

Simulation von Späneerfassungsvorgängen in Absaughauben bei holzbearbeitenden Maschinen

Der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) vorgelegte Abhandlung

von

Martin Dressler
geboren in Schorndorf

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Uwe Heisel
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ
Tag der Einreichung:	14. Oktober 2005
Tag der mündlichen Prüfung:	26. Juli 2006

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Formelzeichen	IX
English Summary	XIII
Introduction	XIII
Experimental Procedures	XIII
Results	XVI
Discussion	XVI
Summary	XVII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Späneerfassung in der Holzbearbeitung	3
2.1.1 Raumabsaugung	3
2.1.2 Diverse singuläre Ansätze	4
2.1.3 Direkte Späneerfassung	5
2.1.4 Spanabfuhr aus dem Werkzeug – Doppelzerspanung	5
2.2 Mehrphasenströmung	10
2.3 Pneumatische Partikelförderung	10
2.4 FEM-Strömungsberechnung	11
2.5 Programmiertechnik	12
3 Zielsetzung	13
4 Einflussgrößen auf den Späneflug	15
4.1 Verfahren zur Abschätzung des Parametereinflusses auf die Simulationsrechnung	15
4.2 Programmierung der Tabellenkalkulation	16
4.2.1 Festlegung des Koordinatensystems	16
4.2.2 Grenzen der Tabellenkalkulation	16
4.2.3 Anfangswerte im Rechenschema	17
4.2.4 Absolute Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,abs}$	17
4.2.5 Absolute Partikelgeschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,abs}$	18
4.2.6 Relative Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,rel}$	18
4.2.7 Widerstandskraft F_w	19
4.2.8 Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$	19
4.2.9 Kraft auf das Partikel in x-Richtung F_x	22
4.2.10 Kraft auf das Partikel in y-Richtung F_y	22

4.2.11	Gesamtkraft F_{ges}	23
4.2.12	Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$	23
4.2.13	Partikelbeschleunigung a	24
4.2.14	Partikelbeschleunigung in x-Richtung a_x	24
4.2.15	Partikelbeschleunigung in y-Richtung a_y	24
4.2.16	Absolute x-Geschwindigkeit $v_{x+1,\text{abs}}$ am Ende des Weginkrements	24
4.2.17	Flugzeit des Partikels über das Weginkrement in x-Richtung t	25
4.2.18	Weginkrement in y-Richtung Δs_y	25
4.2.19	Geschwindigkeit in y-Richtung v_{y+1} am Ende des Weginkrements	26
4.3	Variation der Einflussgrößen auf den Späneflug	28
4.3.1	c_w -Wert	28
4.3.2	Schrittweite Δx	30
4.3.3	Umgebende Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$	31
4.3.4	Anfangsgeschwindigkeit des Partikels v_{abs}	32
4.3.5	Partikelmasse m_p	33
4.3.6	Partikelquerschnitt A	34
4.3.7	Abflugwinkel α	35
4.3.8	Statischer Auftrieb F_A	36
4.3.9	Dynamischer Auftrieb F_{dyn}	36
4.3.10	Coriolis-Kraft F_C	38
4.3.11	Magnus-Effekt durch die Partikelrotation	38
4.3.12	Rückprallwinkel beim Wandstoß von Partikeln	39
4.3.13	Geschwindigkeitsreduzierung beim Wandstoß von Partikeln	40
4.4	Vernachlässigte Einflüsse	40
4.4.1	Stoß zwischen Partikeln im Spänestrahl	40
4.4.2	Mehrere Partikel in unmittelbarer Nähe zueinander	40
4.4.3	Partikel in Wandnähe	42
4.5	Abschätzung der Einflüsse einzelner Parameter auf die Simulationsrechnung	42
5.	Werkstoff	44
5.1	Werkstoffauswahl	44
5.2	Aufbau der Werkstoffe	44
5.2.1	Anatomie des Holzes	45
5.2.2	Einfluss der Holzeigenschaften auf die Spanbildung	45
5.2.3	Aufbau der ausgewählten Holzwerkstoffe	47
5.3	Zerspanungsversuche unter dem Mikroskop	47
5.3.1	Zerspanung von Spanplatte unter dem Mikroskop	49
5.3.2	Sekundärspanbildung bei Spanplatte	50
5.3.3	Zerspanen von MDF unter dem Mikroskop	51
5.3.4	Resümee der Zerspanungsuntersuchungen unter dem Mikroskop	52
5.4	Schnittrichtungen	53

5.5	Vorspaltung	53
6	Spangröße	55
6.1	Versuchsaufbau	55
6.1.1	Versuchsmaschinen	55
6.1.2	Siebmaschine	55
6.2	Versuchsdurchführung	56
6.2.1	Untersuchte Werkstoffe	56
6.2.2	Gleich- und Gegenlauf	57
6.2.3	Vorschubgeschwindigkeiten	57
6.2.4	Unterschiedliche Bearbeitungsverfahren und Vergleichsversuche	57
6.2.5	Siebanalyse	58
6.2.6	Ellipse als Näherung des Spangquerschnitts	58
6.3	Mathematische Umsetzung der Spangrößenverteilung	59
6.3.1	Einzelspanmassen pro Siebfraction	59
6.3.2	Klasseneinteilung	60
6.3.3	Berechnung des arithmetischen Mittelwertes	61
6.3.4	Berechnung der Varianz s^2	61
6.3.5	Berechnung der Gauß'schen Normalverteilung	61
6.4	Versuchsergebnisse Spangrößenverteilung	62
6.4.1	Spanplatte: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit	62
6.4.2	Spanplatte: Einfluss von Gleich- und Gegenlauf	63
6.4.3	Spanplatte: Varianz der Spangrößenverteilung	65
6.4.4	Spanplatte: Einfluss der Schnittbreite	65
6.4.5	Spanplatte: Bewertung	65
6.4.6	Buche: Approximation der Spangrößenverteilung	66
6.4.7	Buche: Einfluss von Gleich- und Gegenlauf	67
6.4.8	Buche: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit	68
6.4.9	Buche: Varianz der Spangrößenverteilung	69
6.4.10	Buche: Einfluss der Schnittrichtung	70
6.4.11	Buche: Einfluss der Schnittbreite	70
6.4.12	Buche: Bewertung	70
6.4.13	Fichte: Analogien zur Buche-Bearbeitung	71
6.4.14	MDF: Approximation der Spangrößenverteilung	71
6.4.15	MDF: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und Schnittbreite	72
6.4.16	MDF: Einfluss von Gleich- und Gegenlauf	72
6.4.17	MDF: Bewertung	72
6.5	Ermittlung der Spangrößenverteilungen über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen	72
6.6	Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung der Spangröße	74
7	c_w -Wert	75
7.1	Herleitung des c_w -Wertes	75

7.1.1	Strömungswiderstandskraft F_w	75
7.1.2	c_w -Wert-Bestimmung	77
7.2	Auswahl des Sichterprinzips	77
7.2.1	Mögliche Sichterprinzipien	77
7.2.2	Auswahl des Sichtungsverfahrens	80
7.3	Versuchsaufbau	80
7.3.1	Strömungsverhältnisse im Sichterrohr	81
7.3.2	Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Sichterrohr	82
7.3.3	Anhaften von Partikeln durch elektrostatische Aufladung	83
7.4	Versuchsdurchführung	83
7.4.1	Schwebegeschwindigkeit	83
7.4.2	Spanmenge pro Sichtung	84
7.4.3	Bestimmung der Sichtzeit einer Geschwindigkeitsstufe	84
7.4.4	Dispergieren des Aufgabegutes	85
7.4.5	Spanherstellung	85
7.5	Versuchsergebnisse	85
7.5.1	Ermittelte Schwebegeschwindigkeiten	85
7.5.2	Spanformen und Schwebegeschwindigkeiten	86
7.5.3	Ermittelte c_w -Wert-Verläufe	86
7.5.4	Vergleich der gemessenen c_w -Wert-Verläufe mit bekannten Luftwiderstandsbeiwerten	88
7.6	Mathematische Umsetzung der Versuchsergebnisse	89
8.	Spanreflexion	94
8.1	Theoretische Betrachtung	94
8.2	Versuchsaufbau zur Bestimmung des Spänerückprallwinkels	95
8.3	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Spänerückprallwinkels	96
8.4	Versuchsauswertung zur Bestimmung des Spänerückprallwinkels	97
8.4.1	Reproduzierbarkeit der Versuche	97
8.4.2	Reflexionswinkel der Späne (Gesamtmasse)	98
8.4.3	Einfluss der Spangröße auf den Reflexionswinkel	99
8.4.4	Reflexionswinkel weiterer Werkstoffe	99
8.5	Mathematische Behandlung der ermittelten Ergebnisse	101
8.5.1	Überführung der Messwerte in stetige Funktionen	101
8.5.2	Lineare Regression	101
8.5.3	Auswahl geeigneter Grundfunktionen	103
8.5.4	Auswertung der Reflexionswinkel	105
8.5.5	Ermittlung der Reflexionsbedingungen über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen	106
8.5.6	Entscheidung über das verwendete Verfahren	106
8.6	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß	107

8.7	Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß	108
8.8	Versuchsauswertung zur Ermittlung der Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß	108
8.8.1	Rückprallgeschwindigkeiten der Späne verschiedener Werkstoffe	110
8.8.2	Vergleich der Rückprallgeschwindigkeiten	110
8.9	Mathematische Applikation der Rückprallgeschwindigkeit	111
9	Spanauswurf	112
9.1	Versuchseinrichtung	112
9.1.1	Auffangvorrichtung	112
9.1.2	Verwendete Werkzeuge	113
9.2	Versuchsdurchführung	114
9.3	Versuchsauswertung des Spanauswurfs	114
9.3.1	Tangential und stirnseitig ausgeworfene Spanmengen	114
9.3.2	Auswurfverhalten verschiedener Werkstoffe aus dem Werkzeug	116
9.3.3	Auswurfverhalten verschiedener Spanräume	117
9.3.4	Spangrößenverteilung über dem Werkzeugumfang	118
9.3.5	Gründe für unterschiedliches Auswurfverhalten der Späne	118
9.4	Umsetzung des Spanauswurfverhaltens	119
10	Simulation	119
10.1	Strömungsberechnungsprogramm	119
10.1.1	Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware	119
10.1.2	Struktur der Partikelflugsimulation	120
10.1.3	Ablauf der Partikelflugsimulation	121
10.2	Implementierung der Partikelflugsimulation	122
10.2.1	Eingabemaske der benötigten Daten	122
10.2.2	Strömungsrandbedingungen am Werkzeug	122
10.2.3	Neudefinition der Randbedingungen des Modells	123
10.2.4	Spanmassenfaktor	123
10.2.5	Startpunkte der Spanpartikel	124
10.2.6	Spanmassenverteilung der Spanpartikel am Werkzeug	124
10.2.7	Startrichtung der Spanpartikel	125
10.2.8	Startgeschwindigkeit der Spanpartikel	125
10.2.9	Berechnung der Partikelflugbahn	125
10.2.10	Darstellung der Berechnung	126
10.2.11	Abbruch der Berechnung	126
10.2.12	Berechnung der Luftgeschwindigkeit am Span	126
10.2.13	Berechnung des c_w -Werts über der Partikelflugbahn	127
10.2.14	Berechnung der Reflexion an der Haubenwand	127
10.2.15	Geschwindigkeitsreduzierung an der Haubenwand	127

10.2.16	Berechnete Spananzahl	127
10.2.17	Darstellung einzelner Partikelflugbahnen	128
10.2.18	Darstellung der Partikelverteilung	128
10.3	Vergleich von Versuch und Simulationsrechnung	130
10.4	Zukünftige Einsatzmöglichkeiten und Features	131
10.4.1	Berechnung des Spanauswurfs aus dem Werkzeug	131
10.4.2	Berechnung des Absaughaubenverschleißes durch abrasive Partikel	131
10.4.3	Berechnung des Werkzeugverschleißes durch abrasive Partikel	132
10.4.4	Vermeidung der Doppelzerspanung am Werkzeug	133
10.4.5	Vermeidung der Doppelzerspanung durch Absaughaubeneinflüsse	133
10.4.6	Lösungssuche zur Verbesserung der Späneabfuhr bei problematischen Anwendungen	133
11	Zusammenfassung	135
12	Literaturverzeichnis	138