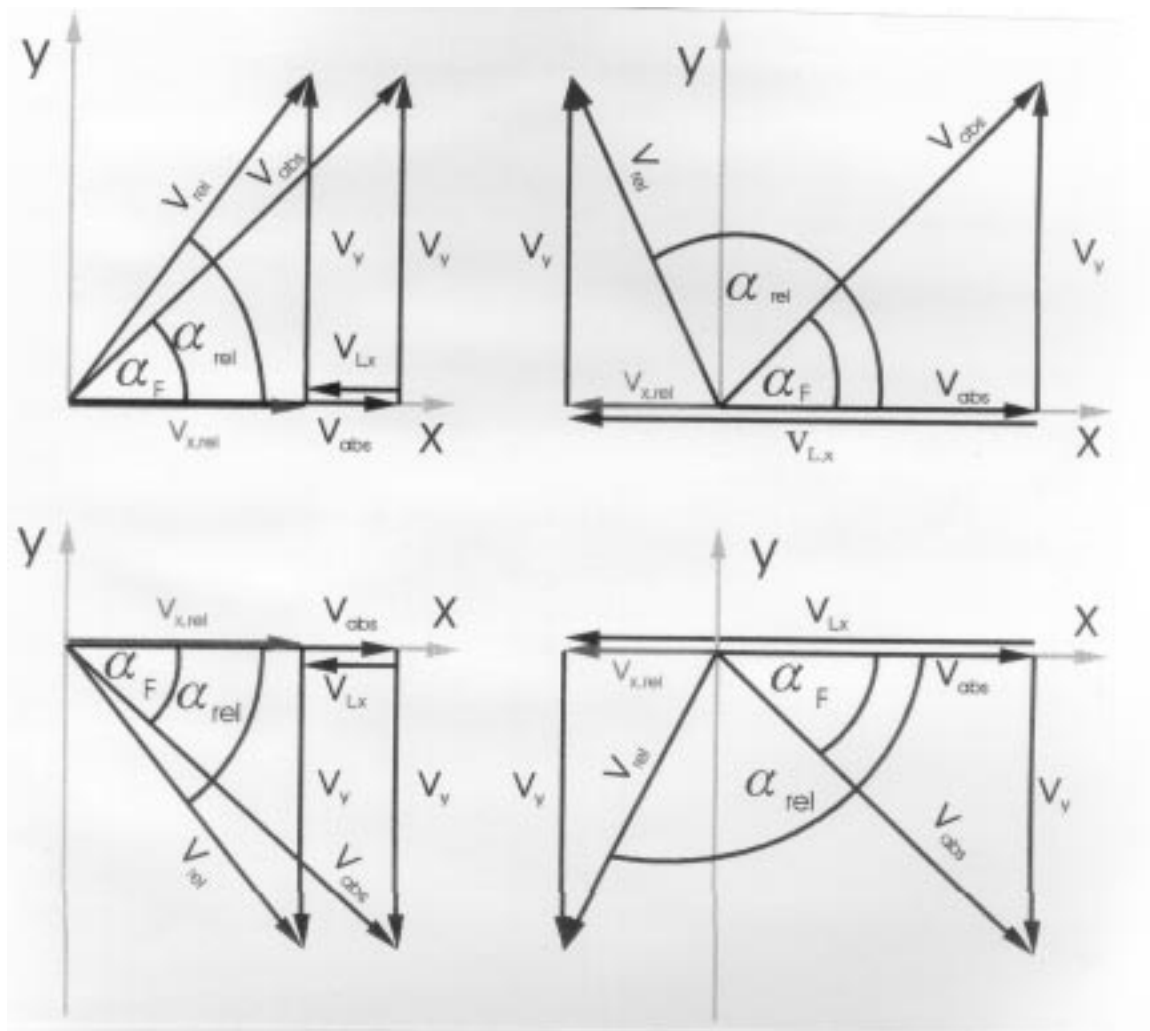


Bild 9.3: Vier verschiedene Möglichkeiten der relativen Geschwindigkeit in x-Richtung

Es gibt vier mögliche Relativgeschwindigkeitswinkel für jeweils zwei verschiedene Orientie-

rungen der Geschwindigkeiten $v_{x,rel}$ und $v_{y,abs} = v_{y,rel} = v_y$, wie aus obigem Bild 9.3 zu ersehen ist.

Die absolute Geschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,abs}$ ist identisch mit der relativen Geschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,rel}$, da angenommen wird, daß in y-Richtung keine vom rotierenden Sägeblatt ausgelöste Luftbewegung herrscht. Der Einfachheit wegen soll die Geschwindigkeit des Partikels in y-Richtung nun mit v_y bezeichnet werden.

Der Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ kann unter diesen Voraussetzungen also Werte von $-\pi < \hat{\alpha}_{rel} < \pi$ erreichen.

Eine einheitliche trigonometrische Funktion zu finden, die den korrekten Winkel $\hat{\alpha}_{rel}$ im Werte-bereich von $W_F \in [-\pi; \pi]$ ergibt, ist nicht möglich. Dies läßt sich leicht durch die Betrachtung der Werte- und Definitionsbereiche verschiedener trigonometrischer Funktionen zeigen. Eine mögliche Lösung müßte einer der prinzipiellen Formeln

$$\begin{aligned}\hat{\alpha}_{rel} &= \arcsin\left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}}\right) \\ \hat{\alpha}_{rel} &= \arccos\left(\frac{\text{Ankathete}}{\text{Hypotenuse}}\right) \\ \hat{\alpha}_{rel} &= \arctan\left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}}\right) \\ \hat{\alpha}_{rel} &= \text{arc cot}\left(\frac{\text{Ankathete}}{\text{Gegenkathete}}\right)\end{aligned}\tag{9-15}$$

folgen.

Betrachten wir zunächst einmal die sin-Funktion. Sie ist auf dem ganzen Zahlenstrahl, also auf ganz $\mathbb{R}$, definiert und hat eine Wertemenge zwischen -1 und 1.

$$\begin{aligned}f: x &\mapsto \sin x \\ [\mathbb{R}] &\rightarrow [-1;1]\end{aligned}\tag{9-16}$$

Soll nun die Umkehrfunktion gebildet werden muß der Definitionsbereich auf

$$\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right] \rightarrow [-1;1] \quad (9-17)$$

reduziert werden. Nur in diesem reduzierten Definitionsbereich hat die Umkehrfunktion eine eindeutige Lösung. Beim Bilden der inversen Funktion nun tauschen Definitionsbereich und Wertebereich die Rollen.

$$\begin{aligned} f: x &\mapsto \arcsin x \\ [-1;1] &\rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right] \end{aligned} \quad (9-18)$$

Diese Wertemenge der Umkehrfunktion ist kleiner als die Wertemenge $W_F \in [-\pi; \pi]$, die notwendig ist, um den Winkel $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ darzustellen.

Auch die Wertemengen der restlichen Umkehrfunktionen sind nicht ausreichend, um damit den Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ darzustellen

$$\begin{aligned} f: x &\mapsto \arccos x \\ [-1;1] &\rightarrow [0; \pi] \\ \\ f: x &\mapsto \arctan x \\ \mathbb{R} &\rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right] \end{aligned} \quad (9-19)$$

$$\begin{aligned} f: x &\mapsto \operatorname{arccot} x \\ \mathbb{R} &\rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right] \end{aligned}$$

So bleibt nur die Möglichkeit, den Relativgeschwindigkeitswinkel über einen kleinen Umweg zu berechnen, damit der weitere Rechengang programmiert werden kann.

Der Winkel zwischen y-Achse und Relativgeschwindigkeit v_{rel} soll nach nachfolgendem Bild 9.4 mit $\hat{\alpha}'_{\text{rel}}$ bezeichnet werden, wenn die relative Geschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,\text{rel}}$ negativ ist.

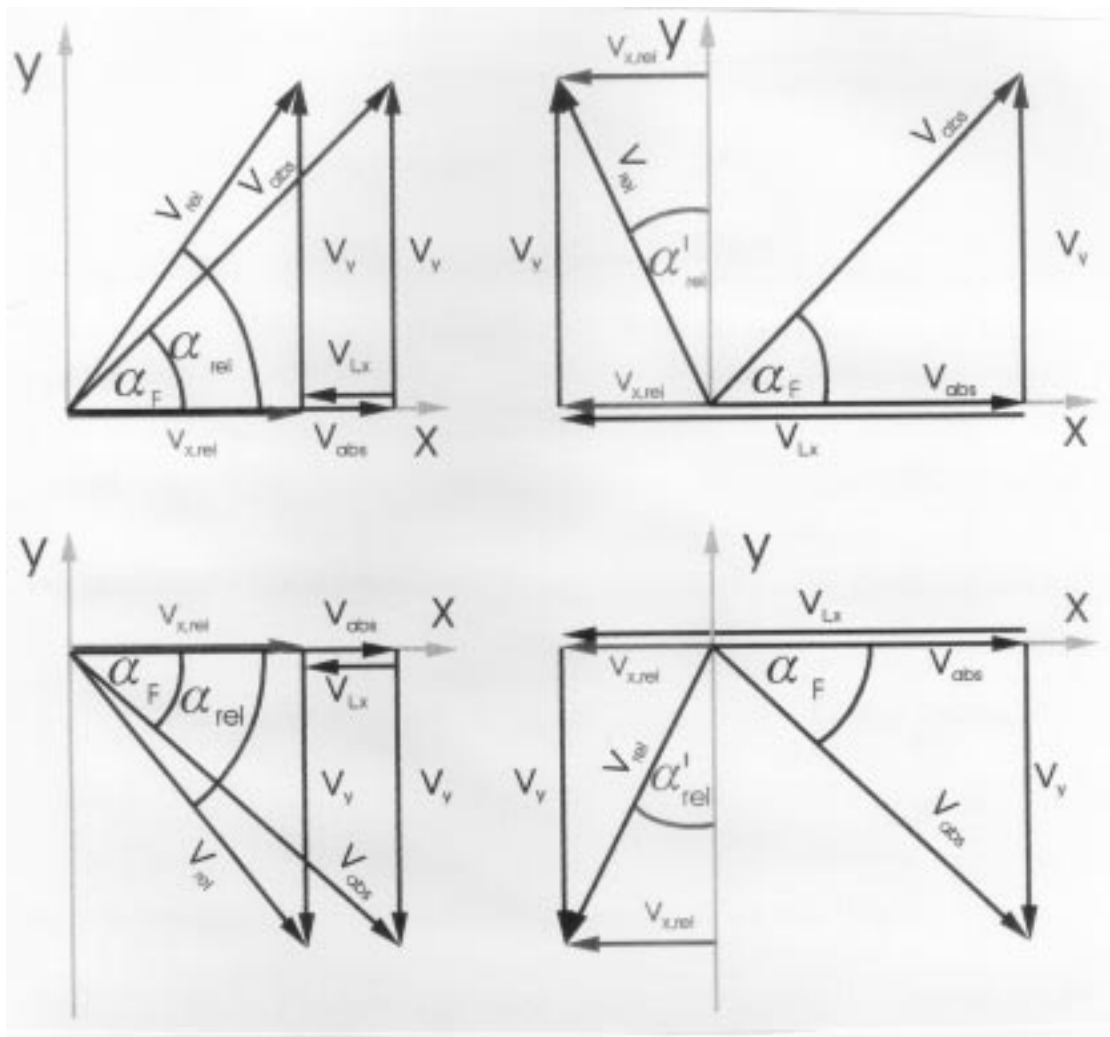


Bild 9.4: Neue Bezeichnungen der relativen Flugwinkel

Um den korrekten Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ zu erhalten, müssen demnach zwei Fall-unterscheidungen programmiert werden. Die erste Fallunterscheidung richtet sich nach dem Vorzeichen der Relativgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,rel}$. Somit gilt:

Für $v_{x,rel} > 0$ berechnet sich der Winkel $\hat{\alpha}_{rel}$ zu:

$$\hat{\alpha}_{rel} = \arctan\left(\frac{v_y}{v_{x,rel}}\right) \quad (9-20)$$

Für $v_{x,rel} \leq 0$ berechnet sich der Winkel $\hat{\alpha}'_{rel}$ zu:

$$\hat{\alpha}'_{rel} = \arctan\left(\frac{-v_{x,rel}}{v_y}\right) \quad (9-21)$$

Die arctan-Funktion wechselt bei $v_y = 0$ das Vorzeichen und liefert so automatisch das richtige Vorzeichen des Winkels $\hat{\alpha}_{rel}$. Auch beim Winkel $\hat{\alpha}'_{rel}$ ist dies der Fall, jedoch muß die Relativgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,rel}$ mit einem negativen Vorzeichen versehen werden. Damit ergibt sich bei positivem v_y auch ein positiver Winkel $\hat{\alpha}'_{rel}$.

Um den Winkel $\hat{\alpha}'_{rel}$ schließlich in den richtigen Relativgeschwindigkeitswinkel umzurechnen, wird die zweite Fallunterscheidung notwendig. Dabei wird geprüft, ob die Geschwindigkeit in y-Richtung positiv oder negativ ist:

$$\text{Für } v_y > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = \frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_{rel}. \quad (9-22)$$

$$\text{Für } v_y \leq 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = -\frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_{rel}. \quad (9-23)$$

Nach der Zusammenführung beider Fallunterscheidungen ergibt sich schließlich:

$$\text{Für } v_{x,rel} > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = \arctan\left(\frac{v_y}{v_{x,rel}}\right). \quad (9-24)$$

$$\text{Für } v_{x,rel} \leq 0 \text{ und } v_y > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{-v_{x,rel}}{v_y}\right). \quad (9-25)$$

$$\text{Für } v_{x,rel} \leq 0 \text{ und } v_y \leq 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = -\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{-v_{x,rel}}{v_y}\right). \quad (9-26)$$

Wichtig ist noch, daß die Möglichkeit $v_{x,rel} = 0$ bei der ersten Fallunterscheidung der Seite von $v_{x,rel} < 0$ zugeschlagen wird. Der Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ darf nämlich bei $v_{x,rel} = 0$ nicht zu null werden, sondern muß $\pm \frac{\pi}{2}$ betragen.

9.4.3 Kraft auf den Partikel in x-Richtung F_x

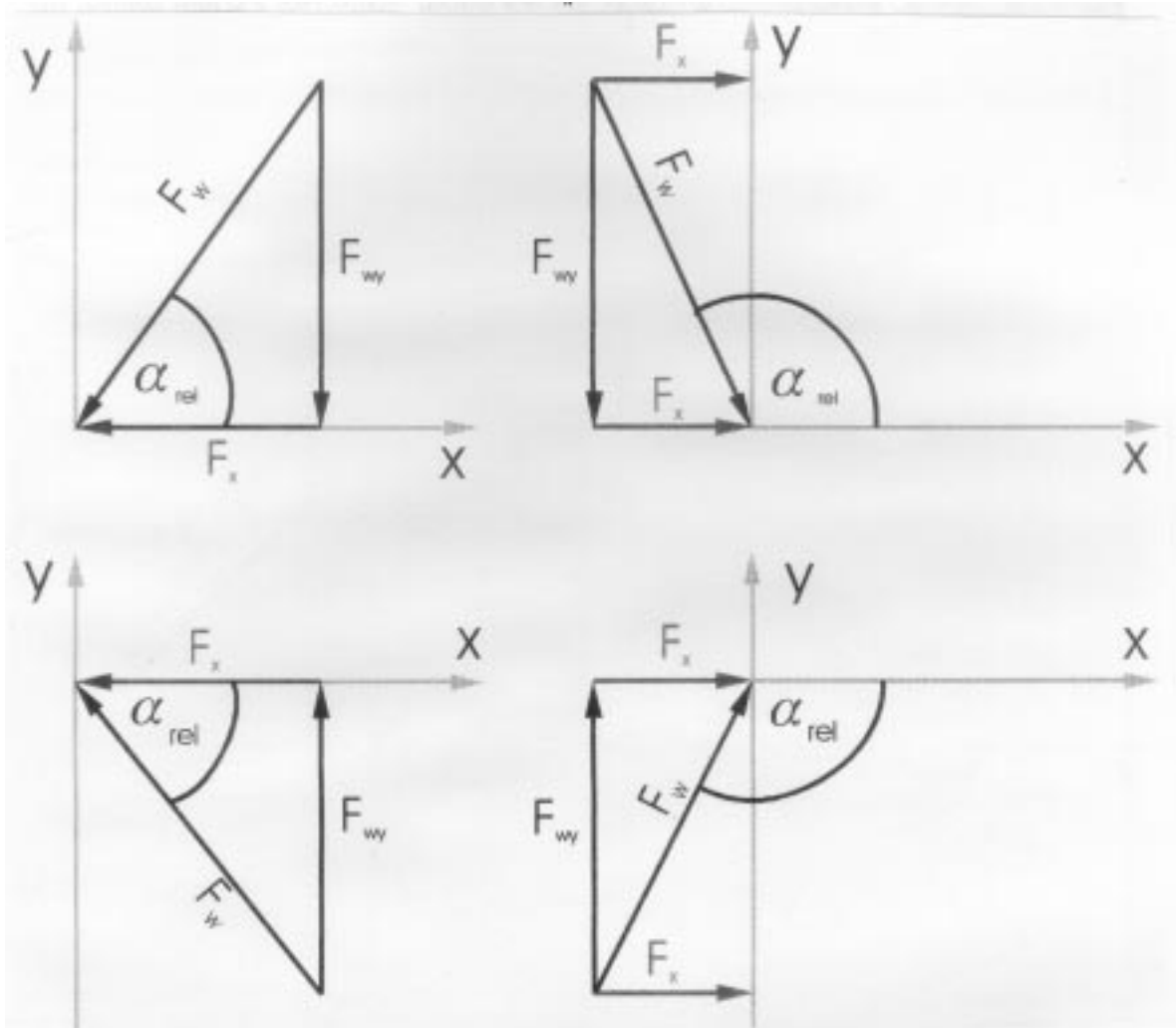


Bild 9.5: Kraft auf den Partikel in x-Richtung

Über den berechneten Relativbeschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ und die Widerstandskraft F_w lässt sich die auf den Partikel einwirkende Kraft in x-Richtung F_x berechnen zu:

$$F_x = -F_w \cdot \cos \hat{\alpha}_{rel} \quad (9-27)$$

Das negative Vorzeichen der Formel 9-27 basiert darauf, daß die Widerstandskraft F_w zwar immer positiv eingeht, die cos-Funktion jedoch im Winkelbereich von $-\frac{\pi}{2} < \hat{\alpha}_{rel} < \frac{\pi}{2}$ positiv ist und sich somit ein positives F_x ergeben würde. Die Kraft F_x ist in diesem Winkelbereich,

wie aus obigem Bild 9.5 hervorgeht, jedoch negativ. In den Winkelbereichen $-\pi < \alpha_{\text{rel}} < -\frac{\pi}{2}$ und $\pi < \alpha_{\text{rel}} < \frac{\pi}{2}$ verhält es sich gerade umgekehrt. Hier ist die cos-Funktion negativ, die Kraft F_x jedoch positiv.

9.4.4 Kraft auf den Partikel in y-Richtung F_y

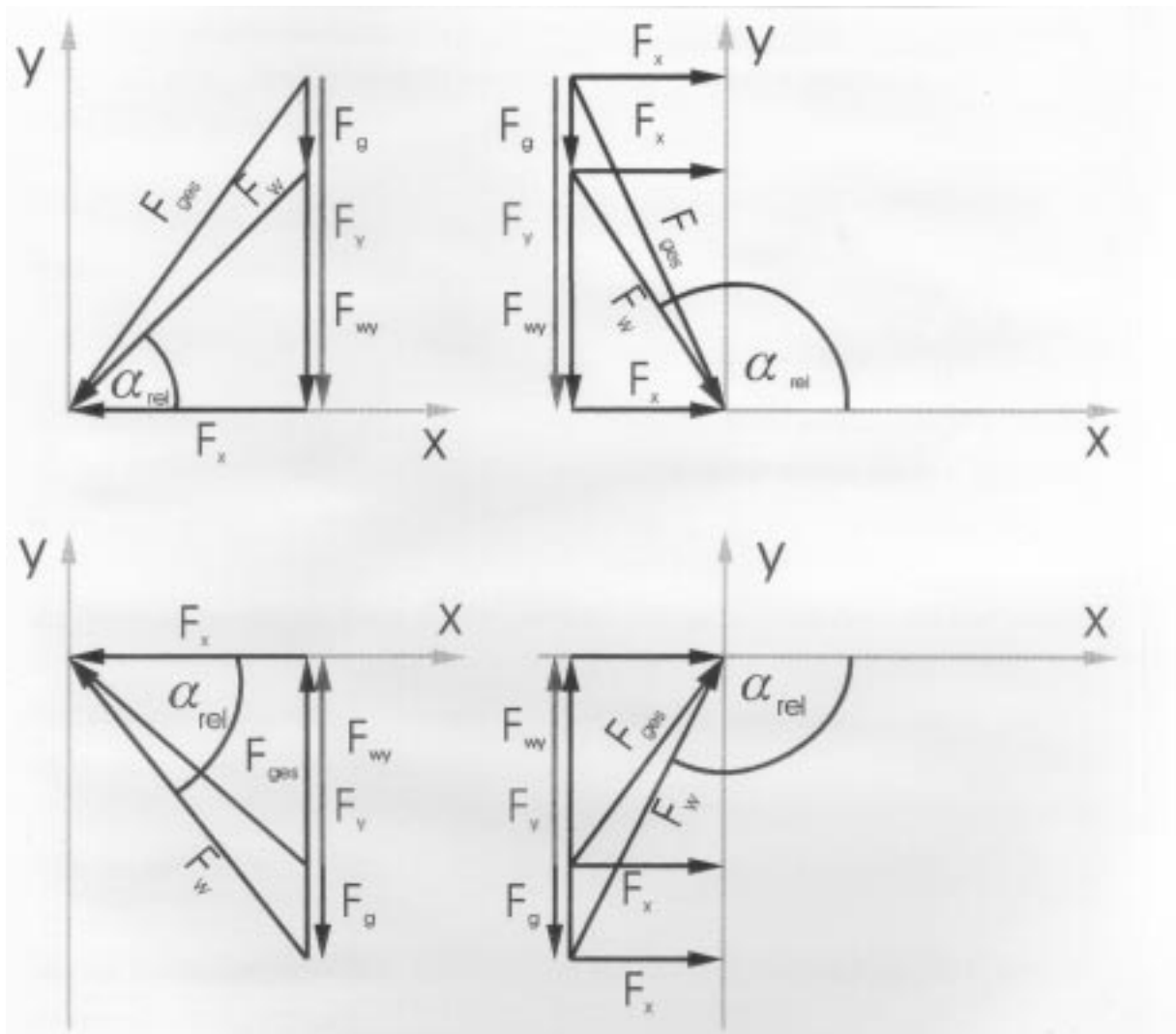


Bild 9.6: Die Kraft auf den Partikel in y-Richtung

Die Kraft in y Richtung F_y , die auf den Partikel wirkt, setzt sich aus zwei verschiedenen Kraftkomponenten zusammen. Zum einen wirkt an jeder Stelle im Raum die Gewichtskraft F_g in negativer y-Richtung mit konstantem Betrag auf den Partikel ein.

$$F_g = -m_p \cdot g \quad (9-28)$$

mit $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Zum zweiten addiert sich hierzu eine Kraftkomponente, die sich aus der Widerstandskraft ermitteln lässt hinzu. Diese kann jedoch in positive, wie auch negative y-Richtung gerichtet sein, wie in Bild 9.6 zu erkennen ist.

Die Kraft in y-Richtung ergibt sich somit zu:

$$F_y = -F_W \cdot \sin \hat{\alpha}_{\text{rel}} - m_p \cdot g \quad (9-29)$$

Eine Fallunterscheidung ist bei dieser Kraft nicht notwendig, da die sin-Funktion beim Winkel $\hat{\alpha}_{\text{rel}} = 0$ das Vorzeichen wechselt. Genau bei diesem Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ jedoch ändert sich auch das Vorzeichen der Kraft in y-Richtung.

Das Minuszeichen vor der ersten Kraftkomponente wird benötigt, da durch die sin-Funktion bei positivem Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ eine positive Kraft ermittelt würde. Die Kraftkomponente aus der Widerstandskraft ist jedoch bei positivem $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ negativ und bei negativem $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ demzufolge positiv.

9.4.5 Gesamtkraft F_{ges}

Aus den Kraftkomponenten in x- und y-Richtung lässt sich über die Gleichung des Pythagoras die Gesamtkraft F_{ges} ermitteln.

$$F_{\text{ges}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (9-30)$$

Dieses Ergebnis stellt jedoch nur den Betrag der Gesamtkraft F_{ges} dar, es sagt nichts über deren Wirkrichtung aus.

9.4.6 Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$

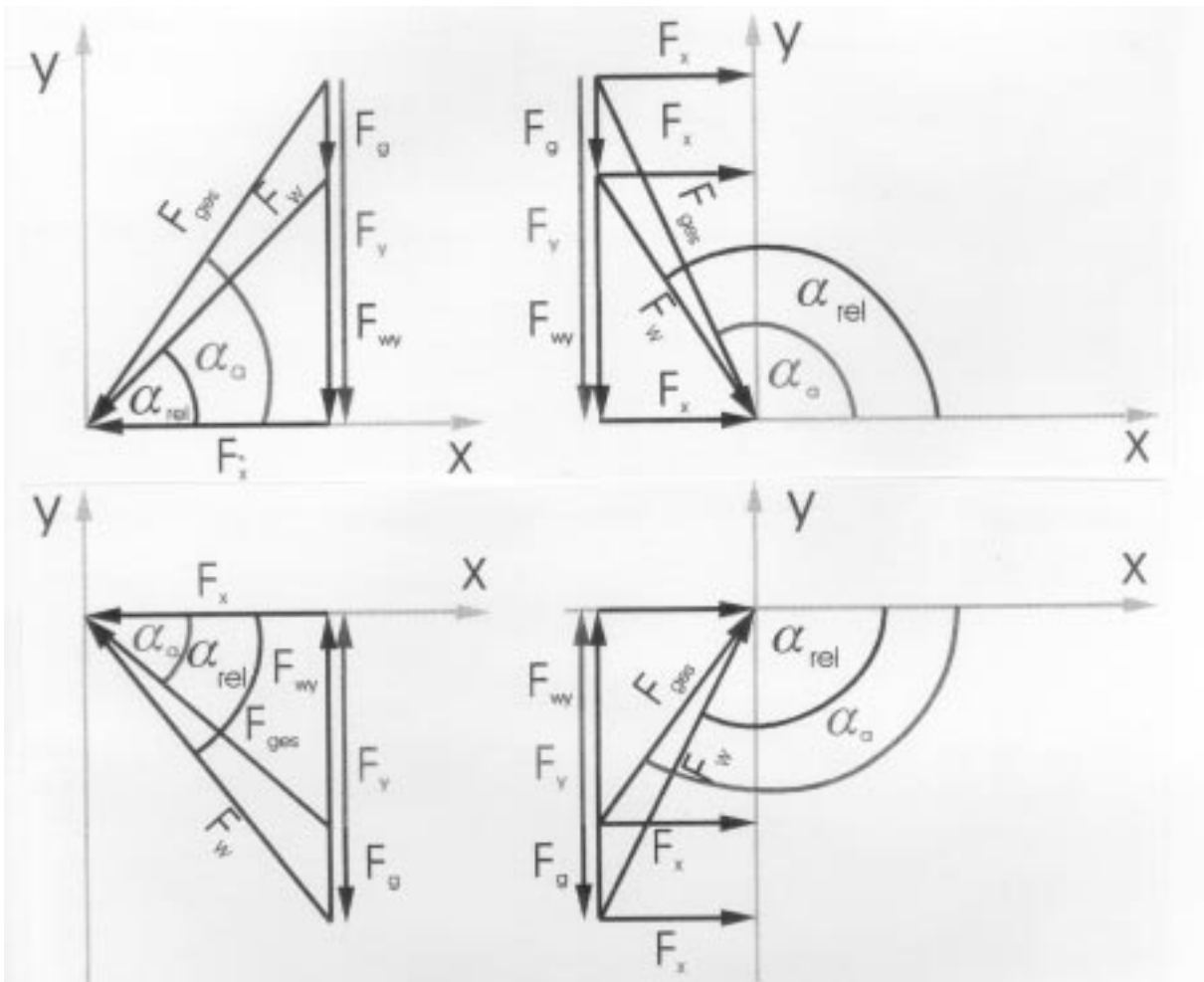


Bild 9.7: Der Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$

Der weitere Rechengang kommt zwar ohne den berechneten Wert des Beschleunigungswinkels $\hat{\alpha}_a$ aus. Es bleibt aber festzustellen, daß der Beschleunigungsvektor, wie aus Bild 9.7 zu entnehmen ist, weder in die Richtung der momentanen absoluten Flugbahn, noch in die Richtung der momentanen relativen Flugbahn weist. Er wirkt vielmehr unter dem Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$ zur x-Achse. Im übrigen folgt dessen Berechnung dem

Berechnungsverlauf des Relativgeschwindigkeitswinkels $\hat{\alpha}_{\text{rel}}$ in Kapitel 9.4.2. Die programmierte Formel soll hier der Vollständigkeit halber verkürzt angegeben werden.

Dabei wird für die Fallunterscheidung $v_{x,\text{rel}} < 0$ wieder ein Hilfswinkel $\hat{\alpha}'_a$ folgendermaßen eingeführt:

$$\text{für } v_{x,\text{rel}} < 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}'_a = -\arctan\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (9-31)$$

Für den gesamten Beschleunigungswinkel lauten die Fallunterscheidungen dann:

$$\text{für } v_{x,\text{rel}} > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_a = \arctan\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad (9-32)$$

$$\text{für } v_{x,\text{rel}} < 0 \text{ und } F_y < 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_a = \frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_a = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (9-33)$$

$$\text{für } v_{x,\text{rel}} < 0 \text{ und } F_y > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_a = -\frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_a = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{F_x}{F_y}\right). \quad (9-34)$$

9.4.7 Partikelbeschleunigung a

Die Beschleunigung a , welche parallel zur Gesamtkraft F_{ges} gerichtet ist, läßt sich aus der Grundgleichung der Mechanik $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ ermitteln.

$$a = \frac{F_{\text{ges}}}{m_p} \quad (9-35)$$

Der Fall $F_{\text{ges}} = 0$ kann nur für den freien Fall mit Endgeschwindigkeit auftreten. Ansonsten ist immer eine Beschleunigung des Partikels vorhanden.

9.4.8 Partikelbeschleunigung in x-Richtung a_x

Die Beschleunigung des Partikels in x-Richtung a_x ließe sich nun über den Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$ und die Partikelbeschleunigung a über trigonometrische Funktionen errechnen. Wesentlich einfacher geht dies jedoch mit der Kraft in x-Richtung nach der Grundgleichung der Mechanik.

$$a_x = \frac{F_x}{m_p} \quad (9-36)$$

Die Beschleunigung in x-Richtung ist für positive relative Partikelgeschwindigkeiten durch die negative Kraft F_x negativ. Ist die relative Partikelgeschwindigkeit negativ, so wird die Beschleunigung in x-Richtung positiv. Dies bedeutet, der Partikel wird durch die umgebende Luft wieder in x-Richtung beschleunigt.

9.4.9 Partikelbeschleunigung in y-Richtung a_y

Die Partikelbeschleunigung in y-Richtung a_y berechnet sich analog der Partikelbeschleunigung in x-Richtung a_x .

$$a_y = \frac{F_y}{m_p} \quad (9-37)$$

Die Beschleunigung in y-Richtung ist je nach dem Vorzeichen der Kraft in y-Richtung F_y in die positive oder negative Richtung der y-Achse orientiert.

9.5 Programmierung der Endwerte des Weginkrements

9.5.1 Neue absolute x-Geschwindigkeit $v_{x+1,abs}$

Bei der Bewegung im Weginkrement handelt es sich um eine beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit. Dabei wird angenommen, daß die Beschleunigung über das Weginkrement konstant sei. So errechnet sich die neue absolute Geschwindigkeit in x-Richtung

$v_{x+1,abs}$ aus der Gleichung für beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit.

$$v_{x+1,abs} = \sqrt{v_{x,abs}^2 + 2 \cdot a_x \cdot \Delta s_x} \quad (9-38)$$

Bei dieser Formel muß gewährleistet sein, daß der Wert unter der Wurzel nie kleiner als Null wird. Dies würde geschehen, wenn die Nachbeschleunigung $2 \cdot a_x \cdot \Delta s_x$ negativ und dem Betrage nach größer als die Anfangsgeschwindigkeit wäre.

Da die Widerstandskraft den Partikel nicht weiter als bis zum Stillstand in x-Richtung abzubremesen in der Lage ist und die umgebende Luftgeschwindigkeit den Partikel nur in positive x-Richtung beschleunigen kann, ist es nicht möglich, daß dieser Fall eintritt.

Trotzdem wurde die Fallunterscheidung

$$\text{wenn: } v_{x,abs}^2 + 2 \cdot a_x \cdot \Delta s_x \leq 0 \quad \text{gilt: } v_{x+1,abs} = 0 \quad (9-39)$$

$$\text{wenn: } v_{x,abs}^2 + 2 \cdot a_x \cdot \Delta s_x > 0 \quad \text{gilt: } v_{x+1,abs} = \sqrt{v_{x,abs}^2 + 2 \cdot a_x \cdot \Delta s_x}$$

programmiert, um Fehler im Rechenschema durch Rundungsungenauigkeiten und dergleichen zu vermeiden.

9.5.2 Flugzeit des Partikels über das Weginkrement t

Über die Gleichung 9-38 konnte die neue Geschwindigkeit in x-Richtung $v_{x+1,abs}$ berechnet werden, so daß der Berechnung der Flugzeit über dem Weginkrement in x-Richtung Δs_x nichts mehr im Wege steht. Die Flugzeit über das Weginkrement in x-Richtung ist selbstverständlich identisch mit der Flugzeit über das Weginkrement in y-Richtung.

So berechnet sich die Flugzeit t durch Umformen der Weggleichung für Bewegungen mit Anfangsgeschwindigkeit:

$$\Delta s_x = 0,5(v_{x,abs} + v_{x+1,abs}) \cdot t$$

$$t = \frac{2 \cdot \Delta s_x}{v_{x,abs} + v_{x+1,abs}} \quad (9-40)$$

9.5.3 Weginkrement in y-Richtung Δs_y

Als Vorstufe zur Berechnung der neuen Geschwindigkeit in y-Richtung, sowie zur Erzeugung eines Flugbahndiagramms ist es notwendig, das Weginkrement in y Richtung Δs_y und dessen Orientierung zu kennen. Das Weginkrement in y-Richtung ändert sich bei jedem Rechengang, da das Weginkrement in x-Richtung konstant gehalten wird, der Flugwinkel sich aber ständig ändert.

Durch die Berechnung der Flugzeit über das Weginkrement sind alle notwendigen Voraussetzungen zur Berechnung des Weginkrements in y-Richtung gegeben. Die berechneten Werte werden in die Weggleichung für Bewegungen mit Anfangsgeschwindigkeit eingesetzt.

$$\Delta s_y = v_y \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t^2 \quad (9-41)$$

Die Orientierung des Weginkrements nach oben oder unten ergibt sich durch die Vorzeichen der Geschwindigkeit in y-Richtung und die Beschleunigung in y-Richtung automatisch.

Auch bei einem Flugwinkel von null Grad ist die Formel 9-41 gültig. Die Geschwindigkeit v_y wird dann gleich null, und die Formel entspricht der Formel für die Bewegung ohne Anfangsgeschwindigkeit.

9.5.4 Neue Geschwindigkeit in y-Richtung v_{y+1}

Auch bei der Berechnung der neuen Geschwindigkeit in y-Richtung v_{y+1} handelt es sich um eine beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit. Jedoch sind Fallunterscheidungen notwendig, um die Berechnung programmieren zu können.

Die erste Fallunterscheidung, die betrachtet werden muß, bezieht sich auf den Zustand des reinen Sink- bzw. des reinen Steigfluges. Reiner Steig- bzw. Sinkflug bedeutet in diesem Zusammenhang, daß eine Richtungsumkehr der Geschwindigkeit im Weginkrement nicht stattfindet. Die Geschwindigkeitsumkehr in einem Weginkrement muß später als Sonderfall betrachtet werden.

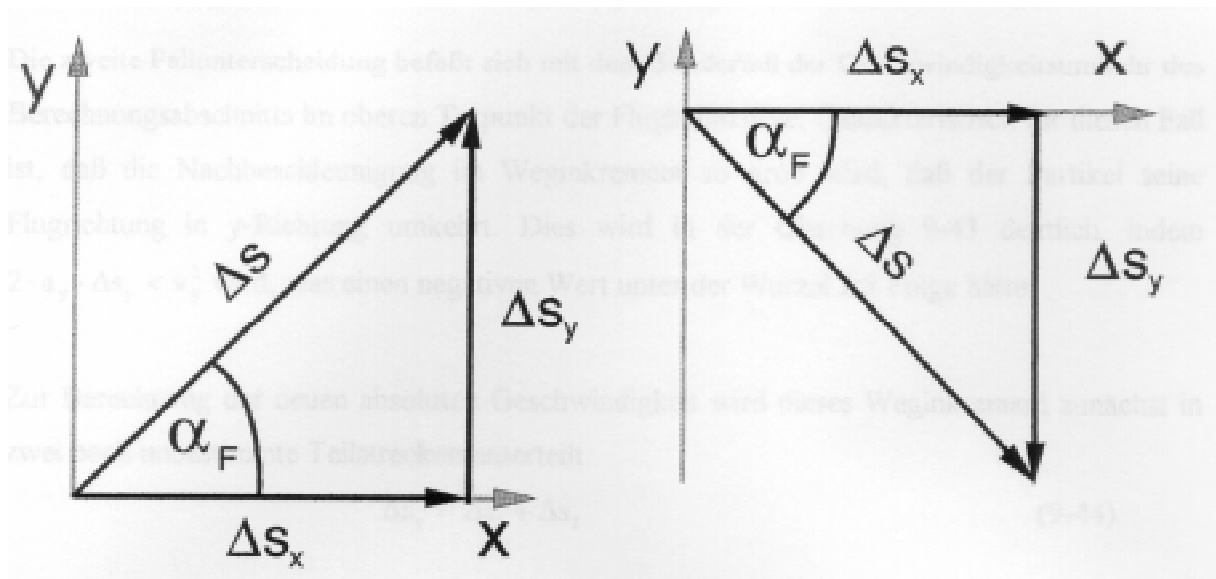


Bild 9.8: Weginkremente im Steig- bzw. Sinkflug

Bei der ersten Fallunterscheidung kommt es in erster Linie darauf an, für den Sinkflug eine negative neue absolute Geschwindigkeit $v_{x+1,abs}$ errechnen zu können. Da das Ergebnis der Wurzelfunktion immer positiv ist, werden für die beiden Orientierungen der Weginkrements in y-Richtung Δs_y unterschieden:

$$\text{für: } \Delta s_y \geq 0 \text{ gilt: } v_{y+1} = \sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \quad (9-42)$$

$$\text{für: } \Delta s_y < 0 \text{ gilt: } v_{y+1} = -\sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \quad (9-43)$$

Bei gemeinsamer Betrachtung der Bilder 9.8 und 9.6 zeigt sich, daß die Vorzeichen, sowie der Rechenweg der neuen absoluten Geschwindigkeit v_{y+1} korrekt sind. Während des Steigfluges ist Δs_y positiv a_y aber parallel zur Gesamtkraft und somit in y-Richtung negativ, was einen negativen zweiten Wert unter der Wurzel ergibt. Das bedeutet, die Geschwindigkeit muß während des Steigfluges in y-Richtung abnehmen.

Während des Sinkfluges muß die Geschwindigkeit bis zu einer Endgeschwindigkeit zunehmen. Dies geschieht, indem sowohl Δs_y als auch a_y positiv sind. Dadurch wird das Ergebnis der Wurzel größer als die einbezogene Anfangsgeschwindigkeit des berechneten Abschnitts. Da die Geschwindigkeit während des Sinkfluges nach unten gerichtet ist, muß vor die Wurzel ein negatives Vorzeichen gesetzt werden.

Die zweite Fallunterscheidung befaßt sich mit dem Sonderfall der Geschwindigkeitsumkehr des Berechnungsabschnitts im oberen Totpunkt der Flugbahnkurve. Charakteristisch für diesen Fall ist, daß die Nachbeschleunigung im Weginkrement so groß wird, daß der Partikel seine Flugrichtung in y-Richtung umkehrt. Dies wird in der Gleichung 9-43 deutlich, indem $2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y < v_y^2$ wird, was einen negativen Wert unter der Wurzel zur Folge hätte.

Zur Berechnung der neuen absoluten Geschwindigkeit wird dieses Weginkrement zunächst in zwei noch unbestimmte Teilstrecken unterteilt.

$$\Delta s_y = \Delta s_1 + \Delta s_2 \quad (9-44)$$

Die Teilstrecke Δs_1 wird dabei als Strecke in y-Richtung angesehen, die der Partikel zurücklegt bis er den oberen Totpunkt, also die Geschwindigkeitsumkehr, erreicht. Um sie zu bestimmen muß die Endgeschwindigkeit des Weginkrements v_y zu Null gesetzt werden. Die Wegstrecke wird dabei nur über das erste Weginkrement Δs_1 berechnet, nach welchem die Gleichung auf-gelöst werden muß.

$$\begin{aligned} 0 &= \sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_1} \\ -2 \cdot a_y \cdot \Delta s_1 &= v_y^2 \\ \Delta s_1 &= \frac{v_y^2}{-2 \cdot a_y} \end{aligned} \quad (9-45)$$

Die Länge des zweiten Weginkrements läßt sich nun aus der Kenntnis der beiden anderen Weginkremente leicht ermitteln.

$$\Delta s_2 = \Delta s_y - \Delta s_1 \quad (9-46)$$

Die Endgeschwindigkeit kann jetzt ermittelt werden, indem die Formel mit der Wegstrecke und ohne Anfangsgeschwindigkeit neu angesetzt wird. Dabei muß ein negatives Vorzeichen vor die Wurzel gesetzt werden, da die errechnete Geschwindigkeit nach unten weist. Da das Weginkrement positiv ist, muß es im Gegensatz zu den anderen Formeln mit einem negativen Vorzeichen versehen werden, damit die Formel für den berechneten Sinkflug im zweiten Abschnitt das richtige Ergebnis liefert.

$$v_{y+1} = -\sqrt{0 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_2} \quad (9-47)$$

Durch einsetzen der Gleichungen 9-45 und 9-46 erhält man schließlich:

$$\begin{aligned} v_{y+1} &= -\sqrt{-2 \cdot a_y \cdot (\Delta s_y - \Delta s_2)} \\ v_{y+1} &= -\sqrt{-2 \cdot a_y \cdot \left(\Delta s_y + \frac{v_y^2}{2 \cdot a_y} \right)} \\ v_{y+1} &= -\sqrt{-v_y^2 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \end{aligned} \quad (9-48)$$

Zusammengefaßt lauten die beiden Fallunterscheidungen schließlich:

$$\begin{aligned} \text{für } \Delta s_y < 0 \text{ gilt: } v_{y+1} &= -\sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \\ \text{für } \Delta s_y \leq 0 \text{ und } |2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y| < v_y^2 \text{ gilt: } v_{y+1} &= \sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \\ \text{für } \Delta s_y \leq 0 \text{ und } |2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y| > v_y^2 \text{ gilt: } v_{y+1} &= -\sqrt{-v_y^2 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \end{aligned} \quad (9-49)$$

9.5.5 Gesamte Flugzeit des Partikels T

Durch Aufsummieren der Flugzeiten über die einzelnen Weginkremente, bis $y = -0,84$ m lassen sich die Flugzeiten des Partikels bis zum Aufschlag im Raster bestimmen.

$$T = \sum_{y=0}^{y=-0,84} t \quad (9-50)$$

9.6 Genauigkeit und Praktikabilität des Rechenschemas

Die Handhabung des Rechenschemas ist denkbar einfach. Man erkennt in der Tabelle auf Seite 146 verschiedene farbig unterlegte Felder. Diese stellen die Variablen der Rechnung dar und können einfach durch Eingeben einer neuen Zahl verändert werden. Die Tabelle wird daraufhin mit dem neuen Wert komplett berechnet und die Flugbahn im angefügten Diagramm gezeichnet. So lassen sich mit dem Berechnungsschema auf einfache Weise verschiedene Konstellationen der Variablen durchtesten.

Da das Rechenschema mit kleinen Wegstrecken, den sogenannten Weginkrementen, für die

Rechnung arbeitet, ist die Genauigkeit der Rechnung bei Weginkrementen, die gegen Null gehen am höchsten. Jedoch differiert das Ergebnis der Rechnung bei unterschiedlichen Längen der Weginkremente nur sehr gering, da die zurückgelegten Wegstrecken über die Flugzeit mit der Formel für beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit (Gleichung 9-41) gerechnet werden. Hier geht die Beschleunigung des Partikels in die Rechnung des Weginkrements in y-Richtung, im Gegensatz zur Rechenmethode mit kleinen konstanten Geschwindigkeitsdreiecken, mit ein. Der Fehler in der dargestellten Flugbahn rührt somit nur noch von der über das Weginkrement als konstant angenommenen Beschleunigung her. Da sich die Beschleunigungswerte über den kleinen verwendeten Weginkrementen nicht gravierend verändern, kann mit dieser Annahme eine sehr genaue Flugbahn berechnet werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Durchführung der Versuche wurde im Rahmen dieser Studienarbeit eine einfache Vorrichtung konzipiert und hergestellt, mit welcher es möglich war einen größtenteils freien Späneflug mit einer umgebauten Handkreissäge zu realisieren.

Die erzeugten Partikel wurden über ein ausgelegtes Raster und eine Siebanalyse der dadurch gewonnenen Proben, auf ihre Flugweite hin untersucht. Dabei wurden für 3 verschiedene Sägeblätter mit unterschiedlichen Zähnezahlen jeweils die Verteilungen der Partikel im Raster als Massenanteil, sowie als prozentualer Anteil ermittelt.

Aufgrund dieser Daten wurde versucht Rückschlüsse auf den Flug der Späne und dessen Beeinflussung zu ziehen. Dabei wurden einzelne Effekte, wie beispielsweise die umgebende Luftgeschwindigkeit genauer untersucht. Es mußten aber auch einige physikalische Effekte, die einen Einfluß auf die Flugbahn 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 nur die Rotationsgeschwindigkeit der fliegenden Partikel genannt, die benötigt wird um den Einfluß des Magnus-Effekts zu bestimmen.

Über mehrere Iterationsschritte wurde versucht eine brauchbare Beziehung des C_w -Wertes für die im Versuch erzeugten Partikel zu finden, die eine genaue Berechnung der Partikelflugbahn erst möglich macht.

Die Berechnung der Flugbahn schließlich, wurde als Excel-Tabelle programmiert. Sie ist so flexibel gehalten, daß durch einsetzen neuer Werte verschiedene Konstellationen der einzelnen Variablen getestet werden können, ohne grundsätzlich in die Programmierung einzugreifen. Es müssen dafür lediglich neue Anfangswerte in die markierten Tabellenbereiche eingesetzt werden.

Um die Berechnungen der Flugbahn zu untermauern und zu verbessern sind jedoch noch einige weiterführende Versuche notwendig und möglich. So wäre beispielsweise die genauere Untersuchung der Abfluggeschwindigkeiten für die einzelnen Partikelklassen sinnvoll. Auch wären ausführlichere Untersuchungen der Partikelmassen und Partikelformen möglich, sie hätten jedoch den Rahmen dieser Studienarbeit gesprengt. So wären zur Untermauerung der Berechnungen auch Vergleiche mit der realen Sinkgeschwindigkeit der verschiedenen Partikel sinnvoll.

Eine weiterer wichtiger Aspekt wäre die Untersuchung der Flugbahn auf mehreren Ebenen. So könnten beispielsweise durch die Streuung der Partikel auftretende Geschwindigkeits- und Flugbahnverzerrungen in den aufgenommenen Flugbahnen eliminiert werden. Da die Flugbahnen nur aus einer Kameraebene beobachtet werden konnten enthalten sie zwangsläufig Abweichungen, für deren Korrektur aber genauere Angaben fehlen.

Diese Studienarbeit stellt somit eine Grundlage für weiterführende Untersuchungen dar. Das Rechenschema als Excel-Tabelle ist hierfür recht offen gestaltet und kann mit mäßigem Aufwand auch auf den dreidimensionalen Raum und weitere physikalische Größen, die die Flugbahn beeinflussen ausgeweitet und angepaßt werden.

11 Literaturhinweise

- /1/ Bolm-Audorff, Ulrich, Vogel, Christa, Woitowitz, Hans-Joachim:
Berufliche und außerberufliche Risikofaktoren von Nasen-Rachentumoren
Staub - Reinhaltung der Luft 49 (1989), Springer-Verlag 1989, S. 389-393.
- /2/ Heimann Manfred:
Prüfstandversuche zur Ermittlung der Staubemissionsrate von Holzbearbeitungs-
maschinen,
Staub - Reinhaltung der Luft 49 (1989) Springer-Verlag, 1989, S. 385-388.
- /3/ Bullinger, Hans-Jörg:
Skriptum Arbeitswissenschaft I
Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement,
1993.
- /4/ Müller Stephan:
Untersuchung eines neuen Späneentsorgungskonzeptes
Universität Stuttgart, Institut für Werkzeugmaschinen
Unveröffentlichte Diplomarbeit, 1993
- /5/ Barz, Eginhard, Münz, Uwe V.:
Der Spanablauf bei Fräsen für die Holzbearbeitung
HOLZ als Roh- und Werkstoff 11 (1967), 25 Jahrgang, S. 422-428.
- /6/ Schmutzler, Wolfgang:
Kenngrößen für die Späneabsaugung
HOLZ als Roh- und Werkstoff 7 (1967), 21. Jahrgang, S. 265-267
- /7/ Westkämper E., Riegel A.:
Auslegung von Staub- und Späneerfassungseinrichtungen

Holz-Zentralblatt 24 (1995), Stuttgart, S. 394,395

- /8/ DIN 476
Schreibpapier und bestimmte Gruppen von Drucksachen
Deutsches Institut für Normung, Februar 1991
- /9/ Roedle, Tilman:
Experimentelle Untersuchung zur Staubentstehung und Schnittqualität beim Sägen
plattenförmiger Holzwerkstoffe
Universität Stuttgart, Institut für Werkzeugmaschinen
Unveröffentlichte Studienarbeit, 1991
- /10/ Heisel, U.:
Grundlagen der Werkzeugmaschinen
Universität Stuttgart, Institut für Werkzeugmaschinen
Vorlesungsmanuskript, 1990
- /11/ Paulitsch Michael:
Moderne Holzwerkstoffe: Grundlagen, Technologie, Anwendungen
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1989
- /12/ DIN 68 761:
Flachpreßplatten für allgemeine Zwecke,
Deutsches Institut für Normung, August 1981
- /13/ DIN 68 760:
Spanplatten Nenndicken
Deutsches Institut für Normung, September 1973
- /14/ DIN 68 765:
Kunststoffbeschichtete dekorative Flachpreßplatten für allgemeine Zwecke
Deutsches Institut für normung, August 1981

- /15/ Bartsch Hans-Jochen:
Taschenbuch mathematischer Formeln
Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfurt/Main, 1973
- /16/ Herr Horst:
Mechanik der Flüssigkeiten und Gase, Technische Physik.
Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co., Wuppertal 1989.
- /17/ Bader, Franz, Dorn, Friedrich:
Physik - Oberstufe
Schroedel Schulbuchverlag GmbH, Hannover 1983
- /18/ Czichos Horst:
Hütte, Grundlagen der Ingenieurwissenschaften
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1991.