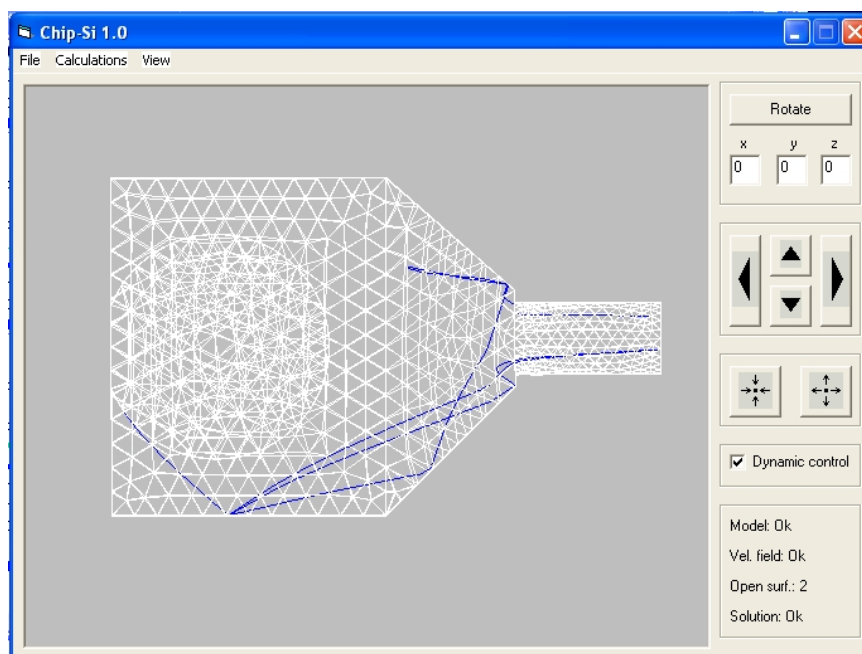


ABSCHLUSSBERICHT ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

Grundlagenuntersuchungen zum Späneflug bei der Trockenbearbeitung metallischer Werkstoffe zur optimierten Auslegung von Späneerfassungselementen und Werkzeugen durch Simulationsrechnung



Förderzeitraum:

He 1656/71-1

Kennwort: Simulation absaugoptimierter Späneerfassungselemente und
Werkzeuge

Bearbeiter:
Dipl.-Ing. M. Dressler
Februar 2006

I Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------|---|----|
| I | Inhaltsverzeichnis | 2 |
| II | Formelzeichen | 7 |
| 1 | Einleitung | 11 |
| 2 | Stand der Technik | 12 |
| 2.1 | Späneerfassung an Bearbeitungszentren | 12 |
| 2.1 | Späneerfassung in der Holzbearbeitung | 14 |
| 2.2 | Mehrphasenströmung | 14 |
| 2.3 | Pneumatische Partikelförderung | 15 |
| 2.4 | FEM-Strömungsberechnung | 16 |
| 2.5 | Programmiertechnik | 18 |
| 3 | Zielsetzung | 19 |
| 4 | Einflussgrößen auf den Späneflug | 20 |
| 4.1 | Verfahren zur Abschätzung des Parametereinflusses auf die Simulationsrechnung | 20 |
| 4.2 | Programmierung der Excel Tabelle | 21 |
| 4.2.1 | Festlegung des Koordinatensystems | 21 |
| 4.2.2 | Grenzen in Excel | 22 |
| 4.2.3 | Anfangswerte im Rechenschema | 22 |
| 4.2.4 | Absolute Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,abs}$ | 23 |
| 4.2.5 | Absolute Partikelgeschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,abs}$ | 23 |
| 4.2.6 | Relative Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,rel}$ | 24 |
| 4.2.7 | Widerstandskraft F_W | 25 |
| 4.2.8 | Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ | 25 |
| 4.2.9 | Kraft auf den Partikel in x-Richtung F_x | 29 |
| 4.2.10 | Kraft auf den Partikel in y-Richtung F_y | 29 |
| 4.2.11 | Gesamtkraft F_{ges} | 31 |
| 4.2.12 | Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$ | 31 |
| 4.2.13 | Partikelbeschleunigung a | 32 |
| 4.2.14 | Partikelbeschleunigung in x-Richtung a_x | 32 |
| 4.2.15 | Partikelbeschleunigung in y-Richtung a_y | 32 |
| 4.2.16 | Neue absolute x-Geschwindigkeit $v_{x+1,abs}$ | 33 |
| 4.2.17 | Flugzeit des Partikels über das Weginkrement in x-Richtung t | 33 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2.18 | Weginkrement in y-Richtung Δs_y | 34 |
| 4.2.19 | Neue Geschwindigkeit in y-Richtung v_{y+1} | 34 |
| 4.3 | Variation der Einflussgrößen auf den Späneflug | 37 |
| 4.3.1 | Einfluss des c_w -Wertes | 37 |
| 4.3.2 | Einfluss der Schrittweite Δx | 40 |
| 4.3.3 | Einfluss der umgebenden Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$ | 42 |
| 4.3.4 | Einfluss der Anfangsgeschwindigkeit des Partikels v_{abs} | 43 |
| 4.3.5 | Einfluss der Partikelmasse m_p | 44 |
| 4.3.6 | Einfluss des Partikelquerschnitts A | 45 |
| 4.3.7 | Einfluss des Abflugwinkels α | 46 |
| 4.3.8 | Einfluss des statischen Auftriebs F_A | 47 |
| 4.3.9 | Einfluss des dynamischen Auftriebs F_{dyn} | 47 |
| 4.3.10 | Einfluss der Coriolis-Kraft F_C | 49 |
| 4.3.11 | Einfluss des Magnus-Effekts durch die Partikelrotation | 50 |
| 4.3.12 | Einfluss des Rückprallwinkels beim Wandstoß von Partikeln | 51 |
| 4.3.13 | Einfluss der Geschwindigkeitsreduzierung beim Wandstoß von Partikeln | 51 |
| 4.4 | Vernachlässigte Einflüsse | 51 |
| 4.4.1 | Stoß zwischen Partikeln im Spänestrahl | 52 |
| 4.4.2 | Mehrere Partikel in unmittelbarer Nähe zueinander | 52 |
| 4.4.3 | Partikel in Wandnähe | 53 |
| 4.5 | Abschätzung der Einflüsse einzelner Parameter auf die Simulationsrechnung | 54 |
| 5 | Spangröße | 55 |
| 5.1 | Versuchsaufbau | 55 |
| 5.1.1 | Versuchsmaschinen | 55 |
| 5.1.2 | Siebmaschine | 56 |
| 5.2 | Versuchsdurchführung | 56 |
| 5.2.1 | Untersuchte Werkstoffe | 57 |
| 5.2.2 | Werkzeuge | 57 |
| 5.2.3 | Schnittwerte | 58 |
| 5.2.4 | Siebanalyse | 58 |
| 5.2.5 | Rechteck als Näherung des Spanquerschnitts | 59 |
| 5.3 | Mathematische Umsetzung der Spangrößenverteilung | 60 |
| 5.3.1 | Einzelspanmassen pro Siebfraktion | 60 |
| 5.3.2 | Klasseneinteilung | 61 |
| 5.3.3 | Berechnung des arithmetischen Mittelwertes | 62 |
| 5.3.4 | Berechnung der Varianz s^2 | 63 |
| 5.3.5 | Berechnung der Gauß'schen Normalverteilung | 64 |
| 5.4 | Versuchsergebnisse Spangrößenverteilung | 64 |
| 5.4.1 | Spangrößenverteilung von AlSi9Cu3-Spänen | 64 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.4.2 | Spangrößenverteilung von GGV-Spänen | 66 |
| 5.5 | Ermittlung der Spangrößenverteilungen über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen | 67 |
| 5.6 | Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung der Spangröße | 69 |
| 6 | c_w -Wert | 70 |
| 6.1 | Herleitung des c_w -Wertes | 70 |
| 6.1.1 | Strömungswiderstandskraft F_w | 70 |
| 6.1.2 | Gewichtskraft F_G | 72 |
| 6.1.3 | c_w -Wert-Bestimmung | 72 |
| 6.2 | Auswahl des Sichterprinzips | 72 |
| 6.2.1 | Mögliche Sichterprinzipien | 73 |
| 6.2.2 | Auswahl des Sichtungsverfahrens | 75 |
| 6.3 | Versuchsaufbau | 75 |
| 6.3.1 | Luftführung | 77 |
| 6.3.2 | Strömungsverhältnisse im Sichterrohr | 78 |
| 6.3.3 | Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Sichterrohr | 79 |
| 6.3.4 | Späneabscheider | 80 |
| 6.4 | Versuchsdurchführung | 81 |
| 6.4.1 | Schwebegeschwindigkeit | 81 |
| 6.4.2 | Spanmenge pro Sichtung | 82 |
| 6.4.3 | Bestimmung der Sichtzeit einer Geschwindigkeitsstufe | 83 |
| 6.4.4 | Dispergieren des Aufgabegutes | 83 |
| 6.5 | Versuchsergebnisse | 84 |
| 6.5.1 | Ermittelte Schwebegeschwindigkeiten | 84 |
| 6.5.2 | Ermittelte c_w -Wert-Verläufe | 85 |
| 6.5.3 | Vergleich der gemessenen c_w -Wert-Verläufe mit bekannten Luftwiderstandsbeiwerten | 85 |
| 6.6 | Mathematische Umsetzung der Versuchsergebnisse | 86 |
| 6.6.1 | Gemessene c_w -Werte bezüglich der Reynoldszahl | 86 |
| 6.6.2 | Näherungsfunktion für den c_w -Wert | 88 |
| 7 | Spanreflexion | 89 |
| 7.1 | Theoretische Betrachtung | 89 |
| 7.1.1 | Der elastische Stoß | 90 |
| 7.1.2 | Der unelastische Stoß | 90 |
| 7.1.3 | Gerader oder schiefer Stoß | 91 |
| 7.1.4 | Reflexionswinkel | 92 |
| 7.2 | Randbedingungen bei Stoßvorgängen | 93 |
| 7.3 | Versuchsaufbau – Rückprallwinkel der Späne | 94 |
| 7.4 | Versuchsdurchführung – Rückprallwinkel der Späne | 96 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 7.5 | Versuchsauswertung – Rückprallwinkel der Späne | 97 |
| 7.5.1 | Reproduzierbarkeit der Versuche | 97 |
| 7.5.2 | Reflexionswinkel der Späne aus GGK (Gesamtmasse) | 98 |
| 7.5.3 | Reflexionswinkel der Späne aus AlSi9Cu3 (Gesamtmasse) | 99 |
| 7.6 | Mathematische Behandlung der ermittelten Ergebnisse | 99 |
| 7.6.1 | Überführung der Messwerte in stetige Funktionen | 99 |
| 7.6.2 | Lineare Regression | 100 |
| 7.6.3 | Auswahl geeigneter Grundfunktionen | 102 |
| 7.6.4 | Auswertung der Reflexionswinkel | 105 |
| 7.6.5 | Ermittlung der Reflexionsbedingungen über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen | 105 |
| 7.6.6 | Entscheidung über das verwendete Verfahren | 106 |
| 7.7 | Versuchsaufbau – Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß | 106 |
| 7.8 | Versuchsdurchführung – Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß | 107 |
| 7.9 | Versuchsauswertung – Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß | 108 |
| 7.10 | Mathematische Applikation der Rückprallgeschwindigkeit | 110 |
| 8 | Simulation | 111 |
| 8.1 | Strömungsberechnungsprogramm | 111 |
| 8.1.1 | Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware | 111 |
| 8.1.2 | Ablauf der Strömungssimulation | 112 |
| 8.2 | Partikelflugsimulation | 112 |
| 8.2.1 | Struktur der Partikelflugsimulation | 112 |
| 8.2.2 | Ablauf der Partikelflugsimulation | 115 |
| 8.3 | Umsetzung der Untersuchung in Chip-Si 1.0 | 116 |
| 8.3.1 | Oberfläche des Partikelsimulationsprogramms Chip-Si 1.0 | 118 |
| 8.3.2 | Import der Knotendaten | 118 |
| 8.3.3 | Import der Elementdaten | 119 |
| 8.3.4 | Import der Luftgeschwindigkeiten an den Knoten | 120 |
| 8.3.5 | Import der offenen Flächen | 121 |
| 8.3.6 | Definition des Werkstoffs | 122 |
| 8.3.7 | Strömungsrandbedingungen am Werkzeug | 123 |
| 8.3.8 | Neudefinition der Randbedingungen des Modells | 124 |
| 8.3.7 | Starten der Simulation | 128 |
| 8.3.8 | Spanmassenfaktor | 129 |
| 8.3.9 | Generierung der Spanmassenverteilung von Spanpartikeln am Werkzeug | 130 |
| 8.3.10 | Startrichtung der Spanpartikel (Näherung) | 130 |
| 8.3.11 | Startgeschwindigkeit der Spanpartikel (Näherung) | 130 |
| 8.3.12 | Berechnung der Partikelflugbahn | 131 |
| 8.3.13 | Darstellung der Spanflugbahn | 131 |
| 8.3.14 | Abbruch der Berechnung | 132 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.3.15 | Berechnung der Luftgeschwindigkeit am Span | 132 |
| 8.3.16 | Berechnung des c_w -Werts über der Partikelflugbahn | 132 |
| 8.3.17 | Erkennung des Modellrandes | 133 |
| 8.3.18 | Berechnung der Reflexion an der Haubenwand | 134 |
| 8.3.19 | Geschwindigkeitsreduzierung an der Haubenwand | 135 |
| 8.3.20 | Berechnung des Erfassungsgrades | 135 |
| 8.4 | Berechnung des Spanraumes als drehendes System | 136 |
| 8.4.1 | Strömungsberechnung des drehenden Spanraumes | 136 |
| 8.4.2 | Berechnung der Strömungsrandbedingungen am Werkzeug | 136 |
| 8.4.3 | Startbedingungen der Spanpartikel an der Werkzeugschneide | 136 |
| 8.4.4 | Flugbahnberechnung der Spanpartikel im Spanraum | 137 |
| 8.4.5 | Werkzeugdrehung und Stoßbedingungen | 138 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 140 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 141 |

II Formelzeichen

| | | |
|--------------|---------------------|--|
| A | [m ²] | Spanquerschnittsfläche |
| a | [m/s ²] | Beschleunigung |
| a | [] | Anzahl der fiktiven Stichproben |
| a_e | [m] | Eingriffsgröße |
| a_x | [m/s ²] | Beschleunigung des Partikels in x-Richtung |
| a_y | [m/s ²] | Beschleunigung des Partikels in y-Richtung |
| b | [m] | Breite der Ellipse |
| c_a | [] | Auftriebsbeiwert |
| c_D | [] | Druckwiderstandsbeiwert |
| c_W | [] | Luftwiderstandsbeiwert |
| D | [m] | Partikeldurchmesser |
| E_{kin} | [J] | kinetische Energie |
| E_v | [J] | Energieverlust |
| $E_{v,unel}$ | [J] | Energieverlust beim unelastischen Stoß |
| F | [N] | Kraft |
| F_A | [N] | statische Auftriebskraft |
| F_C | [N] | Corioliskraft |
| F_D | [N] | Druckwiderstandskraft |
| F_{dyn} | [N] | dynamische Auftriebskraft |
| F_g | [N] | Gewichtskraft des Partikels |
| F_{ges} | [N] | Gesamtkraft auf den Partikel |
| F_q | [N] | Querkraft |
| F_R | [N] | Newton'sche Reibkraft |
| F_W | [N] | Luftwiderstandskraft |
| F_{W1} | [N] | Luftwiderstandskraft Partikel 1 |
| F_{W2} | [N] | Luftwiderstandskraft Partikel 2 |

| | | |
|--------------|---------------------|--|
| F_{wy} | [N] | Kraftkomponente der Luftwiderstandskraft in y-Richtung |
| F_x | [N] | Kraft auf den Partikel in x-Richtung |
| F_y | [N] | Kraft auf den Partikel in y-Richtung |
| $f_{m\%}$ | [] | prozentualer Spanmassenfaktor |
| g | [m/s ²] | Erdbeschleunigung |
| H | [m] | Höhe der Ellipse |
| k | [] | Konstante |
| L | [m] | charakteristische Länge bei einer Ellipse |
| m_0 | [kg] | Spänemenge zur Zeit $t = 0$ |
| m_1 | [kg] | Masse Körper 1 |
| m_2 | [kg] | Masse Körper 2 |
| m_{ges} | [kg] | Gesamtspanmasse |
| m_p | [kg] | Partikelgewicht |
| m_t | [kg] | Spänemenge zur Zeit t |
| $m_{\%}$ | [kg] | prozentuale Spanmasse |
| Δm | [kg] | Masse der einzelnen Siebfraction |
| n | [] | Anzahl der Stichproben |
| IR | [] | Definitionsbereich der Funktion |
| Δp | [Pa] | Druckgefälle am umströmten Partikel |
| Re | [] | Reynoldszahl |
| s | [] | Standardabweichung |
| s^2 | [] | Varianz |
| Δs | [m] | Weginkrement in Flugrichtung |
| Δs_1 | [m] | Teilstrecke1 des Weginkrements in y-Richtung |
| Δs_2 | [m] | Teilstrecke2 des Weginkrements in y-Richtung |
| Δs_x | [m] | Weginkrement in x-Richtung |
| Δs_y | [m] | Weginkrement in y-Richtung |
| t | [s] | Flugzeit |
| u_1 | [m/s] | Geschwindigkeit Körper 1 nach dem Stoß |

| | | |
|----------------|-------------------|---|
| u_2 | [m/s] | Geschwindigkeit Körper 2 nach dem Stoß |
| v | [m/s] | Geschwindigkeit |
| $v_{0,abs}$ | [m/s] | absolute Anfangsgeschwindigkeit des Spanpartikels |
| v_1 | [m/s] | Anfangsgeschwindigkeit Körper 1 |
| v_2 | [m/s] | Anfangsgeschwindigkeit Körper 2 |
| v_{abs} | [m/s] | Absolutgeschwindigkeit des Spanpartikels |
| v_F | [m/s] | Fluidgeschwindigkeit |
| v_f | [m/s] | Vorschubgeschwindigkeit |
| $v_{L,x}$ | [m/s] | Umgebende Luftgeschwindigkeit des Spans in x-Richtung |
| v_P | [m/s] | Partikelgeschwindigkeit |
| v_R | [m/s] | Rotationsgeschwindigkeit an der Partikeloberfläche |
| v_{rel} | [m/s] | relative Geschwindigkeit des Spanpartikels |
| v_s | [m/s] | Schwebegeschwindigkeit |
| v_x | [m/s] | Geschwindigkeit in x-Richtung |
| $v_{x,abs}$ | [m/s] | Absolutgeschwindigkeit des Spanpartikels in x-Richtung |
| $v_{x+1,abs}$ | [m/s] | Neue Absolutgeschwindigkeit des Spanpartikels in x-Richtung |
| $v_{x,rel}$ | [m/s] | relative Geschwindigkeit des Spanpartikels in x-Richtung |
| v_y | [m/s] | Geschwindigkeit des Spanpartikels in y-Richtung |
| v_{y+1} | [m/s] | Neue Geschwindigkeit des Spanpartikels in y-Richtung |
| $v_{y,abs}$ | [m/s] | Absolutgeschwindigkeit des Spanpartikels in y-Richtung |
| $v_{y,rel}$ | [m/s] | relative Geschwindigkeit des Spanpartikels in y-Richtung |
| V | [m ³] | Volumen |
| Δv | [m/s] | prozentuale Geschwindigkeitsreduktion |
| W_F | [] | Wertebereich der Funktion |
| Δx | [m] | Schrittweite in x-Richtung |
| α | [°] | Anfangsflugwinkel |
| α° | [°] | Winkel im kartesischen Koordinatensystem im Gradmaß |
| $\hat{\alpha}$ | [] | Winkel im kartesischen Koordinatensystem im Bogenmaß |

| | | |
|---------------------------|----------------------|--|
| $\widehat{\alpha}_a$ | [] | Beschleunigungswinkel im Bogenmaß |
| $\widehat{\alpha}'_a$ | [] | Hilfsbeschleunigungswinkel im Bogenmaß |
| α_{ap} | [°] | Aufprallwinkel |
| $\widehat{\alpha}'_{rel}$ | [] | Winkel zwischen y-Achse und Relativgeschwindigkeit im Bogenmaß |
| α'_{rel} | [°] | Winkel zwischen y-Achse und Relativgeschwindigkeit im Gradmaß |
| $\widehat{\alpha}_{rel}$ | [] | Relativgeschwindigkeitswinkel |
| $\widehat{\alpha}_F$ | [°] | Flugwinkel des Spanpartikels im Bogenmaß |
| $\alpha^{\circ}_{0,abs}$ | [°] | Anfangsflugwinkel des Spanes beim Auswurf aus dem Werkzeug |
| β | [°] | Reflexionswinkel |
| μ | [] | Arithmetischer Mittelwert |
| ν | [kg/ms] | Kinematische Viskosität des Fluids |
| ν_L | [kg/ms] | Dynamische Viskosität der Luft |
| ρ_F | [kg/m ³] | Fluiddichte |
| ρ_{fluid} | [kg/m ³] | Dichte der Luft |
| ρ_{Luft} | [kg/m ³] | Dichte der Luft |
| ρ_P | [kg/m ³] | Partikeldichte |
| ω | [1/s] | Kreisfrequenz |
| θ | [°] | Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Drehachse |

1 Einleitung

Die Trockenbearbeitung bzw. Bearbeitung metallischer Werkstoffe mit Minimalmengenschmierung findet immer breitere Anwendung in der Industrie. Für die Großserie, beispielsweise in der Automobilindustrie, bieten sich hierbei viele Vorteile wie die geringeren Investitionskosten in teure Anlagen zur Umwälzung und Pflege des Schmierstoffs, das verbesserte Arbeitsklima in den Werkhallen, die bessere Absetzbarkeit (höherer Preis) der trockenen Späne auf dem Schrottmarkt und vieles mehr. Allerdings sind bislang von den klassischen drei Funktionen der bislang verwendeten Kühlschmierstoffemulsion (Schmieren, Kühlen, Spänetransport) durch die Minimalmengenschmierung nur zwei erfüllt (Schmieren, Temperieren). Der Spänetransport stellt ein bislang ungelöstes Problem dar.

Lösungsansätze zum Transport der Späne sind Arbeitsräume von Maschinen mit freiem Spänefall und die Absaugung der Späne am Entstehungsort. Beide Konzepte haben eines gemeinsam: Der Konstrukteur muss die Flugbahn der Späne kennen, um in der Konstruktionsphase schon überprüfen zu können, ob das Späneerfassungskonzept den Vorgaben entspricht. Bei dieser Problemstellung wirken sich beispielsweise die Geometrie des Werkstücks selbst und die Aufspannvorrichtung oft hinderlich auf eine gute Späneerfassung aus. Um dem Konstrukteur die Beurteilung der Späneerfassung in der Konstruktionsphase zu ermöglichen, bietet sich das Werkzeug der Simulationsrechnung an. Allerdings war es bis dato nicht möglich, diese mit herkömmlichen Programmen durchzuführen, da die dazu notwendigen Daten der Spanpartikel (Luftwiderstandsbeiwert, Größenverteilung, etc.) und des Prozesses (Reflexion der Späne an der Wand etc.) nicht bekannt waren. Herkömmliche Simulationsprogramme sind lediglich in der Lage, definierte geometrische Partikel (meist Kugel) mit definierter Dichte (Werkstoffkennwerte) bis zum ersten Kontakt mit der Begrenzung des Simulationsgebietes zu berechnen. Von diesen engen Vorgaben weichen Spanpartikel weit ab.

Wie nachfolgend beschrieben, wurden alle notwendigen Werte zur Simulation des Spanfluges metallischer Werkstoffe exemplarisch an zwei in der Automobilindustrie häufig eingesetzten Werkstoffen untersucht. Weiter wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, welches in der Lage ist, mit Hilfe der ermittelten Kennwerte auf der Basis einer Strömungssimulation den Späneflug zu simulieren. Es wurde dabei darauf geachtet, die Rechenzeit so klein als möglich zu halten, um dem Anwender die realistische Simulation mehrerer Varianten auf normalen Arbeitsplatzrechnern zu ermöglichen. Weiter wurden die Grundlagen erarbeitet, auch eine Simulation des Werkzeugs selbst, also des Spanraumes, in den der Span nach Ablösung von der Werkzeugschneide eintritt, durchzuführen.

Mit den erzielten Ergebnissen und den ermittelten Grundlagen des Spanfluges metallischer Werkstoffe wird die Auslegung von Erfassungselementen bzw. die Lösung des Spänetransportvorganges bei der Trockenbearbeitung deutlich verbessert.

2 Stand der Technik

Die Trockenbearbeitung metallischer Werkstoffe zählt heute zu den intensiv diskutierten Themen in der Zerspanungstechnologie. So befassen sich verschiedenste Forschungsthemen mit der Werkzeug- und Maschinenkonstruktion, um Werkstücke aus unterschiedlichen Werkstoffen trocken oder mit Minimalmengenschmierung, anstelle von Kühlschmierstoffemulsion oder Schneidöl, bearbeiten zu können. Von den elementaren Grundfunktionen - Schmieren, Kühlen, Späne abführen – konnten in den letzten Jahren die Aufgaben Schmieren und Kühlen weitgehend zufrieden stellend gelöst werden. Das verbleibende Problem, die u. U. in großen Mengen anfallenden, heißen Späne aus dem Bearbeitungsraum der Maschine schnell abzuführen, ohne den Wärmegang der Maschine oder die Werkstückgeometrie negativ zu beeinflussen, ist dagegen noch großteils ungelöst.

2.1 Späneerfassung an Bearbeitungszentren

Es existieren bereits Ansätze, die Späne aus der Maschine zu entfernen, ohne dass diese Spänenester im Arbeitsraum bilden können, welche Wärme an die Maschine und ihre Bauteile abgeben können. So werden beispielsweise möglichst viele Flächen im Arbeitsraum der Maschine als schräge Flächen ausgeführt, an denen die Späne abgeleitet und in den Späneförderer fallen können. Weiter wird mit doppelten Abdeckblechen gearbeitet, deren Luftschicht den Maschinenständer vor dem direkten Wärmeeintrag durch die Späne schützt. Alle diese Bemühungen stoßen jedoch oft an Grenzen, beispielsweise bei komplizierten Vorrichtung- und Werkstückgeometrien, auf oder in denen die Späne nach der Bearbeitung liegen bleiben können.

Die Ansätze, Späne passiv durch freien Fall oder Abrutschen an schrägen Flächen aus der Maschine zu befördern, stoßen an Grenzen, die eine Großserienfertigung, beispielsweise in der Automobilindustrie, momentan noch verhindern. Die Folge ist eine Entwicklung hin zu aktiven Erfassungselementen, mit denen die Späne durch eine Absaugeinrichtung erfasst und abgeführt werden. Dieses Prinzip wird in der holzbearbeitenden Industrie schon seit vielen Jahren erfolgreich praktiziert, allerdings mit anderen Prioritäten. So geben die Holzpartikel keine nennenswerte Wärmeenergie an die Bearbeitungsmaschine ab. Hier kommt es hauptsächlich darauf an, die gefährlichen, weil krebserregenden Holzstäube zu erfassen und sicher abzuführen. Auch ist das spezifische Gewicht der Holzwerkstoffe viel geringer als bei metallischen Werkstoffen, dafür sind die Schnittgeschwindigkeiten in der holzbearbeitenden Industrie wiederum höher, als im metallverarbeitenden Gewerbe.

Auch bei der Metallverarbeitung gibt es inzwischen Bestrebungen, die Späne mittels Absaughauben direkt am Werkzeug zu erfassen. Nicht zuletzt das Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart hat hier einige Ansätze, zusammen mit dem Arbeitskreis "Trockenbearbeitungsmaschine für Aluminium" aus namhaften Automobilherstellern und –

zulieferern erarbeitet [1]. Weiter beschäftigt sich das Institut für Werkzeugmaschinen schon seit vielen Jahren mit Fragen zur Späne- und Partikelabsaugung in der Holzbearbeitung, so dass hier umfangreiche Erfahrungen und Kenntnisse gesammelt werden konnten [2-10], die in Anfängen bereits erfolgreich auf die Bearbeitung metallischer Werkstoffe übertragen werden konnten.

In dem oben genannten Industrieforschungsvorhaben bzw. in dessen direkter Fortführung als Kooperation zwischen einem Maschinenhersteller, einem Automobilhersteller und dem Institut für Werkzeugmaschinen wurden von Seiten des Instituts verschiedene Prototypen von Absaughauben für die Metallbearbeitung in Bearbeitungszentren entwickelt. Die entwickelten Absaughauben zeichnen sich insbesondere aufgrund der Verwendung einer Federbandspirale durch einen kleinen Bauraum aus (siehe Bild 2.1). Die entwickelten Hauben zeichnen sich weiter durch eine nebenzeitneutrale automatische Wechselbarkeit durch den Werkzeugwechsler des Bearbeitungszentrums aus. Damit ist gewährleistet, dass für jedes Werkzeug eine individuell gestaltete Absaughaube entworfen und mit dem Werkzeug selbst ohne Zeitverlust in die Spindel der Maschine eingewechselt werden kann. Weiter sind auf dem Markt insbesondere zum Planfräsen unterschiedliche Erfassungselemente und Absaughauben der Firmen Mitsubishi, Horkos und Mapal erhältlich.

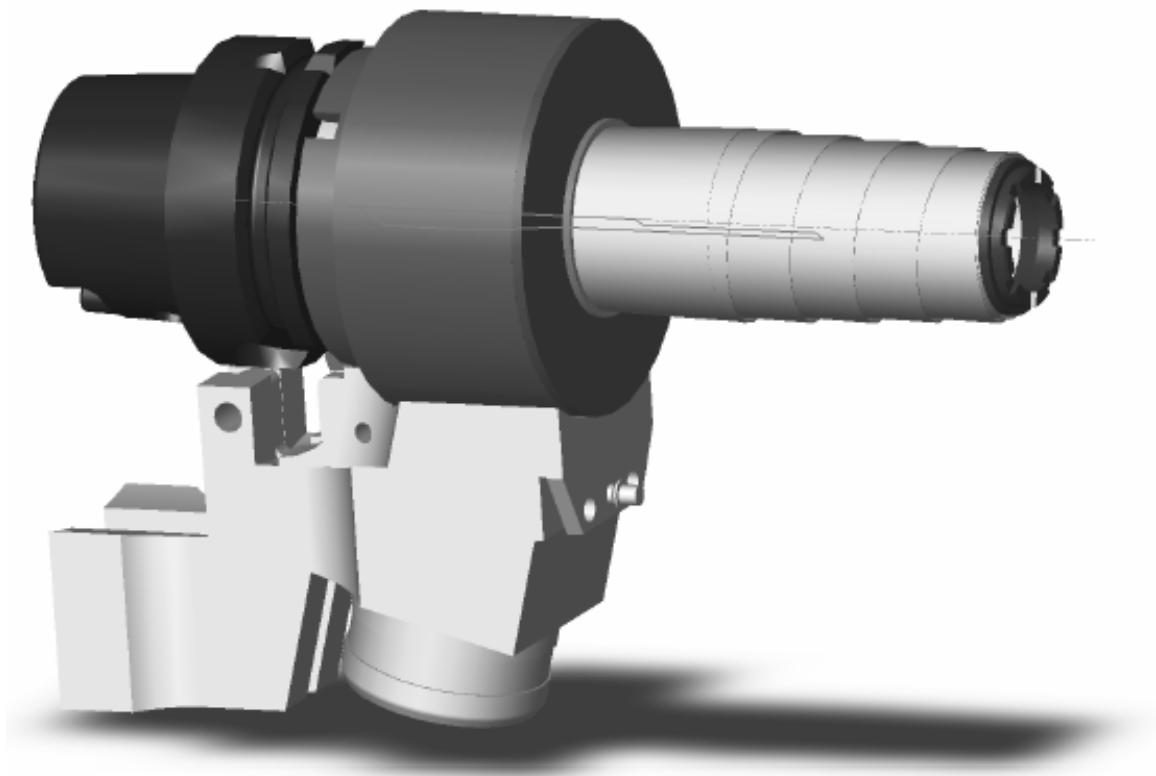


Bild 2.1: Absaughaube des IfW für die Bohr- und Reibbearbeitung an einem Zylinderkopf

2.2 Späneerfassung in der Holzbearbeitung

In der holzverarbeitenden Industrie hat sich über viele Jahre gezeigt, dass eine hochwirksame Späneerfassung nur im unmittelbaren Umfeld um die Zerspanungsstelle realisiert werden kann. Dies bedeutet, dass ein Erfassungselement, beispielsweise eine Absaughaube, möglichst nahe an der Spanantstehungsstelle angebracht werden muss. Dies wiederum bedeutet, dass Werkzeugmaschinen mit automatischem Werkzeugwechsel mit wechselbaren Erfassungselementen auszustatten sind, die beim Werkzeugwechsel mit dem Werkzeug und dem Werkzeughalter ausgetauscht werden können. Alle Ansätze von Haubenkonstruktionen haben eine gemeinsame Grundproblematik. Die Späne müssen bei oft engem Bauraum erfasst und durch das Erfassungselement abgeführt werden. Dies erfordert eine sehr sorgfältige Konstruktion und Auslegung der Erfassungselemente hinsichtlich Luft- und Spanführung sowie ein auf die Späneerfassung optimiertes Werkzeug. Werkzeug und Erfassungselement ergänzen und unterstützen sich im Idealfall gegenseitig, um eine optimale Spanabfuhr zu ermöglichen. Die Erfahrungen aus der Holzbearbeitung zeigen, dass dies oft einen mühevollen und langwierigen Entwicklungsprozess bedeutet, in dem viele verschiedene Prototypen von Werkzeugen und Erfassungselementen gebaut und getestet werden müssen, bis für einen speziellen Fall eine zufrieden stellende Lösung des Späneerfassungsproblems gefunden ist.

Aus den o. g. Gründen beschäftigt sich das nachfolgend beschriebene Forschungsprojekt nicht mit einzelnen Bearbeitungsoperationen oder Bauteilen, sondern versucht dem Konstrukteur von Erfassungselementen ein Tool in Form eines FEM-Simulationsprogramms an die Hand zu geben mit dem er die Späneerfassungsprobleme erstmals selbst bearbeiten und lösen kann.

Im Bereich der Holzbearbeitung wurden erste Grundlagen für eine Simulationsrechnung der Späneerfassung im Forschungsprojekt "Auslegung von Absaughauben bezüglich der Späneerfassung durch Simulation" (AiF-Nr. 12311 N) erarbeitet [1]. Diese Untersuchungen sind aber aufgrund der sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften von Holz und Metall nicht auf metallische Partikel übertragbar.

2.2 Mehrphasenströmung

Eine Berechnung von Mehrphasenströmungen (Partikel und Medium) scheitert häufig an den dazu notwendigen Randbedingungen und vor allem an der notwendigen Rechenzeit. So ist es äußerst kompliziert, die Einflüsse der Partikel auf die Strömung und umgekehrt nachzubilden. In den meisten Fällen ist eine derartige Simulationsrechnung jedoch auch nicht notwendig. In vielen Fällen reicht es, die unterschiedlichen Mehrphasen-Strömungstypen zu kennen und daraus die resultierenden Partikeltransportbedingungen zu ermitteln. Exemplarisch zeigt das nachfolgende Bild 2.2 die verschiedenen Fördermechanismen in einem Rohr bei unterschiedlicher Gutbeladung. Es wird ersichtlich, dass alle Förderprinzipien mit gesonderten Ansätzen berechnet werden müssen. Es zeigt sich aber auch, dass bei einer Absaughaube immer

die Flugförderung vorliegt, zumal in der Strömungsberechnung davon ausgegangen wird, dass bei einer Partikelbeladung der Strömung < 10 Massenprozent kein Einfluss der Partikel auf die Strömung selbst zu berücksichtigen ist.

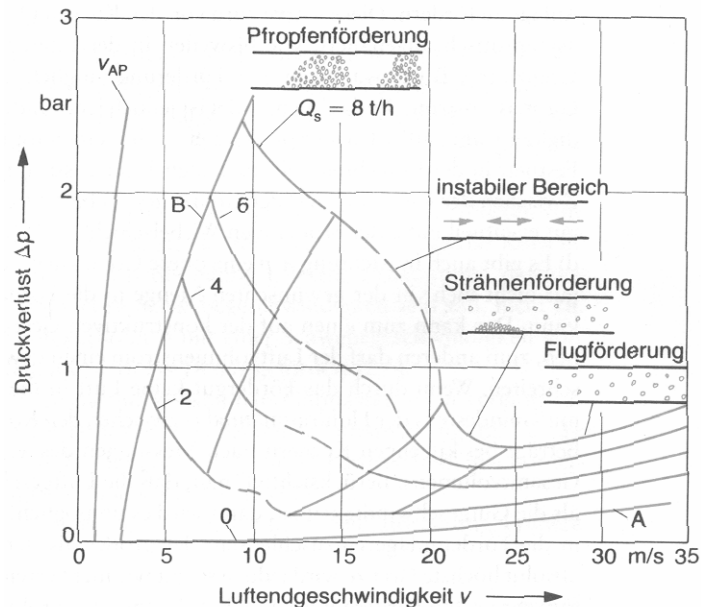


Bild 2.2: Partikelförderung bei unterschiedlicher Gutbeladung des Luftstromes

2.3 Pneumatische Partikelförderung

In der Literatur finden sich viele Untersuchungen, die sich mit der pneumatischen Förderung von Partikeln der unterschiedlichsten Art beschäftigen. Jedoch handelt es sich dabei meist um die kontinuierliche Förderung von Partikeln in vorgegebenen, meist starr verlegten Rohrleitungen [11-25]. Dabei kann der geschlossene Raum der Rohrleitung, in welcher ein bestimmter Gutstrom unter kontinuierlichen Bedingungen gefördert wird, wesentlich einfacher als geschlossenes System betrachtet werden wie eine Absaughaube, in welcher sich zudem noch ein schnell rotierendes Werkzeug dreht, welches eine nicht vernachlässigbare Lüfterwirkung aufweist.

Die Betrachtung eines Einzelpartikels im Luftstrom ist in der Literatur schon wesentlich seltener behandelt. Zumeist handelt es sich bei diesen Partikeln um sehr einfache Grundkörper oder sogar um kugelförmige Partikel, wie sie bei der spanenden Bearbeitung in der Regel nicht auftreten [26-27]. Allerdings befassen sich sehr viele Untersuchungen mit der Umströmung und dem Luftwiderstand von Einzelpartikeln im Fluid [28-44], wobei es sich auch hier vorwiegend nur um sehr einfache geometrische Grundformen wie Kugeln etc. handelt. Auch liegt die untersuchte Partikelgröße meist deutlich über der Partikelgröße von durchschnittlichen Spanpartikeln.

2.4 FEM-Strömungsberechnung

Im Jahre 1994 wurden weltweit mehrere Marktanalysen zu FE-Programmen durchgeführt [45-46]. Dabei ging man von mehr als 1000 existierenden FE-Programmen aus. Wobei in dieser Zahl auch zahlreiche hochschul- und firmeninterne Spezialprogramme enthalten sind. Bild 2.3 zeigt einen Überblick über die am weitesten verbreiteten FE-Systeme. Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass viele dieser Programme bereits in den 70er-Jahren entstanden. Dies ist auch der Hauptgrund, warum die meisten dieser sehr umfangreichen Programmpakete in "alten" Programmiersprachen, wie beispielsweise Fortran, geschrieben wurden und noch heute in diesen Sprachen gepflegt und erweitert werden müssen. Dadurch gestaltet sich die Erweiterung, wie dies beispielsweise bei einer Partikelflugsimulation notwendig ist, im Vergleich zu heute üblichen objektorientierten Programmiersprachen aufwändig.

| FE-System | Anbieter | Installationen (gesamt) | Erstinstal- lation |
|-----------------------------|-----------------|------------------------------------|-------------------------------|
| ABAQUS | HKS, USA | k.A. | 1978 |
| ADINA | ADINA R&D, USA | > 500 | 1978 |
| ALGOR | ALGOR, USA | > 14.000 | 1986 |
| ANSYS | ANSYS, USA | > 20.000 | 1974 |
| ANTRAS | ATLAS, D | > 490 | 1972 |
| COSMOS | SRAC, USA | > 8.500 | 1985 |
| I-DEAS | SDRC, USA | > 20.000 | 1975 |
| MARC | MARC, USA | > 3.400 | 1971 |
| MECHANICA | RASNA, USA | > 5.000 | 1990 |
| MEDIAS (PERMAS & MEDINA) | DEBIS/INTES, D | > 170 | 1993 (1984) |
| NASTRAN | MSC, USA | > 20.000 | 1963 |
| NISA | EMRC, USA | > 5.000 | 1973 |
| PAFEC | PAFEC, GB | > 550 | 1970 |
| PATRAN | MSC (PDA), USA | > 8.000 | 1978 |
| SYSTUS | FRAMASOFT, F | k.A. | k.A. |

Bild 2.3: Marktanalyse führender FE-Programme [47]

FEM-Programme bestehen heute aus mindestens drei Komponenten (Preprozessor, Solver, Postprozessor). Es gibt Berechnungsprogramme auf dem Markt, die eine strikte Trennung dieser Komponenten verfolgen und solche Programme, die zugunsten einer stärkeren Integration die Dreiteilung aus Pre-, Postprozessor und Solver mehr und mehr aufheben. In der Regel wird das Berechnungsmodell im Preprozessor erstellt, im Solver wird die Berechnung selbst durchgeführt und das Ergebnis schließlich im Postprozessor angezeigt und ausgewertet. Auch

ist es möglich, FEM-Programme mit einem vorgeschalteten CAD-Programm zur Geometrieerzeugung zu kombinieren.

Sofern dies nicht bereits über ein vorgeschaltetes CAD-Programm realisiert wurde [48, 49], wird im Preprozessor das Geometriemodell erstellt. Das fertige Geometriemodell muss dann, um eine Berechnung mit finiten Elementen durchführen zu können, mit verschiedenen Elementtypen (Stab-, Balken-, Scheiben-, Schalen-, oder Volumenelemente) vernetzt werden. Für eine Strömungsberechnung eines dreidimensionalen Absaughaubenelementes kommen nur Volumenelemente in Frage. Es sind dabei unterschiedliche Volumenelemente für die Vernetzung anwendbar. Bild 2.4 zeigt die gängigsten Schalen- und Volumenelemente.

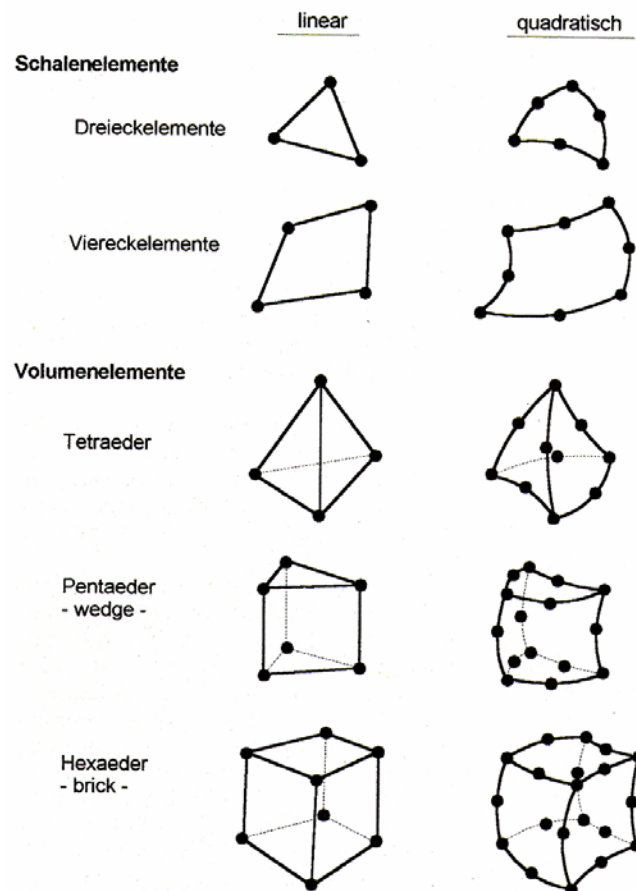


Bild 2.4: Volumenelemente zur Vernetzung (Tetraeder, Pentaeder, Hexaeder) [47]

Für die generierte Vernetzung kann in der Regel im Preprozessor eine unterschiedliche Netzfeinheit über das Modell definiert werden. So ist es möglich, an Stellen großer Geschwindigkeitsgradienten der Strömung die Vernetzung zu verfeinern. Dadurch wird ein besseres Berechnungsergebnis erzielt. Schließlich werden im Preprozessor noch die Stoffeigenschaften des Fluids und die Randbedingungen des Modells auf die Knoten der Vernetzung aufgebracht [50].

Der Solver stellt das Herz der FEM-Berechnung dar. Hier wird die eigentliche Berechnung durchgeführt. Im Solver wird aus den Elementen mit den vorgegebenen Randbedingungen das Gleichungssystem aufgestellt und über diverse Lösungsverfahren schließlich gelöst. Die Qualität eines Solvers entscheidet maßgeblich über die Machbarkeit einer FEM-Analyse. Dabei kommt es bei einer hohen Anzahl an Elementen in einem Modell vor allem auf einen niedrigen Speicherplatzbedarf und eine niedrige Rechenzeit des Solvers an. Die Erfahrung zeigt, dass unterschiedliche Solver sich um den Faktor 10 und mehr in der benötigten Rechenzeit und dem notwendigen Speicherbedarf auf der Festplatte unterscheiden [51-60].

Schließlich wird der Postprozessor dazu verwendet, die Analyseergebnisse auf dem Bildschirm auszugeben und die Daten grafisch darzustellen. Bei der Vielzahl der ermittelten Ergebnisse ist zur Darstellung ein mächtiger Preprozessor notwendig. So können beispielsweise die Strömungsgeschwindigkeiten an den einzelnen Knoten durch Vektoren dargestellt werden. Die Drücke im Fluid hingegen werden meist durch Einfärben der Netzmaschen visualisiert. Neben diesen grundlegenden Visualisierungsmethoden erlauben die meisten Postprozessoren weitere Ergebnisdarstellungen, indem die Knotendaten beispielsweise via Listing als Textfile exportiert werden können. Dadurch ist ein Einlesen der Daten in andere Programme einfach zu realisieren.

2.5 Programmieretechnik

Auch die modernen Programmiersprachen haben sich seit der Entwicklung erster leistungsfähiger FEM-Programme grundlegend geändert und weiterentwickelt. So waren in den 70er-Jahren die prozeduralen Programmiersprachen wie beispielsweise Fortran und Algol für mathematisch-naturwissenschaftliche Probleme oder aber Cobol für kaufmännisch orientierte Probleme auf dem neusten Stand der Technik [61, 62].

Inzwischen hat die objektorientierte Programmierung mit Objekten und Klassen in die moderne Programmerstellung Einzug gehalten [63-66]. In der objektorientierten Programmierung wird nicht von Funktionen und Prozeduren, sondern von realen Objekten ausgegangen, die miteinander kommunizieren. Auch die Visualisierung von Berechnungsergebnissen und Modellen hat seit den Anfängen der höheren Programmiersprachen deutliche Fortschritte gemacht. So haben sich die Grafikbibliotheken von OpenGL mittlerweile zu einem universalen Visualisierungsinstrument entwickelt, mit welchem sich dreidimensionale Modelle inklusive Ausleuchtung und Schattierung und vielem mehr einfach auf den Bildschirm anzeigen lassen [67].

3 Zielsetzung

Im durchgeführten Forschungsvorhaben sollen die notwendigen systematischen Grundlagen geschaffen werden, um in der Metallbearbeitung entstehende Späne gängiger Werkstoffe hinsichtlich ihres Flugverhaltens in Absaugelementen simulieren zu können. Es wurde dabei ein spezieller Focus auf kleine Spangrößen, wie sie beispielsweise bei der Fräsbearbeitung entstehen, gelegt, da lange Fließspäne bzw. Wirrspäne grundsätzlich vermieden werden müssen, wenn die Späne werkzeugnah von Späneerfassungselementen abgeführt werden sollen.

Mit der Möglichkeit, die Späneerfassung durch eine Simulationsrechnung abzubilden, soll es möglich werden, teure und vor allem zeitaufwändig zu fertigende Prototypen die für eine große Anzahl an Bearbeitungswerkzeugen benötigt werden, zu vermeiden, indem der Späneerfassungsvorgang bereits in der Konstruktionsphase optimiert werden kann.

Die Simulationsberechnung soll einer herkömmliche Strömungsberechnung des Absaughaubenelements nachgeschaltet durchgeführt werden. Dabei ist besonders auf die Rechenzeit zu achten, die bei einer Simulationsrechnung benötigt wird. Durch einen reduzierten Rechenaufwand der Simulationsrechnung wird es möglich die Simulation auf gängigen Arbeitsplatzrechnern durchzuführen.

Die grundlegenden Untersuchungen beziehen sich auf gängige Werkstoffe in der Metallbearbeitung (GGV, AlSi9). Die untersuchten Werkstoffe werden speziell in der Automobilindustrie häufig eingesetzt. Es soll versucht werden, möglichst viele Daten in ein einfach zu übertragendes mathematisches Modell zu überführen, um so auch auf andere metallische Werkstoffe schließen zu können.

Weiter sind Überlegungen anzustellen, die Späne nicht erst nach dem Austritt aus dem Werkzeug zu betrachten, sondern auch die Möglichkeit zu prüfen, Späne im Spanraum des Werkzeugs zu simulieren. Hierbei unterscheiden sich die Simulationsrechnungen, indem ein Spanraum eines Werkzeugs ein drehendes System, das Absaugelement jedoch meist ein stehendes System darstellt. Die beiden Betrachtungssysteme sind somit ineinander zu überführen. Es ist angedacht, die Simulation des Spanraums und des Absaugelementes in zwei Stufen durchzuführen. So sind die Daten der Späne beim Austritt aus dem Werkzeug (und damit dem drehenden System) auf das stehende Erfassungselement übertragbar. Dies kann beispielsweise durch das Mitführen der Zeit in der Flugbahnberechnung geschehen, um so eine Aussage über den Auswurfort des Spanes aus dem Werkzeug machen zu können.

4 Einflussgrößen auf den Späneflug

Um die Flugbahn eines Spanpartikels simulieren zu können, sind eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter notwendig, die systematisch aus diversen Versuchsreihen gewonnen werden müssen. Dabei sind diese Parameter bezüglich ihres Einflusses auf die Spanflugbahn nicht gleich zu gewichten. Ein Teil von ihnen kann sogar für die Simulationsrechnung unbeachtet bleiben. Nachfolgend sollen alle Parameter, die einen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben können, genauer untersucht und bewertet werden. Dabei wird versucht, möglichst viele Parameter zur Vereinfachung der Berechnung zu vernachlässigen.

4.1 Verfahren zur Abschätzung des Parametereinflusses auf die Simulationsrechnung

Nachdem die Theorie des Partikelfluges eine Fülle von Einflussparametern auf die Flugbahnberechnung zeigt [68], muss eine sinnvolle Einschränkung und Vereinfachung getroffen werden. Diese muss sich daran orientieren, wie viel Einfluss der einzelne Parameter auf die tatsächliche Flugbahn eines Partikels ausübt. Dazu ist eine Abschätzung notwendig, die bei allen Parametern einen vergleichbaren Wert ihres Einflusses auf die Partikelflugbahn ergibt. Für diese Abschätzung wurde eine pragmatische Lösung, die Berechnung des Sonderfalles, "Waagrecht Wurf eines Partikels in bewegter Luft", über eine programmierte Excel-Tabelle (siehe Kapitel 4.2) gewählt. Als Beurteilungskriterium wurde die Wurfweite des Partikels definiert. Das gewählte Verfahren hat mehrere, nachfolgend aufgeführte Vorteile:

- Zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Parameter wird eine reale Flugbahnberechnung gewählt.
- Die Berechnung erlaubt es, alle Einflussgrößen unabhängig voneinander zu untersuchen.
- Es wird nur ein Wert, die Wurfweite, ermittelt, über die alle untersuchten Einflussgrößen miteinander verglichen werden können. Dieser erlaubt einen quantitativen Vergleich der untersuchten Einflussparameter untereinander und damit die Definition eines Grenzwertes, ab dem der untersuchte Parameter in der Simulationsrechnung vernachlässigt werden darf.
- Zur Abschätzung der Einflussparameter muss zum Zeitpunkt der Parameterabschätzung noch keine Strömungs- und Partikelberechnungssoftware programmiert sein.

Bei der Abschätzung der Parametereinflussgrößen wird eine festgelegte Flugbahnberechnung als Vergleichsgrundlage verwendet. Auf die mit diesen Grundwerten errechneten Flugweiten werden alle Variationsrechnungen bezogen und miteinander verglichen. Dazu ist lediglich eine grobe Abschätzung des Wertebereiches, mit welchem ein Parameter in die Rechnung eingehen kann, notwendig. Die exakte Ermittlung des Parameters selbst, was sich im Einzelnen als sehr aufwändig erweisen kann, ist hier noch nicht nötig. Eine genaue Bestimmung

der einzelnen Einflussparameter kann den dann letztendlich in der Berechnung berücksichtigten Parametern vorbehalten bleiben.

4.2 Programmierung der Excel Tabelle

Die Flugbahnberechnung in der Excel-Tabelle ist als ein sich laufend wiederholendes Rechenschema aufgebaut. Dadurch werden die sich ständig ändernden Werte (Flugwinkel, Geschwindigkeiten, etc.) der Berechnung berücksichtigt. Die Schrittweite des Weginkrements muss dabei in x-Richtung immer konstant gehalten werden, um die Flugbahn anschließend als maßstäbliches Diagramm in Excel darstellen zu können. Bei jedem Durchlauf des Schemas wird von Anfangswerten ausgehend der Flug des Partikels über ein kleines Weginkrement in x-Richtung (= Partikelflugrichtung) betrachtet. Die Beschleunigung wird dabei über das gesamte Weginkrement als konstant angenommen. Mit der Rechnung unter diesen Annahmen ergeben sich schließlich neue Werte für den Partikelflug am Ende der betrachteten Flugstrecke, die gleichfalls die Anfangswerte des nächsten Rechendurchgangs darstellen. Das Rechenschema muss auf mehrere Zeilen pro Rechendurchgang aufgeteilt werden, da sich ansonsten im Excel sogenannte Zirkelbezüge ergeben können, die das Programm nicht auflösen imstande ist. Durch das Auseinanderziehen jedes Rechenschrittes auf fünf Zeilen können sowohl die Zirkelbezüge vermieden, wie auch die Übersichtlichkeit der Tabelle deutlich verbessert werden.

In den folgenden Erläuterungen zum Rechenschema werden die Anfangswerte des Weginkrements den Index x oder y und die Endwerte des Weginkrements den Index $x+1$ oder $y+1$ tragen, sofern dies zur eindeutigen Unterscheidung notwendig ist. In den Bildern sind die Vektoren, welche bestimmt werden sollen, jeweils gestrichelt dargestellt.

4.2.1 Festlegung des Koordinatensystems

Für die Berechnung der Flugbahn des Partikels wurde der Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems in den Startpunkt des Spanes gelegt. Die x-Achse wird nach rechts und die y-Achse nach oben als positiv angenommen. Die verwendeten Winkel, hier α , werden im mathematisch positiven Sinn von der positiven x-Achse aus als positiv definiert. Alle folgenden Betrachtungen der Partikelflugbahn beziehen sich auf diese Festlegungen des Koordinatensystems, welches in Bild 4.1 dargestellt ist.

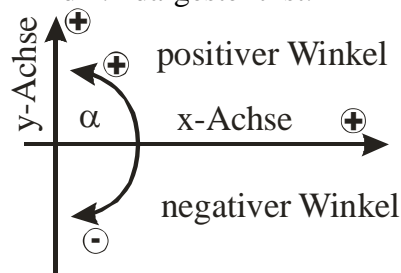


Bild 4.1: Definition des Koordinatensystems

4.2.2 Grenzen in Excel

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, wird eine Umrechnung ins Gradmaß vorgenommen, um den Rechengang überschaubarer, aber vor allem, um ihn kontrollierbar zu gestalten. Die Umrechnung erfolgt nach Formel 4.1. Entsprechend werden Winkel, welche im Gradmaß eingegeben werden, zur weiteren Verarbeitung ins Bogenmaß umgerechnet (siehe Formel 4.2).

$$\alpha^\circ = \frac{180^\circ \cdot \hat{\alpha}}{\pi} \quad (4.1)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\pi \cdot \alpha^0}{180^\circ} \quad (4.2)$$

Weiter ist die Darstellungsmöglichkeit in Excel-Diagrammen auf 255 Datenpunkte beschränkt. Die dadurch notwendigen Einschränkungen werden an den entsprechenden Stellen in diesem Kapitel näher erläutert.

4.2.3 Anfangswerte im Rechenschema

Als Ausgangswerte der Rechnung müssen einige Anfangswerte eingegeben werden. Sie sind unverzichtbar und werden nachfolgend ebenfalls in ihren Werten variiert, um auch ihren Einfluss auf die Rechnung zu prüfen (siehe Kapitel 4.3). Im Gegensatz zu diesen Anfangswerten stehen Parameter, bei welchen untersucht wird, ob sie vernachlässigt werden können. Das Rechenschema ist sehr gut dazu geeignet, diese hypothetischen Bandbreiten von Anfangswerten einzeln zu variieren und so ihren Einfluss auf die Flugbahnberechnung aufzuzeigen.

Als Anfangswerte des zu berechnenden Spanes müssen die Spanmasse m_p sowie die senkrecht zur Flugrichtung gemessene Spanfläche A eingesetzt werden. Es ist notwendig für die Rechnung, ein konstantes Weginkrement in x-Richtung Δs_x festzulegen. Um überhaupt einen Spanflug zu erhalten, ist eine absolute Anfangsgeschwindigkeit des Spanes $v_{0,abs}$ einzusetzen. Obwohl hauptsächlich der Sonderfall des waagrechten Wurfs untersucht werden soll, ist die Hinterlegung eines variablen Anfangsflugwinkels $\alpha_{0,abs}^\circ$ schon vorbereitet. Auf diese Weise ist das Rechenschema später geeignet, den Einfluss des Anfangsflugwinkels auf die Flugbahn zu zeigen. Der Abflugwinkel kann im Gradmaß eingegeben werden, wird aber intern wie oben gezeigt ins Bogenmaß umgerechnet. Schließlich muss noch eine den fliegenden Partikel umgebende Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$ definiert werden, da der berechnete Sonderfall des Spanfluges den waagrechten Wurf in bewegter Luft wiedergeben soll.

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

Die absolute Geschwindigkeit des Partikels in x-Richtung muss für die Darstellung als Flugbahn in Excel immer einen positiven Wert annehmen. Es ist zwar denkbar, dass ein Partikel durch eine ihm entgegen wirkende Luftströmung in x-Richtung vollständig abgebremst und in entgegengesetzte Richtung beschleunigt wird, dieser Fall ist aber durch die Verwendung eines festen Weginkrements in x-Richtung als Schrittweite bei der Berechnung per Definition auszuschließen. Aus der absoluten Fluggeschwindigkeit des Partikels v_{abs} wird nun die absolute Geschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,abs}$ mit dem Flugwinkel $\hat{\alpha}_F$ durch

$$v_{x,abs} = v_{abs} \cdot \cos \hat{\alpha}_F \quad (4.3)$$

berechnet (Bild 4.2). Die Flugwinkel $\hat{\alpha}_F > 0$ sowie $\hat{\alpha}_F < 0$ ergeben für $-\frac{\pi}{2} < \hat{\alpha}_F < \frac{\pi}{2}$ positive Geschwindigkeiten für $v_{x,abs}$. Die Winkel von $\hat{\alpha}_F > \frac{\pi}{2}$ und $\hat{\alpha}_F < -\frac{\pi}{2}$ müssen nicht betrachtet werden, da auf den Partikel, wie oben dargestellt, keine Kräfte einwirken dürfen, die ihn in x-Richtung vollständig abbremsen und in die entgegengesetzte Richtung beschleunigen können. Im Grenzfall $\hat{\alpha}_F = -\frac{\pi}{2}$ wird die absolute Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung zu Null. Dann befindet sich der Partikel im Sonderfall, des freien Falls.

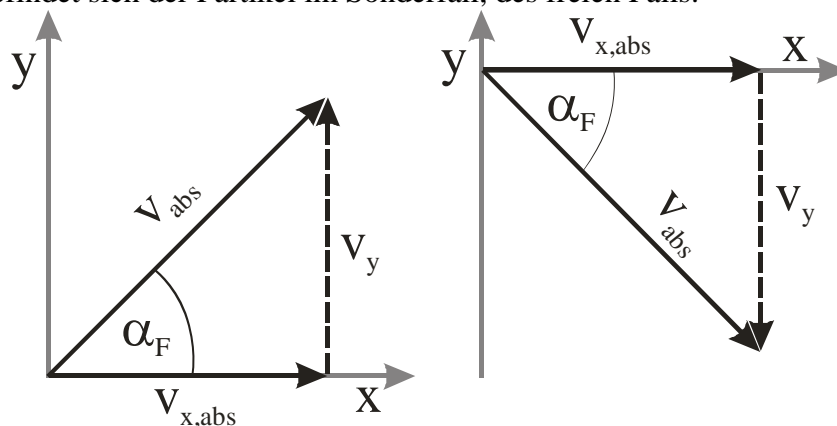


Bild 4.2: Die absolute Partikelgeschwindigkeit in x- und y-Richtung

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

Um die Vorab-Simulationsrechnung nicht unnötig kompliziert zu gestalten, wird definiert, dass eine umgebende Luftgeschwindigkeit nur in x-Richtung gegeben sein soll. Dies reicht vollkommen aus, den Einfluss der umgebenden Luftgeschwindigkeit zu untersuchen und vereinfacht die Programmierung durch die Vermeidung von Fallunterscheidungen in den nachfolgenden Berechnungen wesentlich. Die absolute Geschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,abs}$ ist somit identisch mit der relativen Geschwindigkeit in y-Richtung $v_{y,rel}$. Der Einfachheit halber soll die Geschwindigkeit des Partikels in y-Richtung nun mit v_y bezeichnet werden.

Die Berechnung der absoluten Fluggeschwindigkeit in y-Richtung v_y geschieht aufgrund der gleichen Dreiecksbetrachtung nach Bild 4.2. Daraus ergibt sich mit der absoluten Fluggeschwindigkeit v_{abs} des Partikels und dessen Flugwinkel $\widehat{\alpha}_F$ die absolute Fluggeschwindigkeit v_y in y-Richtung aus Formel 4.4.

$$v_y = v_{abs} \cdot \sin \widehat{\alpha}_F \quad (4.4)$$

Das richtige Vorzeichen von v_y ergibt sich automatisch durch die Sinusfunktion. Bei positivem Flugwinkel $\widehat{\alpha}_F$ ist v_y positiv, bei negativem Flugwinkel entsprechend negativ. Dies gilt im gesamten Definitionsbereich für den Flugwinkel von $-\frac{\pi}{2} < \widehat{\alpha}_F < \frac{\pi}{2}$, es ist also keine Fallunterscheidung notwendig.

4.2.6 Relative Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,rel}$

Um die Kräfte, die auf den Partikel im Flug wirken, zu erhalten, ist es notwendig, die relative Geschwindigkeit v_{rel} des Partikels zur Umgebungsluft zu kennen, da diese für die Widerstandskraft ausschlaggebend ist. Nur die den Partikel im Nahbereich umgebende Luftgeschwindigkeit hat einen Einfluss auf dessen Flugbahn.

Im Rechenschema ist es deshalb möglich, unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten im Raum zu untersuchen. Dafür wird eine konstante Luftgeschwindigkeit in positive x-Richtung eingesetzt. Diese darf den Partikel, wie oben begründet, nie vollständig abbremsen und in negative x-Richtung beschleunigen. Dadurch kommen nur umgebende Luftgeschwindigkeiten in positive x-Richtung in Frage. Die relative Geschwindigkeit des Partikels $v_{x,rel}$ in x-Richtung, ergibt sich, wenn die umgebende Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$ von der absoluten Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,abs}$ subtrahiert wird (Formel 4.5).

$$v_{x,rel} = v_{x,abs} - v_{L,x} \quad (4.5)$$

Sowohl $v_{x,abs}$ als auch $v_{L,x}$ sind größer oder gleich Null, woraus die beiden Fälle für positive und negative $v_{x,abs}$ folgen:

$$\begin{aligned} v_{x,rel} &\geq 0, \text{ wenn } v_{x,abs} \geq v_{L,x} \\ v_{x,rel} &< 0, \text{ wenn } v_{x,abs} < v_{L,x} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Die relative Geschwindigkeit des Partikels zur Umgebungsluft in x-Richtung $v_{x,rel}$ wird also ab dem Zeitpunkt negativ, ab dem die absolute Geschwindigkeit des Partikels in x-Richtung kleiner als die ihn umgebende Luftgeschwindigkeit wird. Diese Bedingung ist für die Programmierung des weiteren Rechenganges wichtig und wird noch häufiger für Fallunter-

scheidungen eingesetzt. Vermeidbar ist diese Fallunterscheidung nicht, obwohl die umgebende Luftgeschwindigkeit nicht negativ werden darf, da die Geschwindigkeiten in endlich großen Iterationsschritten berechnet werden. So kann es sein, dass in einem Iterationsschritt, während dessen die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als konstant betrachtet werden, der Partikel in x-Richtung langsamer als die umgebende Luftgeschwindigkeit wird. In y-Richtung gibt es keine relative Geschwindigkeit, da in y-Richtung keine Überlagerung einer umgebenden Luftgeschwindigkeit vorgesehen ist. Für die Abschätzung des Einflusses einer umgebenden Luftgeschwindigkeit ist die überlagerte Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$ in x-Richtung ausreichend.

Der Betrag der relativen Partikelgeschwindigkeit v_{rel} lässt sich aus den beiden Geschwindigkeitskomponenten $v_{x,rel}$ und v_y aus dem Satz des Pythagoras ermitteln (Formel 4.7):

$$v_{rel} = \sqrt{v_{x,rel}^2 + v_y^2} \quad (4.7)$$

4.2.7 Widerstandskraft F_W

Mit der nun errechneten relativen Geschwindigkeit v_{rel} kann die Widerstandskraft F_W nach folgender Gleichung 4.8 bestimmt werden. Sie greift parallel zur relativen Geschwindigkeit v_{rel} am Partikel an.

$$F_W = c_W \cdot \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot v_{rel}^2 \cdot A \quad (4.8)$$

4.2.8 Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$

Da die Kraft F_W entlang der relativen Partikelgeschwindigkeit v_{rel} und nicht entlang der Flugbahn angreift, muss der Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ der relativen Partikelgeschwindigkeit zu den Koordinatenachsen bestimmt werden. Es gibt vier mögliche Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ für jeweils zwei unterschiedliche Orientierungen der Geschwindigkeiten $v_{x,rel}$ und v_y , wie aus Bild 4.3 zu ersehen ist.

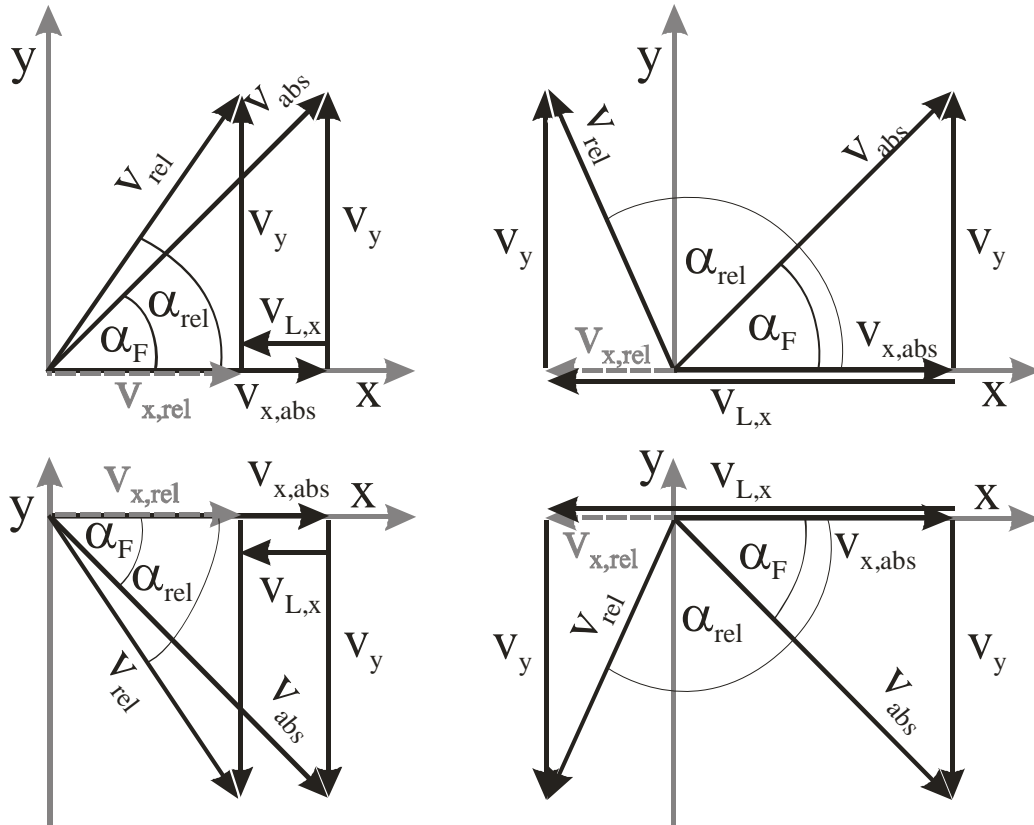


Bild 4.3: Vier unterschiedliche Fälle der relativen Partikelgeschwindigkeit in x-Richtung

Der Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ kann unter diesen Voraussetzungen also Werte von $-\pi < \hat{\alpha}_{rel} < \pi$ annehmen. Für die Berechnung des Relativgeschwindigkeitswinkels wird die Umkehrfunktion einer trigonometrischen Funktion benötigt. Betrachtet man nun die in Frage kommenden Funktionen mit ihren Werte- und Definitionsbereichen, so zeigt sich, dass keine der Funktionen im benötigten Wertebereich definiert ist (Gleichungen 4.9 – 4.12).

$$f : x \mapsto \arcsin x \quad (4.9)$$

$$[-1;1] \rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$$

$$f : x \mapsto \arccos x \quad (4.10)$$

$$[-1;1] \rightarrow [0; \pi]$$

$$f : x \mapsto \arctan x \quad (4.11)$$

$$\mathbb{R} \rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$$

$$f : x \mapsto \operatorname{arc cot} x \quad (4.12)$$

$$\mathbb{R} \rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right]$$

So bleibt nur die Möglichkeit, den Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ über einen Umweg zu berechnen, damit der weitere Rechengang programmiert werden kann. Der Winkel zwischen y-Achse und Relativgeschwindigkeit v_{rel} soll nach Bild 4.4 nun mit $\hat{\alpha}'_{rel}$ bezeichnet werden, wenn die relative Geschwindigkeit in x-Richtung $v_{x,rel}$ negativ ist.

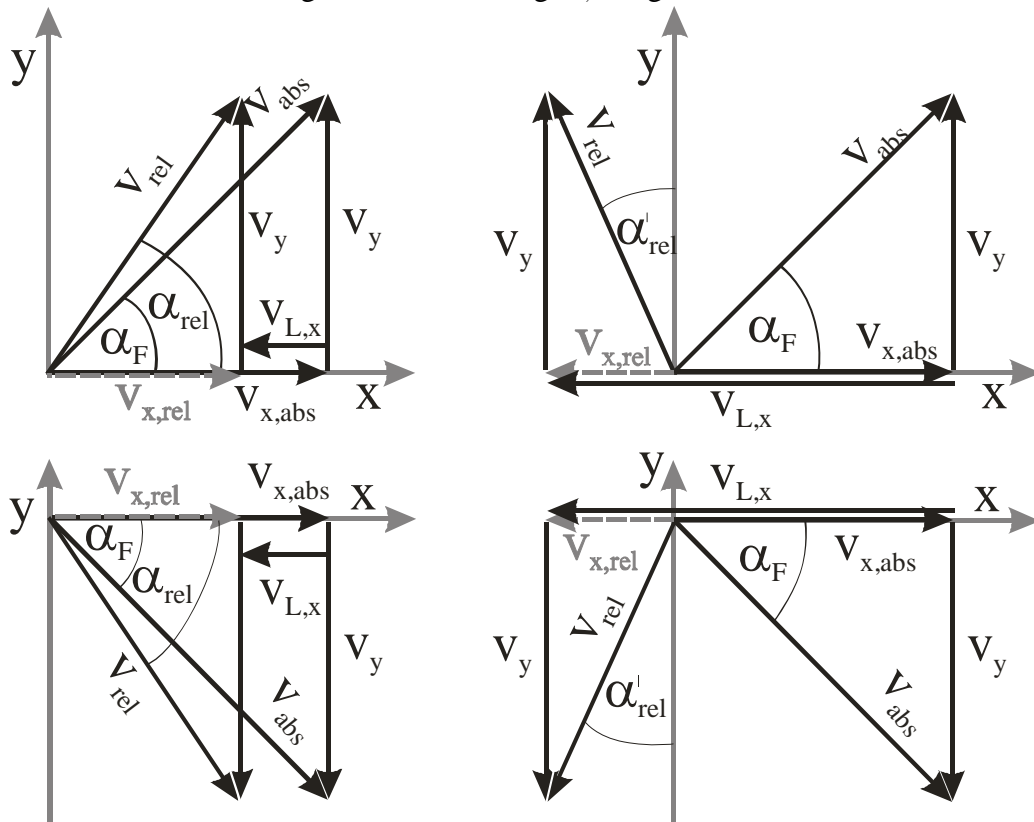


Bild 4.4: Fallunterscheidungen beim Relativgeschwindigkeitswinkel

Um den korrekten Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ zu erhalten, müssen demnach zwei Fallunterscheidungen 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:

$$\hat{\alpha}_{rel} = \arctan \left(\frac{v_y}{v_{x,rel}} \right) \quad (4.13)$$

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

$$\hat{\alpha}'_{rel} = \arctan\left(\frac{-v_{x,rel}}{v_y}\right) \quad (4.14)$$

Die arctan-Funktion wechselt bei $v_x = 0$ 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 $v_{x,rel}$ dazu 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 korrekten Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ umzurechnen, wird die zweite Fallunterscheidung bezüglich der Partikelgeschwindigkeit in y-Richtung notwendig. Dabei wird geprüft, ob diese Geschwindigkeit positiv oder negativ ist (Formel 4.15 – 4.16):

$$\text{Für } v_y > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = \frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_{rel} \quad (4.15)$$

$$\text{Für } v_y \leq 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = -\frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_{rel} \quad (4.16)$$

Nach der Zusammenführung beider Fallunterscheidungen ergibt sich schließlich (Formel 4.17 – 4.19):

$$\text{Für } v_{x,rel} > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = \arctan\left(\frac{v_y}{v_{x,rel}}\right) \quad (4.17)$$

$$\text{Für } v_{x,rel} \leq 0 \text{ und } v_y > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{-v_{x,rel}}{v_y}\right) \quad (4.18)$$

$$\text{Für } v_{x,rel} \leq 0 \text{ und } v_y \leq 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_{rel} = -\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{-v_{x,rel}}{v_y}\right) \quad (4.19)$$

)

Wichtig ist daher, dass der Fall $v_{x,rel} = 0$ bei der ersten Fallunterscheidung der Seite von $v_{x,rel} < 0$ zugeschlagen wird. Der Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ darf bei $v_{x,rel} = 0$ nicht Null werden, sondern muss $\pm \frac{\pi}{2}$ betragen, da $\arctan 0$ nicht definiert ist.

4.2.9 Kraft auf den Partikel in x-Richtung F_x

Über den berechneten Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ und die Widerstandskraft F_W lässt sich die auf den Partikel einwirkende Kraft in x-Richtung F_x berechnen (Formel 4.20):

$$F_x = -F_W \cdot \cos \hat{\alpha}_{rel} \quad (4.20)$$

Das negative Vorzeichen der Formel 4.19 folgt aus der Tatsache, 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 Bild 4.5 ersichtlich ist, jedoch negativ. In den Winkelbereichen $-\pi < \hat{\alpha}_{rel} < -\frac{\pi}{2}$ und $\pi < \hat{\alpha}_{rel} < \frac{\pi}{2}$ verhält sich die Kraft F_x gerade umgekehrt. Hier ist die \cos -Funktion negativ, die Kraft F_x jedoch positiv.

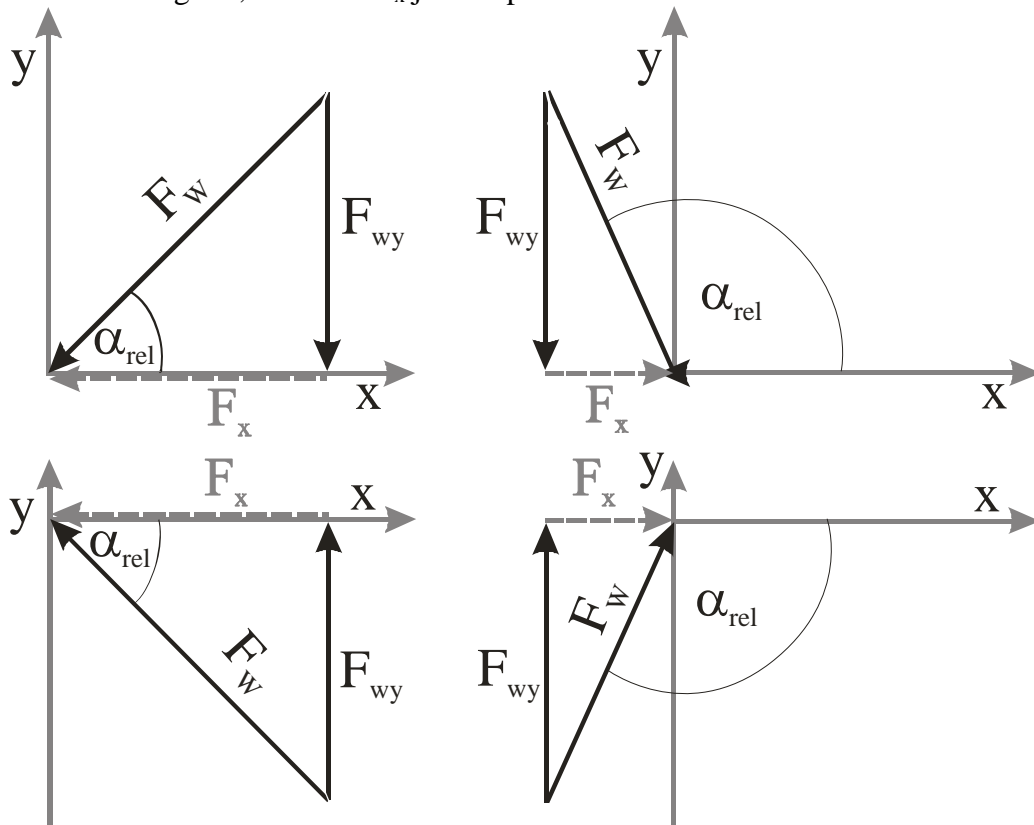


Bild 4.5: Kraft auf den Partikel in x-Richtung

4.2.10 Kraft auf den Partikel in y-Richtung F_y

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 mit konstantem Betrag und in negativer y-Richtung auf den Partikel ein (Gleichung 4.21).

$$F_g = -m_p \cdot g \quad (4.21)$$

Zum zweiten addiert sich hierzu die Kraftkomponente F_{wy} , die sich aus der Widerstandskraft F_w in y-Richtung ermitteln lässt. Diese kann jedoch in positive, wie auch negative y-Richtung gerichtet sein, wie in Bild 4.6 zu erkennen ist.

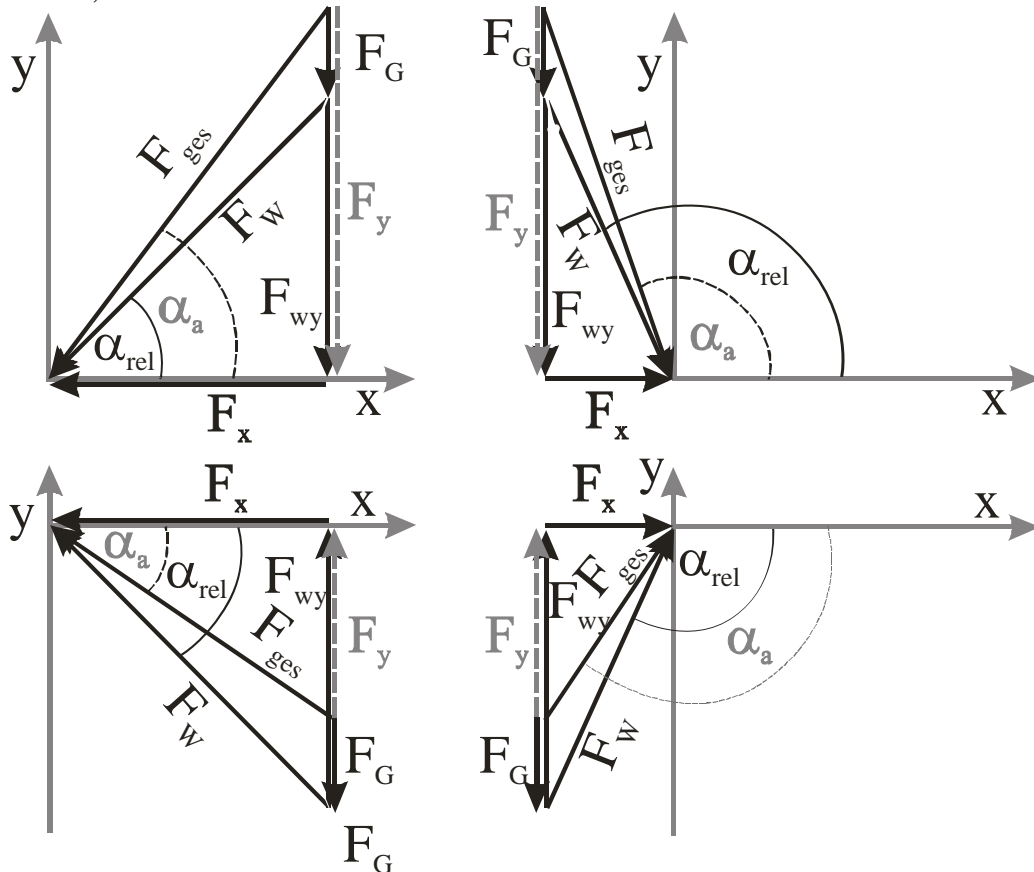


Bild 4.6: Kraft auf den Partikel in y-Richtung

Die Kraft in y-Richtung ergibt sich somit nach Gleichung 4.22 zu:

$$F_y = -F_w \cdot \sin \hat{\alpha}_{rel} - m_p \cdot g \quad (4.22)$$

Eine Fallunterscheidung ist bei der Kraftkomponente aus der Widerstandskraft in y-Richtung F_{wy} nicht notwendig, da die sin-Funktion, mit welcher sie aus der Widerstandskraft F_w ermittelt wird, beim Winkel $\hat{\alpha}_{rel} = 0$ das Vorzeichen wechselt. Genau bei diesem Relativgeschwindigkeitswinkel $\hat{\alpha}_{rel}$ 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 $\hat{\alpha}_{rel}$ eine positive Kraft berechnet würde. Die Kraftkomponente aus der Widerstandskraft ist jedoch bei positivem $\hat{\alpha}_{rel}$ negativ und bei negativem $\hat{\alpha}_{rel}$ demzufolge positiv.

4.2.11 Gesamtkraft F_{ges}

Aus den Kraftkomponenten in x- und y-Richtung lässt sich über die Gleichung des Pythagoras die Gesamtkraft F_{ges} ermitteln (Gleichung 4.23).

$$F_{ges} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4.23)$$

Dieses Ergebnis gibt nur den Betrag der insgesamt auf den Partikel einwirkenden Gesamtkraft F_{ges} wieder. Es sagt nichts über die Wirkrichtung dieser Kraft aus.

4.2.12 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 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 parallel zur auf den Partikel wirkenden Gesamtkraft F_{ges} (siehe Bild 4.6). Im Übrigen folgt die Berechnung des Beschleunigungswinkels $\hat{\alpha}_a$ dem Berechnungsverlauf des Relativgeschwindigkeitswinkels $\hat{\alpha}_{rel}$ in Kapitel 4.2.8. Die programmierte Formel soll hier nur der Vollständigkeit halber angegeben werden.

Dabei wird für die Fallunterscheidung bei $v_{x,rel} < 0$ wieder ein Hilfswinkel $\hat{\alpha}'_a$ nach Gleichung 4.24 eingeführt:

$$\text{Für } v_{x,rel} < 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}'_a = -\arctan\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (4.24)$$

Für den gesamten Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$ lauten die Fallunterscheidungen dann (Gleichungen 4.25 bis 4.27):

$$\text{Für } v_{x,rel} > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_a = \arctan\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad (4.25)$$

$$\text{Für } v_{x,rel} < 0 \text{ und } F_y < 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_a = \frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_a = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (4.26)$$

$$\text{Für } v_{x,rel} < 0 \text{ und } F_y > 0 \text{ gilt: } \hat{\alpha}_a = \frac{\pi}{2} + \hat{\alpha}'_a = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (4.27)$$

4.2.13 Partikelbeschleunigung a

Die Beschleunigung a , welche parallel zur Gesamtkraft F_{ges} gerichtet ist, lässt sich aus der Grundgleichung der Mechanik $F = m \cdot a$ ermitteln (Gleichung 4.28).

$$a = \frac{F_{\text{ges}}}{m_p} \quad (4.28)$$

Der Fall $F_{\text{ges}} = 0$ kann nur für den freien Fall des Partikels bei ruhender Luft mit Endgeschwindigkeit oder dem beschleunigungslosen Mitschweben des Partikels in x -Richtung im bewegten Luftstrom auftreten. Ansonsten ist immer eine Beschleunigung des Partikels in x -Richtung vorhanden.

4.2.14 Partikelbeschleunigung in x -Richtung a_x

Die Beschleunigung des Partikels in x -Richtung a_x ließe sich nun über den Beschleunigungswinkel $\hat{\alpha}_a$ (siehe Kapitel 4.2.12) und die Partikelbeschleunigung a über trigonometrische Funktionen errechnen. Wesentlich einfacher geht dies jedoch mit der Kraft in x -Richtung nach der Grundgleichung der Mechanik in x -Richtung (Gleichung 4.29).

$$a_x = \frac{F_x}{m_p} \quad (4.29)$$

Die Beschleunigung in x -Richtung ist für positive relative Partikelgeschwindigkeiten durch die negative Kraft F_x negativ (siehe Bild 4.6). Ist die relative Partikelgeschwindigkeit negativ, so wird die Beschleunigung in x -Richtung positiv. Dies bedeutet, der Partikel wird durch die umgebende Luft wieder in positive x -Richtung beschleunigt.

4.2.15 Partikelbeschleunigung in y -Richtung a_y

Die Partikelbeschleunigung in y -Richtung a_y berechnet sich analog der Partikelbeschleunigung in x -Richtung a_x aus der Grundgleichung der Mechanik in y -Richtung (Gleichung 4.30).

$$a_y = \frac{F_y}{m_p} \quad (4.30)$$

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

4.2.16 Neue absolute x -Geschwindigkeit $v_{x+1,\text{abs}}$

Bei der Bewegung im Weginkrement handelt es sich um eine beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit. Dabei wird angenommen, dass die Beschleunigung über das gesamte Weginkrement konstant sei. Aus diesem Grund darf das Weginkrement nicht beliebig groß werden, da es sonst, bei Beschleunigung in negative x-Richtung, zur Umkehr der Partikelflugrichtung aufgrund zu großer Iterationsschritte kommt. Die neue absolute Geschwindigkeit in x-Richtung $v_{x+1,abs}$ errechnet sich schließlich aus der Gleichung 4.31 für beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit.

$$v_{x+1,abs} = \sqrt{v_{x,abs}^2 + 2 \cdot a_x \cdot \Delta s_x} \quad (4.31)$$

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 abbremsen darf und die umgebende Luftgeschwindigkeit nach der Definition in Kapitel 4.3.3 den Partikel nur in die positive x-Richtung beschleunigt, ist es unwahrscheinlich, dass dieser Fall eintritt. Trotzdem wurde die Fallunterscheidung (Gleichung 4.32) programmiert, um Fehler im Rechenschema durch Rundungsungenauigkeiten bzw. durch die endlichen Iterationsschritte zu vermeiden.

$$\text{wenn: } v_{x,abs}^2 + 2 \cdot a_x \cdot \Delta s_x \leq 0 \text{ gilt: } v_{x+1,abs} = 0 \quad (4.32)$$

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

4.2.17 Flugzeit des Partikels über das Weginkrement in x-Richtung t

Über die Gleichung (4.31) 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 dem Weginkrement in x-Richtung ist selbstverständlich identisch mit der Flugzeit über dem Weginkrement in y-Richtung. So berechnet sich die Flugzeit t durch Umformen der Weggleichung für Bewegungen mit Anfangsgeschwindigkeit (Gleichung 4.33).

$$\Delta s_x = 0,5(v_{x,abs} + v_{x+1,abs}) \cdot t \quad (4.33)$$

$$t = \frac{2 \cdot \Delta s_x}{v_{x,abs} + v_{x+1,abs}}$$

4.2.18 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. Der Betrag des Weginkrements in y-Richtung ändert sich bei jedem Rechendurchgang, da das Weginkrement in x-Richtung konstant gehalten wird.

Durch die Berechnung der Flugzeit t über das Weginkrement Δs_x sind alle notwendigen Voraussetzungen zur Berechnung des Weginkrements in y-Richtung Δs_y gegeben. Die berechneten Werte a_y und t (Gleichung 4.30 und 4.33) werden in die Weggleichung für Bewegungen mit Anfangsgeschwindigkeit eingesetzt (Gleichung 4.34).

$$\Delta s_y = v_y \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t^2 \quad (4.34)$$

Die Orientierung des Weginkrements in positive oder negative y-Richtung ergibt sich durch die Vorzeichen der Geschwindigkeit in y-Richtung und die Beschleunigung in y-Richtung automatisch. Auch bei einem Flugwinkel von 0 Grad ist die Formel (4.34) gültig. Die Geschwindigkeit v_y wird dann gleich Null und die Formel entspricht der Formel für die Bewegung ohne Anfangsgeschwindigkeit.

4.2.19 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 Richtungs- umkehr der Geschwindigkeit im berechneten Weginkrement nicht stattfindet. (Die Geschwindigkeitsumkehr in einem Weginkrement wird später als Sonderfall betrachtet.) Bei der ersten Fallunterscheidung kommt es vor allem darauf an, für den Sinkflug eine negative neue absolute Geschwindigkeit v_y errechnen zu können. Da das Ergebnis der Wurzelfunktion immer positiv ist, werden für die beiden Orientierungen des Weginkrements in y-Richtung Δs_y folgende beide Fälle (Gleichung 4.35 und 4.36) unterschieden:

$$\text{Für } \Delta s_y \geq 0 \text{ gilt: } v_{y+1} = \sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \quad (4.35)$$

$$\text{Für } \Delta s_y < 0 \text{ gilt: } v_{y+1} = -\sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \quad (4.36)$$

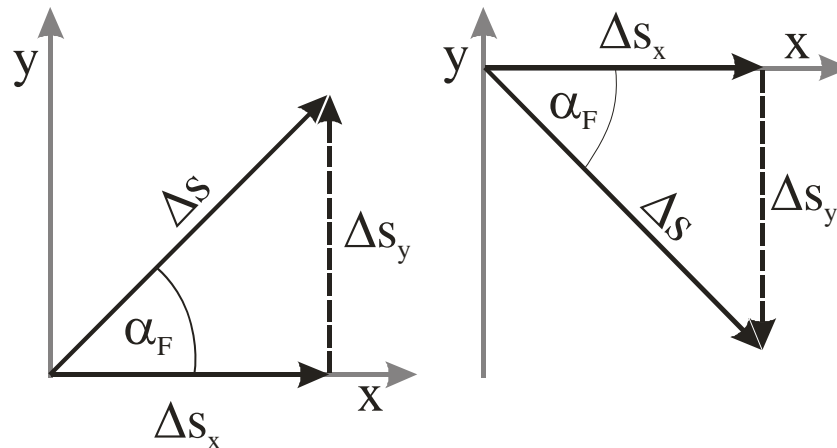


Bild 4.7: Weginkremente im Steig- bzw. Sinkflug

Aus den Bildern 4.7 und 4.6 geht hervor, 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 F_{ges} 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 Anfangsgeschwindigkeit im Weginkrement. Da die Geschwindigkeit während des Sinkfluges nach unten gerichtet ist, muss vor die Wurzel ein negatives Vorzeichen gesetzt werden.

Die zweite Fallunterscheidung befasst sich nun mit dem Sonderfall der Geschwindigkeitsumkehr im Weginkrement am 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 (4.36) deutlich, indem $2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y < v_y^2$ wird, was einen negativen Wert unter der Wurzel zur Folge hätte. Tritt dieser Fall ein, wird zur Berechnung der neuen absoluten Geschwindigkeit v_{y+1} dieses Weginkrement zunächst in zwei noch unbestimmte Teilstrecken (Δs_{y1} und Δs_{y2}) unterteilt (Gleichung 4.37).

$$\Delta s_y = \Delta s_{y1} + \Delta s_{y2} \quad (4.37)$$

Die Teilstrecke Δs_1 wird dabei als Strecke in y -Richtung angesehen, die der Partikel zurücklegt, bis er den oberen Totpunkt, also die Geschwindigkeitsumkehr in y -Richtung, erreicht. Um diese Teilstrecke zu bestimmen, muss die Endgeschwindigkeit des Weginkrements v_{y+1} zunächst für die Teilstrecke bis zum oberen Totpunkt der Flugbahn zu Null gesetzt werden. Die Wegstrecke wird dabei nur über das erste Weginkrement Δs_1 berechnet, nach welchem die Gleichung 4.38 aufgelöst werden muss.

$$\begin{aligned}
0 &= \sqrt{v_y^2 + 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_{y1}} \\
-2 \cdot a_y \cdot \Delta s_{y1} &= v_y^2 \\
\Delta s_{y1} &= \frac{v_y^2}{-2 \cdot a_y}
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Die Länge des zweiten Weginkrements lässt sich nun aus der Kenntnis der beiden anderen Weginkremente (Gleichung 4.34 und 4.38) ermitteln.

$$\Delta s_{y2} = \Delta s_y - \Delta s_{y1} \tag{4.39}$$

Die Endgeschwindigkeit kann jetzt ermittelt werden, indem die Formel mit der Wegstrecke Δs_{y2} 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 für Δs_{y1} das richtige Ergebnis liefert (Gleichung 4.40).

$$v_{y+1} = -\sqrt{0 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_{y2}} \tag{4.40}$$

Durch Einsetzen der Gleichung (4.38) und (4.39) erhält man schließlich:

$$\begin{aligned}
v_{y+1} &= -\sqrt{-2 \cdot a_y \cdot (\Delta s_y - \Delta s_{y2})} \\
v_{y+1} &= -\sqrt{-2 \cdot a_y \cdot \left(\Delta s_y + \frac{v_y^2}{2 \cdot a_y} \right)} \\
v_{y+1} &= -\sqrt{-v_y^2 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y}
\end{aligned} \tag{4.41}$$

Zusammengefasst lauten die beiden Fallunterscheidungen schließlich:

$$\begin{aligned}
\text{Für } \Delta s_y < 0 \text{ gilt: } v_{y+1} &= -\sqrt{v_y^2 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \\
\text{für } \Delta s_y \leq 0 \text{ gilt: } |2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y| < v_y^2 \text{ gilt: } v_{y+1} &= \sqrt{v_y^2 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y} \\
\text{für } \Delta s_y \leq 0 \text{ gilt: } |2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y| > v_y^2 \text{ gilt: } v_{y+1} &= -\sqrt{-v_y^2 - 2 \cdot a_y \cdot \Delta s_y}
\end{aligned} \tag{4.42}$$

4.3 Variation der Einflussgrößen auf den Späneflug

Nachfolgend werden die Einflussparameter in einer Bandbreite variiert, in der sie aller Voraussicht nach auftreten können. Wenn der Parameter für die Rechnung entfallen kann, so wird zwischen einer wahrscheinlichen Größenordnung und dem Weglassen des Parameters variiert. Als Grundwerte der Vergleichsrechnung, mit welcher später alle Rechnungen zur Abschätzung des Parametereinflusses validiert werden, werden folgende Werte angenommen. Sie stellen einen erwarteten Mittelwert dar oder wurden, wie bei der Flughöhe frei gewählt.

- Anfangsgeschwindigkeit = 4 m/s
- Partikelmasse = $1,28 \cdot 10^{-4}$ kg
- Partikelfläche = $0,002 * 0,009$ m = 0,000018 m²
- c_w -Wert = 20
- Umgebende Luftgeschwindigkeit = 0,5 m/s
- Flughöhe: 1 m
- Schrittweite der Berechnungsschritte = 0,01 m
- Abflugwinkel zur Horizontalen = 0° (Sonderfall waagrechter Wurf)

4.3.1 Einfluss des c_w -Wertes

Die klassische Wurfbahn eines Körpers ohne Luftwiderstand ergibt die allseits bekannten Wurfparabeln, die bei der Betrachtung größerer Körper mit kleinen bis mittleren Geschwindigkeiten in Luft beobachtet werden können. Beschreibt der Körper nun eine lange Flugbahn mit hoher Anfangsgeschwindigkeit, wie beispielsweise eine Geschossflugbahn im militärischen Bereich, oder die Körper haben sehr kleine Abmessungen, wie beispielsweise bei geworfenen Spanpartikeln, so weichen die Flugbahnen der betrachteten Körper deutlich von der idealtypischen parabelförmigen Flugbahn ohne Luftwiderstand ab. Verantwortlich für diese Flugbahnabweichung ist der Luftwiderstand, welcher über den für jeden Körper charakteristischen Luftwiderstandsbeiwert c_w berechnet wird.

Generell hängt der Luftwiderstandsbeiwert c_w (siehe Kapitel 7) sowohl von der Reibung, als auch vom Druckverlust des Fluids an einem umströmten Körpers ab. Welche Anteile der Druckverlust und die Reibung zum Luftwiderstand des Körpers beitragen, ist jedoch rein von der Körperform des Partikels und dessen Oberflächenstruktur abhängig. Für einige einfache Körperformen (Kugel, Platte, etc.) gibt es genauere Untersuchungen des Luftwiderstandsbeiwertes. Es ist jedoch nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage für beliebige Körper wie Spanpartikel zu treffen. Alle Untersuchungen zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Luftwiderstandsbeiwertes c_w von partikelförmigen Körpern von der Reynoldszahl Re bei kleinen Reynoldszahlen ($Re = 0,1$ bis $Re = 100$). In Bild 4.8 sind experimentell ermittelte c_w -Werte einfacher Körper in Abhängigkeit von ihrer Reynoldszahl im üblicherweise verwendeten doppellogarithmischen Diagramm dargestellt.

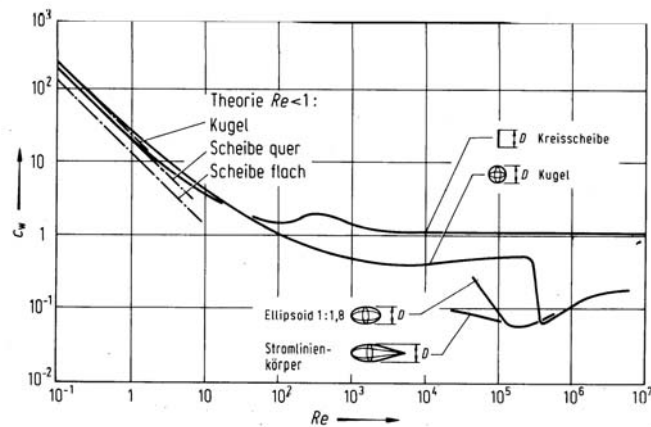


Bild 4.8: c_w -Werte einfacher Körperformen über der Reynoldszahl

Die Reynoldszahl für Spanpartikel errechnet sich nach Formel (4.43). Die darin einzusetzen- den Größen sind die relative Partikelgeschwindigkeit v_{rel} , die kinematische Viskosität der Luft ν_L und, als charakteristische Größe des Partikels, der Partikeldurchmesser D . Näherungs- weise wird für die Abschätzung der Reynoldszahl hier als Partikeldurchmesser die Sieb- maschenweite des nächst größeren Siebes eingesetzt.

$$Re = \frac{v_{rel} \cdot D}{\nu_L} \quad (4.43)$$

Es wird eine Partikelgröße von 500 μm Durchmesser angenommen und die kinematische Viskosität der Luft mit $\nu_L = 0,00001513 \text{ m}^2/\text{s}$ angesetzt. Eine Variation der relativen Partikel- geschwindigkeit von 0,01 m/s für im Luftstrom mitfliegende Partikel bis 50 m/s für sehr schnell fliegende Partikel ergibt folgenden Reynoldszahlenbereich:

| | |
|------------------------------|------------|
| $v_{rel} = 0,01 \text{ m/s}$ | $Re = 0,2$ |
| $v_{rel} = 20,0 \text{ m/s}$ | $Re = 330$ |
| $v_{rel} = 50,0 \text{ m/s}$ | $Re = 826$ |

Aus Bild 4.8 lässt sich nun ermitteln, dass der Luftwiderstandsbeiwert c_w für diesen Rey- noldszahlenbereich zwischen $c_w = 0,7$ und $c_w = 100$ liegt, wenn die Kugelform als Näherung für die Partikelform angenommen wird.

Für die Abschätzung des Einflusses der c_w -Werte auf die Partikelflugbahn sollen hier nur die Fälle "Flugbahn ohne Luftwiderstand" und "Flugbahn mit konstantem c_w -Wert" untersucht werden. Allerdings wird bei den konstant angesetzten c_w -Werten zwischen einem c_w -Wert bei hohen Reynoldszahlen ($c_w = 0,7$) und einem c_w -Wert bei kleinen Reynoldszahlen ($c_w = 100$) unterschieden (Bild 4.9).

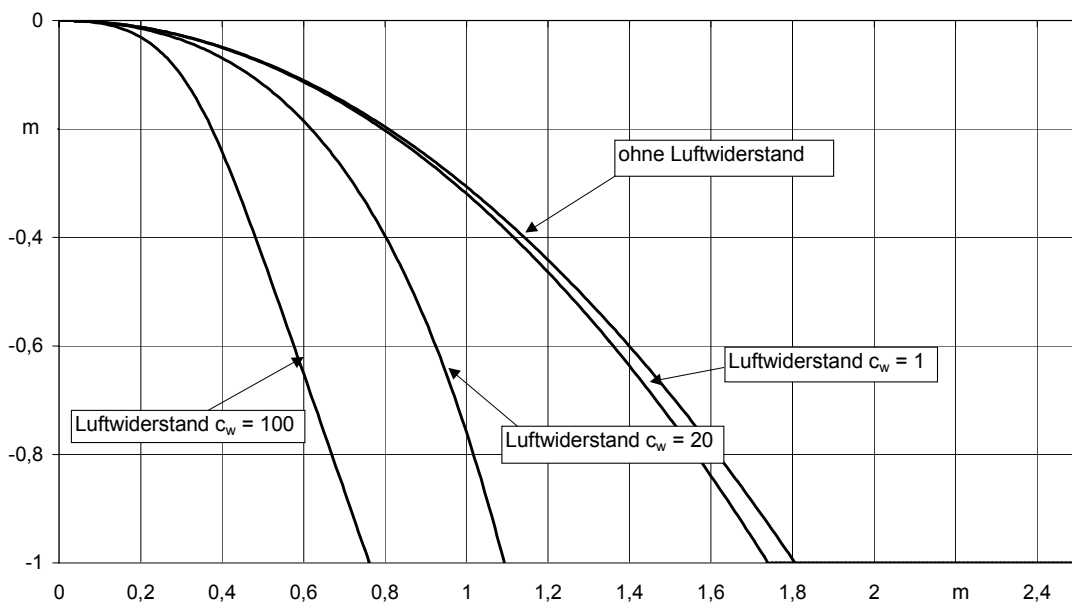


Bild 4.9: Flugbahn ohne und mit konstanten c_w -Werten

Ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandsbeiwerts c_w ergibt sich eine Flugweite des Partikels unter den definierten Bedingungen von 1,8 Meter. Bei unterschiedlichen konstanten Luftwiderstandsbeiwerten ergeben sich die folgenden Flugweiten:

| | |
|-------------|--------------------|
| $c_w = 1$ | Flugweite = 1,74 m |
| $c_w = 20$ | Flugweite = 1,1 m |
| $c_w = 100$ | Flugweite = 0,77 m |

Mit wachsendem c_w -Wert nimmt die Flugweite des Partikels durch die verstärkte Abbremsung des Partikels ab. Je höher der c_w -Wert des Partikels ist, desto schneller geht die Flugbahn in eine Gerade, die Gleichgewichts- oder Endgeschwindigkeit des Partikels über. Bei dieser Endgeschwindigkeit fliegt der Partikel mit der ihn umgebenden Strömungsgeschwindigkeit mit und fällt dabei mit seiner individuellen Endgeschwindigkeit nach unten. Betrachtet man die absolute Fluggeschwindigkeit des Partikels (Bild 4.10), so ist zu erkennen, dass die Fluggeschwindigkeit ohne Luftwiderstand (Bild 4.10, linkes Teilbild) durch die Fallgeschwindigkeit in y -Richtung langsam ansteigt. Bei großen Luftwiderständen (Bild 4.10, rechtes Teilbild) fällt die Anfangsgeschwindigkeit des Partikels auf die auf Grund der kleinen Partikelmassen niedrige Endgeschwindigkeit. Dadurch fällt der Partikel wesentlich langsamer und wird durch die umgebende Luftgeschwindigkeit mitgetragen.

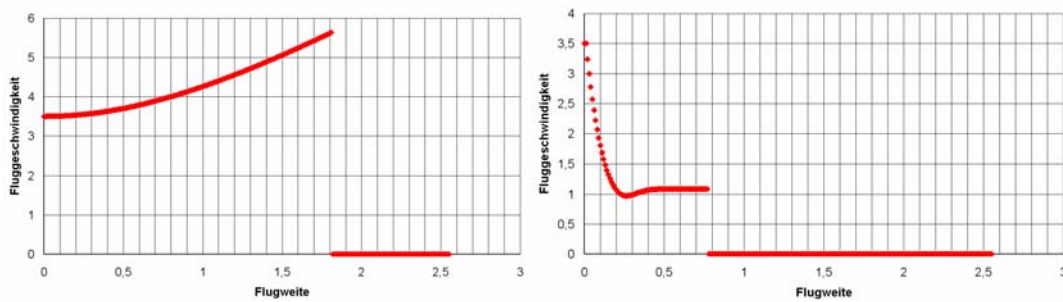


Bild 4.10: Fluggeschwindigkeiten des Partikels (links ohne Luftwiderstand, rechts mit $c_w = 100$)

Es zeigt sich, dass eine Variation des c_w -Wertes im erwarteten c_w -Wert-Bereich eine Abweichung der Flugweite von + 63,6 % (bei $c_w = 0$) und - 30 % (bei $c_w = 100$) bezogen auf $c_w = 20$, bewirkt.

4.3.2 Einfluss der Schrittweite Δx

Die Schrittweite der Excel-Berechnung entspricht nahezu der Maschenweite einer Simulationsrechnung. Sie unterscheidet sich von einer Simulationsrechnung jedoch dadurch, dass in der Excel-Berechnung nur die Schrittweite in x-Richtung konstant gehalten wird. Im Extremfall eines freien Falles kann die Flugstrecke des Partikels innerhalb der Schrittweite dadurch sehr groß werden. Da die Rechnung definitionsgemäß jedoch mit einer kleinen, den Partikel umgebenden Luftgeschwindigkeit in x-Richtung durchgeführt wird, kann die Fluglänge innerhalb der Schrittweite nicht beliebig groß werden, da der Partikel durch die umgebende Luftgeschwindigkeit mitgeführt wird.

Jede Näherungsrechnung ist durch die Annahme konstanter Bedingungen in jedem Netzelement (Schrittweite) fehlerbehaftet. Je kleiner die Schrittweite der Berechnung wird, desto genauer muss die Flugbahnberechnung also werden, da die Fehler durch konstante Randbedingungen mit der Schrittweite abnehmen. Die Schrittweite der Excel-Rechnung wird zwischen $\Delta x = 0,004$ m und $\Delta x = 0,025$ m variiert. Diese Variationsbreite ergibt sich bei der kleinen Schrittweite in der Darstellbarkeit der Ergebnisse im Excel-Diagramm, welches auf 255 Datenpunkte limitiert ist.

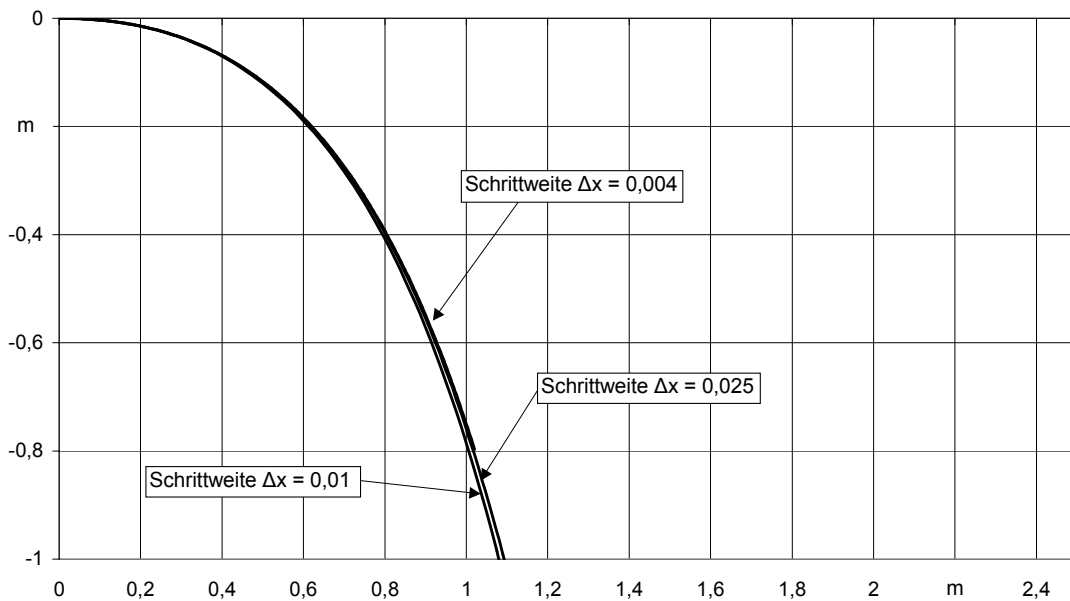


Bild 4.11: Variation der Schrittweite von 0,004 m bis 0,025 m

Als Flugweiten ergeben sich bei allen untersuchten Schrittweiten annähernd gleiche Werte. Diese können nicht unmittelbar miteinander verglichen werden, da sie sich nur im Bereich der eingesetzten Schrittweitendifferenzen unterscheiden. Metallspäne sind demnach ausreichend schwer und träge, so dass eine Schrittweitendifferenz in der Simulationsrechnung nur einen geringen Flugbahnfehler verursacht. Vergleichsuntersuchungen mit sehr kleinen, leichten Partikeln wie Stäuben und Holzspänen zeigen hier eine deutlich größere Abweichung der Partikelflugbahn bei der Schrittweitenvariation der Simulationsrechnung. Betrachtet man die Fluggeschwindigkeiten der kleinen Partikel, so wird klar, dass die Fehler bei großen Schrittweiten hier in einer sehr drastischen Veränderung der Fluggeschwindigkeit pro Schrittweite liegen (Bild 4.12). Ist die Schrittweite kleiner, so passt sich die am Ende des Berechnungsschrittes ermittelte Fluggeschwindigkeit in kleineren und damit der Realität angepassten Schritten an die Endgeschwindigkeit des Partikels an.

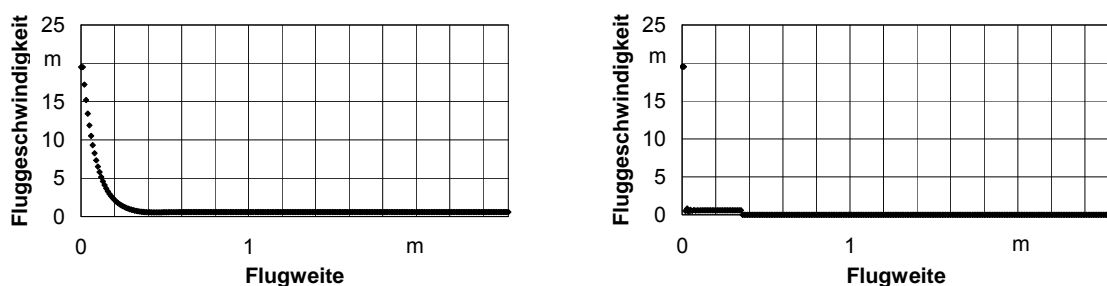


Bild 4.12: Fluggeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der eingesetzten Schrittweite bei sehr kleinen, leichten Partikeln (Staub)

Bei der Variation der Schrittweite der Berechnung kann für große Metallspäne keine Aussage über den Einfluss auf die Flugweite getroffen werden. Es ist jedoch bei Metallstäuben und sehr kleinen Spänen mit einer größeren Abweichung der Simulationsrechnung von der tatsächlichen Flugbahn zu rechnen, wenn große Schrittweiten in der Simulationsrechnung verwendet werden.

4.3.3 Einfluss der umgebenden Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$

Die den Partikel umgebende Luftgeschwindigkeit $v_{L,x}$ wird maßgeblich von der Absaugung und dem Geschwindigkeitsfeld, welches ein rotierendes Werkzeug selbst erzeugt, bestimmt. Die umgebende Luftgeschwindigkeit wird deshalb im Bereich von 0 m/s bis 3 m/s, einer gängigen Absauggeschwindigkeit, die im Arbeitsraum einer Maschine erzielt werden kann, variiert. Es ist in der Excel-Berechnung nur deshalb möglich, die umgebende Luftgeschwindigkeit exakt auf 0 m/s für den Fall in ruhender Luft zu setzen, da die Partikel durch ihre Massenträgheit bei der betrachteten Flugbahn in x-Richtung nicht vollständig abgebremst werden. Würde der Partikel in der betrachteten Flugbahn in x-Richtung durch den Luftwiderstand vollständig zur Ruhe gebracht, so ergäbe sich aufgrund der fest vorgegebenen Schrittweite der Berechnung in x-Richtung eine unendlich große Schrittweite der Flugbahnberechnung in y-Richtung.

Im Rechenschema ist nur eine Luftgeschwindigkeit in positive x-Richtung zulässig, um eine eindeutige Flugbahndarstellung in Excel zu erhalten. Für eine Abschätzung des Einflusses der umgebenden Luftgeschwindigkeit ist die Richtung der Luftgeschwindigkeit jedoch nicht wesentlich.

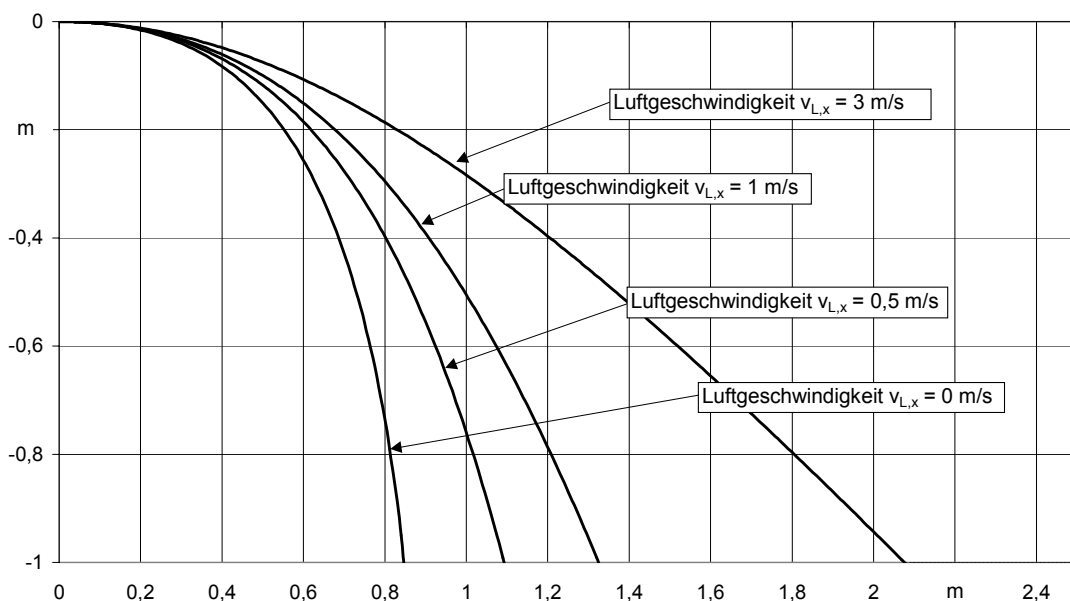


Bild 4.13: Flugweiten mit umgebender Luftgeschwindigkeit $v_{L,x} = 0 \text{ m/s}$ (links) und $v_{L,x} = 3,0 \text{ m/s}$ (rechts)

In Bild 4.13 ist der Einfluss der umgebenden Luftgeschwindigkeit auf die Partikelflugbahn deutlich zu erkennen. Es ergeben sich folgende Flugweiten:

| | |
|------------------------------|--------------------|
| $v_{L,x} = 0,01 \text{ m/s}$ | Flugweite = 0,85 m |
| $v_{L,x} = 0,5 \text{ m/s}$ | Flugweite = 1,1 m |
| $v_{L,x} = 3,0 \text{ m/s}$ | Flugweite = 2,08 m |

Bei umgebender Luftgeschwindigkeit von nahezu 0 m/s ergibt sich eine Flugweitenreduzierung um 22,7 %, bei einer Luftgeschwindigkeit von 3 m/s hingegen ergibt sich eine Flugweitenerhöhung um 89,1 % bezogen auf die definitionsgemäß verwendete umgebende Luftgeschwindigkeit von 0,5 m/s.

4.3.4 Einfluss der Anfangsgeschwindigkeit des Partikels v_{abs}

Die Anfangsgeschwindigkeit des Partikels liegt nahe an der Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Werkzeugs. Da die Schnittgeschwindigkeiten zwischen großen Werkzeugen und kleinen Schaftfräsern oder Bohrern, bei welchen die aufgrund des Schneidstoffs möglichen Schnittgeschwindigkeiten durch die erzielbaren Spindeldrehzahlen zumindest bei der Leichtmetallbearbeitung nicht erreicht werden können, stark differieren, werden die Anfangsgeschwindigkeiten des Partikels von 120 m/min bis 2.400 m/min variiert. Dies deckt den Rahmen der möglichen Schnittgeschwindigkeiten gut ab. Speziell bei hohen Anfangsgeschwindigkeiten der Partikelbewegung ist in Bild 4.14 eine klassische ballistische Flugbahn der Späne zu beobachten.

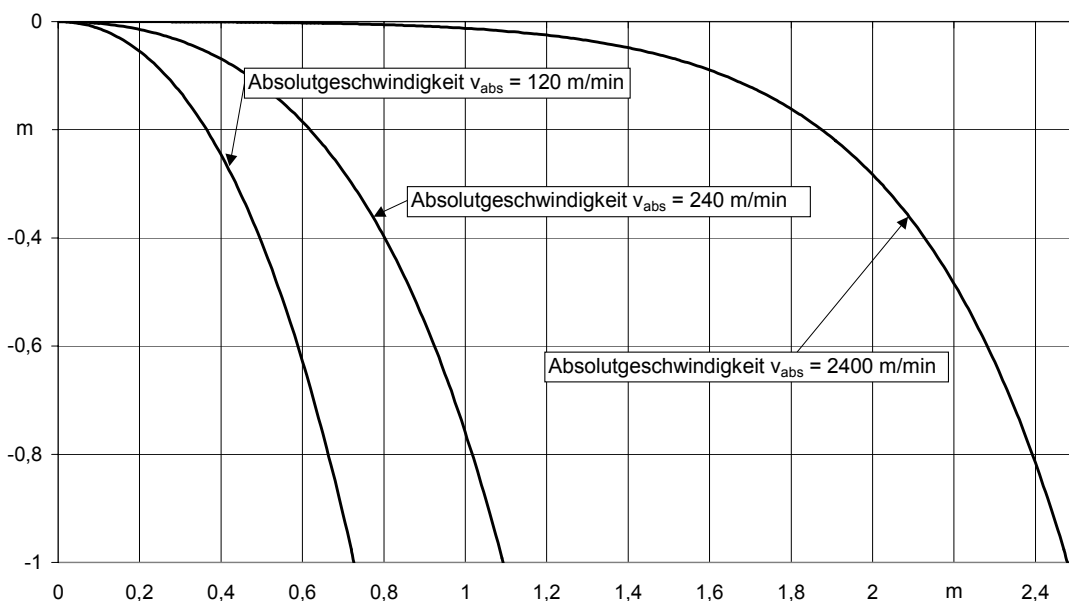


Bild 4.14: Flugweiten mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten (120 – 2.400 m/min) der Partikel

Es ergeben sich durch die unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten folgende berechnete Flugweiten:

| | |
|---------------------------------------|--------------------|
| $v_{\text{abs}} = 120 \text{ m/min}$ | Flugweite = 0,73 m |
| $v_{\text{abs}} = 240 \text{ m/min}$ | Flugweite = 1,1 m |
| $v_{\text{abs}} = 2400 \text{ m/min}$ | Flugweite = 1,48 m |

Durch eine Steigerung der Anfangsfluggeschwindigkeit von 240 m/min auf 2.400 m/min steigt die berechnete Flugweite um 34,5 % der Anfangsflugweite. Bei einer Halbierung der Schnittgeschwindigkeit auf 120 m/min reduziert sich die Flugweite um 33,6 %.

4.3.5 Einfluss der Partikelmasse m_p

Die Partikelmasse wird für Metallspäne von 0,128 g (GGV), über 0,044 g (Aluminium) bis 0,028 g (Magnesium) variiert. Es wurde dabei davon ausgegangen, dass die Spanarten und Spangrößen identisch sind. Die GGV-Späne wurden dabei stichprobenartig auf einer Feinstwaage ausgewogen. Das Gewicht der Aluminium- bzw. Magnesiumspäne wurde über die spezifische Dichte der beiden Werkstoffe ermittelt. Diese beiden Werkstoffe werden z. B. in der Automobilindustrie häufig eingesetzt bzw. sollen in Zukunft verstärkt eingesetzt werden (Magnesium).

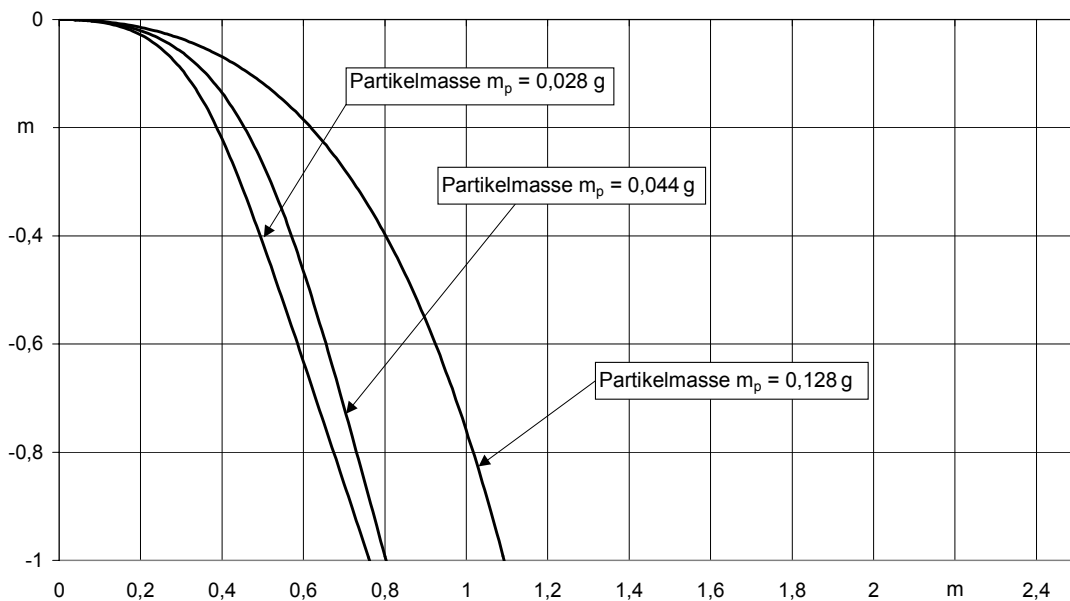


Bild 4.15: Flugweiten mit unterschiedlichen Partikelmassen

Der Einfluss der Partikelmasse auf die Flugbahn des Partikels ist in Bild 4.15 zu erkennen. Der leichte Partikel wird dabei schneller abgebremst und von der umgebenden Luft mitgetragen (linearer Flugbahnverlauf). Der schwere Partikel hingegen wird langsamer abgebremst und erreicht den Fallzustand im Gleichgewicht im betrachteten Flugbahnbereich nicht. Da er aufgrund der größeren Masse eine höhere Fallgeschwindigkeit hat, fällt er gegen

Ende der Flugbahn unter einem steileren Winkel. Die Betrachtung der Partikelgeschwindigkeit in Bild 4.16 zeigt, dass schwerere Partikel eine höhere Endgeschwindigkeit erreichen als leichte Partikel.

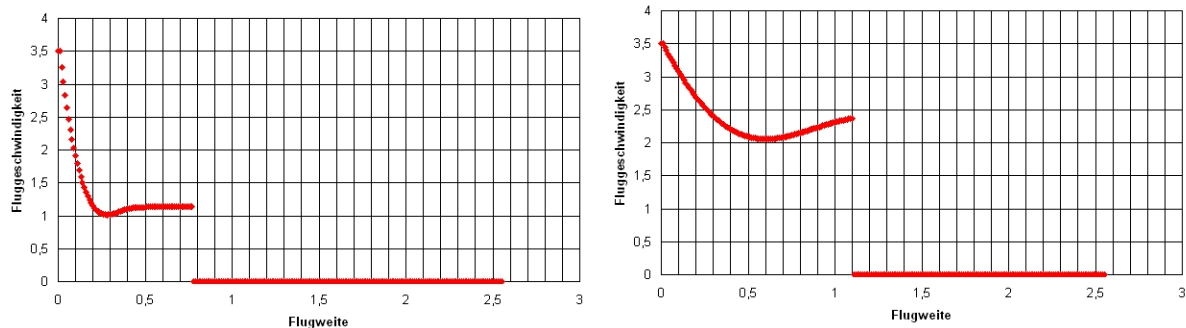


Bild 4.16: Partikelgeschwindigkeiten leichter Partikel (links) und schwerer Partikel (rechts)

Die Partikel erreichen die folgenden Flugweiten:

$$m_p = 0,128 \text{ g} \quad \text{Flugweite} = 1,1 \text{ m}$$

$$m_p = 0,028 \text{ g} \quad \text{Flugweite} = 0,77 \text{ m}$$

Daraus ergibt sich eine Flugweitenreduktion beim leichten Partikel um 30 % der Flugweite des durchschnittlichen Partikels.

4.3.6 Einfluss des Partikelquerschnitts A

Betrachtet man Spanpartikel in der Metallzerspanung, so erhält man in der Regel sehr homogen zusammengesetzte, gleichförmige Späne bei unveränderlichen Zerspanungsbedingungen. Somit kann bei einer durch die Siebanalyse fraktionierten Spanklasse davon ausgegangen werden, dass die maximalen Abmessungen des Spanes nicht größer als die Siebmaschenweite des Siebes sein kann. Das Vermessen von wahllos ausgewählten Spänen einer Spanklasse ergab eine annähernd gleich bleibende Breite der Späne (welche von den Schnittparametern abhängt). Es wird somit davon ausgegangen, dass die kleinsten Späne der Spangrößenfraktion gerade so groß sind, dass sie durch die Maschen des darunterliegenden Siebes noch nicht hindurchfallen können. Geht man weiter davon aus, dass sich Partikel im Luftstrom mit ihrer kleinsten Querschnittsfläche in die Stromrichtung ausrichten, so ergibt sich bei den untersuchten Spänen eine rechteckige Querschnittsfläche von 2 mm Spanbreite und 4 - 8 mm Spanhöhe. Somit muss mit einer Variation von 8 - 16 mm² Querschnittsfläche eines Spanes einer Spangrößenklasse aus der Siebanalyse eines Analysesiebes von 4 mm Maschenweite gerechnet werden.

Es ist in Bild 4.17 zu erkennen, wie der kleine Partikelquerschnitt eine weit geringere Abbremsung des Partikels bewirkt als dies beim Partikel mit großer Querschnittsfläche der Fall ist.

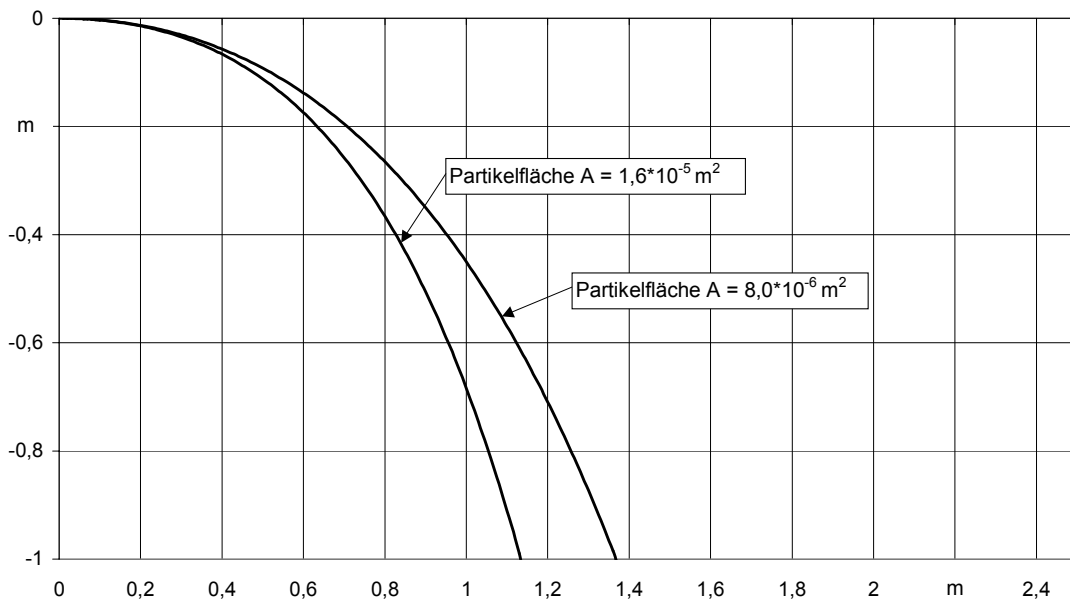


Bild 4.17: Flugweite bei unterschiedlicher Partikelquerschnittsfläche

Die Flugweiten der Partikel variieren in folgender Größenordnung:

$$\begin{array}{ll} A = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 & \text{Flugweite} = 1,37 \text{ m} \\ A = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 & \text{Flugweite} = 1,14 \text{ m} \end{array}$$

Über die Variation der Partikelquerschnittsfläche einer Siebfraktion ergibt sich eine Flugweitenabweichung von 20% (Reduktion).

4.3.7 Einfluss des Abflugwinkels α

Der Abflugwinkel soll im Bereich von $+15^\circ$ bis -15° variiert werden. Ein Winkel von 15° ist auf jeden Fall größer als die Messungenauigkeit der Abflugwinkelbestimmung über eine Bildauswertung. Somit ist die Variation des realen Abflugwinkels sicherlich deutlich kleiner.

Trotz der um 30° unterschiedlichen Abflugwinkel ergeben sich verhältnismäßig kleine Abweichungen in der Flugweite des Partikels:

$$\begin{array}{ll} \alpha = -15^\circ & \text{Flugweite} = 0,97 \text{ m} \\ \alpha = +15^\circ & \text{Flugweite} = 1,18 \text{ m} \end{array}$$

Durch die Variation des Abflugwinkels ergibt sich eine Verkürzung der Flugweite um 12 % bei der Verkleinerung des Abflugwinkels um -15° und eine Verlängerung der Flugweite um 7 % bei einer Vergrößerung des Abflugwinkels um $+15^\circ$ (Bild 4.18).

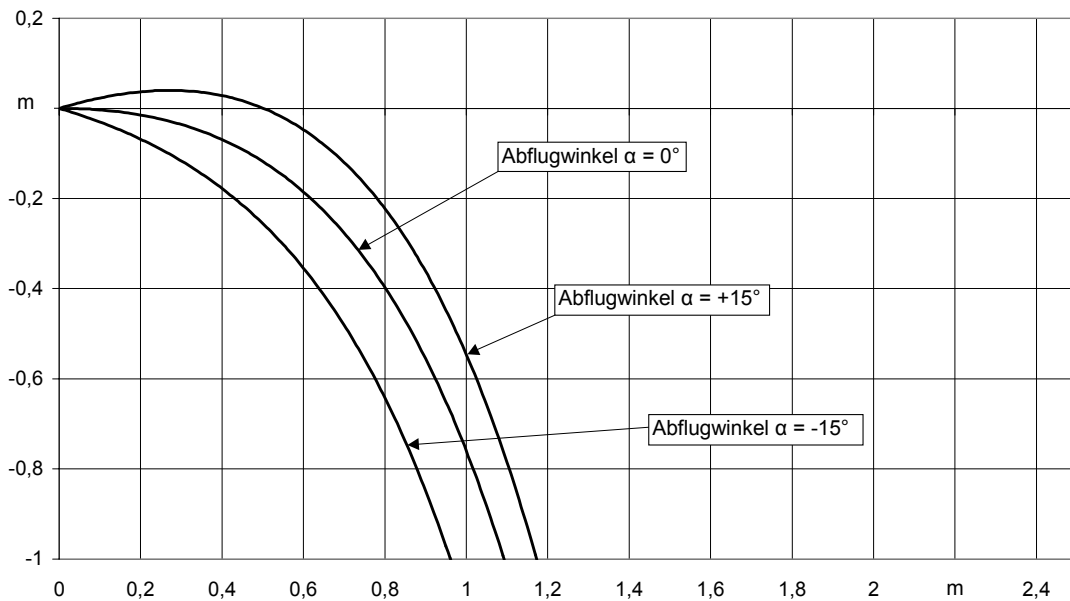


Bild 4.18: Flugweiten bei unterschiedlichen Abflugwinkeln

4.3.8 Einfluss des statischen Auftriebs F_A

Als statischer Auftrieb wirkt auf jeden Partikel eine Kraft F_A entgegen der Schwerkraft, die aus dem durch den Partikel verdrängten Fluid herrührt. Es 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 ". Für eine Abschätzung der statischen Auftriebskraft F_A wird der Partikel mit der Siebmaschenweite des Siebes, das er gerade noch passiert hat, als Partikeldurchmesser kugelförmig angenommen. Der statische Auftrieb berechnet sich nach der folgenden Formel (4.44):

$$F_A = V \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot g \quad (4.44)$$

Die statische Auftriebskraft wird bei der Berechnung betragsmäßig von der Gewichtskraft des Partikels abgezogen. Ihr Einfluss hängt von der Dichte des Partikels und von der Dichte des Fluids bzw. von deren Verhältnis zueinander ab. Näherungsweise wird das Volumen des Partikels als Kugel eingesetzt. Bei den untersuchten Spänen beträgt dieser statische Auftrieb nur ca. 0,25 % des Eigengewichts eines Partikels. Es ergibt sich somit keine messbare Flugweitendifferenz.

4.3.9 Einfluss des dynamischen Auftriebs F_{dyn}

Infolge der unsymmetrischen Umströmung eines Partikels in Abhängigkeit von dessen Körperform sind die Luftgeschwindigkeiten auf der Partikeloberseite und auf der Partikelunterseite unterschiedlich. Dadurch entwickelt sich auf einer Partikelseite ein Unterdruckgebiet

und auf der anderen Seite ein Überdruckgebiet. Die daraus resultierende Kraft auf den Körper bezeichnet man als dynamische Auftriebskraft F_{dyn} . Sie kann bei bekanntem Auftriebsbeiwert c_a nach Formel 4.45 berechnet werden.

$$F_{dyn} = c_A \cdot \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot v^2 \cdot A \quad (4.45)$$

Diese Betrachtungen werden hauptsächlich bei der Berechnung von Tragflügeln angestellt. In Bild 4.19 (links) [69] ist deshalb auch die Druckverteilung an einem Tragflügel genauer dargestellt. Allerdings sind diese aufwändigen Betrachtungen nur an speziellen Profilen möglich und sinnvoll. Dies lässt sich weiter dadurch verdeutlichen, dass der Auftriebsbeiwert c_a neben seiner Abhängigkeit von der Re-Zahl hauptsächlich von der Anstellung des Profils zur Strömung abhängt. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, entwickelte bereits Otto Lilienthal ein sogenanntes Polardiagramm, in welchem die Abhängigkeit der Anstellung eines Tragflügels zur Luftströmung und die Auswirkungen auf den c_a -Wert, welcher als Funktion des Luftwiderstandsbeiwertes c_w betrachtet wird, aufgetragen wird (Bild 4.19 rechts) [69]. Es muss an dieser Stelle noch darauf hingewiesen werden, dass die Auftriebskraft, trotz der Namensgebung auch als Abtriebskraft wirken kann (sie wurde bei der Flugbahnabschätzung als Abtriebskraft eingesetzt). Ob auf einen Körper nun eine Auf- oder Abtriebskraft wirkt, hängt nur von der Körperform und der Anstellung des Körpers zum Luftstrom ab.

Durch die Komplexität der unterschiedlichen Partikelformen und die sich permanent verändernde Anstellung der Späne im Luftstrom kann keine Aussage über den dynamischen Auftrieb von Partikeln im Luftstrom getroffen werden. Es ist allerdings anzunehmen, dass der dynamische Auftrieb sehr gering ist, da die Partikelformen oft eine stabförmige oder runde Form aufweisen, die wenig dynamischen Auftrieb bietet. Dies belegten auch Erfahrungswerte aus der Automobilindustrie. Hier wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, um den dynamischen Auftrieb von Fahrzeugen zu bestimmen, da dieser die Anpresskraft der Räder auf den Untergrund verringert [70-73]. Als Ergebnis wurde eine Verringerung der Anpresskraft des Fahrzeugs bei hohen Fahrgeschwindigkeiten bis zu 8 % ermittelt. Auch hieraus lässt sich schließen, dass der dynamische Auftrieb auf Spanpartikel gering ist und vernachlässigt werden kann.

Obwohl nicht gesagt werden kann, dass der dynamische Auftrieb die Kraft in y-Richtung des Partikels um 8 % beeinflusst, wurde eine fiktive Kraft in die negative y-Richtung (die Kraft kann je nach Partikelform auch in positive y-Richtung wirken) von 8 % der aktuellen Kraft F_y angenommen. Grundsätzlich handelt es sich jedoch bei einem Automobil wie auch bei einem Spanpartikel um einen konturierten länglichen Körper. Ein Auftriebswert eines Automobils liegt also grundsätzlich näher am Auftriebswertes eines Spanpartikels als beispielsweise ein

Tragflügel. Durch Einsatz des Wertes verringert sich die Flugbahn des Partikels nicht, da in der gewählten Schrittweite keine Flugbahnabweichung feststellbar ist.

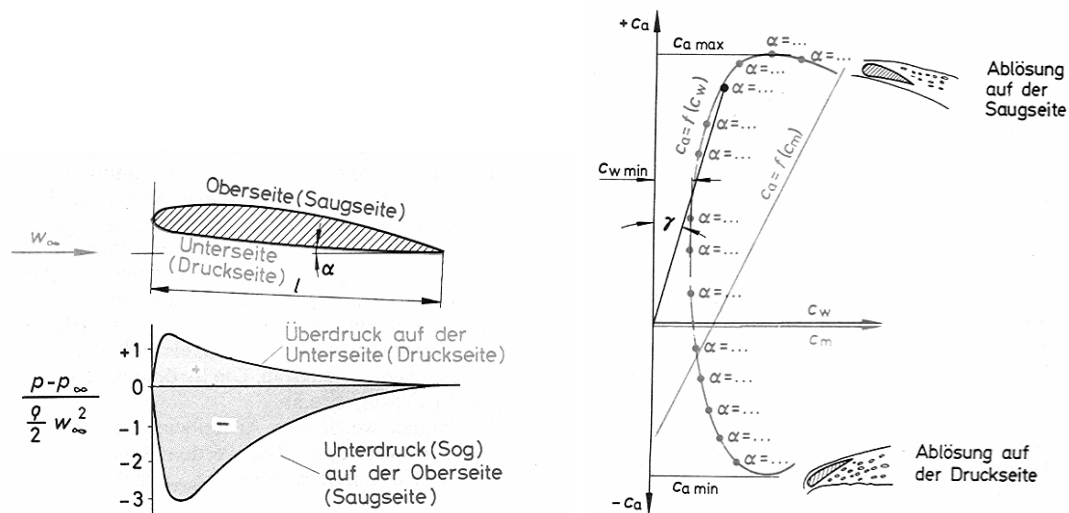


Bild 4.19: Über- und Unterdruckgebiete in Abhängigkeit von der Körperform an einem Tragflügel (linkes Teilbild); Polardiagramm nach Otto Lilienthal (rechtes Teilbild)

4.3.10 Einfluss der Coriolis-Kraft F_C

Bewegte Körper werden in einem rotierenden Bezugssystem, wie beispielsweise der Erde, aus Sicht des mitbewegten Beobachters aus ihrer geradlinigen Bewegung abgelenkt. Diese Ablenkung wird der Corioliskraft nach dem französischen Physiker Gaspard Gustave Coriolis zugeschrieben. Allerdings handelt es sich bei der Corioliskraft um eine Scheinkraft, was bedeutet, dass diese im ruhenden Bezugssystem (Inertialsystem) nicht vorhanden ist. Da es sich beim Beobachter auf der Erde immer um einen Beobachter in einem rotierenden Bezugssystem handelt, wird die Ablenkung einer geradlinigen Bewegung immer beobachtet. Eines der bekanntesten Beispiele der scheinbar auftretenden Corioliskraft ist das Foucaultsche Pendel, welches seine Pendelebene ständig verändert. Die Corioliskraft berechnet sich nach Formel 4.46:

$$F_C = 2 \cdot m_p \cdot v \cdot \omega \cdot \sin \theta \quad (4.46)$$

Die Corioliskraft hängt dabei von der Partikelgeschwindigkeit, der Kreisfrequenz der Erdrotation und dem Winkel der Bewegung zur Drehachse der Erde ab. Setzt man in die Formel eine hohe Partikelgeschwindigkeit von 100 m/s ein und geht von einer Flugrichtung in nördliche bzw. südliche Richtung ($\sin \theta = 1$) aus um die maximale Corioliskraft zu erhalten, so ergibt sich im betrachteten Flugbereich keine messbare Ablenkung.

4.3.11 Einfluss des Magnus-Effekts durch die Partikelrotation

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 v_{rel} . Durch die Fluidreibung in der Grenzschicht zwischen Luft und Span wird die Strömungsgeschwindigkeit durch die Rotation des Spanes an der Stelle 1 vergrößert und an der Stelle 2 verkleinert (siehe Bild 4.20). Die Geschwindigkeit der Luftströmung an den Stellen 1 und 2 ergibt sich somit aus Formel 4.47 und 4.48.

$$v_1 = v_{rel} + v_R \quad (4.47)$$

$$v_2 = v_{rel} - v_R \quad (4.48)$$

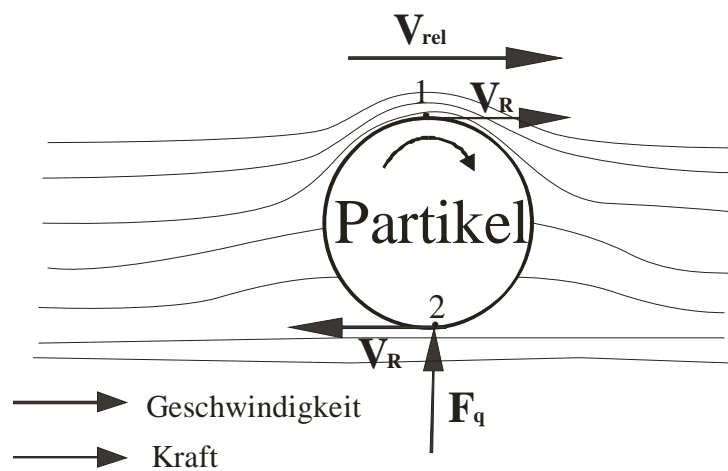


Bild 4.20: Magnuseffekt am rotierenden Partikel

Damit ergibt sich nach Bernoulli ein Druckunterschied zwischen der Oberkante und der Unterkante des Partikels. Durch diesen Druckunterschied zwischen Punkt 1 und Punkt 2 am rotierenden Zylinder wird eine Querkraft F_q am Partikel erzeugt. Sie wirkt rechtwinklig zur Strömungsrichtung und bewirkt dadurch eine Bewegung des Partikels quer zur Strömungsrichtung. Der Effekt wurde nach seinem Entdecker, dem deutschen Physiker H. G. Magnus (1802 - 1870) benannt und wirkt sich beispielsweise beim "Anschneiden" von Bällen beim Tischtennissport aus. Die Querkraft auf den Partikel lässt sich nach Formel 4.49 berechnen, wenn der Auftriebsbeiwert bekannt ist. Als Auftriebsbeiwert c_a soll nun näherungsweise der c_w -Wert der Partikel von $c_w = c_a = 20$ eingesetzt werden, obwohl es für Späne keine Anhaltswerte für die Auftriebsbeiwerte gibt. Als Rotationsgeschwindigkeit wurde eine Drehzahl von 500 1/min des Partikels angenommen.

$$F_q = c_A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (4.49)$$

Durch den sehr kleinen Durchmesser der Partikel und der dadurch sehr kleinen Differenzgeschwindigkeit an Partikelober- und -unterseite ergibt sich über der Flugweite keine messbare Flugweitenveränderung.

4.3.12 Einfluss des Rückprallwinkels beim Wandstoß von Partikeln

Im Berechnungsschema lassen sich die Wandstöße der Partikel nicht direkt untersuchen. Betrachtet man jedoch das Vorgehen bei der Simulationsrechnung (siehe Kapitel 8) näher, so zeigt sich, dass die Flugbahnen der einzelnen Partikel immer von deren Startpunkt am Werkzeug oder an der Haubenwand bis zum nächsten Wandkontakt bzw. bis zum Verlassen des Simulationsgebietes berechnet werden. Erreicht ein Partikel eine Wand oder einen Ein- bzw. Auslass des Simulationsgebietes, so wird die Flugbahnberechnung abgebrochen und eine neue Flugbahn generiert. Dazu sind neue Anfangsflugwinkel bezüglich der Wand zu ermitteln. Demzufolge kann der Einfluss des Abflugwinkels bezüglich der Partikelflugbahn im Modell, wie der Anfangsflugwinkel der ersten Flugbahn hinsichtlich seines Einflusses auf die Flugbahnberechnung bewertet werden. Analog zu Kapitel 4.3.7 wird somit die Variation des Flugwinkels bezüglich der Wand mit -15 % bis +15 % angenommen. Daraus ergeben sich dann die ebenfalls identischen Abweichungen der Flugbahn von -12 % bis + 7%.

4.3.13 Einfluss der Geschwindigkeitsreduzierung beim Wandstoß von Partikeln

In gleicher Weise wie im obigen Kapitel 4.3.12 kann die Geschwindigkeit nach dem Wandstoß eines Partikels behandelt werden. Die Rückprallgeschwindigkeit des Partikels kann als seine neue Anfangsgeschwindigkeit an der Haubenwand aufgefasst werden. Analog ergibt sich somit derselbe Einfluss auf die Partikelflugbahn wie bei der in Kapitel 4.3.4 durchgeführten Variation der Anfangsgeschwindigkeit des Partikels.

4.4 Vernachlässigte Einflüsse

Die nachfolgend aufgeführten Einflüsse müssen in der vereinfachten Simulationsrechnung vernachlässigt werden, da sie mit vertretbarem Aufwand nicht ausreichend genau spezifizierbar sind. Es soll jedoch bei allen Parametern aufgezeigt werden, wie deren Einfluss berücksichtigt werden kann. Weiter soll aufgezeigt werden, wie die dazu notwendigen Untersuchungen durchgeführt werden können. Für alle Untersuchungen ist jedoch ein Strömungskanal notwendig, wie er für die durchgeführten Untersuchungen nicht zur Verfügung stand. Es soll bei allen Parametern zumindest qualitativ abgeschätzt werden, wie groß der Einfluss auf das Simulationsergebnis sein kann.

4.4.1 Stoß zwischen Partikeln im Spänestrahle

Frei fliegende Partikel können sich im Luftstrom auf unterschiedlichste Weise tangieren und zusammenstoßen. Dabei wird kinetische Energie abgebaut und in Wärme umgesetzt. Stoßen Partikel in nennenswerter Zahl im Spänestrahle zusammen, so wird der Spänestrahle an sich abgebremst. Im betrachteten Simulationsraum um das Werkzeug haben die Partikel jedoch in der Regel nach dem Verlassen des Spanraumes die gleiche Flugrichtung und annähernd die gleiche Fluggeschwindigkeit. Das bedeutet, ein Stoß der Partikel untereinander ist nicht sehr wahrscheinlich und baut, wenn er doch stattfindet, wenig kinetische Energie ab, da die Partikel allenfalls mit geringer Geschwindigkeitsdifferenz aufeinander prallen. Der Einfluss der Partikelstöße untereinander ist somit als gering einzuschätzen.

In Ausnahmefällen, wenn Partikel durch Reflexion auf nachfolgende Partikel mit stark unterschiedlicher Flugrichtung und Geschwindigkeit aufeinanderprallen, ist eine Untersuchung des Partikelstoßes angebracht. Im Allgemeinen werden solche Spänereflexionen in Absaugelementen aber möglichst vermieden, da sie einer kontrollierten Spanabfuhr im Wege stehen. Durch eine Betrachtung einzelner Flugbahnen sind diese problematischen Punkte einer Absaughaube jedoch identifizierbar.

Untersucht werden kann die Geschwindigkeits- und Winkeländerung in einem Strömungskanal in welchen mehrere Spänesträhle mit unterschiedlichen Winkeln und Spänekonzentrationen (evtl. auch unterschiedliche Spangrößen) aufeinandergeschossen und deren anschließende Verteilung bzw. deren Ablenkung gemessen wird. Dazu wäre ein unterschiedliches Einfärben der beiden Spänesträhle hilfreich, um den genauen Ablenkungseinfluss in einem Raster, in dem die Späne aufgefangen werden, zu untersuchen. Problematisch bei diesen Untersuchungen ist der Einfluss der Luftgeschwindigkeit in der Versuchsanordnung. Einerseits sollten die Versuche möglichst ohne umgebende Luftgeschwindigkeit durchgeführt werden um die eigentlichen Stoßvorgänge zu untersuchen, andererseits ist durch das Einbringen des Spänestrahls und den anschließenden Transport der Späne zu den Auffangbehältern ein Luftstrom unvermeidlich.

4.4.2 Mehrere Partikel in unmittelbarer Nähe zueinander

Es ist bekannt, dass zwei Partikel in unmittelbarer Nähe zueinander einen anderen Luftwiderstandsbeiwert aufweisen als beide Partikel einzeln betrachtet [74]. In der Regel weisen mehrer Partikel zusammen einen kleineren c_w -Wert als die einzelnen Partikel auf. Auf diesem Hintergrund ist auch die Tragweite eines kompakten Partikelstrahls zu erklären. Bild 4.21 zeigt zwei Partikel in unmittelbarer Nähe zueinander im Luftstrom als Prinzipskizze und als Strömungsaufnahme. Dadurch wird deutlich, dass der zweite Partikel, quasi im Windschatten des ersten Partikels, den Luftstrom wesentlich geringer ablenken muss.

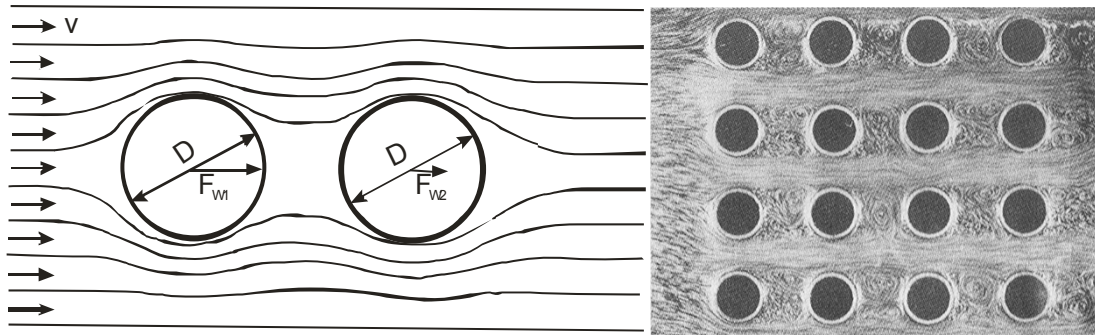


Bild 4.21: Partikel in unmittelbarer Nähe zueinander - Prinzipskizze und Strömungsbild [74]

In der Simulationsrechnung kommt dies nur in einem sehr kleinen Bereich, dem unmittelbaren Werkzeugnahfeld in Betracht. Kurz nach dem Verlassen des Spanraumes sind bei Spänen deutliche Tendenzen sich weit zu streuen zu beobachten (siehe Bild 4.22 links). Damit ist der Einfluss mehrerer Partikel in unmittelbarer Nähe zueinander in der Absaughaube als klein einzuschätzen.

Untersuchbar ist der Einfluss eines konzentrierten Spänestrahls durch das Einbringen in einen Strömungskanal mit definierter Strömungsgeschwindigkeit und definiertem Strömungsprofil. Bringt man in diesen Strömungskanal nacheinander einen Spänestrahl mit unterschiedlicher Partikeldichte ein, so kann aus der Ablenkung des Strahles in Abhängigkeit von seiner Partikeldichte der Einfluss des c_w -Wertes nahe beieinander befindlicher Partikel, abhängig von der Partikeldichte, abgeleitet werden.

4.4.3 Partikel in Wandnähe

In unmittelbarer Wandnähe werden einzelne Partikel anders umströmt als im freien Luftstrom (siehe Bild 4.22). Dies wirkt sich allerdings nur dann auf die Berechnung aus, wenn die einzelnen Partikel sich länger in Wandnähe aufhalten würden. Die geringeren Luftgeschwindigkeiten in Wandnähe werden durch die Strömungsberechnung bereits wiedergegeben. Ebenso die Stoßvorgänge der einzelnen Partikel (Kapitel 7). Somit ist der Einfluss der veränderten Umströmung der Partikeln in Wandnähe bereits über andere Untersuchungen in der Simulationsrechnung enthalten.

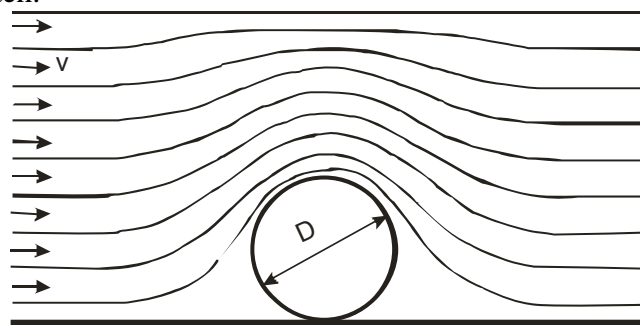


Bild 4.22: Umströmung eines Partikels in Wandnähe

4.5 Abschätzung der Einflüsse einzelner Parameter auf die Simulationsrechnung

Der Sinn dieser aufwändigen Einflussparametereinschätzung war die Feststellung welche Einflüsse besonders betrachtet und untersucht werden müssen und welche Einflüsse vernachlässigt werden können. Auch zeigt sich, welcher Aufwand zu treiben ist, um die einzelnen Parameter zu bestimmen. Bild 4.23 zeigt ein Diagramm und eine Tabelle, in welchen die einzelnen betrachteten Parameter nach ihrer Gesamtabweichung der Flugweite aufgelistet sind. Daraus ergeben sich die Luftgeschwindigkeit und der Luftwiderstandsbeiwert c_w eindeutig als die Haupteinflussparameter. Dem Haupteinflussparameter folgen die Partikeldimensionen (Masse und Querschnitt) und die Simulationsgröße Schrittweite, die sich in der Netzmaschengröße der Simulationsrechnung wiederfindet. Als noch zu berücksichtigende Parameter sind die Partikelkinematik (Geschwindigkeit und Winkel) am Anfang der Flugbahn und beim Wandstoß zu betrachten. Alle anderen Parameter werden vernachlässigt, da ihr Einfluss auf die erreichte Flugweite zu gering ist. Die Grenze der nicht mehr zu betrachtenden Parameter wird somit bei Einflussfaktoren gezogen, deren Berücksichtigung die Partikelflugweite um weniger als 5 % beeinflusst.

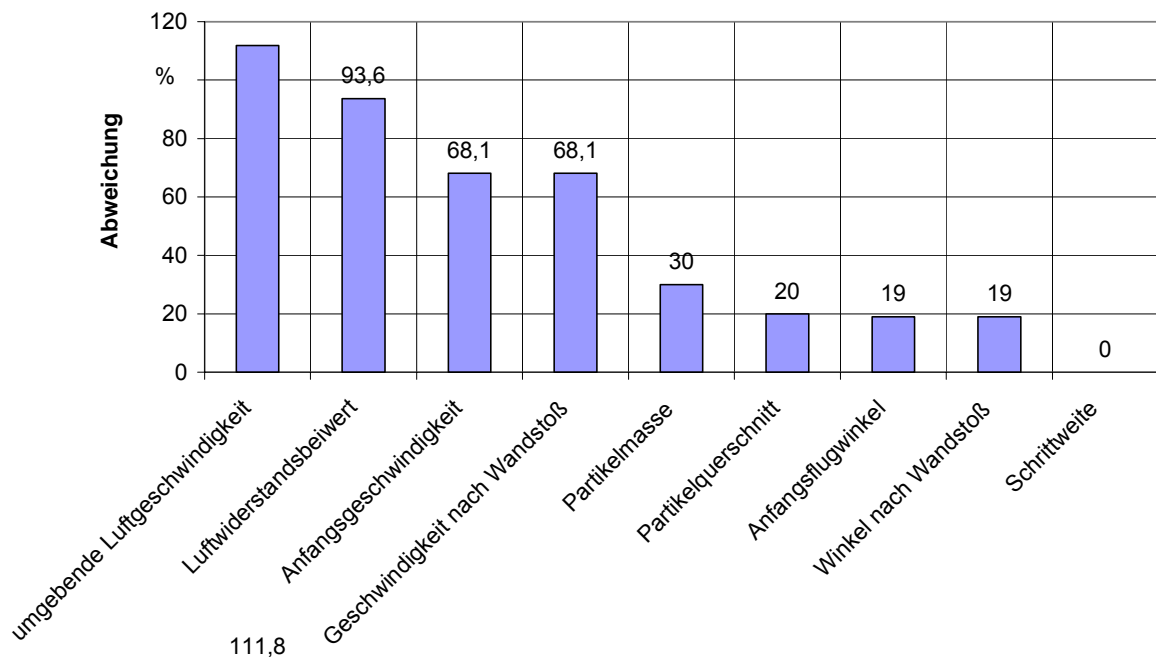


Bild 4.23: Einfluss der Parameter bei realistischer Parametervariation in % der Partikelflugweite (ohne die nicht messbaren Einflüsse)

5 Spangröße

Ein entscheidender Ausgangswert für die Flugbahnberechnung der Spanpartikel aus der Zerspaltung von unterschiedlichen Werkstoffen ist die Partikelgrößenverteilung der einzelnen Spanklassen. So haben kleine, leichte Späne grundlegend andere Flugbahnen in der bewegten Luft als große Spanpartikel. Stäube beispielsweise haben, im Vergleich zu großen Spänen, viel weniger kinetische Bewegungsenergie gespeichert und sind somit durch die sie umgebende Luft viel einfacher abzulenken als Partikel großer Masse.

Der Radius der Späne geht, betrachtet man die Späne in erster Näherung als Kugel, in der dritten Potenz über die Dichte in die Berechnung des Volumens und somit in die Gewichtskraft des Partikels ein. Je höher das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit eines Partikels jedoch ist, desto höher ist seine kinetische Energie und desto schwerer fällt es, diesen Partikel aus seiner Flugbahn durch eine Luftströmung abzulenken bzw. abzubremesen.

5.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung der Spanpartikel bezüglich ihrer Eigenschaften für die Spanflugsimulation kommt es in erster Linie auf gleich bleibende Spanformen an. So wurden Späne gleicher Spanform hauptsächlich durch Fräsen erzeugt. Es wurde versucht, möglichst unterschiedliche Spanformen aus unterschiedlichen Materialien zu erzeugen.

5.1.1 Versuchsmaschinen



Bild 5.1 Ex-Cell-O XHC 241 Bearbeitungszentrum

Die Späne wurden auf dem in Bild 5.1 abgebildeten hochdynamischen Bearbeitungszentrum XHC-241 der Fa. Ex-Cell-O durch Fräsprozesse hergestellt. Das eingesetzte Bearbeitungszentrum hat eine horizontal eingebaute Spindel mit einer Drehzahl von max. 24.000 min^{-1} (40kW), Lineardirektantriebe in allen Achsen und einen drehbaren Aufspanntisch. Die erzeugten Späne können gut und vollständig erfasst werden, da der Arbeitsraum durch abgeschrägte Flächen etc. einen freien Fall der Späne in den Späneförderer erlaubt. Die Werkstücke werden zur Spanerzeugung auf einem Aufspannwinkel aufgespannt, so dass die erzeugten Späne möglichst ungehindert nach unten fallen können.

5.1.2 Siebmaschine

Die in den Versuchen erzeugten Spanfraktionen wurden mittels Maschinensiebung mit bewegtem Siebsatz in gasförmigem, ruhendem Fluid nach DIN 66165 (Verfahren F) in Späneklassen separiert. Dafür wurde eine Vibrationssiebmaschine der Fa. Retsch eingesetzt. Bei der Siebung kamen Analysesiebe mit Drahtsiebböden nach DIN ISO 3310, Teil 1 aus der Hauptreihe R 20/3, mit den Nennmaschenweiten 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; und 8 mm zum Einsatz. Die Siebmaschine und die Siebe sind im folgenden Bild 5.2 dargestellt.



Bild 5.2: Siebmaschine und Siebsatz für Maschinensiebung

5.2 Versuchsdurchführung

Die Probewerkstücke wurden auf dem Bearbeitungszentrum Ex-Cell-O XHC 241 gespannt und mit der horizontal liegenden Spindel bei unterschiedlichen Bearbeitungsparametern (siehe Kap. 5.2.3) bearbeitet. Die nach unten fallenden Späne werden dabei möglichst vollständig aufgefangen, so dass die anschließend durchgeführte Siebanalyse ein korrektes Bild der Spangrößenverteilung ergibt. Für die Siebanalyse wurde eine ausreichend große Probemenge der gut gemischten Spanfraktion entnommen und entsprechend den vorab nach Norm ermittelten Mindestsiebzeiten analysiert.

5.2.1 Untersuchte Werkstoffe

Hauptsächlich wurden zur Herstellung der Späne GGK und AlSi9Cu3 verwendet. Beides sind in der Automobilindustrie sehr häufig eingesetzte Werkstoffe.

Die Späne aus GGK brechen in der Regel sehr kurz, es entsteht bei der Zerspaltung neben den Spänen auch eine messbare Fraktion an feinem Staub. Späne aus dem Aluminiumwerkstoff AlSi9Cu3 enthalten demgegenüber fast keine staubförmigen Partikel. Stichversuche wurden auch mit Stahlwerkstoffen durchgeführt.

5.2.2 Werkzeuge

Die Späne wurden überwiegend mit folgenden zwei Fräs Werkzeugen hergestellt:

a) Aluminium AlSi9Cu3

Zur Zerspaltung von Aluminium wurde ein Mapal Planfräskopf mit Durchmesser 160 mm und einer Zähnezahl von $z = 10$ eingesetzt. Der Planfräskopf war mit PKD-Schneiden bestückt (siehe Bild 5.3).



Bild 5.3: Mapal-Planfräskopf

b) Gußwerkstoff GGK

Zur Zerspaltung des GGK wurde ein Avantec Planfräser mit Durchmesser 63 mm und einer Zähnezahl von $z = 7$ eingesetzt. Der Planfräser war mit Hartmetallschneiden bestückt (siehe Bild 5.4).



Bild 5.4: Avantec-Planfräser

5.2.3 Schnittwerte

Die Späne wurden mit folgenden üblichen Schnittparametern hergestellt:

GGV: Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 100 \frac{m}{min}$

Zahnvorschub: $f_z = 0,1 \frac{mm}{z}$

Zustelltiefe: $a_p = 1,0 - 2,0 mm$

AlSi9Cu3: Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 2000 \frac{m}{min}$

Zahnvorschub: $f_z = 0,08 \frac{mm}{z}$

Zustelltiefe: $a_p = 1,0 - 2,0 mm$

Um Späne unterschiedlicher Größe zu erhalten, wurde bei beiden Versuchen die Zustelltiefe zwischen 1,0 mm und 2,0 mm variiert.

5.2.4 Siebanalyse

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 eines abriebfesten Stoffes dann erreicht, wenn die Masse, die in einer Minute noch durch das Sieb fällt, kleiner als 0,1 % der Masse des Aufgabegutes im Sieb beträgt. Bei der Satzsiebung ist die Siebdauer für die einzelnen Analysesiebe somit unterschiedlich. Siebe mit kleiner Öffnungsweite beteiligen sich erst dann an der Siebung, wenn die feineren Partikel die Siebe mit größeren Öffnungsweiten passiert

haben. Die Siebdauer der Satzsiebung wurde deshalb durch Vorversuche so ermittelt, dass die Siebdauer aller Siebe der Norm entsprach. Die Proben wurden dabei jeweils 5 Minuten gesiebt und die einzelnen Siebe anschließend ausgewogen. Dieser Vorgang wurde so oft wiederholt, bis die Massendifferenz der einzelnen Siebe pro Minute kleiner als die geforderten 0,1% der Aufgabemenge betrug.

5.2.5 Rechteck als Näherung des Spanquerschnitts

Im nachfolgenden Kapitel 6.1.3 wird für die Berechnung des c_w -Wertes ein Partikelquerschnitt benötigt. Es handelt sich dabei um die Querschnittfläche, welche beim Flug des Partikels gegen die Strömung gerichtet ist. Da sich ein fliegender Körper automatisch in eine Lage dreht, in welcher er der Luft den geringsten Widerstand entgegenbringt (Beispiel: Federball, Wurfspieß), ist nicht unbedingt die größte Dimension des Partikels ausschlaggebend. Wie aus Bild 6.13 ersichtlich ist, handelt es sich bei den meisten Spänen nicht um kugelförmige Gebilde. Vielmehr sind viele Späne von ihrer Körperform meist eher halbmondförmig. Eine Messung von zufällig ausgewählten Spänen einer Siebfraktion ergab, dass im 1 mm-Sieb verbliebene Späne aus GGW im Durchschnitt 0,5 mm breiter als die Schnittbreite waren. Dies lässt sich hauptsächlich durch das starke Ausfransen der Späne erklären. Aluminiumspäne haben demgegenüber eine glatte Kante, was bedeutet, dass ihre Spanbreite der Schnittbreite an der Schneidkante entspricht.

Als zweites Maß für eine Näherung des Partikelquerschnitts wird die mögliche verbleibende Breite eines diagonal durch das Sieb fallenden Partikels angenommen. Zu beachten ist dabei, dass für die Berechnung die Siebmaschenweite des nächst größeren Siebes verwendet werden muss. Bild 5.5 zeigt die angenäherte Spanquerschnittsfläche, wie sie in den Berechnungen verwendet wird.

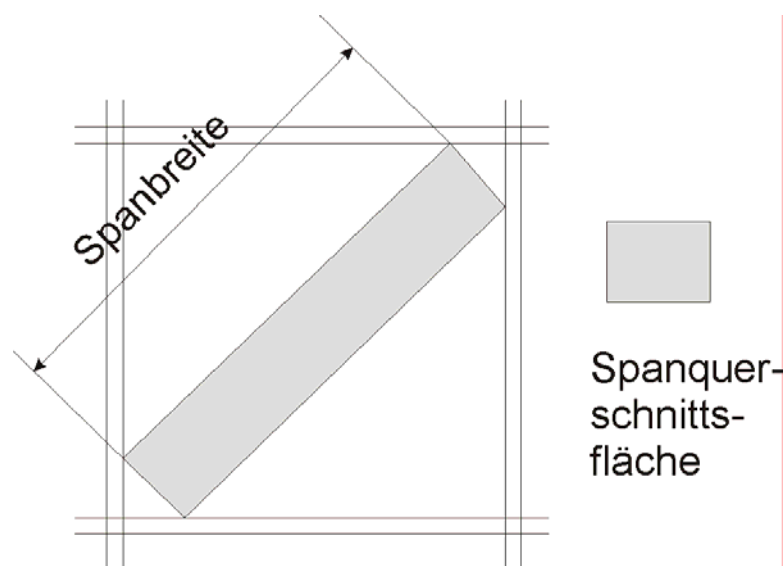


Bild 5.5: Definition eines Rechtecks in einer Siebmasche als Näherung des Partikelquerschnitts

5.3 Mathematische Umsetzung der Spangrößenverteilung

Um ein möglichst universell einsetzbares Programm zu ermöglichen, wird versucht, durch die Eingabe einiger weniger Schnittwerte (Werkstoff, Zustelltiefe, etc.) die entstehende Spangrößenverteilung durch das Programm selbstständig ermittelt zu lassen. Es gibt für die mathematische Umsetzung im Simulationsprogramm dafür zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Zum einen kann die Spangrößenverteilung der einzelnen Werkstoffe in eine Gauß'sche Normalverteilung überführt werden. Dadurch entstehen Funktionen, die es dem Simulationsprogramm erlauben, für jede Spangröße einen wahrscheinlichen Spanmassenanteil zu ermitteln. Auf der anderen Seite kann die Spangrößenverteilung der Späne auch aus den Versuchsergebnissen selbst direkt bestimmt werden und der Einfluss der Bearbeitungsparameter wird durch unterschiedliche einzulesende Kurven berücksichtigt. Nach der Diskussion beider Methoden soll abschließend festgelegt werden, welche Methode besser geeignet ist und umgesetzt werden kann.

5.3.1 Einzelspanmassen pro Siebfraction

Aus den einzelnen Siebfractionen wird durch Aufsummieren die Gesamtspanmasse ermittelt (Gleichung 5.1).

$$m_{ges} = \sum \Delta m_i \quad (5.1)$$

Aus der Gesamtspanmasse m_{ges} und der Masse der einzelnen Siebfractionen Δm ergibt sich nach Gleichung 5.2 die prozentuale Spanmasse der einzelnen Spangrößenklasse $\Delta m_{\%}$.

$$\Delta m_{\%} = \frac{100 \cdot \Delta m_i}{m_{ges}} \quad (5.2)$$

Trägt man diesen prozentualen Anteil über den Spangrößenklassen, beispielsweise für verschiedene Zustelltiefen bei der Bearbeitung von GGV und AlSi9Cu3 auf, so ergibt sich das folgende Bild 5.6.

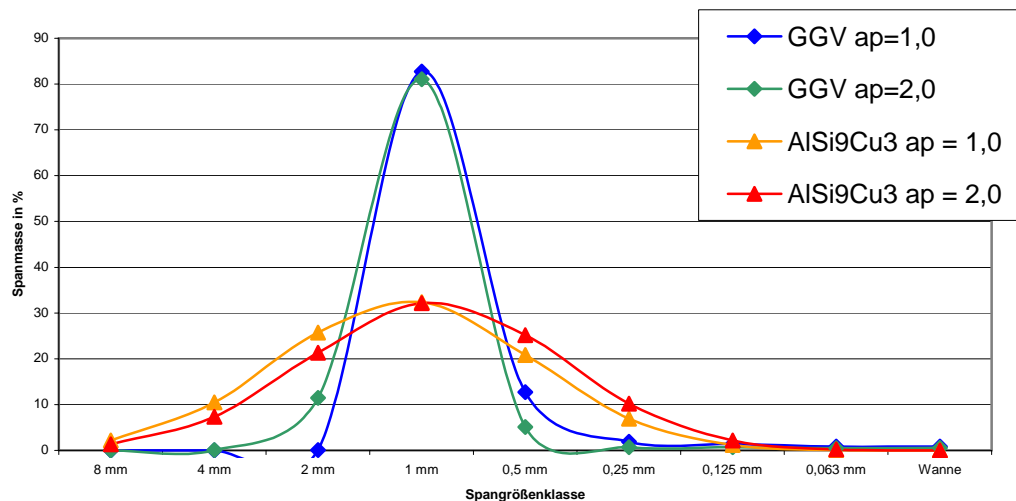


Bild 5.6: Spangrößenverteilung beim Fräsen von GGK und AlSi9Cu3 mit unterschiedlichen Zustelltiefen

Die prozentuale Massenverteilung der verschiedenen Spangrößenklassen legt einen Vergleich mit einer Gauß'schen Normalverteilung zur Überführung der Kurve in eine auswertbare Funktion nahe (Bild 5.7).

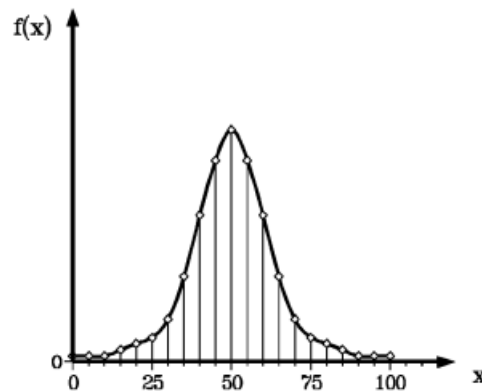


Bild 5.7: Gauß'sche Normalverteilung

5.3.2 Klasseneinteilung

Eine Gauß'sche Normalverteilung ist in der Regel die Auswertung einer Häufigkeitsverteilung der Messwerte von Stichproben. Dazu wird das Intervall in dem alle Messwerte liegen in gleich große Teilintervalle (die so genannten Klassen) eingeteilt. Dies sind hier die Spangrößenklassen. Die Klasseneinteilung geschieht nach folgenden Regeln:

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

Nun entsprechen die Spangrößenklassen in mehreren Punkten nicht den obigen Klasseneinteilungsregeln. Dies lässt sich jedoch lösen, indem die Spangrößenklassen durchnummeriert werden (Bild 5.8). Dadurch sind die verwendeten Klassen gleich groß und, wie gefordert, einfache Zahlen.

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

Bild 5.8: Ersetzen der Spangrößenklassen durch eine fortlaufende Nummerierung

Die y-Werte der Normalverteilung entsprechen üblicherweise der Summe von Messwerten aus der Stichprobe, die sich in dieser Klasse befinden. Bei der Spangrößenverteilung sind die Werte der verschiedenen Klassen jedoch Prozentanteile der Gesamtspanmasse. Um damit eine Normalverteilung errechnen zu können, werden diese Werte in fiktive Häufigkeiten von Stichproben umgewandelt. Hierzu geht man davon aus, dass die Prozente der jeweiligen Spangrößenklassen Versuchsergebnisse darstellen, die im jeweiligen Teilintervall (Klasse) liegen. So sind in der nachfolgenden Tabelle nicht 81,1 % der Spanmasse in der Größenklasse 1 mm, sondern 81,1 fiktive Proben (von 100 Proben) liegen in der Klasse 6 (vergleiche Bild 5.9). Das bei dieser Vorgehensweise keine ganzzahligen Probenanzahlen entstehen, ist nicht problematisch (siehe Regeln zur Klasseneinteilung, wo Werte, die direkt auf der Klassengrenze liegen, jeder Klasse zur Hälfte zugeteilt werden).

| Spangrößenklasse | 8 mm | 4 mm | 2 mm | 1 mm | 0,5 mm | 0,25 mm | 0,125 mm | 0,063 mm | Wanne |
|------------------|------|------|-------|-------|--------|---------|----------|----------|-------|
| Klassennummer | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| GGV $ap=2,0$ | 0,0% | 0,0% | 11,5% | 81,1% | 5,1% | 0,7% | 0,7% | 0,5% | 0,5% |

Bild 5.9: Prozentuale Spanmassenverteilung einer Siebprobe

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

- Arithmetischer Mittelwert μ
- Varianz s^2 (Angabe über die Streuung der Werte)

5.3.3 Berechnung des arithmetischen Mittelwertes

Wichtig ist hier klarzustellen, dass es sich beim arithmetischen Mittelwert nicht um den Mittelwert der Prozentwerte der Verteilung auf die Spangrößenklassen handelt, sondern um den Mittelwert der Proben. Da die Prozentwerte der Spangrößenverteilung gleich der Probenanzahl gesetzt und die Spangrößenklasse durch eine Klassennummer ersetzt wurde, ist zu bedenken, dass jetzt 81,1 Proben den Wert 6 haben. (siehe auch Bild 5.10).

| | | | | | | | | | |
|--------------------|---|-------|-------|-------|------|-----|-----|------|------|
| Probenanzahl | 0 | 0,007 | 11,47 | 81,06 | 5,13 | 0,7 | 0,7 | 0,46 | 0,53 |
| Messwert der Probe | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

Bild 5.10: Umsetzung für die Berechnungen zur Normalverteilung

Dies kann nun in die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts nach folgender Formel 5.3 eingesetzt werden.

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.3)$$

Dabei sind:

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

n = Anzahl der Stichproben

Die Aufsummierung der „Stichproben“ muss durch eine andere Form ersetzt werden (Formel 5.4), da nicht 81,1 Versuche mit dem Wert 6 addierbar sind. Hier wird jede mittlere Klassengröße mit ihrer Klassenhäufigkeit multipliziert. Dies wird als Bildung eines gewichteten Mittelwertes bezeichnet.

$$\mu = \frac{a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_9 \cdot x_9}{n} \quad (5.4)$$

Dabei sind:

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

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

n = 100

5.3.4 Berechnung der Varianz s^2

Als Maß für die Streuung werden die kleinsten Gauß'schen Fehlerquadrate eingesetzt. Dies ist die Summe der Quadrate der Einzelabweichungen. Geteilt durch die Anzahl der Stichproben ergibt sich schließlich nach Gleichung 5.5 die Varianz s^2 .

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (5.5)$$

Auch hier wird, aus den gleichen Gründen wie bei der Berechnung des Mittelwertes (gewichteter Mittelwert), wieder auf die Klassengröße und Klassenhäufigkeit zurückgegriffen und die Gleichung 5.5 in die folgende (gewichtete) Form umgestellt.

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot [a_1 \cdot (x_1 - \mu)^2 + a_2 \cdot (x_2 - \mu)^2 + \dots + a_9 \cdot (x_9 - \mu)^2] \quad (5.6)$$

Die Standardabweichung s ergibt sich aus der Wurzel der Varianz s^2 (Gleichung 5.7):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (5.7)$$

5.3.5 Berechnung der Gauß'schen Normalverteilung

Die Formel für die Gauß'sche Normalverteilung lautet folgendermaßen:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot s^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{s} \right)^2} \quad (5.8)$$

In diese Formel werden nun der gewichtete Mittelwert μ und die Varianz s^2 bzw. die Standardabweichung s eingesetzt. Der Funktionswert ergibt, da mit relativen Häufigkeiten gearbeitet wurde, immer einen Wert zwischen 0 und 1. Soll die berechnete Kurve nun mit den Prozentwerten der Spangrößenklassen aus den Versuchen vergleichbar sein, so muss die Gleichung mit dem Faktor 100 multipliziert werden (Formel 5.9).

$$f(x) = \frac{100}{\sqrt{2\pi \cdot s^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{s} \right)^2} \quad (5.9)$$

5.4 Versuchsergebnisse Spangrößenverteilung

Im Folgenden sollen nun sowohl die Späne aus GGK als auch aus AlSi9Cu3 betrachtet werden. An diesen Spänen soll dann exemplarisch untersucht werden, wie die Spangrößenverteilung der Spankollektive aufgebaut ist und wie gut sich diese Spangrößenverteilungen durch Näherungsfunktionen approximieren lassen. Durch eine Siebanalyse (siehe Kap. 5.3) werden die erzeugten Späne in unterschiedliche Spangrößenklassen separiert. Auf diese Spangrößenverteilungen wird die Gauß'sche Normalverteilung angewandt.

5.4.1 Spangrößenverteilung von AlSi9Cu3-Spänen

Bei der Bearbeitung von AlSi9Cu3 ergibt sich ein recht breites Spangrößenspektrum (Bild 5.11). Die überwiegend auftretende Spangröße mit über 30% Massenanteil sind die Späne der Größe 1 mm. Durch die Verdopplung der Zustellung ergibt sich eine leichte Verschiebung der Spangrößenverteilungskurve zu größeren Spangrößen, obwohl die Massenanteile der 1 mm-Späne nahezu identisch sind.

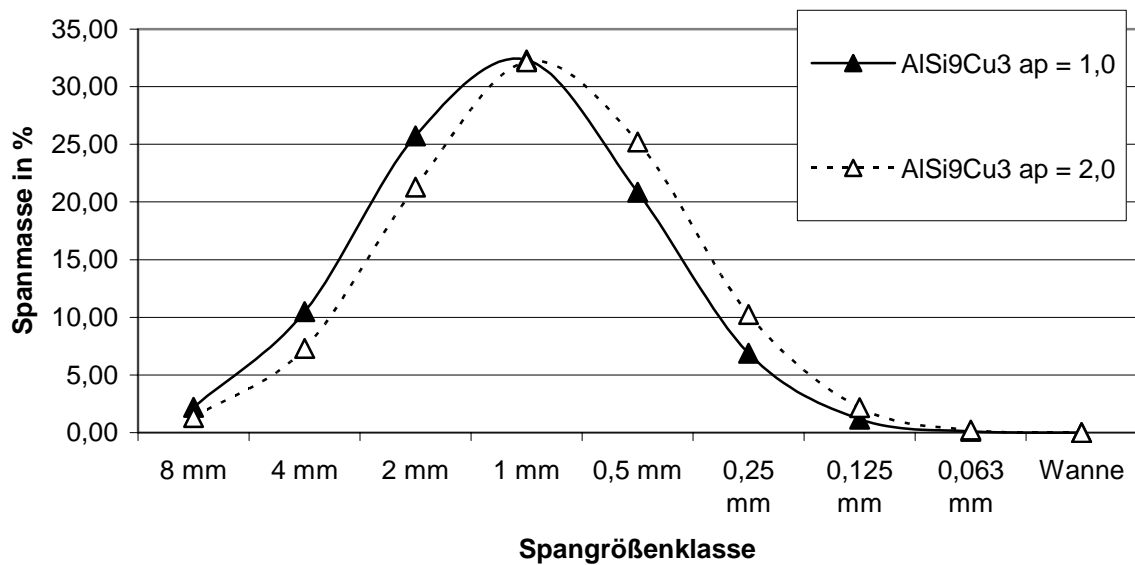


Bild 5.11: Spangrößenverteilung von AlSi9Cu3-Spänen bei unterschiedlicher Zustellung ($a_p = 1,0$ mm und $a_p = 2,0$ mm)

Ersetzt man nun den Kurvenverlauf durch eine Gauß'sche Normalverteilung, so ergibt sich, wie Bild 5.12 zeigt, eine sehr gute Übereinstimmung. Die Spangrößenverteilungen von AlSi9Cu3-Spänen lassen sich also sehr gut durch eine Gauß'sche Normalverteilung darstellen.

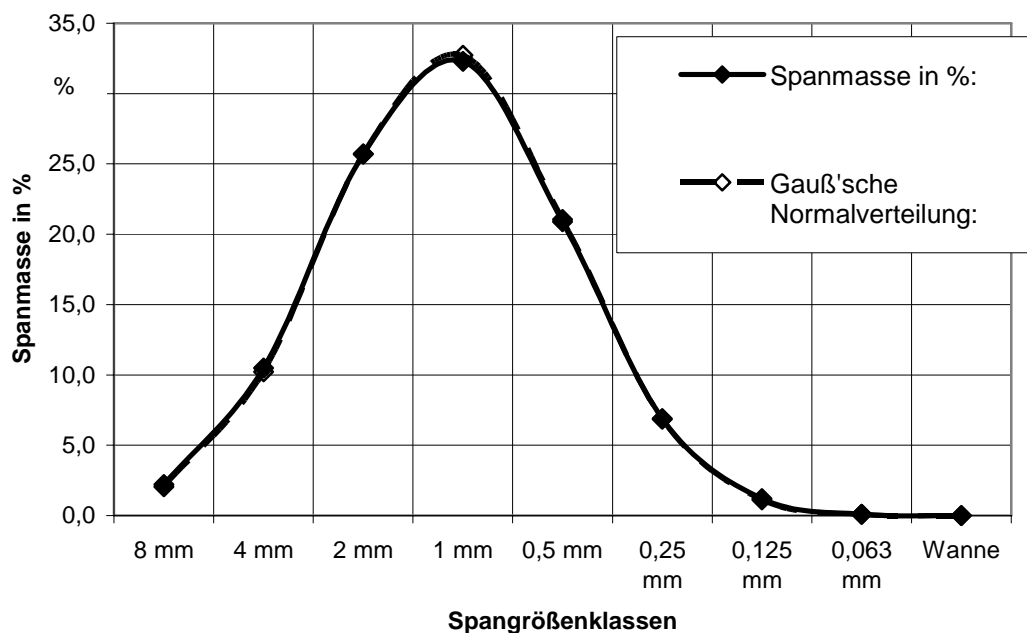


Bild 5.12: Vergleich der Sieblinie von AlSi9Cu3-Spänen mit der Gauß'schen Normalverteilung

5.4.2 Spangrößenverteilung von GGV-Spänen

Bei der Bearbeitung von GGV ergibt sich gegenüber dem Aluminium ein sehr schmales Spangrößenspektrum (Bild 5.13). Die überwiegend auftretende Spangröße mit über 80% Massenanteil sind die Späne der Größe 1 mm. Durch die Verdopplung der Zustellung ergibt sich nur eine sehr kleine Verschiebung der Spangrößenverteilungskurve zu größeren Spangrößen, obwohl die Massenanteile der 1 mm-Späne wiederum nahezu identisch sind.

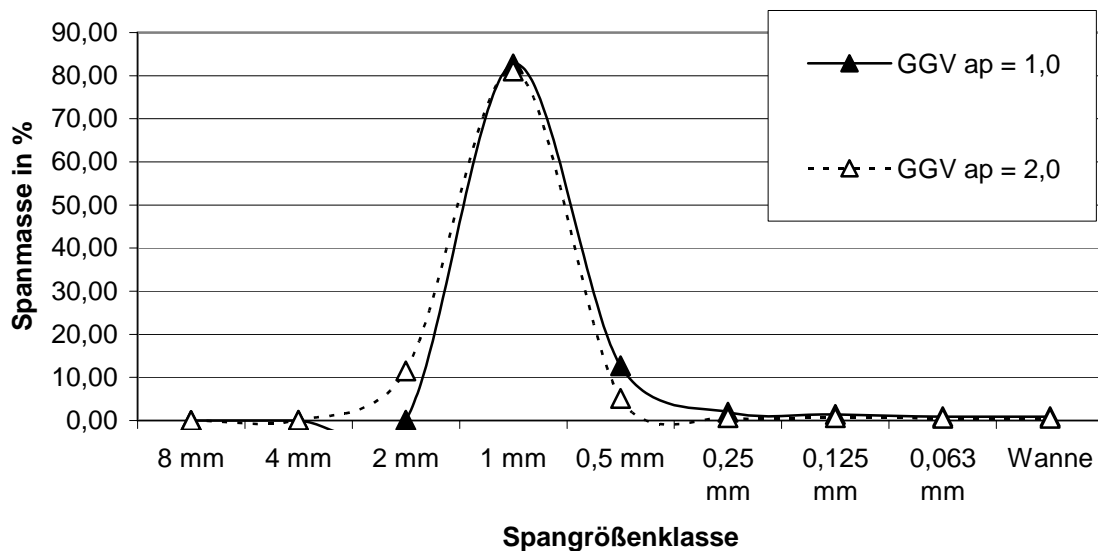


Bild 5.13: Spangrößenverteilung von GGV-Spänen bei unterschiedlicher Zustellung ($a_p = 1,0$ mm und $a_p = 2,0$ mm)

Ersetzt man nun den Kurvenverlauf der GGV-Spangrößen durch eine Gauß'sche Normalverteilung, so ergibt sich, wie Bild 5.14 zeigt, eine deutliche Abweichung von über 20% zwischen gemessener Spangrößenverteilung und der durch die Gauß'sche Normalverteilung berechneten Spangrößenverteilung. Die Spangrößenverteilungen von GGV-Spänen lassen sich also nicht ausreichend genau durch eine Gauß'schen Normalverteilung darstellen.

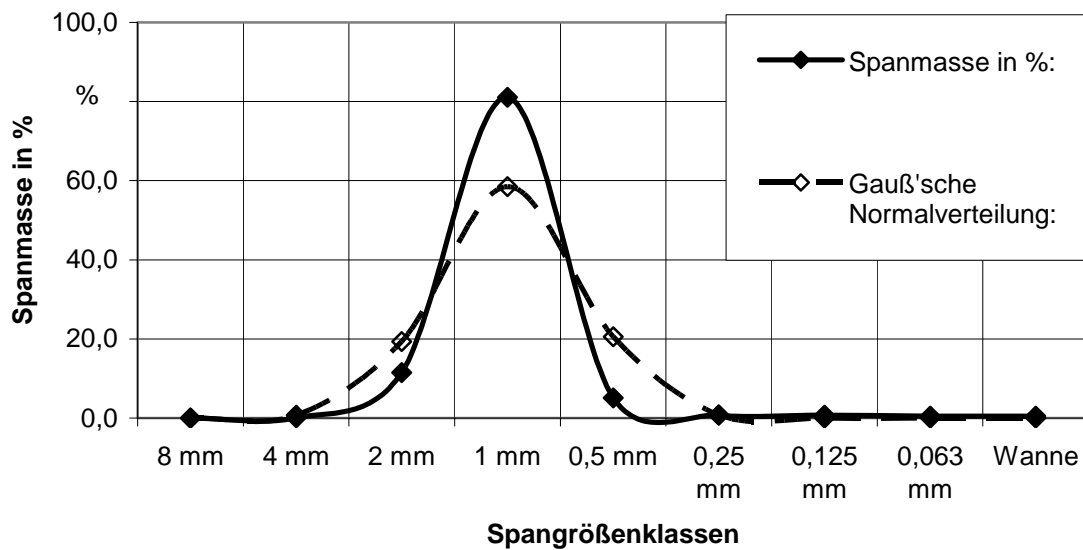


Bild 5.14: Vergleich der Sieblinie von GGV-Spänen mit der Gauß'schen Normalverteilung

5.5 Ermittlung der Spangrößenverteilung über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen

Bei der Bestimmung der Spangrößenverteilungen über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen werden, im Gegensatz zur Überführung der Versuchsergebnisse in mathematische Funktionen, die ermittelten Messwerte direkt verwendet. Dadurch entstehen keine Ungenauigkeiten aufgrund der Funktionserstellung. Je nach bearbeitetem Werkstoff wird das entsprechende Diagramm der Spangrößenverteilung eingelesen und die Wahrscheinlichkeiten in einem Zahlenstrahl entsprechend ihrem prozentualen Anteil an der Gesamtspanmenge von 0 bis 100 aufgetragen (siehe Bild 5.15).

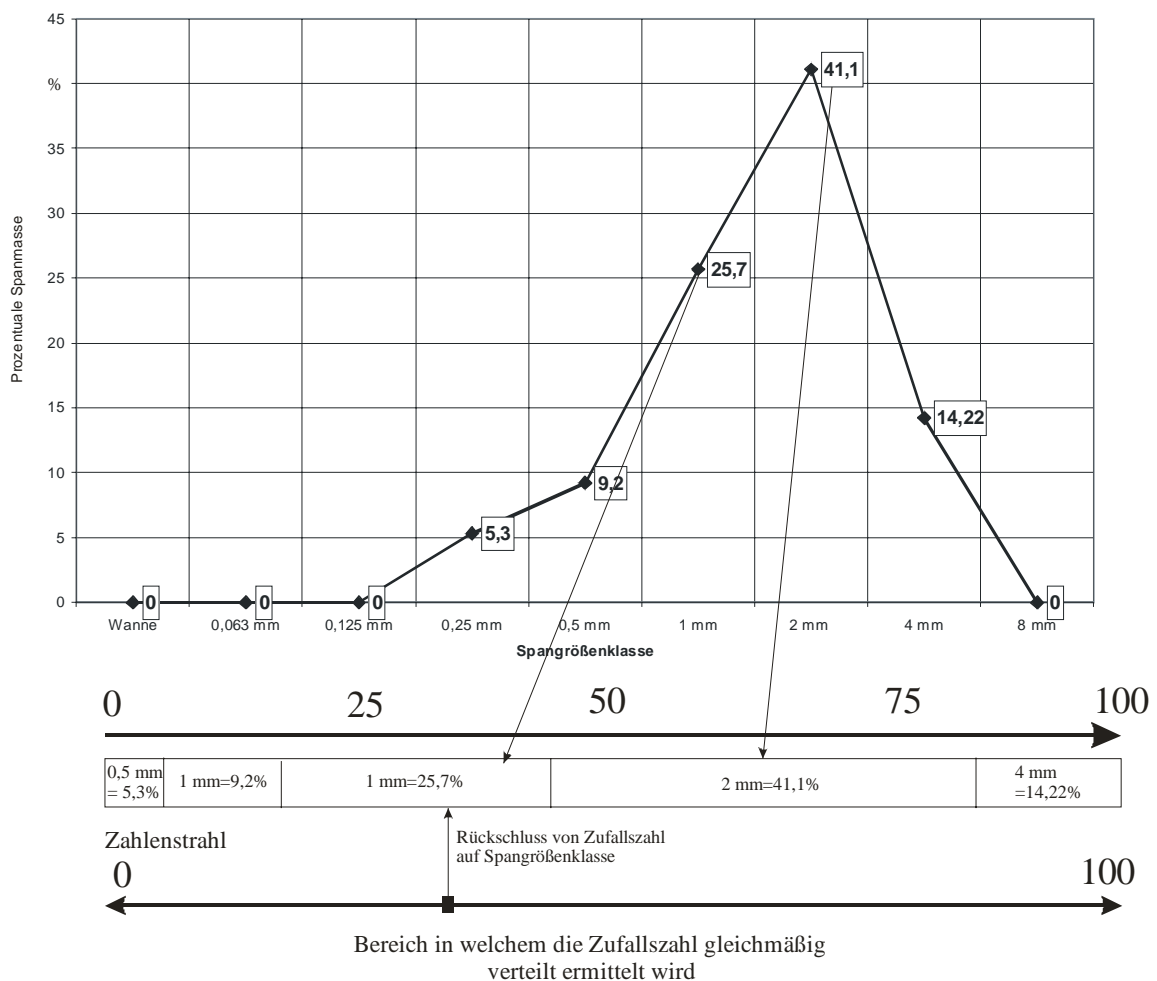


Bild 5.15: Übertragung der Messwerte der Spangrößenverteilung auf einen Zahlenstrahl zur Ermittlung einer wahrscheinlichen Spangröße als Anfangsbedingung für einen Partikel

In einem weiteren Schritt muss nun eine Zufallszahl zwischen 0 und 100 ermittelt werden. Mit der berechneten Zufallszahl wird der Zahlenstrahl abgelesen und der dort angegebene Wert der Spangröße übernommen. Da nun Spangrößen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auf dem Zahlenstrahl einen größeren Bereich einnehmen, als Spangrößen mit einer geringen Wahrscheinlichkeit, wird durch die Zufallszahl der Bereich höherer Wahrscheinlichkeit entsprechend häufiger getroffen. Dadurch entsprechen die ermittelten Spangrößen in Summe der tatsächlichen Verteilung der Spangrößenverteilung aus den Messungen.

Um dieses Verfahren jedoch einsetzen zu können, sind die Ergebnisse von Spanauswurfuntersuchungen mit einzubeziehen. Es werden über den ganzen Werkzeugumfang Späne mit nahezu gleicher Spangrößenverteilung ausgeworfen, so dass mit guter Näherung an jedem Punkt des Werkzeugumfangs mit dieser Methode zur Bestimmung der Spangröße gearbeitet werden kann. Würden die Werkzeuge über den Umfang unterschiedliche Spangrößenver-

teilungen auswerfen, so müssen diese abhängig vom Auswurfwinkel berücksichtigt werden. Dies erhöht jedoch den Aufwand des Verfahrens erheblich.

Die Spangrößen werden auf die gemessenen Spangrößenklassen beschränkt. Es wäre zwar möglich, zwischen den Spangrößenklassen zu interpolieren, allerdings kann dies, da die gemessenen Spangrößenklassen nicht linear auf der Achse verteilt sind, sondern sich jeweils von Klasse zu Klasse verdoppeln, keine lineare Interpolation sein. Die gemessenen Spangrößenklassen repräsentieren die Spangrößenverteilung jedoch ausreichend, zumal sich dadurch die Simulationsrechnung vereinfacht, da die Spanquerschnittsfläche nicht errechnet werden muss und alle nachfolgenden Versuche auf der gemessenen Spangrößenverteilung aufbauen.

5.6 Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung der Spangröße

Im Gegensatz zur problematischen Überführung der Spangrößenverteilungen in adäquate Funktionen (Gauß'sche Normalverteilungen) erweist sich die Auswertung der gemessenen Spangrößenverteilungen als sehr einfach umsetzbar. Auch halten sich die durchzuführenden Versuche für weitere Werkstoffe in engen Grenzen.

Eine genauere Umsetzung der Messwerte durch die Verwendung verschiedener Funktionen ist sicherlich erreichbar. Allerdings müssten dann entweder die berechneten Werte der Funktionen als Tabelle oder die einzelnen Funktionen über Fallunterscheidungen als Datenbank abgelegt werden.

Die einfachste Lösung stellt hier das direkte Einlesen der gemessenen Spangrößenverteilung dar. Dadurch wird die Spangrößenverteilung der Späne ohne größeren Berechnungsaufwand und vor allem ohne größere Abweichungen am genauesten wiedergegeben.

6 c_w -Wert

Wie in Kapitel 4.5 bereits gezeigt, hat der c_w -Wert, also der Luftwiderstandsbeiwert des Partikels einen großen Einfluss auf die Partikelflugbahn.

6.1 Herleitung des c_w -Wertes

Eine Teilchenbahn in einer beliebigen, exakt definierten Strömung lässt sich immer berechnen, wenn die Eintrittsbedingungen des Teilchens in die Strömung bekannt sind und nur Strömungs-, Feld- und Trägheitskräfte berücksichtigt werden. Die Bewegungsgleichung kann dann mit hinreichender Genauigkeit aufgestellt werden. Vorausgesetzt wird dabei, dass die Kräfte durch Lage und Geschwindigkeit des Teilchens bestimmt sind, und dass das Widerstandsgesetz bekannt ist. Bild 6.1 zeigt einen nicht rotierenden Partikel und die an ihm angreifenden Kräfte im Schwebezustand im Sonderfall einer rein vertikal ausgerichteten, zeitlich unveränderlichen Strömung. An diesem Beispiel soll die Definition des c_w -Wertes hergeleitet werden. Die Strömungssituation gibt das nachfolgend in Kapitel 6.2 näher beschriebene Sichtverfahren zur Messung des c_w -Wertes wieder.

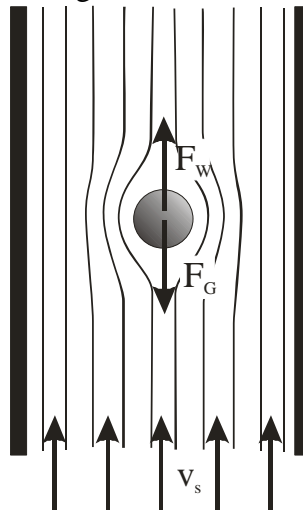


Bild 6.1: Angreifende Kräfte an einem Partikel im Schwebezustand

Am Partikel müssen sich alle angreifenden Kräfte aufheben, da er sich im Schwebezustand befinden soll. Im Einzelnen sind dies die Strömungswiderstandskraft F_w und die Gewichtskraft F_G . Beide Kräfte werden im Massenschwerpunkt des Partikels angesetzt und heben sich gegenseitig nach Formel 6.1 auf:

$$F_w + F_G = 0 \quad (6.1)$$

6.1.1 Strömungswiderstandskraft F_w

Die Strömungswiderstandskraft F_w setzt sich aus zwei unterschiedlichen Kraftkomponenten zusammen. Dies ist zum einen die Druckwiderstandskraft F_D die aus der Umströmung des

Körpers resultiert, und zum Anderen die Newtonsche Reibkraft F_R der Fluidströmung, die ebenfalls überwunden werden muss, da der Körper das Fluid verdrängt (Formel 6.2).

$$F_W = F_R + F_D \quad (6.2)$$

Die Druckwiderstandskraft hingegen setzt sich aus einem Differenzdruck vor und hinter dem Partikel Δp und der Querschnittsfläche des Partikels A , auf welchen die Druckdifferenz wirkt, zusammen. Bei diesen Betrachtungen wurde die Körperform des Partikels 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 Grund wirken sich verschiedene Körperformen unterschiedlich auf den Luftwiderstand aus. Die Körperform wird somit in der Gleichung für F_D durch einen Druckwiderstandsbeiwert c_D berücksichtigt, welcher allerdings nur über Versuche ermittelt werden kann oder auf Erfahrungswerten beruht (Formel 6.3).

$$F_D = c_D \cdot \Delta p \cdot A \quad (6.3)$$

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

$$\Delta p = \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \quad (6.4)$$

Setzt man nun Gleichung (6.4) in Gleichung (6.3) ein, so ergibt sich die Formel (6.5) für die Druckwiderstandskraft F_D :

$$F_D = c_D \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A \quad (6.5)$$

Am fliegenden Partikel müssen jedoch Reibkraft und Druckwiderstandskraft überwunden werden. In der Praxis lässt sich aber wenig über die Reibkraft aussagen. Sie ist jedoch im Vergleich zum Druckwiderstand meist relativ klein. So kann zweckmäßigerweise der Strömungswiderstand proportional zum Druckwiderstand angesetzt werden. Dabei wird ein neuer Beiwert, der Widerstandsbeiwert c_w , als Proportionalitätsfaktor verwendet, der die

Reibkraft ebenfalls mit berücksichtigt. Es ergibt sich damit folgende gute Näherung der Widerstandskraft zu:

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \cdot A \quad (6.6)$$

In dieser Gleichung (6.6) sind nun zur Berechnung der Widerstandskraft F_w , bis auf den Widerstandsbeiwert c_w , alle Variablen auf der rechten Gleichungsseite am Partikel selbst oder in der ihn umgebenden Strömung bestimmbar. Der Widerstandsbeiwert c_w ist allerdings von der Reynoldszahl abhängig, da er die Fluidreibung beinhaltet.

Direkt über Näherungsfunktionen lässt sich der c_w -Wert nur in wenigen Ausnahmefällen berechnen, die sich zumeist auf sehr kleine Re-Zahlen beschränken. In der Literatur existieren für einige einfache Grundkörperformen Angaben für diesen Beiwert, die jedoch nur im jeweils angegebenen Bereich der Reynoldszahlen gültig sind.

6.1.2 Gewichtskraft F_G

Die Gewichtskraft ist die Kraft, die das Schwerfeld der Erde auf einen Körper ausübt. Sie berechnet sich aus:

$$F_G = m \cdot g \quad (6.7)$$

6.1.3 c_w -Wert-Bestimmung

Im Sonderfall eines Partikels im Schwebezustand (Bild 6.1) kann die Geschwindigkeit v durch die Schwebebeschwindigkeit v_s (Gleichung (6.6)) ersetzt werden. Diese Gleichung kann nun mit Gleichung (6.7) der Gewichtskraft gleichgesetzt werden, da beide am Partikel angreifenden Kräfte gleich groß sein müssen, solange auf den Partikel im Schwebezustand keine Beschleunigung ausgeübt wird. Dadurch kann die Gleichung (6.8) nun nach dem c_w -Wert aufgelöst werden (Gleichung (6.9)):

$$c_w \frac{\rho_L}{2} \cdot w_s^2 \cdot A = m \cdot g \quad (6.8)$$

$$c_w = \frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho_L \cdot w_s^2 \cdot A} \quad (6.9)$$

6.2 Auswahl des Sichterprinzips

Wie aus der Herleitung des c_w -Wertes in Kapitel 6.1 ersichtlich wird, benötigt man für die Ermittlung des c_w -Wertes, neben anderen, direkt messbaren Größen, die Schwebebeschwin-

digkeit des Einzelspans. Diese Geschwindigkeit entspricht nach der Strömungslehre der maximalen freien Fallgeschwindigkeit eines Partikels in ruhender Luft.

Es zeigt sich, dass das Prinzip der Sichtanalyse, das in der Strömungsfördertechnik bereits breite Anwendung findet, bei Partikeln mit teilweise sehr geringen Abmessungen als geeignetste Lösung anzusehen ist. Nach DIN 66 160 [75] wird die Sichtanalyse als Dispersitätsanalyse definiert, bei der ein disperses Gut in einem strömenden Gas unter Einfluss von Massen- und Strömungskraften in Sinkgeschwindigkeitsklassen getrennt wird.

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

6.2.1 Mögliche Sichterprinzipien

Für die Trennung in Partikelklassen können im Wesentlichen die Prinzipien der Gegen- und Querstromsichtung angewandt werden. Die Begriffe Gegen- und Querstromsichtung leiten sich von der relativen Bewegung des Aufgabegutes im Sichter, vor der Trennung zur umgebenden Luft, ab. Bild 6.2 zeigt schematisch die unterschiedlichen Sichtungungsverfahren.

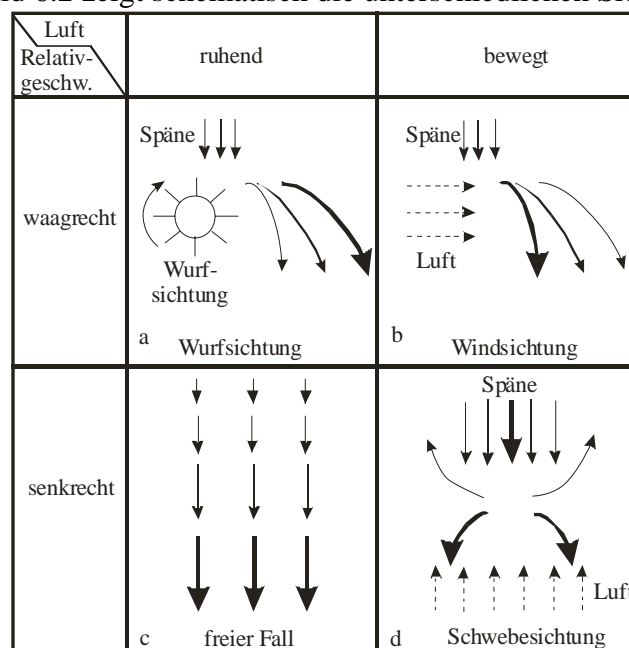


Bild 6.2: Unterschiedliche Sichtungungsverfahren (die unterschiedliche Strichdicke deutet das unterschiedliche Gewicht der Teilchen an)

Im Sichter erfolgt die Trennung des zu untersuchenden Gutes in Sinkgeschwindigkeitsklassen. Diese Trennung wird dadurch hervorgerufen, dass auf die in den Sichter einge-

brachten Partikel gleichzeitig Luftwiderstands- und Massenkräfte, jeweils von der Partikelgröße abhängig in unterschiedlicher Richtung und Größe, angreifen.

a) Wurfsichtung

Das Verfahren der Wurfsichtung beruht auf dem Prinzip der Querstromsichtung in ruhender Luft. Werden Teilchen mit einer bestimmten Anfangsgeschwindigkeit waagrecht in ruhende Luft geworfen, so erfahren diese durch die Luftwiderstandskraft eine Verzögerung, sowohl in x - als auch in y -Richtung. Teilchen, in denen das Verhältnis der Masse zur gegen die Flugrichtung angestellten Oberfläche groß ist, werden dabei weniger verzögert und fliegen weiter als solche Teilchen, bei denen dieses Verhältnis kleiner ist. Das Aufgabegut kann dadurch in beinahe beliebig viele Fraktionen getrennt werden.

Die Wurfsichtung wird bei der Fraktionierung von Spanplatten sehr häufig eingesetzt. Allerdings ist dieses Verfahren für die Messung eines c_w -Wertes ungeeignet, da die Verzögerung des Spanpartikels nicht statisch, also im Gleichgewichtsfall, geschieht. Dadurch ist es sehr schwer, den c_w -Wert über die Wurfsichtung zu bestimmen. Das verwendete Auswahlverfahren zur Beurteilung der relevanten, zu berücksichtigenden physikalischen Größen beim Partikelflug, wie es in Kapitel 4.3 beschrieben wurde, entspricht weitgehend der Wurfsichtung. In Kapitel 4.3 wird das Verfahren allerdings nur zur Abschätzung der Einflussgrößen auf die Flugbahn angewandt.

b) Windsichtung

Das Verfahren der Windsichtung entspricht der Sichtung durch den freien Fall des Partikels bei ruhender Luft, jedoch erhalten die Teilchen durch die zusätzliche waagrechte Luftwiderstandskomponente eine waagrechte Beschleunigung. Diese waagrechte Ablenkung der Teilchen, die den Luftstrom durchfallen, ist abhängig von ihrem c_w -Wert. Das heißt, sie werden unterschiedlich weit abgelenkt. Da sich auch bei der Windsichtung die Teilchen nicht im Gleichgewicht befinden, ist sie eher zur Klassifizierung unterschiedlicher Partikel geeignet als zur c_w -Wert-Messung. Zudem ist es schwierig, einen gleichmäßigen Querluftstrom, der berechenbare Bedingungen liefern kann, zu erzeugen.

c) Sichtung durch freien Fall in ruhender Luft

An einem in ruhender Luft frei fallenden Massenteilchen wirkt senkrecht nach unten die aus Masse und Erdbeschleunigung herrührende konstante Gewichtskraft. Senkrecht nach oben wirkt die von der Luftdichte, der Teilchenform und -größe und der Relativgeschwindigkeit zur Luft abhängige Luftwiderstandskraft. Das Teilchen wird so lange beschleunigt, bis beide Kräfte im Gleichgewicht sind. Theoretisch ist dieses Verfahren sehr einfach zu behandeln. Praktisch ist es jedoch fast bedeutungslos, da es nicht kontinuierlich betrieben werden kann und zudem messtechnische Probleme bereitet. So muss, um mit ihm den c_w -Wert eines

Partikels zu bestimmen, die Geschwindigkeit des einzelnen Partikels genau dann gemessen werden, wenn er sich sicher im Kräftegleichgewicht befindet, also auf Endgeschwindigkeit beschleunigt wurde. Bei den sehr kleinen zu untersuchenden Partikeln ist dies nicht ohne Schwierigkeiten möglich.

d) Schwebesichtung

Die Schwebesichtung beruht auf dem Prinzip der Gegenstromsichtung und ist ähnlich einfach wie die Sichtung durch freien Fall in ruhender Luft berechenbar. Sie unterscheidet sich lediglich durch einen nach oben gerichteten Luftstrom, der über die Widerstandskraft eine Auftriebskraft auf die Partikel ausübt. Dadurch können an den Partikeln drei unterschiedliche Zustände auftreten.

Ist die Massenkraft gleich der wirkenden Luftwiderstandskraft, so befindet sich der Span im Schwebezustand. Die Luftgeschwindigkeit entspricht der Endgeschwindigkeit des frei fallenden Partikels. Allerdings ist dieser Zustand sehr instabil und tritt durch die unweigerlich ungleichmäßige Strömungsverteilung über dem Querschnitt des Sichters praktisch bei keinem der Partikel auf.

Ist die Fallgeschwindigkeit des Partikels größer als die Anströmgeschwindigkeit im Gegenstromsichter, so fällt der Partikel nach unten und sedimentiert am Boden des Sichters. Ist die Fallgeschwindigkeit des Partikels allerdings kleiner als die Anströmgeschwindigkeit, so wird der Partikel nach oben aus dem Sichterrohr austragen. Beide Zustände, das Austragen nach oben und das Sedimentieren im Sichter sind stabile Zustände der eingebrachten Partikel.

6.2.2 Auswahl des Sichtungsverfahrens

Sowohl die Windsichtung als auch die Wurfsichtung sind für die Bestimmung des c_w -Wertes denkbar ungeeignet, da die Partikel sich nicht im Gleichgewichtszustand befinden. Die Berechnung des c_w -Wertes lässt sich somit nicht auf eine einfache Formel zurückführen.

Die Schwebesichtung ist theoretisch ähnlich einfach zu behandeln wie die Sichtung durch den freien Fall, der aus messtechnischen Gründen für die Bestimmung des c_w -Wertes ausscheidet, da es sich während der Sichtung um Gleichgewichtszustände des Partikels handelt. Im Gegensatz zum freien Fall werden bei der Gegenstromsichtung jedoch die Partikel in unterschiedliche Fraktionen getrennt. Dadurch kann das Partikelgemisch schrittweise und nacheinander in unterschiedlichen Fraktionen im Gleichgewichtszustand aufgeteilt und untersucht werden. Der c_w -Wert kann nach Kapitel 6.1.3 aus sehr einfachen Formeln bestimmt werden.

6.3 Versuchsaufbau

Die Versuchseinrichtung wurde nach der von Gonell [76] vorgeschlagenen Anordnung zur Untersuchung der Kornzusammensetzung staubförmiger Stoffe aufgebaut. Prinzipiell ent-

spricht sie auch der von Jiru [77] verwendeten Einrichtung zur Bestimmung der maximalen Luftgeschwindigkeiten für den pneumatischen Transport von Spänen und Mahlgut.

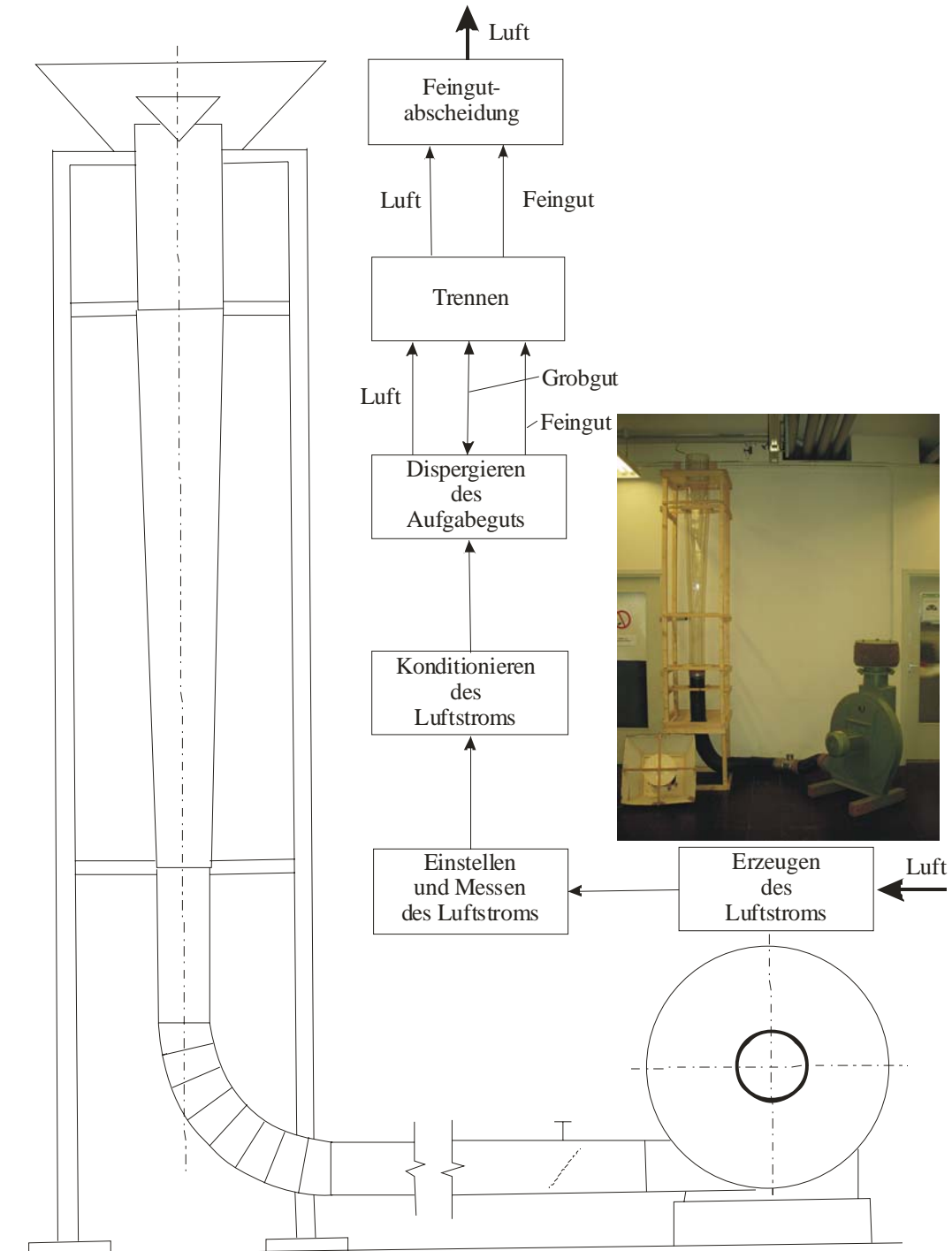


Bild 6.3: Versuchseinrichtung zur Schwebesichtung

Die für die Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit konzipierte Versuchseinrichtung zeigt Bild 6.3. Sie besteht aus einem Radialventilator zur Erzeugung einer konstanten Luft-

strömung, einer Luftklappe zur groben Anpassung der Luftgeschwindigkeit und einem Frequenzumformer zur Feinjustierung der vom Ventilator erzeugten Strömungsgeschwindigkeit. Das eigentliche Sichterrohr ist nach einer Umlenkung des Luftstromes nach oben in einem Holzgestell fixiert. Um die aus der Sichtzone ausgetragenen Partikel für die weiteren Untersuchungen aufzufangen, ist auf das Sichterrohr am oberen Ende ein abnehmbarer, trichterförmiger Spanabscheider aufgesetzt.

6.3.1 Luftführung

Die Schwebesichtung in einer Gegenströmung besteht aus mehreren, aufeinander folgenden Verfahrensschritten. Im ersten Schritt wird eine zeitlich möglichst konstante Luftströmung erzeugt, die im zweiten und dritten Schritt, vor Erreichen des Objektbodens, vermessen und gegebenenfalls durch geeignete Maßnahmen gleichmäßig eingestellt wird. Zur Erzeugung des Luftstromes wurde ein Radialventilator der Fa. Schröter Lufttechnik, mit einer Antriebsleistung von 3,1 kW eingesetzt. Dieser Ventilator ist in der Lage, einen Luftvolumenstrom von 950 m³/h zu erzeugen.

Eine Grobeinstellung der Luftgeschwindigkeit erfolgte durch eine mehr oder weniger geschlossene, manuell zu bedienende Luftklappe. Eine Feinjustierung des Luftvolumenstroms wurde über die Einstellung der Lüfterdrehzahl durch einen Frequenzumformer bewirkt. Zur Feineinstellung des Luftvolumenstromes wurde kontinuierlich die Luftgeschwindigkeit am Austritt des Sichterrohres in der Rohrmitte über ein Staurohr gemessen.

Um eine gleichmäßige Strömung über dem gesamten Rohrquerschnitt des Sichters zu erhalten, sind in der Regel lange Einlauf- und Ausgleichsstrecken von ca. 30–40 mal dem Rohrdurchmesser notwendig. Da eine Versuchseinrichtung mit derartig langen Ausgleichsstrecken eine Bauhöhe von ca. neun Metern erreichen würde, muss eine andere Möglichkeit gefunden werden, eine gleichmäßige Strömung zu erzeugen. Dies geschieht durch gezielte Einbauten im Bereich des Rohrkrümmers. Vor dem Rohrkrümmer wurde eine unterschiedlich dicke Schicht eines Filterfließes eingebaut. Die Schichtdicke richtete sich nach der Strömungsgeschwindigkeit und wurde iterativ angepasst. An Stellen höherer Luftgeschwindigkeit wurde diese somit durch eine dickere Fließschicht mit höherem Luftwiderstand der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr iterativ angepasst.

Die aus dem Spiralschlauch, der als Verbindung zwischen Lüfter und Sichter sowie als Umlenkung in die Vertikale diente, in den Krümmer austretende Strömung wies einen starken Drall auf. Da eine Drallströmung stabil ist und sich so über große Strecken im Sichterrohr fortsetzen würde, wurde nach dem Filterfließ im Krümmer ein Gleichrichter aus einem, den ganzen Rohrquerschnitt füllenden Strohhalmbündel eingebaut. Aufgrund des hohen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisses der einzelnen Strohhalme sind die austretenden Einzelströmungen drallfrei, was dazu führt, dass im Sichterrohr eine drallfreie Gesamtströmung entsteht. Bild 6.4 zeigt den Gleichrichter am Ende des Rohrkrümmers.



Bild 6.4: Gleichrichter im Rohrkrümmer

Der Strömungsgleichrichter wurde schließlich als Siehboden mit einem feinen Stoffgewebe bespannt. Dieses Stoffgewebe bewirkt, neben dem Auffangen des absitzenden Spangutes, eine siebähnliche, feine lokale Turbulenz in der Strömung, die eine ungewünschte Agglomeratbildung des Spangutes schon bei geringer Strömungsgeschwindigkeit verhindert oder beim Strömungsanlauf sofort auflöst. Aufgrund der sehr geringen Ausbreitung der Turbulenzen haben diese auf den weiteren Verlauf der Strömung keinen Einfluss.

6.3.2 Strömungsverhältnisse im Sichterrohr

Das Sichterrohr besteht aus einem zylindrischen, lotrechten Rohr. Um die Bewegung der Späne beobachten zu können, besteht dieses Rohr aus durchsichtigem Acrylglas. Am Ende des Sichterohres ist ein Auffangtrichter angebracht, in den die Späne fallen, wenn sie das Sichterrohr verlassen.

Im Sichterrohr können prinzipiell zwei unterschiedliche Strömungsprofile auftreten. Dies sind die laminare und die turbulente Rohrströmung. Bild 6.5 zeigt beide idealtypische Geschwindigkeitsverteilungen über dem Rohrquerschnitt. Beide Strömungen werden durch die Höhe der Reynoldszahl Re bestimmt, die sich wie folgt für kreisförmige Rohre definiert (Formel 6.10). Sie hängt maßgeblich von der Zähigkeit der Luft und der Strömungsgeschwindigkeit ab.

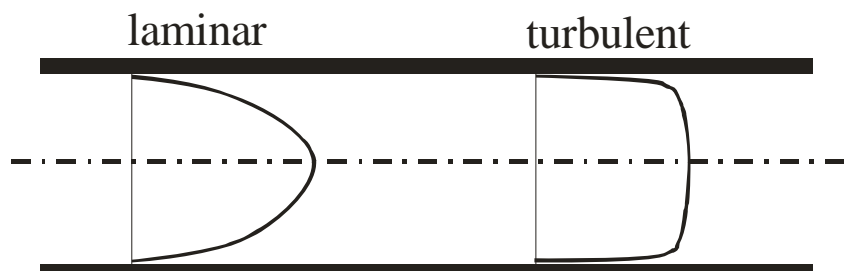


Bild 6.5: Laminare und turbulente Rohrströmung

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D}{\nu_L} \quad (6.10)$$

Der Rohrquerschnitt wurden so gewählt, dass bei allen zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten eine ausgeprägte turbulente Strömung vorhanden ist. Diese Strömungsform, die für Reynoldszahlen über $3 \cdot 10^3$ stets herrscht, ist für die Versuche aufgrund mehrerer Aspekte angeraten. In allen Absaug- und Erfassungselementen treten durchweg nur turbulente Strömungen auf, so dass der c_w -Wert eines Partikels folgerichtig auch für die turbulente Strömung ermittelt werden muss. Zudem beträgt die erforderliche Anlaufstrecke einer turbulenten Strömung nur ca. 25% der erforderlichen Anlaufstrecke einer laminaren Strömung. Dies vereinfacht die Konstruktion der Versuchseinrichtung erheblich.

Betrachtet man nun noch die Abhängigkeit der c_w -Werte von der Reynoldszahl, so ergibt sich vorteilhafterweise ein sehr großer Bereich von Reynoldszahlen, in welchen die c_w -Werte der Körper nahezu konstant sind. Im nachfolgenden Bild 6.6 ist dies exemplarisch für die Kugel- und die Zylinderform dargestellt.

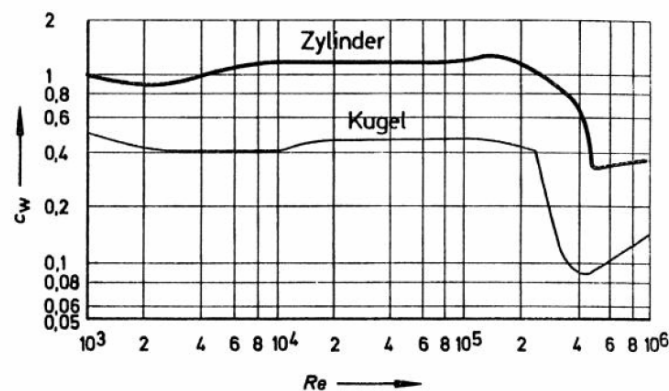


Bild 6.6: Abhängigkeit der c_w -Werte von Kugel und Zylinder von der Reynoldszahl [69]

Erst bei Reynoldszahlen über $2 \cdot 10^5$, d. h. bei Luftgeschwindigkeiten über 50 m/s im Rohr (bezogen auf den Partikeldurchmesser), die bei den Versuchen nie erreicht werden, fällt der c_w -Wert mit zunehmender Reynoldszahl stark ab.

6.3.3 Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Sichterrohr

Die zentrale Stelle im Sichter zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit befindet sich im oberen zylindrischen Teil des Acrylglasrohres. An dieser Stelle werden zwei durch die Rohrmitte verlaufende Messlinien senkrecht zueinander gelegt. Bild 6.7 zeigt das gemessene Strömungsprofil in beiden Messrichtungen. Es zeigt sich ein turbulenter Strömungsquerschnitt.

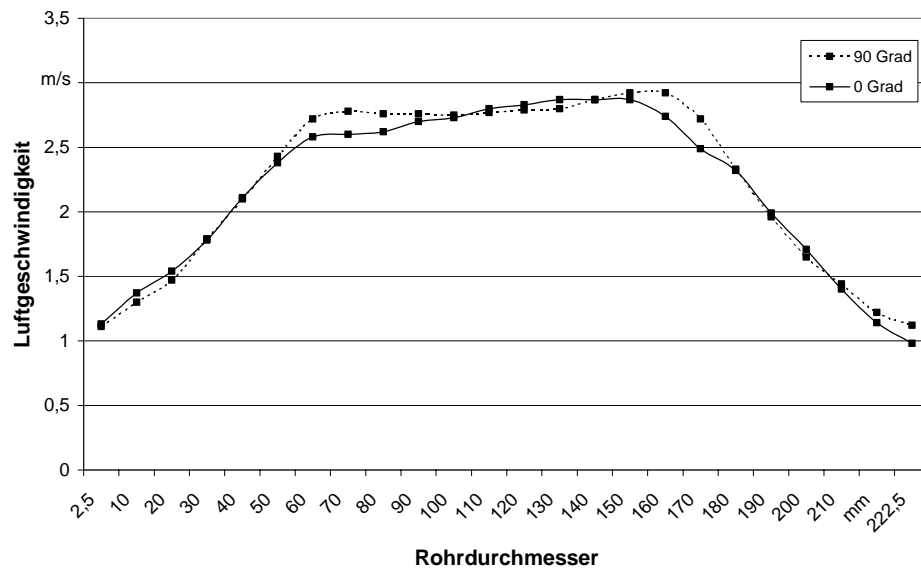


Bild 6.7: Strömungsquerschnitt der beiden senkrecht zueinander stehenden Messachsen im oberen zylindrischen Teil des Sichterrohres (neues Diagramm)

Für das Austragen der Partikel reicht es nun aus, immer in der Rohrmitte zu messen, da hier die höchste Luftgeschwindigkeit vorherrscht, die auch dafür verantwortlich ist, dass Partikel aus dem Sichterrohr nach oben ausgetragen werden. Vorversuche mit regelmäßigen Messungen des Restaustrages pro Schweb-Geschwindigkeitsstufe ergaben eine Mindest-Versuchsdauer von 15 Minuten je Geschwindigkeitsstufe.

6.3.4 Späneabscheider

Um die aus dem Sichterrohr austretenden Späne vom Luftstrom abscheiden zu können, ohne die Strömungsverhältnisse im Austrittsquerschnitt zu verändern, wurde auf das Sichterrohr ein Spänefangtrichter aufgesetzt. Da bei Vorversuchen festgestellt wurde, dass ein großer Teil der ausgetretenen Späne wieder ins Sichterrohr zurückfällt, wurde zur Vermeidung dieses Vorgangs, ein zylindrischer Kreiskegel als Strömungsteiler, der die Strömung nach dem Austritt pilzförmig nach außen ablenkt, über dem Sichterende angebracht. Bild 6.8 zeigt den Späneabscheider und das Prinzip des Strömungsteilers.

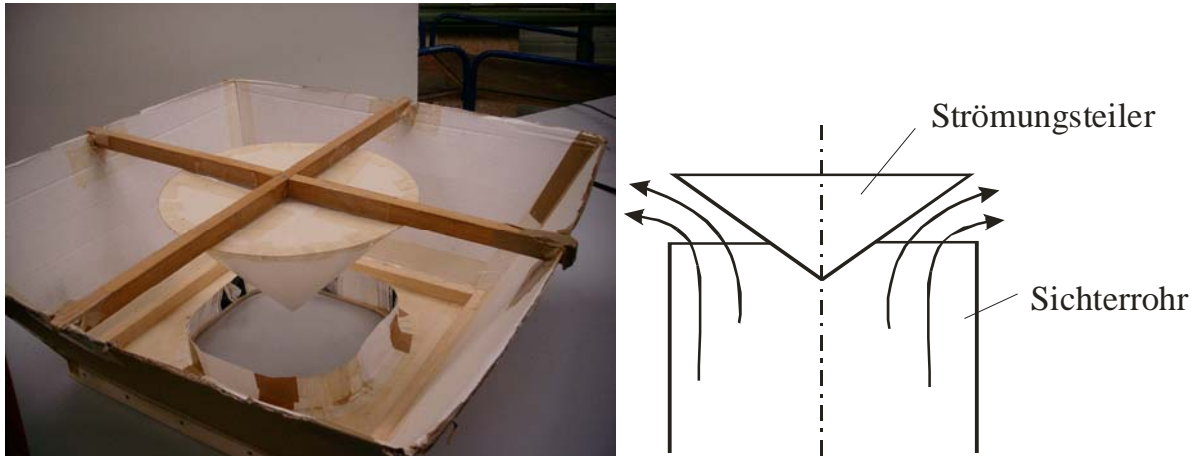


Bild 6.8: Späneabscheider und Strömungsteiler

6.4 Versuchsdurchführung

Die turbulente Geschwindigkeitsverteilung zeigt, dass die Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrachse am größten ist, von dort zur Wandung zunächst langsam abfällt und erst in unmittelbarer Nähe zur Rohrwand infolge der Reibung sehr rasch auf Null abfällt (Bild 6.7). Aus dieser physikalischen Tatsache, der über den Sichterraumquerschnitt ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung, die auch nicht durch konstruktive Maßnahmen zu umgehen ist, ergeben sich spezielle Anforderungen an das Sichtverfahren.

6.4.1 Schwebegeschwindigkeit

So wurde, um die zur späteren Berechnung des c_w -Wertes erforderliche Schwebegeschwindigkeit möglichst genau bestimmen zu können, nur der Bereich der maximalen Strömungsgeschwindigkeit betrachtet. Diese maßgebliche Luftgeschwindigkeit, die nur im Bereich der Rohrachse herrscht, wurde durch die Strömungsmesssonde gemessen. Es kann nicht mit einer über den Messraumquerschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeit gearbeitet werden, da dadurch die Sichtschärfe sehr stark abnehmen würde.

Nach dem Befüllen des Sichters mit dem zu untersuchenden Spankollktiv wurde die Luftgeschwindigkeit mittels des Frequenzumformers so lange erhöht, bis aus dem betrachteten Bereich in der Rohrmitte die ersten Partikel ausgetragen wurden. Es kann dabei angenommen werden, dass dies durch die gemessene maximale Strömungsgeschwindigkeit im Strömungsprofil geschah und diese der Schwebegeschwindigkeit der ausgetretenen Späne nahezu entspricht. Diese Geschwindigkeit wurde über einen längeren, später näher erläuterten Zeitraum durch Nachstellen mittels des Frequenzumformers konstant gehalten, um allen Partikeln dieser Schwebegeschwindigkeitsklasse ausreichend Zeit zum Austritt aus dem Sichter zu gewähren.

Da sich der Widerstand im Sichterrohr durch die geringer werdende Partikelkonzentration vermindert, was zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt, muss die Geschwin-

digkeit während der Sichtung überwacht und mittels des Frequenzumformers durch Nachstellen konstant gehalten werden. Nach Ablauf der erforderlichen Sichtzeit wurde der Späneabscheider vom Sichterende abgenommen, um die darin befindliche Spänemenge zu entnehmen.

Nach dem Wiederaufsetzen des Späneabscheiders auf das Sichterende wurde die Luftgeschwindigkeit jeweils um einen Schritt der Schrittweite 0,5 m/s erhöht. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis die Geschwindigkeit erreicht war, bei der der letzte Span aus dem Sichter ausgetragen wurde. Bild 6.9 zeigt exemplarisch ein bei der Sichtung aufgenommenes Datenprotokoll.

| Strömungs- geschwindigkeit | Partikelauwurf in g bei Nennmaschenweite | | | |
|-------------------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ap=1 | | ap=2 | |
| | ALSi9Cu3 1mm | ALSi9Cu3 2mm | ALSi9Cu3 1mm | ALSi9Cu3 2mm |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,2 | 0,076 | 0 | 0 | 0 |
| 1,4 | 0,006 | 0 | 0 | 0 |
| 1,6 | 0,172 | 0,012 | 0 | 0 |
| 1,8 | 1,91 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 12,4 | 0,2 | 1,08 | 0 |
| 2,2 | 6,8 | 2,12 | 1,16 | 1,36 |
| 2,4 | 5,4 | 4,652 | 1,68 | 1,6 |
| 2,6 | 15 | 4,9 | 2,8 | 2,08 |
| 2,8 | 3 | 6,88 | 9,32 | 2,4 |
| 3 | 23,2 | 3,44 | 21,04 | 7,88 |
| 3,2 | 23,3 | 13,36 | 49,8 | 12,2 |
| 3,4 | 2,86 | 45 | 10,12 | 33,6 |
| 3,6 | 1,74 | 11,84 | 1,4 | 24,2 |
| 3,8 | 0 | 1,2 | 0,2 | 9,68 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 2,12 |
| 4,2 | 0 | 0 | 0 | 0,56 |
| 4,4 | 0 | 0 | 0 | 0,57 |

Bild 6.9: Datenblatt der Sichteruntersuchung

6.4.2 Spanmenge pro Sichtung

In Vorversuchen hat es sich gezeigt, dass es für ein gutes Sichterergebnis wichtig ist, den Sichter mit einer Spanmenge zu beladen, die nicht zu groß ist. Da die Partikel im Luftstrom senkrechte und waagrechte Bewegungen ausführen, steigt bei einer hohen Konzentration im Sichterraum die Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen zwischen den einzelnen Spänen. Damit ist ein Energieaustausch zwischen den Stoßpartnern verbunden [78]. Das Teilchen benötigt wieder eine freie Weglänge, um auf den vorangegangenen Zustand beschleunigt zu

werden. Die dazu notwendige Energie wird der umgebenden Luft entnommen. Die freie Weglänge wird mit steigender Konzentration jedoch immer geringer und damit auch die Möglichkeit der Wiederbeschleunigung. Dies würde im durchgeführten Sichtversuch dazu führen, dass für die Späne eine zu hohe Schwebegeschwindigkeit ermittelt würde. Die zulässige spezifische Beladung der Sichterluft ist eine Funktion der Korngröße bzw. der Endfallgeschwindigkeit des Partikels, wobei die zulässige Beladung mit wachsender Partikelgröße zunimmt [79].

6.4.3 Bestimmung der Sichtzeit einer Geschwindigkeitsstufe

Beim Sichtvorgang verlassen die Teilchen, die zur Trenngrenze der entsprechenden Größenklasse gehören, das Sichterrohr nur mit sehr kleinen Austragsgeschwindigkeiten. Da im ausgewählten Sichtverfahren der Spanaustritt nur im Bereich der Rohrachse stattfindet, muss die Laufzeit des Versuchs so gewählt werden, dass alle zur eingestellten Geschwindigkeitsklasse zugehörigen Partikel die Möglichkeit haben, auszutreten. Ein Span hält sich jedoch bei diesem Verfahren nur kurz im Bereich der höchsten Geschwindigkeit nahe der Rohrachse auf und fällt dann schnell wieder in die durch Reibung verzögerten äußeren Strömungsschichten zurück. Da ein Span durch diesen Vorgang meist mehrere Anläufe benötigt, um die Trennzone zu überwinden, muss die Sichtzeit ausreichend groß bemessen werden. Der zeitliche Verlauf des Austrags folgt, wie durch frühere Versuche [78] festgestellt wurde, einer Exponentialfunktion der Form:

$$m_t = m_0(1 - e^{-kt}) \quad (6.11)$$

In der Formel stellt m_0 die Spänemenge zur Zeit $t = 0$, m_t die Spänemenge, die zur Zeit t ausgetragen wird und k eine Konstante dar, die mit steigender Differenzgeschwindigkeit der Späne wächst.

6.4.4 Dispergieren des Aufgabegutes

Um das in den Sichter eingefüllte Partikelkollektiv möglichst genau in Schwebegeschwindigkeitsklassen aufteilen zu können, müssen die Späne in der Trennzone als Einzelpartikel vorliegen. Dieses als Dispergieren bezeichnete Verfahren muss an die zu untersuchende Partikelzusammensetzung angepasst werden. Nach DIN 66118 Punkt 5 [80] können dazu unterschiedliche Maßnahmen eingesetzt und kombiniert werden. Da die meisten Dispergierhilfen jedoch entweder zu komplex oder mit einer möglichen Zerkleinerung des Aufgabegutes behaftet sind, wurde nur das Klopfen zum Aufrütteln Späne am Boden des Sichterrohrs während des Versuches angewandt.

6.5 Versuchsergebnisse

Aus den vorangegangenen Betrachtungen lassen sich alle Werte ermitteln, die für die Berechnung des c_w -Wertes einer Partikelklasse notwendig sind. Zuerst soll jedoch nochmals kurz auf die ermittelten Schwebegeschwindigkeitsverteilungsdiagramme eingegangen werden.

6.5.1 Ermittelte Schwebegeschwindigkeiten

Aus den in Kapitel 6.4.1 dargestellten Datentabellen lässt sich der prozentuale Späneaustrag je Strömungsgeschwindigkeitsstufe berechnen. Mit den dadurch ermittelten Werten wurde ein Diagramm, das die prozentuale Verteilung der ausgetragenen Partikelmasse über der Strömungsgeschwindigkeit zeigt, erstellt. Bild 6.10 stellt exemplarisch solch ein Diagramm der Schwebegeschwindigkeitsverteilung für zwei Proben dar.

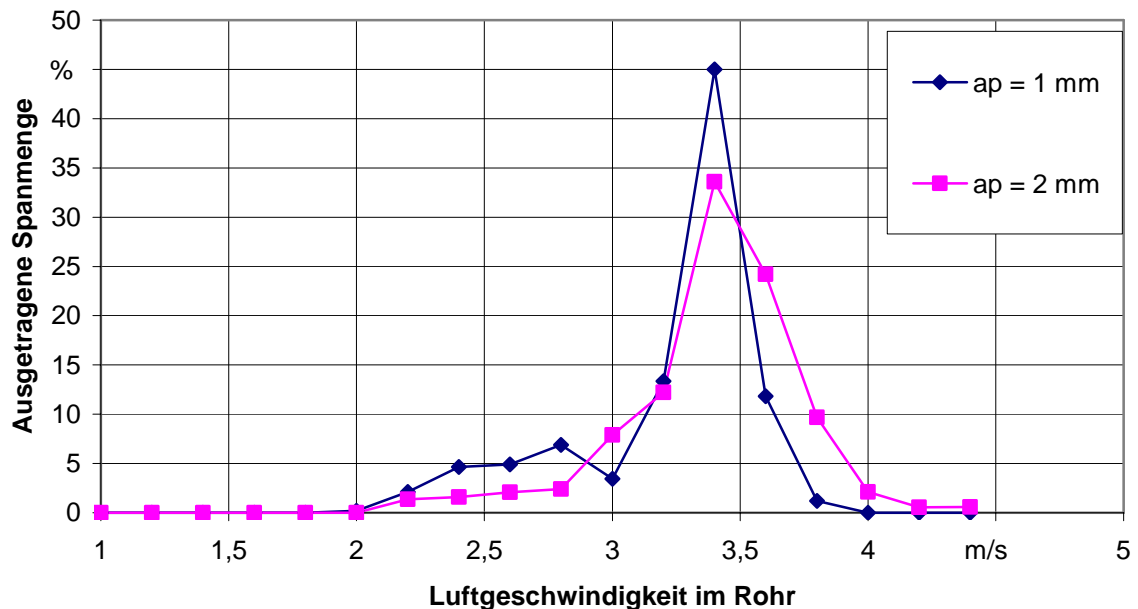


Bild 6.10: Schwebegeschwindigkeitsverteilung von AlSi9Cu3-Spänen

Wie zu erwarten war, verschiebt sich die Verteilungskurve des Spanaustrags mit größer werdender Partikelgrößenklasse und somit massereicheren Spänen zu höheren Schwebegeschwindigkeiten hin (wenn auch nur sehr gering). Dabei bleibt die Form der Verteilung prinzipiell erhalten, es verschiebt sich nur das Maximum der ausgetretenen Späne bei größeren Spänen zu höheren Luftgeschwindigkeiten hin. Dies tritt bei allen untersuchten Bearbeitungsverfahren und Werkstoffen auf.

6.5.2 Ermittelte c_w -Wert-Verläufe

Wird nun aus den bekannten Parametern der Strömung und der Partikelabmessungen für jeden Messpunkt der c_w -Wert berechnet, so ergeben sich, wie nachfolgend exemplarisch für AlSi9Cu3 (mit 2 mm Zustellung) dargestellt, ein Verlauf des c_w -Wertes über der Strömungsgeschwindigkeit (siehe Bild 6.11). Dabei wurde die Querschnittsfläche des Spanes nach bekannter Näherung aus der Siebmaschenweite und das Spangewicht als Durchschnittsmasse aus ca. 100 Spanpartikeln ermittelt. Die Schwebegeschwindigkeit wurde dabei mit der Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Rohrquerschnitt gleichgesetzt.

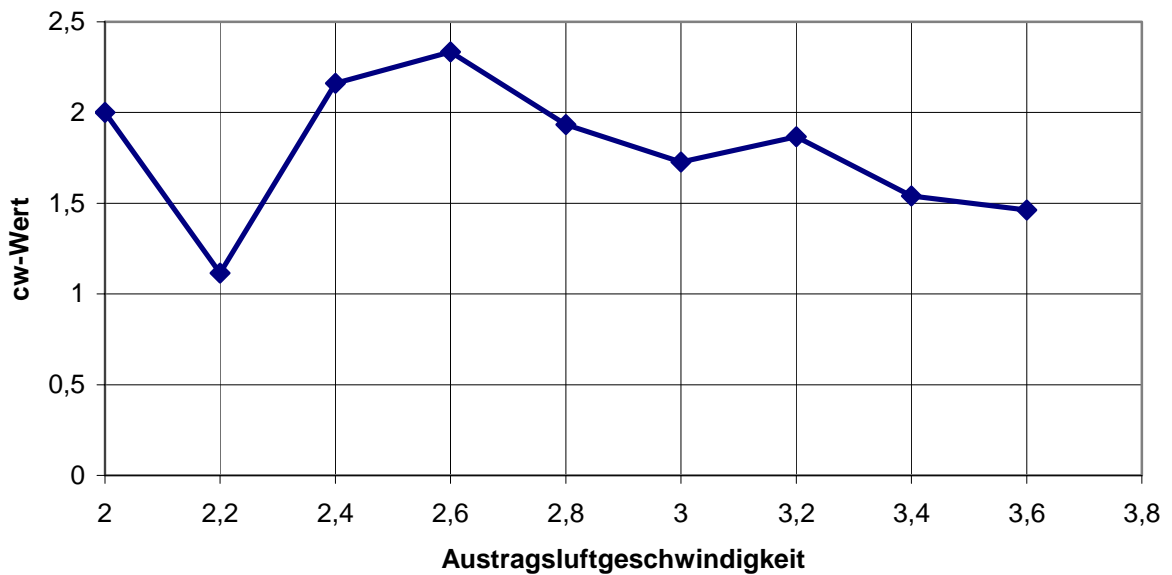


Bild 6.11: c_w -Wertverlauf des Werkstoffs AlSi9Cu3 bei $a_p = 1$ mm

6.5.3 Vergleich der gemessenen c_w -Wert-Verläufe mit bekannten Luftwiderstandsbeiwerten

Vergleicht man nun die gemessenen c_w -Werte mit allgemeinen c_w -Werten aus der Literatur, so ist ersichtlich, dass die errechneten c_w -Werte in der erwarteten Größenordnung liegen. Bild 6.12 zeigt eine Auswahl bekannter Luftwiderstandsbeiwerte.

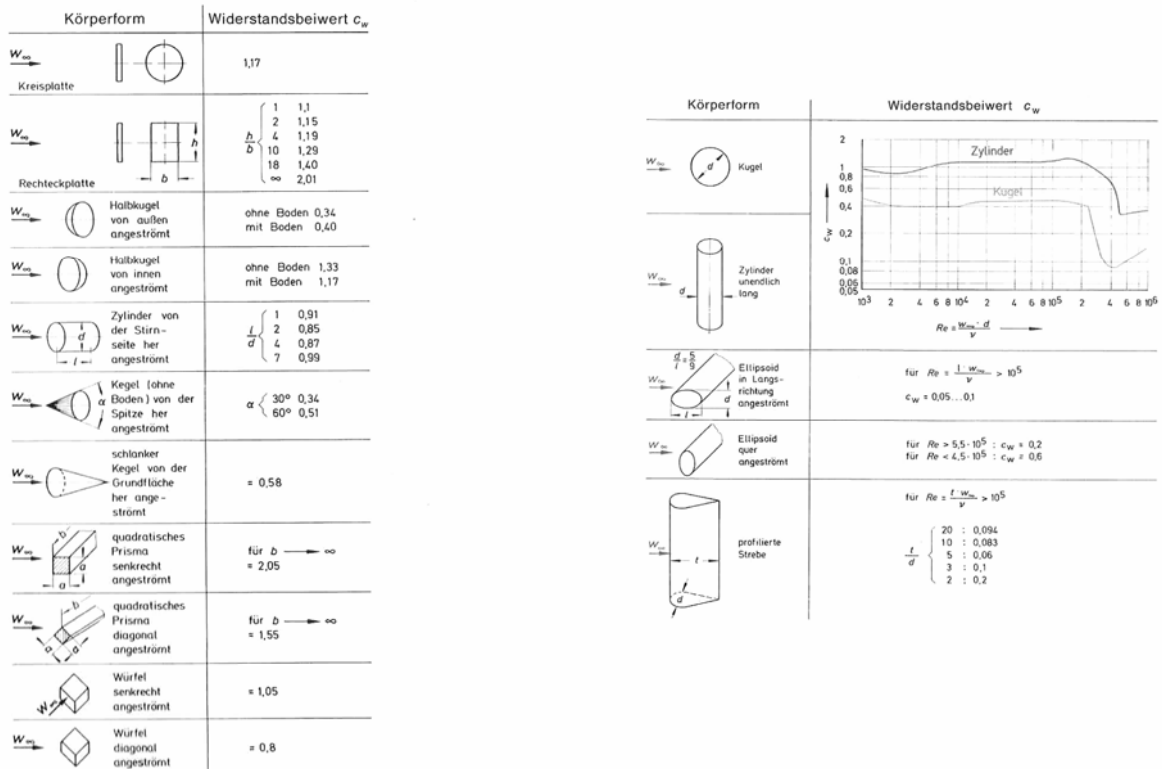


Bild 6.12: Luftwiderstandsbeiwerte umströmter Körper aus [74]

6.6 Mathematische Umsetzung der Versuchsergebnisse

Ziel der mathematischen Umsetzung der gemessenen c_w -Werte ist ein allgemeingültiger Zusammenhang, der im Simulationsprogramm abhängig vom Werkstoff der Spangröße an jedem Punkt der Rechnung zu einem gültigen Luftwiderstandsbeiwert führt.

6.6.1 Gemessene c_w -Werte bezüglich der Reynoldszahl

Es gilt zu beachten, dass der Luftwiderstandsbeiwert c_w jedes Körpers von der Reynoldszahl Re der Strömung abhängig sind. Allerdings konnten die Luftwiderstandsbeiwerte nur in einem konkreten Zustand, dem Schwebезustand des Partikels, gemessen werden. Somit existieren auch nur für eine einzelne Re -Zahl konkrete Messergebnisse. Um die gemessenen c_w -Werte nun auf die Reynoldszahl zu beziehen, wird als erstes die Reynoldszahl für einen umströmten Körper im Luftstrom benötigt. Die Reynoldszahl, erstmals von dem englischen Physiker Osborne Reynolds angegeben, ist definiert als Quotient aus dem Produkt der Geschwindigkeit mal einer charakteristischen Länge und der kinematischen Zähigkeit des Fluids (siehe Formel 6.10) [74].

Nach Wagner [74] ergibt sich die charakteristische Länge L bei einer Ellipse nach Formel 7.12 und 7.13:

$$L = 1,3H \quad \text{bei } B/H = 2 \quad (7.12)$$

$$L = 1,57H \quad \text{bei } B/H = \infty \quad (7.13)$$

Dabei ist B die Breite und H die Höhe der Ellipse. Setzt man die Definition des Partikelquerschnitts, die als Näherung verwendet wurde, aus Kapitel 4.4.6 an, so ergibt sich:

$$B/H = 3/2 = 1,5 \quad (7.14)$$

Demzufolge wird die charakteristische Länge L zu $1,3 H$ gesetzt. Als Luftgeschwindigkeit wird die in den Versuchen zum Austrag der Partikel benötigte Luftgeschwindigkeit in der Rohrmitte eingesetzt.

Es wird angenommen, dass die Partikelform sich nicht grundlegend mit der Spangröße ändert. Vielmehr ändert sich die Partikelform hauptsächlich zwischen unterschiedlichen Werkstoffen. Vergleicht man die Späne unterschiedlicher Werkstoffe aber gleicher Spangröße (Bild 6.14) miteinander, so ergeben sich deutlichere Unterschiede in der Spanform. Bei den unterschiedlichen Werkstoffen sind beispielsweise die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen zu erkennen, die einen veränderten Luftwiderstand bewirken.

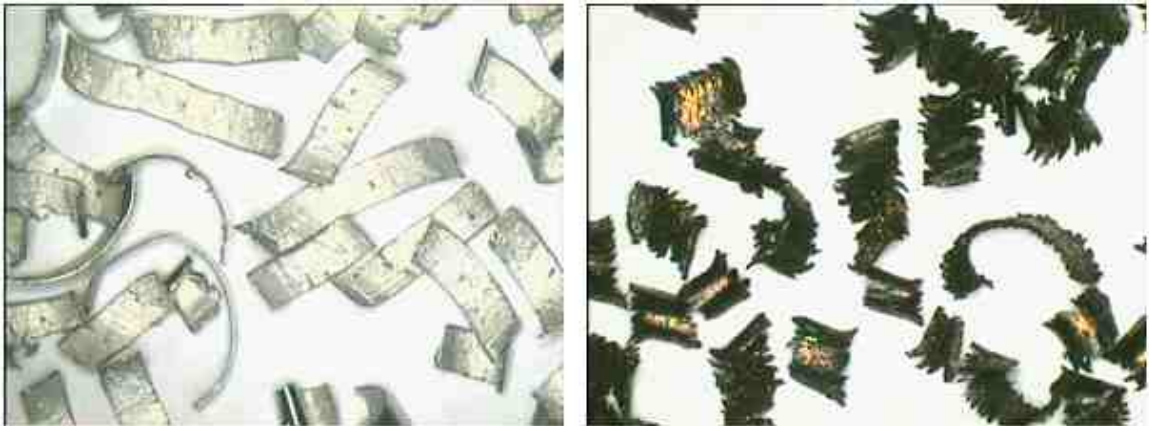


Bild 7.13: Vergleich von Frässpänen aus unterschiedlichen Werkstoffen (links AlSi9Cu3, rechts GGV) der Spangrößenklasse 2 mm

Es wird weiter angenommen, dass Partikel mit gleichem Herstellungsverfahren und Werkstoff eine ähnliche Form aufweisen und somit einen ähnlichen Luftwiderstandsbeiwert bezüglich einer bestimmten Re-Zahl haben. Daraus lässt sich weiter schließen, dass sie sich in einer veränderten, sie umgebenden Strömung (andere Strömungsgeschwindigkeit) mit einer dadurch veränderten Re-Zahl bezüglich ihres c_w -Wertes so verhalten, wie Partikel einer anderen Größenklasse, die ebenfalls beim Austrag die gleiche Re-Zahl hatten. In diesem Fall kann aus den drei gemessenen Kurven (c_w -Wert zu Re-Zahl) ein gemeinsames Diagramm erstellt und

durch alle Punkte eine Näherungskurve gelegt werden, die dann für alle Partikel des entsprechenden Werkstoffs bezüglich der Beziehung c_w -Wert zu Re-Zahl Gültigkeit hat.

6.6.2 Näherungsfunktion für den c_w -Wert

Eine angemessene stetige Näherungsfunktion erhält man über eine Grundfunktion und das Verfahren der linearen Regression. In diesem Fall liegt es nahe, die Näherungsfunktion für die Berechnung des c_w -Wertes einer Kugel (Formel 6.15) als Grundfunktion zu verwenden. Das Verfahren der linearen Regression ermittelt zu dieser Grundfunktion eine Konstante, die die Funktion möglichst genau an die vorhandenen Messpunkte annähert.

$$c_w = \frac{24}{\text{Re}} \cdot (1 + 0,11 \cdot \sqrt{\text{Re}})^2 \quad (6.15)$$

Bild 6.14 zeigt die Darstellung der gemessenen Werte für AlSi9Cu3 und die theoretischen c_w -Werte bezüglich der Reynoldszahl im üblichen doppellogarithmischen Diagramm.

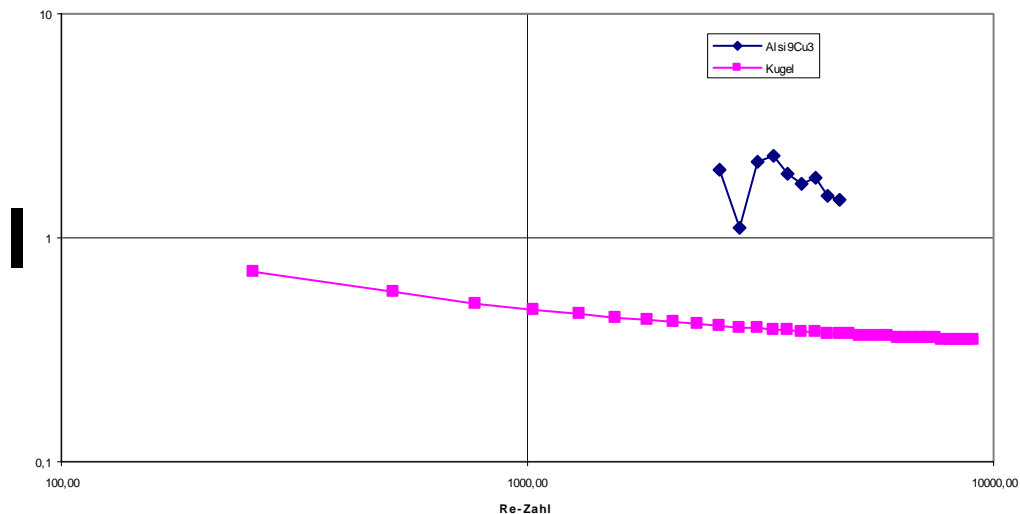


Bild 6.14: Luftwiderstandsbeiwerte der Kugel und von AlSi9Cu3-Spänen im doppellogarithmischen Diagramm.

Führt man diese Schritte nun für den untersuchten Werkstoff durch, so ergibt sich folgende Beziehung für den Luftwiderstandsbeiwert von AlSi9Cu3-Spänen bezüglich der Re-Zahl (Formel 6.16):

Werkstoff AlSi9Cu3:

$$c_w = \frac{500}{\text{Re}} \cdot (1 + 0,011 \cdot \sqrt{\text{Re}})^2 \quad (6.16)$$

7 Spanreflexion

Bei den durchgeführten Versuchen soll das Reflexionsverhalten bezüglich des Reflexionswinkels und der Streubereich von Partikeln beim Stoß mit einer festen Wand unter diversen Auftreffwinkeln und –geschwindigkeiten untersucht werden. Weiter soll eine qualifizierte Aussage über den Geschwindigkeitsverlust der Späne durch den Wandkontakt getroffen werden. Dabei handelt es sich um ein Stoßproblem, das von der klassischen Physik für allgemeine Spanpartikel nur sehr aufwändig beschrieben werden kann [68]. Es ist also notwendig, geeignete Vereinfachungen zu treffen und diese zu definieren.

7.1 Theoretische Betrachtung

Die klassische Physik behandelt zwei idealisierte Grenzfälle eines Stoßes, den vollkommen elastischen und den vollkommen unelastischen Stoß. Die in der Realität auftretenden Stoßprobleme hingegen liegen zwischen diesen beiden Grenzfällen.

Allgemein kann ein Stoßvorgang eines Spanes auf einer Absaughaubenwand folgendermaßen beschrieben werden: Ein Körper (Span) mit der Masse m_1 und einer definierten Gestalt trifft mit linearer Geschwindigkeit v unter dem Auftreffwinkel α auf einen zweiten Körper, eine Prallplatte, welche das Erfassungselement verkörpert, mit der Masse m_2 . Die Prallplatte stellt ein festes Hindernis dar und hat die Geschwindigkeit Null. Nach dem Aufprall, der einen teilelastischen Stoßvorgang darstellt, verläßt der Span unter dem Reflexionswinkel β mit der Geschwindigkeit u die Prallplatte.

Bei einem Stoßvorgang berühren sich zwei oder mehrere Körper kurzzeitig unter Änderung ihres jeweiligen Bewegungszustands. Sie sind dabei beim teilelastischen Stoß vor und nach dem Stoß getrennt. Kennzeichnend für den Stoßvorgang sind die Einmaligkeit und die im Vergleich zur gesamten Beobachtungsdauer kurze Kontaktzeit der beteiligten Körper. In dieser, Wechselwirkungszeit genannten Zeitspanne, treten verhältnismäßig große Kräfte auf. Die Bewegung wenigstens eines der beteiligten Körper ändert sich dabei abrupt. Dabei ist beim betrachteten Stoßvorgang bei korrekter Betrachtung der physikalischen Vorgänge die Rotationsenergie des Spanes mit zu berücksichtigen. Spanpartikel können beim Stoß mit einer festen Wand sowohl Rotationsenergie aufnehmen als auch abgeben.

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

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

Die Untersuchung des mit Deformationen verbundenen Stoßvorganges erfordert die Berücksichtigung der Stoßzeit, also der Berührungsdauer beider Körper. Es wird zwischen zwei Stoßphasen unterschieden. Die erste Stoßphase ist die Kompressionsphase. Sie beginnt mit der Berührung beider Körper und endet mit deren größter Deformation. In diesem Moment sind sich die Schwerpunkte beider Körper am nächsten. Bei den durchgeführten Versuchen ist davon auszugehen, dass eine größere Deformation nur beim Span stattfindet, eine entsprechende Deformation der Wand ist unwahrscheinlich. Danach setzt die zweite Stoßphase ein, die auch Restitutionsphase genannt wird. Während dieser Phase geht die Deformation ganz oder teilweise zurück und die in den stoßenden Körpern reversibel gespeicherte elastische Energie wird in kinetische Energie zurückgewandelt. Die zweite Stoßphase endet mit der Trennung der beiden Körper [68].

7.1.1 Der elastische Stoß

Beim vollkommen elastischen Stoß geht die Deformation der ersten Stoßphase in der zweiten Stoßphase vollkommen zurück. In diesem Grenzfall liegt also ein reversibler Vorgang ohne Energieverlust vor. Weder Erwärmung noch bleibende Deformationen bleiben erhalten, es wird beim elastischen Stoß keine Bewegungsenergie (kinetische Energie) in eine andere Energieform umgewandelt. Es gelten der Impulssatz (Gleichung 7.1) sowie der Energieerhaltungssatz (Gleichung 7.2):

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (7.1)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (7.2)$$

Daraus ergibt sich für die Geschwindigkeiten nach dem Stoß:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2 m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (7.3)$$

$$u_2 = \frac{2m_1 v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2} \quad (7.4)$$

7.1.2 Der unelastische Stoß

Geht beim Stoßvorgang des unelastischen Stoßes alle kinetische Energie beispielsweise durch Reibungs- oder Verformungsarbeit verloren, dann muss der allgemeine Energiesatz nach

Gleichung 7.2 zur Berechnung der Geschwindigkeiten nach dem Stoß herangezogen und der Energieverlust E_v berücksichtigt werden:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2 + E_v \quad (7.5)$$

Zusätzlich zum Impulserhaltungssatz nach Gleichung 7.1 ist eine weitere Bestimmungsgleichung notwendig, um die Geschwindigkeiten u_1 und u_2 nach dem Stoß und den Energieverlust E_v berechnen zu können.

Für den total unelastischen Stoß gilt, dass die Körper nach dem Stoß aneinander haften und sich mit gemeinsamer Geschwindigkeit $u = u_1 = u_2$ weiterbewegen. Der Impulserhaltungssatz des unelastischen Stoßes 7.6 lautet:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)u \quad (7.6)$$

daraus folgt:

$$u = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2} \quad (7.7)$$

Der Energieverlust E_v durch Verformungsarbeit beim unelastischen Stoß ist demnach:

$$E_{v_{unel}} = \frac{m_1m_2}{2(m_1 + m_2)}(v_1 - v_2)^2 \quad (7.8)$$

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

Der in den Versuchen auftretende Stoß ist nicht durch einen dieser physikalischen Sonderfälle zu beschreiben, es handelt sich vielmehr um einen teilelastischen Stoß. Dies bedeutet, ein Teil der kinetischen Energie des Spanes wird beim Stoß irreversibel in Verformung oder Wärmeenergie umgewandelt. Ein anderer Teil der kinetischen Energie des Spanes wird jedoch reversibel wieder in kinetische Energie umgewandelt. Mit dieser kinetischen Energie fliegt der reflektierte Span nach dem Stoßvorgang von der Wand des Erfassungselementes weg.

7.1.3 Gerader oder schiefer Stoß

Eine weitere Unterscheidung der möglichen Stoßvorgänge wird durch die Einteilung in geraden und in schiefen Stoß getroffen. Beim geraden Stoß treffen die Schwerpunkte der Stoßpartner exakt aufeinander. Das bedeutet, beide Massenschwerpunkte treffen sich auf einer Linie. Somit prallen beide Massenschwerpunkte auch wieder auf derselben Linie voneinander zurück.

Beim schiefen Stoß treffen sich die beiden Stoßpartner nicht auf einer gemeinsamen Linie. Das bedeutet, die Rückprallgeschwindigkeiten ergeben sich je nach der Masse und dem Auftreffwinkel der beiden Stoßpartner in einer neuen Richtung. Der Stoß eines Partikels, er wird aufgrund der einfacheren Darstellung als Kugel angenommen, auf eine feste Wand ist beinahe immer (Ausnahmen: symmetrischer Partikel und senkrecht auf die Wand) als schiefer Stoß aufzufassen. Dies verdeutlicht Bild 7.1, indem ein klassischer schiefer Stoß zweier Partikel und ein Stoß eines Partikels auf eine ebene Wand dargestellt sind.

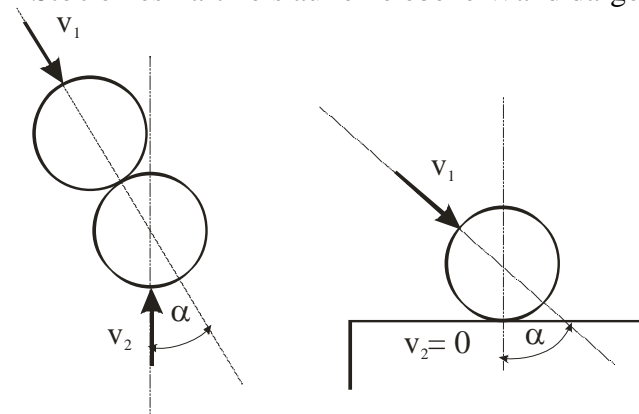


Bild 7.1: Schiefer Stoß zweier Partikel und Wandstoß eines Partikels ungleich 90° Auftreffwinkel

7.1.4 Reflexionswinkel

Der Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor v und der Prallwand ist der Auftreffwinkel α . Nach dem Stoß verlässt der Partikel die Prallwand unter dem Reflexionswinkel β , der zwischen Prallwand und dem Geschwindigkeitsvektor u aufgespannt ist. Die gesamte Partikelflugbahn liegt in einer senkrechten Ebene, dadurch wird das dreidimensionale Stoßproblem auf zwei Dimensionen reduziert. Die x -Richtung wird in die Prallebene parallel zur Tangente der Oberfläche am Auftreffpunkt gelegt, das senkrechte Lot, der y -Richtung, verläuft durch diese Ebene am Auftreffpunkt des Partikels. Wie aus Bild 7.2 zu erkennen ist, entspricht der Reflexionswinkel β nicht dem Auftreffwinkel α . Diese Winkeldifferenz kann auf die beim Aufprall stattfindende Energietransformation zurückgeführt werden [68]. Wie in Kapitel 7.1.2 diskutiert, ist anzunehmen, dass ein Teil der eingebrachten kinetischen Energie E_{kin} in Deformation, die in Einzelfällen bis zur Partikelzerstörung führen kann, in Reibung, Wärme und eventuell auch in Schwingungen umgesetzt wird. Dieser nicht messbare Energieanteil, der zu einer Verminderung der kinetischen Energie E_{kin} führt, wird zusammenfassend als Energieverlust E_v bezeichnet. Durch die Umwandlung von kinetischer Energie E_{kin} in Verlustenergie E_v kann in der Restitutionsphase des Stoßvorgangs nicht mehr die gleiche Spangeschwindigkeit wie vor dem Stoß erreicht werden. Da die Energietransformation in Verlustenergie parallel bzw. senkrecht zum Aufprallpunkt durch unterschiedliche Mechanismen geprägt ist (unter-

schiedliche Anteile an Reibungsenergie, Deformationsenergie, etc.) ergibt sich sowohl ein anderer Rückprallwinkel β als auch eine geringere Rückprallgeschwindigkeit u des Partikels.

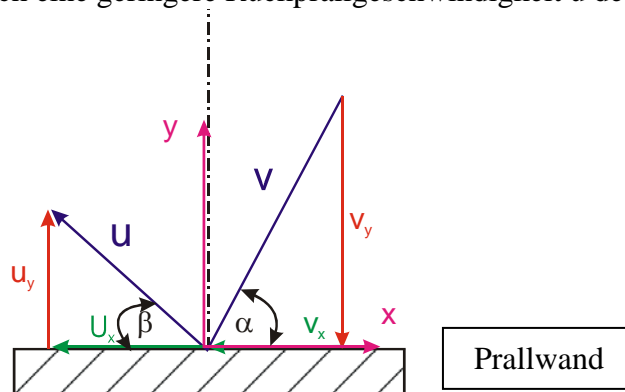


Bild 7.2: Prinzipskizze Aufprallsituation

7.2 Randbedingungen bei Stoßvorgängen

Stoßvorgänge stellen sehr schwer zu beschreibende komplexe Vorgänge dar. Für eine genaue Betrachtung sind folgende Randbedingungen einzubeziehen:

- Kinetische Energie des Partikels vor und nach dem Aufprall
 - Lineare Bewegungsenergie
 - Rotation des Partikels
- Aufprallwinkel und Rückprallwinkel
- Verformungsarbeit im Partikel und in der Wand
 - Reversibel
 - Irreversibel
 - Zerstörung des Partikels

Durch den Stoß des Partikels mit der Wand wird die kinetische Energie des Spanes (Rotationsenergie und Translationsenergie) teilweise durch Verformung der Stoßpartner und Wandreibung in Wärme umgewandelt. Dies bedeutet, der Partikel wird nach dem Wandstoß mit verringerter Fluggeschwindigkeit, veränderter Rotationsgeschwindigkeit und nicht unter dem gleichen Rückprallwinkel (im Vergleich zum Aufprallwinkel) weiterfliegen.

Die Reibkraft zwischen Wand und Partikel reduziert die Geschwindigkeit des Partikels hauptsächlich tangential zur Wandoberfläche. Dabei kommt es auf den Aufprallwinkel der Späne zur Wandoberfläche an. Je flacher der Aufprallwinkel zur Wand ist, desto geringer ist die normale Geschwindigkeitskomponente des Partikels zur Wand. Je geringer die Verzögerung des Partikels senkrecht zur Wand jedoch ist, desto geringer fällt die Anpresskraft aus, die wiederum eine maßgebliche Größe für die Wandreibungskraft und somit die Geschwindigkeitsverzögerung des Partikels tangential zur Wand ist.

Die Verformung des Partikels wiederum wandelt ebenfalls kinetische Energie in Wärme um, da sie niemals vollständig reversibel ist. Auch hier hängt die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärme hauptsächlich vom Aufprallwinkel des Partikels auf die Wand ab. Je steiler der Aufprallwinkel ausfällt, desto höher ist die Kraft auf Partikel und Wand und somit die Verformung beider Stoßpartner. Je größer die lokale Kraft auf die beiden Stoßpartner ist, desto eher entstehen beim Stoß bleibende Verformungen bzw. werden einzelne Stoßpartner beim Aufprall zerstört. Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass eine Berücksichtigung des Aufprallwinkels und die davon abhängigen Spangeschwindigkeiten für eine realistische Simulationsrechnung unumgänglich sind.

7.3 Versuchsaufbau – Rückprallwinkel der Späne

Die Versuche wurden auf einer Tischfräsmaschine durchgeführt. Sie ist mit einer senkrechten Frässpindel mit zwei festen Drehzahlen (3000 1/min und 6000 1/min) ausgestattet. Für die Versuchsdurchführung wurden alle Absaug- und Schutzhaubenelemente demontiert und durch den Versuchsaufbau ersetzt.

Um unterschiedliche Spangrößenklassen einzeln untersuchen zu können, wurde anstelle des Werkzeugs ein aus dem Vollen gefräster Aluminiumlüfter (Durchmesser 126 mm) in die Tischfräsmaschine eingesetzt (siehe Bild 7.3). An der Stirnseite des Lüfters können definiert Späne unterschiedlicher Korngröße und Partikeldichte eingebracht werden, die durch die Lüfterdrehung beschleunigt werden und anschließend entlang eines Leitbleches (Bild 7.13) ausgeworfen werden. Dadurch erreichen die Prüfspäne annähernd die Schnittgeschwindigkeit eines realen Werkzeugs, mit welcher sie bei einem Zerspanungsvorgang den Spanraum des Werkzeugs verlassen würden.

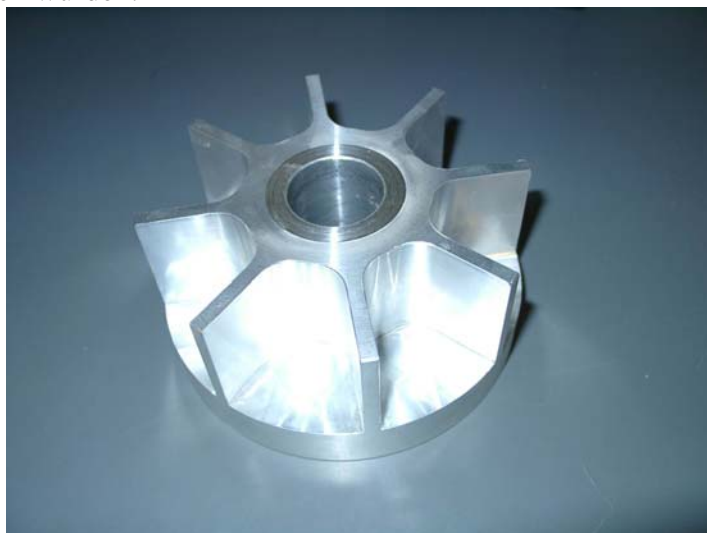


Bild 7.3: Aluminiumlüfter

Der Stoßvorgang der Späne an einer Haubenwand wird mit einer drehbaren und frei aufstellbaren Stahlplatte simuliert, die von oben mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera beo-

bachtet werden kann. Die Kamera ist dazu an einem Galgen über der Auftreffstelle aufgehängt. Aus den aufgenommenen Bildern kann die Geschwindigkeitsreduktion der Späne beim Stoß unter verschiedenen Auftreffwinkeln beobachtet werden. Auf der Vorrichtung sind sowohl in der Flugrichtung der Späne vor dem Aufprall, als auch, kreisförmig, in den Flugrichtungen der Späne nach dem Aufprall Abstandsmarkierungen auf der Grundplatte angebracht, mit deren Hilfe als Referenzmarkierung die Fluggeschwindigkeit der Partikel auf den Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera bestimmt werden kann (Bild 7.5). Es wurde eine dunkle Unterlage gewählt, da die hellen Spanpartikel so einfacher auf den Aufnahmen zu erkennen sind.

Die Späne werden durch einen Auslasskanal aus der Umhausung definiert auf die Wand (Prallplatte) gebündelt und gerichtet ausgeworfen. Die reflektierten Späne sammeln sich anschließend in den einzelnen um die Aufprallstelle angeordneten Fächern. Die auf die Fächer aufgesteckten Tüten dienen hierbei zum Auffangen und zur Aufbewahrung des Spanguts. Es werden Papiertüten zum Auffangen der Späne verwendet, da diese sich statisch nicht aufladen und somit eine vollständige Spanentnahme nicht behindert wird. Die für die Versuche angefertigte Versuchseinrichtung ist in Bild 7.4 dargestellt.

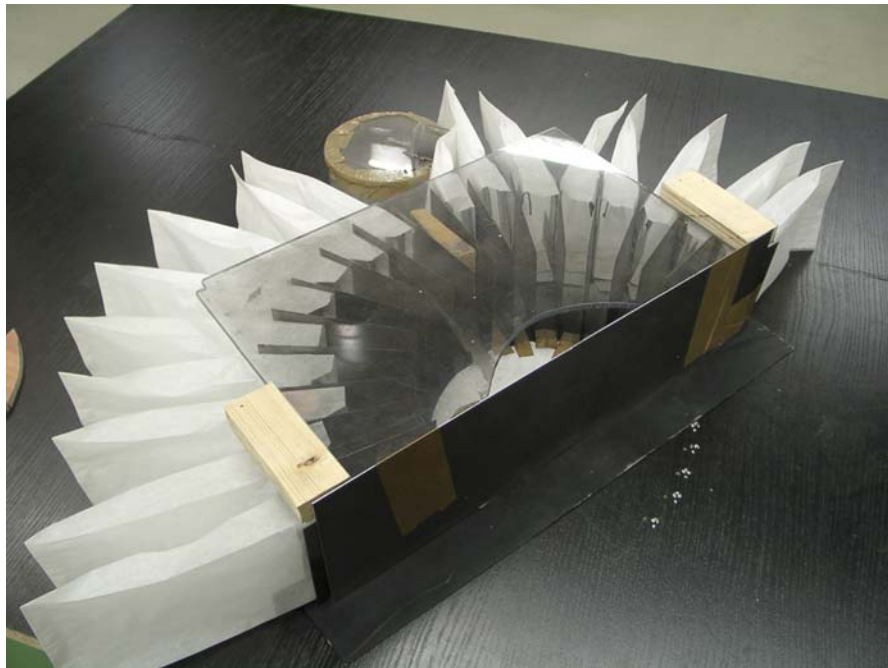


Bild 7.4: Aufbau der Versuchseinrichtung

Als Prallplatte dient eine blankgezogene Stahlplatte (St 37-2, 110mm x 240 mm x 12 mm). Sie entspricht von ihrer Oberflächenrauigkeit der Stahlblechoberfläche von üblichen Absaughauben. Diese Prallplatte kann frei um den Aufprallpunkt gedreht werden, um unterschiedliche Aufprallwinkel des Spänestrahls zu simulieren.

Zur visuellen Dokumentation der Reflexionsversuche wurde an einer Galgenkonstruktion 750 mm über der Aufprallstelle eine Hochgeschwindigkeitskamera montiert. Durch die Galgenkonstruktion kann die Kamera sehr genau senkrecht über der Spanaufprallstelle angebracht werden, ohne dass die Versuche durch Stativaufbauten behindert werden. Durch die integrierte Bildzählung können über ein festgelegtes Referenzmaß im Bildausschnitt bei senkrechter Kameraausrichtung durch Ausmessen der Flugbahnen die Spangeschwindigkeiten sehr genau und einfach ermittelt werden.

7.4 Versuchsdurchführung – Rückprallwinkel der Späne

Durch die Versuche sollen Erkenntnisse über das Rückprallverhalten eines Spänestrahls unter verschiedenen Aufprallwinkeln gewonnen werden. Beim Aufprall auf die Haubenwand treffen die Späne unter sehr unterschiedlichen Winkeln auf und werden in unterschiedlichster Weise reflektiert. Um diese Aufprallsituationen zu simulieren, wird der Aufprallwinkel der Späne in 10°-Schritten, von 5° Aufprallwinkel bis zu 85° Aufprallwinkel, untersucht. Zwischen diesen Schritten müssen die Versuchsergebnisse interpoliert werden, um den Versuchsaufwand in Grenzen zu halten.

Durch den in Kapitel 7.3 beschriebenen gezielten Auswurf treffen alle Späne unter dem gleichen Einfallswinkel (α) an der Aufprallstelle auf. Durch diverse Stoßmechanismen teilt sich der Spänestrahls beim Aufprall jedoch in unterschiedlich breit diversifizierte Rückprallwinkel auf. Durch Auswiegen der einzelnen Massenanteile, der in den Fächern aufgefangenen Späne, wird schließlich eine qualifizierte Aussage über das Prallverhalten eines Spänestrahls gewonnen. Bild 7.5 zeigt schematisch die Aufprall- und Rückprallsituation eines Spänestrahls an einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme. Es werden während des Versuchs so lange Späne emittiert, bis die einzelnen Tüten mit einer statistisch ausreichenden Menge an Spänen gefüllt sind.

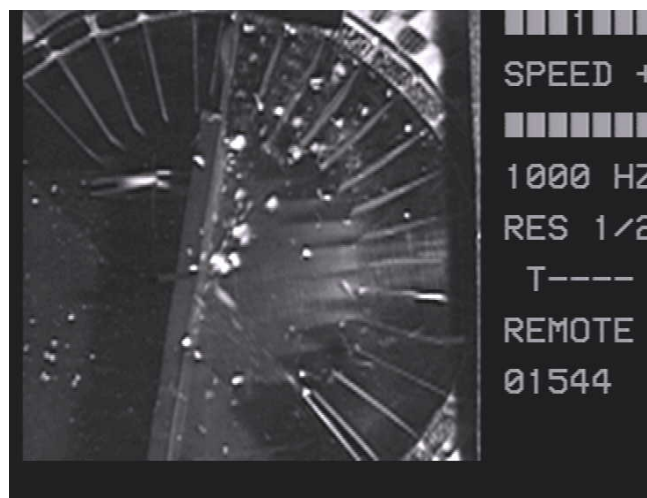


Bild 7.5: Spanreflexion im Versuchsaufbau

7.5 Versuchsauswertung – Rückprallwinkel der Späne

Aus Untersuchungen von sehr unterschiedlichen Holzpartikeln ist bekannt, dass die Reflexion der Partikel an einer Wand nicht von der Partikelgröße, sondern nur vom Werkstoff abhängig ist. Da sowohl beim Gußwerkstoff GGV als auch bei der Aluminiumlegierung AlSi9Cu3 sehr homogene, gleich gestaltete Spanformen entstehen, wurde auf eine Untersuchung einzelner Spangrößenklassen verzichtet. Es ist anzunehmen, dass sich die unterschiedlichen Spangrößen der Metallspäne nicht anders verhalten, als die Späne der Holzbearbeitung und keine Abhängigkeit des Reflexionsverhaltens von der Partikelgröße zeigen. Diese These stützt die deutlich homogenere Spanform und geringere Spangrößenstreuung der Metallspäne gegenüber den Holzspänen.

7.5.1 Reproduzierbarkeit der Versuche

Es soll durch Vergleichsversuche überprüft werden, wie weit die Versuchsergebnisse reproduzierbar sind, da es sich beim Stoß der Partikel an der Wand um einen chaotischen Vorgang handelt. Dazu wurde aus der Versuchsreihe für der GGV-Späne (Zustellung $a_e = 1\text{mm}$) ein Versuch bei 35° Auftreffwinkel doppelt durchgeführt. Mit 35° Aufprallwinkel wurde ein mittlerer Aufprallwinkel zwischen den Maximalaufprallwinkeln von 5° und 85° gewählt.

Das nachfolgende Bild 7.6 zeigt die beiden ermittelten Kurven des Spanmassenanteils der unterschiedlichen Rückprallwinkel. Aus den Versuchen ergeben sich nur geringe Abweichungen der einzelnen Kurven. Bei den zwangsläufig eintretenden Streuungen derartiger Versuchsreihen sind die Versuchsergebnisse somit als reproduzierbar einzustufen.

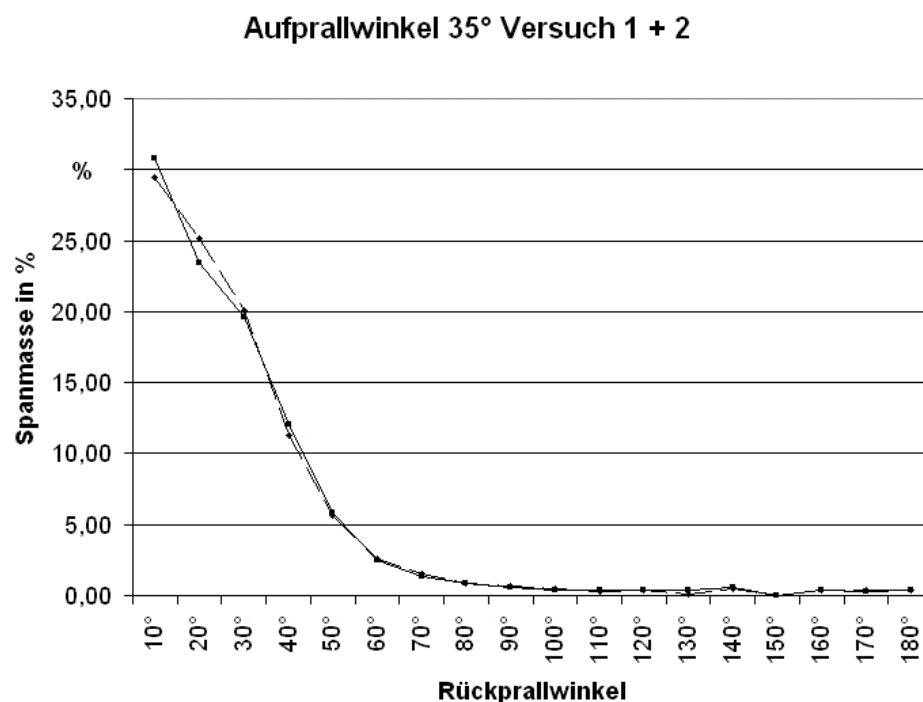


Bild 7.6: Referenzversuch zur Reproduzierbarkeit bei GGV

7.5.2 Reflexionswinkel der Späne aus GGV (Gesamtmasse)

Zuerst soll die Reflexion der Gesamtmasse der Späne betrachtet werden. Das nachfolgende Bild 7.7 stellt die ermittelten Reflexionsbedingungen der GGV-Späne dar. Es lässt sich ein unterschiedlicher Kurvenverlauf bezüglich des Aufprallwinkels erkennen. Bei kleinen Aufprallwinkeln von $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ ergeben sich Rückprallwinkel, welche grob den Verlauf einer Exponentialfunktion aufweisen. Aufprallwinkel im mittleren Winkelbereich von $35^\circ < \alpha < 45^\circ$ weisen hingegen eine Rückprallwahrscheinlichkeit, die einer Normalverteilung nahe kommt, auf. Bei sehr steilen Aufprallwinkeln der Späne von $55^\circ < \alpha < 85^\circ$ ergibt sich schließlich ein nahezu lineares Rückprallverhalten über die Rückprallwinkel der ausgewerteten Fächer. Je näher der Aufprallwinkel dem 90° -Winkel kommt, desto gleichmäßiger verteilt sich die Spanmasse auf alle Fächer.

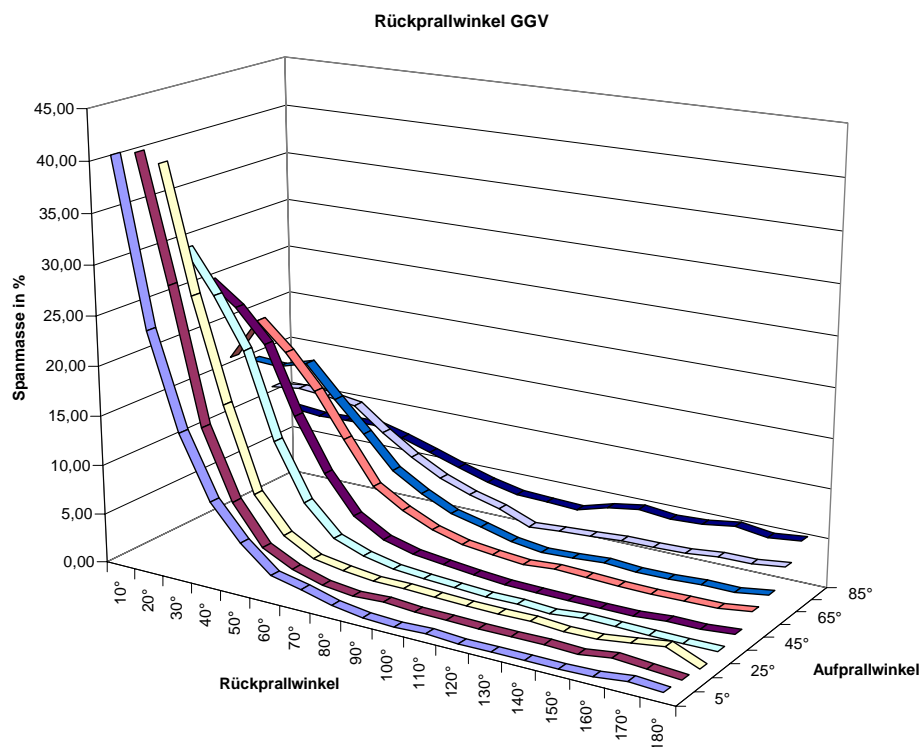


Bild 7.7: Rückprallwinkel für Späne aus GGV bezüglich unterschiedlicher Aufprallwinkel

In Bild 8.10 wurden die fehlenden Werte (da immer ein Fach zum Einschließen der Späne benötigt wird) durch Mittelwerte der beiden angrenzenden Winkel approximiert. Wie aus den Kurvenverläufen hervorgeht, entsteht dadurch kein Fehler.

7.5.3 Reflexionswinkel der Späne aus AlSi9Cu3 (Gesamtmasse)

Auch bei den Spänen aus AlSi9Cu3 lässt sich ein ähnliches Rückprallverhalten aufzeigen (siehe Bild 7.8). Lediglich der mittlere Bereich, der ein Maxima ausbildet, ist bei den Aluminiumspänen ein wenig breiter ausgebildet. Weiter fällt auf, dass bei kleinen Aufprallwinkeln der Maximalwert des einzelnen 10°-Rückprallwinkelbereichs höher liegt als bei den GGV-Spänen.

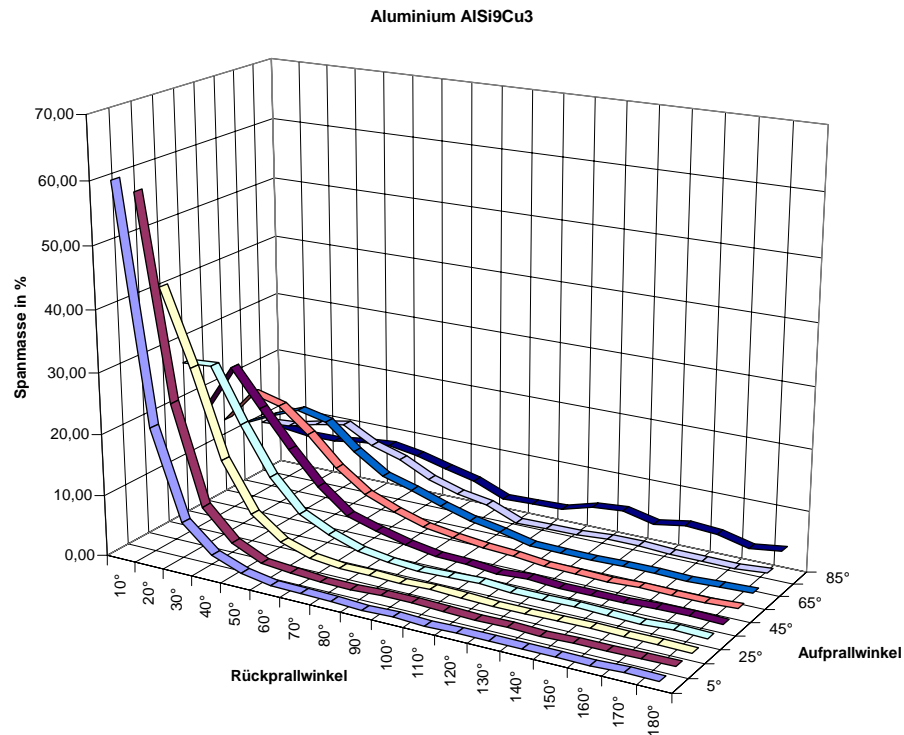


Bild 7.8: Rückprallwinkel für Späne aus AlSi9Cu3 bezüglich unterschiedlicher Aufprallwinkel

7.6 Mathematische Behandlung der ermittelten Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse müssen in eine mathematisch verarbeitbare Form gebracht werden, die bei der Simulationsrechnung einfach angewendet und gegebenenfalls leicht auf andere Werkstoffe erweitert werden kann. Es gibt prinzipiell zwei verschiedene Möglichkeiten der mathematischen Umsetzung der Rückprallwinkel, die nachfolgend genauer untersucht werden sollen. Zum einen wird versucht, die ermittelten Kurven in stetige Funktionen zu überführen. Zum anderen können die Reflexionsbedingungen rein über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen wie in Kapitel 5.5 aus den gemessenen Kurven direkt ermittelt werden.

7.6.1 Überführung der Messwerte in stetige Funktionen

Durch die Auswertung der einzelnen Auffangraster können für die untersuchten Aufprallwinkel für beide Spansorten Kurven der Rückprallwinkel ermittelt werden. Diese Kurven ergeben

sich aus den Stützpunkten im 10° -Raster-Abstand, die in den durchgeführten Versuchen ermittelt wurden. Diese experimentell ermittelten Kurven werden im Folgenden als Basiskurven bezeichnet. Auf ihnen und der Ermittlung einer stetigen Funktion baut die Bestimmung beliebiger Zwischenwerte für konkrete in der Simulation betrachtete Einzelspäne auf. Bild 7.9 zeigt beispielsweise die experimentell ermittelten Basiskurven für Späne aus AlSi9Cu3, die mit einer Zustellung von $a_e = 1,0$ mm hergestellt wurden.

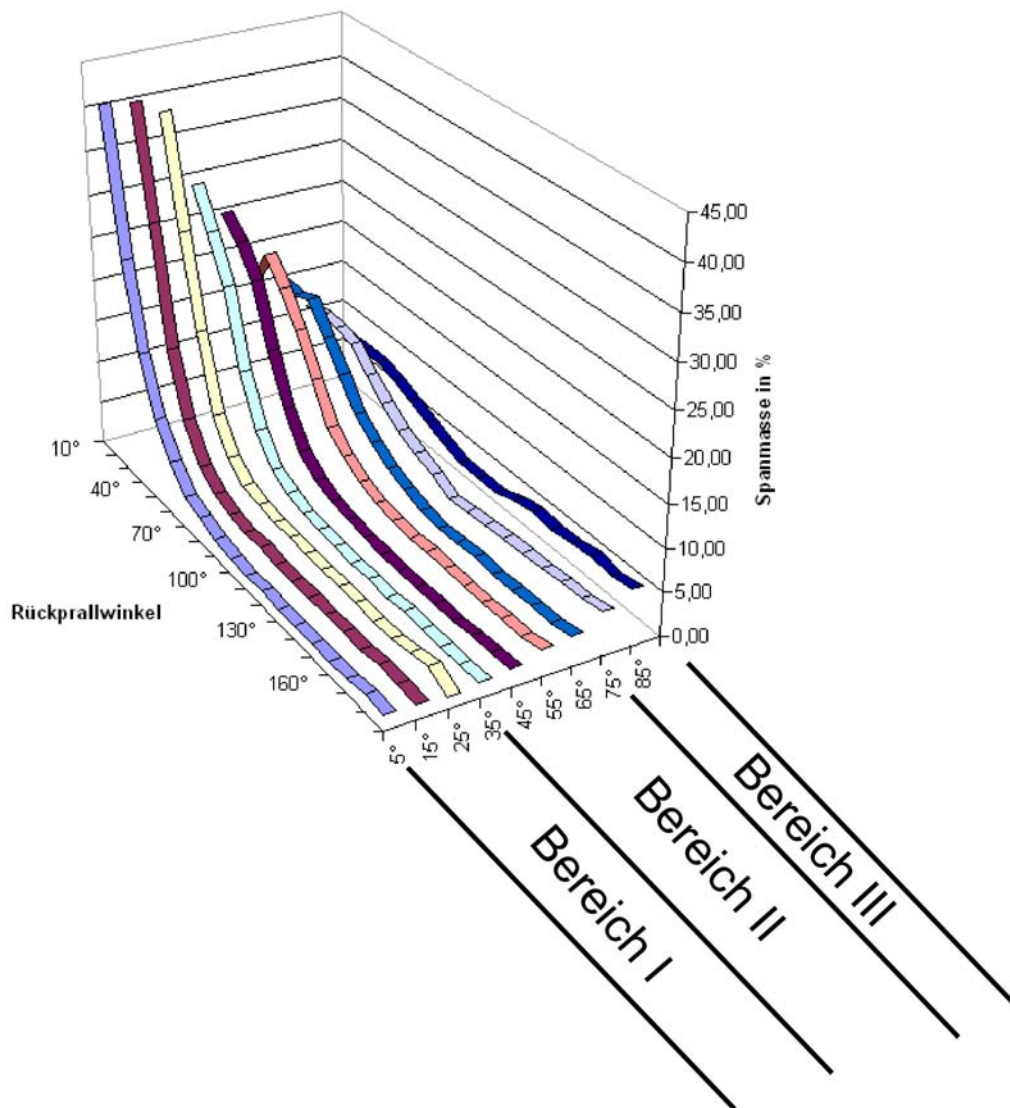


Bild 7.9: Experimentell ermittelte Basiskurven (AlSi9Cu3)

7.6.2 Lineare Regression

Zur Überführung der gemessenen Basiskurven in stetige Funktionen, die bei der Simulationsrechnung verarbeitet werden können, wird die nachfolgend näher erläuterte Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach Gauß (Lineare Regression) angewandt. Durch die lineare Regression nach Gauß kann für gemessene Wertepaare (x/y) eine Funktion $f(x)$ ermittelt werden, für die möglichst genau gelten soll $f(x) = y$. Zu n Punkten (Messwerten) kann immer

in Polynom vom Grad $n-1$ gefunden werden, dessen Funktion durch alle Punkte geht. Allerdings ist die Genauigkeit, mit der die einzelnen Messpunkte in der Funktion enthalten sind, nicht die wesentlichste Forderung an die gesuchte Funktion der experimentell ermittelten Basiskurven. Es wird für die ermittelte Anzahl an Messwerten, die unter anderem auch gewisse Messfehler enthalten können, keine Funktion gesucht, die alle Messpunkte genau wiedergibt, sondern eine möglichst einfache Funktion, die im Durchschnitt sehr nahe an allen Punkten liegt. Die Gaußsche Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermöglicht das Ermitteln von Funktionen $F(x)$, die gegebene Wertepaare optimal, d. h. mit kleinstmöglicher Abweichung annähern. Sie sind vom Typ $F(x)=k_1*f(x)+k_2*g(x)+k_3*h(x)+\dots$. Dadurch ist die lineare Regression für die Umwandlung von experimentell ermittelten Basiskurven in stetige Funktionen geradezu prädestiniert.

Die Variablen k_1, k_2, k_3, \dots stehen dabei für konstante Koeffizienten und die Funktionen $f(x), g(x), h(x), \dots$ für beliebige Funktionsterme der Unbekannten x . Die Funktionsterme können beliebig komplizierte Funktionen darstellen. Einzige Bedingung ist, dass die zu findende Funktion $F(x)$ eine sogenannte Linearkombination aus diesen Funktionen ist, also eine Summe aus konstanten Vielfachen der Teilfunktionen. Konstante Koeffizienten können mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt werden. Die Teilfunktionen selbst müssen vorgegeben werden. Die Auswahl der konkret angewandten Teilfunktionen wird weiter unten näher beschreiben. Zur Berechnung der Parameter k_1, k_2, k_3, \dots muss eine Koeffizientenmatrix nach folgendem Schema aufgestellt werden. Die $f_i(x)$ sind die ausgewählten Teilfunktionsterme.

$$\begin{array}{cccccccc}
 [f_1(x) \cdot f_1(x)] & [f_1(x) \cdot f_2(x)] & [f_1(x) \cdot f_3(x)] & [f_1(x) \cdot f_4(x)] & \dots & [f_1(x) \cdot f_n(x)] & [y \cdot f_1(x)] \\
 [f_2(x) \cdot f_1(x)] & [f_2(x) \cdot f_2(x)] & [f_2(x) \cdot f_3(x)] & [f_2(x) \cdot f_4(x)] & \dots & [f_2(x) \cdot f_n(x)] & [y \cdot f_2(x)] \\
 [f_3(x) \cdot f_1(x)] & [f_3(x) \cdot f_2(x)] & [f_3(x) \cdot f_3(x)] & [f_3(x) \cdot f_4(x)] & \dots & [f_3(x) \cdot f_n(x)] & [y \cdot f_3(x)] \\
 [f_4(x) \cdot f_1(x)] & [f_4(x) \cdot f_2(x)] & [f_4(x) \cdot f_3(x)] & [f_4(x) \cdot f_4(x)] & \dots & [f_4(x) \cdot f_n(x)] & [y \cdot f_4(x)] \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 [f_n(x) \cdot f_1(x)] & [f_n(x) \cdot f_2(x)] & [f_n(x) \cdot f_3(x)] & [f_n(x) \cdot f_4(x)] & \dots & [f_n(x) \cdot f_n(x)] & [y \cdot f_n(x)]
 \end{array} \quad (7.9)$$

Die eckigen Klammern symbolisieren die sogenannten Gauß-Summen. Man gewinnt sie, indem man alle gegebenen Messwerte nacheinander in den eingeklammerten Term einsetzt und die Ergebnisse addiert.

$$[y \cdot f_2(x)] = \sum (y_i \cdot f_2(x)) \quad (7.10)$$

Die entstehende Koeffizientenmatrix muss nun durch geeignete Zeilenumformungen in die Diagonalform gebracht werden.

$$\begin{array}{cccccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & k_1 & \\
 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & k_2 & \\
 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & k_3 & \\
 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & k_4 & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & k_n &
 \end{array} \tag{8.11}$$

In der Diagonalform sind k_1, k_2, k_3, \dots die gesuchten Koeffizienten der Teilfunktionen, und $F(x) = k_1 \cdot f(x) + k_2 \cdot g(x) + k_3 \cdot h(x) + \dots + k_n \cdot f_n(x)$ ist die gesuchte Funktion, die die gegebenen Messwerte mit minimalem Fehler approximiert.

Den Fehler zwischen den einzelnen Messpunkten und dem Funktionsgraph gibt man als Standardabweichung an. Diese berechnet sich aus der Wurzel der aufsummierten quadrierten Einzelfehler dividiert durch die Anzahl der Messwerte.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F(x_i) - y_i)^2} \tag{7.12}$$

7.6.3 Auswahl geeigneter Grundfunktionen

Die aus den Messwerten ermittelten Basiskurven lassen sich prinzipiell in drei Kurventypen aufteilen. Bei kleinen Aufprallwinkeln ergeben sich gebrochen rationale Kurven (Kurventyp I), bei mittleren Aufprallwinkeln ergeben sich parabelförmige Kurven (Normalverteilungen = Kurventyp II) und bei großen Aufprallwinkeln nahe 90° ergeben sich annähernd lineare Kurvenverläufe (Kurventyp III). Im obigen Bild 7.9 wurde diese Aufteilung der experimentell ermittelten Basiskurven in unterschiedliche Kurventypen bereits aufgezeigt. Der Übergang zwischen den einzelnen Kurventypen und den dazu verwendeten Grundfunktionen in der linearen Regression wird durch die berechnete Standardabweichung definiert. Es wird für jede Basiskurve jeweils die Grundfunktion verwendet, die zu einer kleineren Standardabweichung führt.

Um nun in den Grenzbereichen zwischen den Grundfunktionen wirklich beurteilen zu können, welche Grundfunktion zur Ermittlung der Basisfunktionen verwendet werden muss, wird die ermittelte Funktion über die Standardabweichung mit drei zwischen den Messwerten linear interpolierten Zwischenwerten bewertet. Dies ist notwendig, da die Ermittlung der Standardabweichung mit den Messwerten bei einer Approximation durch ein Polynom des Grades $x-1$ immer Null ergeben würde, obwohl zwischen den Messwerten teils gravierende Abweichungen zwischen Funktion und interpoliertem Messwert auftreten können. Damit ist nun eine differenzierte Aussage über die tatsächliche Genauigkeit der ermittelten Funktion möglich.

Die Basiskurven der einzelnen gemessenen Spangrößenklassen bezüglich spezieller Aufprallwinkel werden nun mit den ausgewählten Basisfunktionen in stetige Funktionen überführt. Dies hat mehrere Vorteile. Zum einen werden dadurch einzelne, extreme Messwerte, welche zufällig oder aufgrund von Messfehlern stark abweichen, eliminiert und geglättet. Zum anderen ist es über eine stetige Funktion im Geltungsbereich sehr einfach auch für Zwischenwerte des Reflexionswinkels einen Funktionswert für die zurückreflektierte Spanmenge zu ermitteln. Das folgende Bild 7.10 zeigt die Auswirkungen der Überführung aller Messwerte in eine stetige Funktion des Kurventyps I wie er besonders bei kleinen Aufprallwinkeln beider Werkstoffe auftritt.

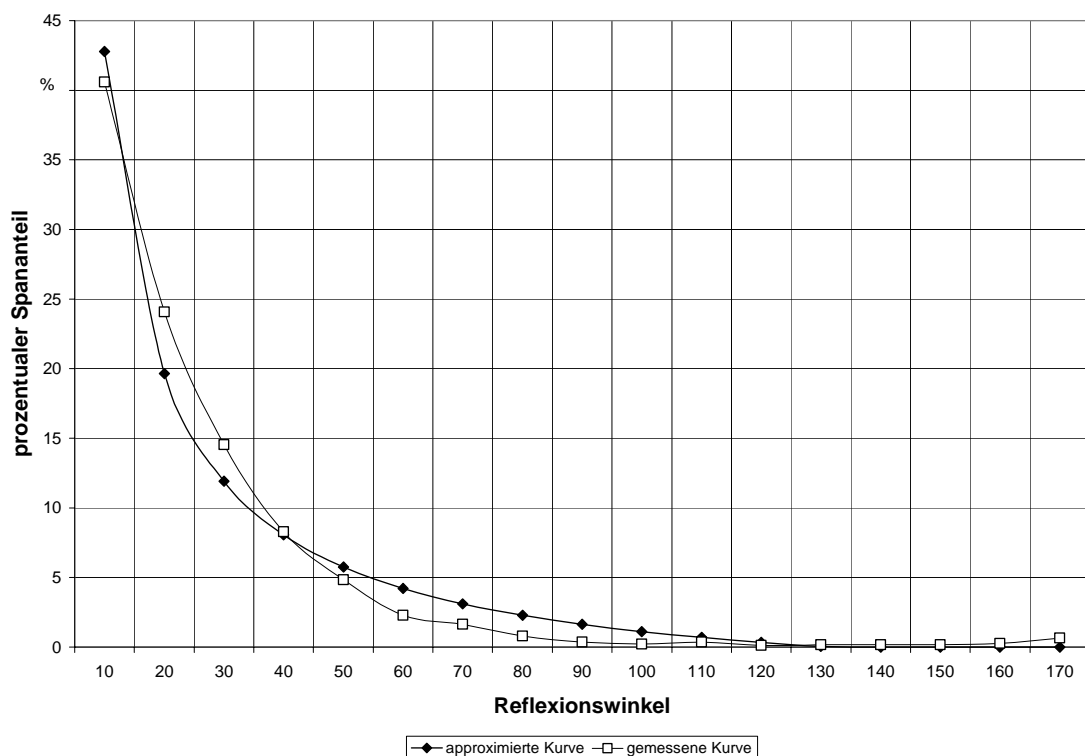


Bild 7.10: Vergleich der Messwerte mit einer approximierten Kurve des Kurventyps I für GGV-Späne bei 5° Aufprallwinkel

Besonders problematisch erweist sich der Bereich zwischen 35° und 65° Aufprallwinkel der Späne. Hier müsste der Kurvenverlauf eigentlich durch eine Normalverteilung erfolgen. Leider ist die Normalverteilung nicht für die lineare Regression geeignet, da es sich um eine Funktion mit mehreren voneinander unabhängigen Veränderlichen (Standardabweichung σ und Varianz μ) handelt. Eine Approximation der Kurve durch andere Funktionen erbringt in den meisten Fällen nicht das gewünschte Ergebnis einer sehr nahe an den Messwerten gelegenen auf \mathbb{R}^+ definierten stetigen Funktion. Bild 7.11 zeigt ein Beispiel, in welchem

versucht wurde, die Messwerte bei 30° Aufprallwinkel durch eine gebrochenrationale Funktion anzunähern. Das Ergebnis ist nicht befriedigend.

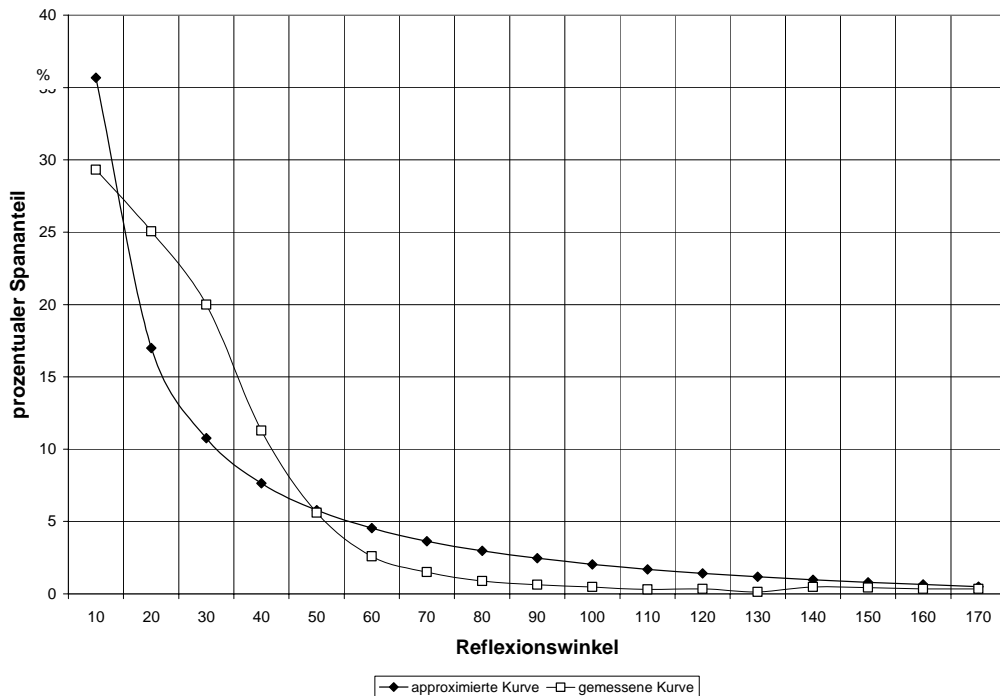


Bild 7.11: Vergleich der Messwerte mit einer approximierten Kurve des Kurventyps II für GGV-Späne bei 35° Aufprallwinkel

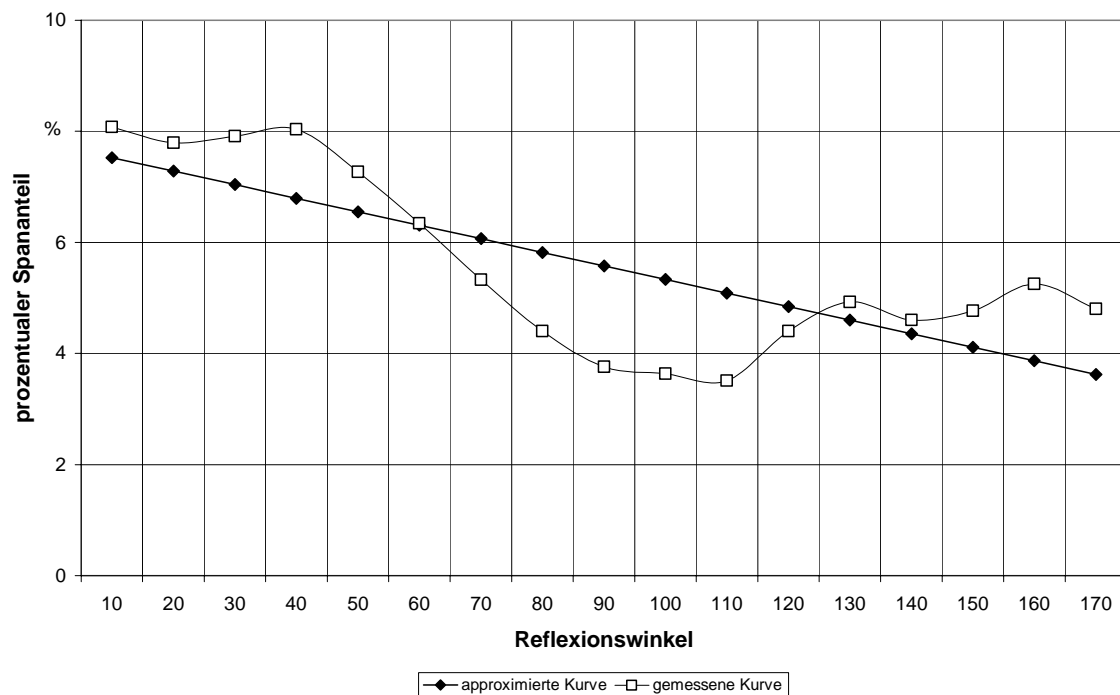


Bild 7.12: Vergleich der Messwerte mit einer approximierten Kurve des Kurventyps III für GGV-Späne bei 85° Aufprallwinkel

Betrachtet man schließlich den Bereich steiler Auftreffwinkel, so lassen sich die dort auftretenden linearen Funktionen wieder sehr gut durch die lineare Regression bestimmen. Als Beispiel ist hier die Näherungsfunktion von GGV-Spänen bei 85° Auftreffwinkel in Bild 7.12 gezeigt.

7.6.4 Auswertung der Reflexionswinkel

Zur Ermittlung konkreter Reflexionsverhältnisse muss für den einzelnen zu berechnenden Span in der Simulationsrechnung nun zuerst einmal seine Spangröße sowie sein Aufprallwinkel auf die feste Wand bekannt sein. Es soll als Ergebnis der Berechnung eine Funktion ermittelt werden, welche den wahrscheinlichen Rückprallwinkel des Partikels widerspiegelt. Dazu muss zwischen den Funktionen des nächst größeren und des nächst kleineren Aufprallwinkels des Partikels interpoliert werden.

Eine nicht triviale Problemstellung ergibt sich bei der Interpolation zwischen unterschiedlichen Aufprallwinkeln an jenen Stellen, an denen die verwendete Grundfunktion wechselt. Weiter besteht zwischen den berechneten Koeffizienten und Konstanten der ermittelten Funktionen kein linearer Zusammenhang, so dass zwischen den Funktionen, selbst wenn sie von der gleichen Grundfunktion sind, die neue Funktion nur linear zwischen den Messwerten und nicht als ganze Funktion interpoliert werden kann.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die lineare Regression zur Approximation von stetigen Funktionen aus Messpunkten zwar den Vorteil hat, dass mit den gefundenen Funktionen sehr einfach alle Mittelwerte zwischen den Messpunkten bestimmt werden können. Allerdings zeigt das Verfahren besonders bei den Aufprallwinkeln des Bereichs II (siehe Bild 7.11), die für die Simulation besonders wichtig sind, deutliche Schwächen, da keine adäquate Grundfunktion gefunden werden konnte, die die Messwerte mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt.

7.6.5 Ermittlung der Reflexionsbedingungen über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen

Bei der Bestimmung der Reflexionsbedingungen über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen werden im Gegensatz zur Überführung der Versuchsergebnisse in Funktionen, wie schon in Kapitel 5.5 näher erläutert, die ermittelten Werte direkt verwendet. Dadurch entstehen keine Ungenauigkeiten durch die Funktionserstellung. Es werden aber eventuelle Ausreißer der gemessenen Ergebnisse nicht herausgefiltert. Mit dem aus der Simulationsrechnung ermittelten Aufprallwinkel wird das entsprechende Winkelintervall, das den Messwerten am nächsten liegt, ausgelesen und die Wahrscheinlichkeiten wieder in einem Zahlenstrahl von 0 bis 100 aufgetragen (siehe Bild 5.16).

Um die Rückprallwinkel nicht auf die gemessenen 10° -Schritte beschränken zu müssen, wird nun zwischen dem ermittelten Rückprallwinkel und dem nächsten kleineren 10° -Rückprall-

winkelschritt ebenfalls über eine Zufallszahl ein Zwischenwert bestimmt. Hier ist jedoch keine Wahrscheinlichkeit hinterlegt, so dass das Verfahren bezüglich der ermittelten Werte einer linearen Interpolation entspricht. Ein besonderer Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass pro Wandkontakt nur mit einer neuen Flugbahn weitergerechnet wird.

7.6.6 Entscheidung über das verwendete Verfahren

Die Ermittlung von stetig differenzierbaren Funktionen ermöglicht eine Bestimmung von Rückprallwerten an allen Zwischenpunkten zwischen der tatsächlichen Messung. Einzelne Ausreißer der Messung werden kaum berücksichtigt. Allerdings ergeben sich auch nicht zu unterschätzende Abweichungen von den Messergebnissen durch die Bestimmung der Funktionen. Problematisch ist hier besonders, dass sich die Kurvenverläufe über die Aufprallwinkel deutlich verändern, so dass sich nicht alle Messungen mit denselben Grundfunktionen annähern lassen. Speziell für die Übergänge zwischen verschiedenen Grundfunktionen müsste ein erhöhter Aufwand betrieben werden, um befriedigende Näherungslösungen zu finden. Weiter bereiten speziell die Kurvenverläufe Probleme, die sich nicht mit einer einzigen einfachen Grundfunktion annähern lassen. Der Aufwand zur Programmierung dieses Verfahrens ist nicht zu unterschätzen.

Die Ermittlung eines zurückprallenden Spanpartikels mittels zweifach angewandter Wahrscheinlichkeitsbetrachtung garantiert ein deutlich einfacher zu handhabendes Verfahren zur Bestimmung der Rückprallbedingungen für einzelne Spanpartikel. Hier können die Messwerte ohne verfälschende Näherungslösungen eingesetzt werden. Um über die Zufallszahlen und die Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen ein realistisches Bild der Späneerfassung zu simulieren, darf die Anzahl der berechneten Späne allerdings nicht zu gering sein. Das Verfahren ist einfach zu programmieren und kann sehr universell angewandt werden. Ändert sich beispielsweise der Werkstoff, so braucht nur auf eine andere Datei mit Versuchsergebnissen zugegriffen zu werden, um neue Rückprallbedingungen für den entsprechenden Werkstoff zur Verfügung zu haben. Aufgrund der Vor- und Nachteile wird das Verfahren der Generierung der Rückprallwinkel über Zufallszahlen und Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen in die Simulationsrechnung integriert.

7.7 Versuchsaufbau - Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß

Für den Versuchsaufbau wurde wiederum die schon in Kapitel 7.3 beschriebene Tischfräsmaschine verwendet. Allerdings werden für diese Versuche alle Bauteile zum Auffangen der Späne entfernt. Die dunkle Platte ist mit Abstands- und Winkelmarkierungen versehen, um die hellen reflektierenden Metallspäne anhand dieser Markierungen einfacher bezüglich ihrer Flugrichtung und Geschwindigkeit vermessen zu können. Der Versuchsaufbau ist im folgenden Bild 7.13 dargestellt.

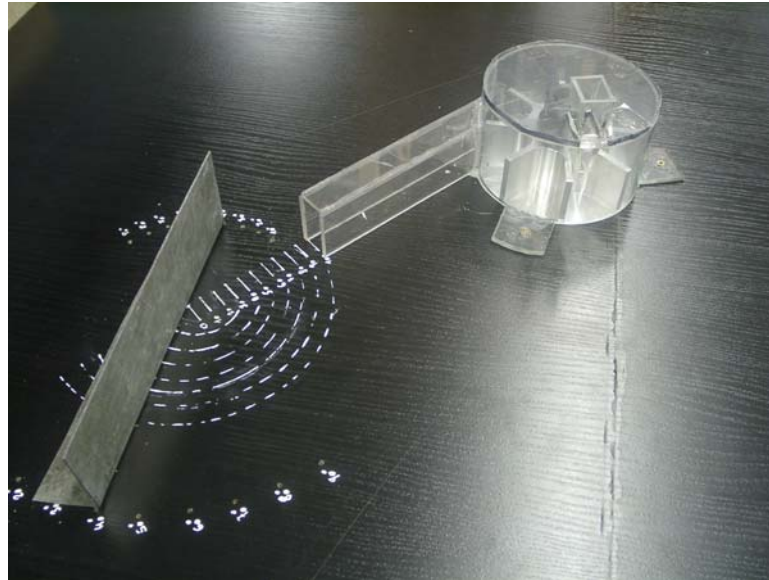


Bild 7.13: Versuchsaufbau zur Messung der Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß

7.8 Versuchsdurchführung – Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß

Die Flugbahn der Späne kann bei diesem Versuch mit dem menschlichen Auge sowie mit einer Videokamera nicht mehr beobachtet werden, da der Vorgang zu schnell abläuft. Aus diesem Grund wurde der Stoßvorgang mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen und dabei mit einem Hochleistungsstroboskop ausgeleuchtet. Dadurch wird erreicht, dass die Späne über mehrere aufeinanderfolgende Aufnahmen hell reflektierend und scharf abgebildet werden. Durch einen Vergleich der Flugbahn auf mehreren Aufnahmen mit einer bekannten Referenzstrecke auf dem Bild kann schließlich die Geschwindigkeit des Partikels vor und nach dem Stoß ermittelt werden. Aus dem auf der Grundplatte aufgetragenen Winkel kann weiter der Rückprallwinkel sowie der Aufprallwinkel bestimmt werden. Ein Beispiel zeigt Bild 7.14.



Bild 7.14: Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Stoßvorgangs

7.9 Versuchsauswertung – Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß

Die Geschwindigkeit der Späne am Austritt der Beschleunigungsvorrichtung ist bei unterschiedlichen Spangrößen und Spanarten unterschiedlich. Deshalb muss zuerst die Anfangsgeschwindigkeit der einzelnen Späne bestimmt werden. Dies geschieht, indem die unterschiedlichen Spangrößenklassen in geringer Dichte in den Ventilator eingebracht werden und die Geschwindigkeit der einzelnen Spanpartikel am Auslass der Vorrichtung mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmt werden. Aus den gemessenen Einzelwerten wird dann ein Mittelwert ermittelt.

Für die unterschiedlichen untersuchten Aufprallwinkel werden mehrere Späne über die Bildauswertung gemessen. Wie in Bild 7.15 zu erkennen ist, streuen die Messwerte der Rückprallgeschwindigkeit u des Spans nach dem Aufprall zwischen den einzelnen Messungen "u1" bis "u8" sehr stark. Es ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Rückprallwinkel der Späne und deren Spangeschwindigkeit. In der letzten Spalte des Diagramms wird schließlich bezogen auf die Anfangsgeschwindigkeit eine prozentuale Rückprallgeschwindigkeit jedes Spanes errechnet. Aus dieser wird ersichtlich welcher Anteil an der kinetischen Energie (ohne Rotation) im Span nach dem Aufprall noch vorhanden ist, da sich die Masse des Partikels beim Aufprall in der Regel nicht verändert. In allen Winkelbereichen, in denen Späne zurückprallen, treten sowohl schnellere, als auch langsamere Späne auf. Es wird deshalb über alle Späne aller Rückprallwinkel eines untersuchten Aufprallwinkels der Mittelwert der Rückprallgeschwindigkeit u unabhängig vom gemessenen Rückprallwinkel des Einzelspanes gebildet.

| Metallspäne Stahl | | | | | | |
|-------------------|--------------------|----|-------------------|----|-------------------|----------------|
| Auftreffwinkel a | Reflexionswinkel b | | Geschwindigkeit v | | Geschwindigkeit u | Verhältnis u/v |
| a | b | | v | | u | u/v |
| Grad | Grad | | m/s | | m/s | % |
| | 16 | v1 | 22,00 | u1 | 12 | 54,55 |
| | 17 | v2 | 26,00 | u2 | 14 | 53,85 |
| | 19 | v3 | 21,00 | u3 | 9 | 42,86 |
| 70 | 32 | v4 | 35,00 | u4 | 22 | 62,86 |
| | 43 | v5 | 11,00 | u5 | 10 | 90,91 |
| | 40 | v6 | 42,00 | u6 | 24 | 57,14 |
| | 69 | v7 | 62,00 | u7 | 28 | 45,16 |
| | 65 | v8 | 31,00 | u8 | 10 | 32,26 |
| Mittelwert | | | 21,04 | | 16,125 | 76,64 |

Bild 7.15: Gemessene Spangeschwindigkeiten vor und nach dem Stoß bei 70° Aufprallwinkel

Trägt man diese Mittelwerte aller aufsummierter prozentualer Rückprallgeschwindigkeiten u/v für einen Aufprallwinkel über den untersuchten Auftreffwinkeln auf, so ergibt sich für alle Spangrößen eines Werkstoffs ein eindeutiger linearer Zusammenhang. Dies ist in Bild 7.16 zu erkennen. Mit ansteigendem Aufprallwinkel sinkt linear der prozentuale Anteil der Rückprallgeschwindigkeit u . Dies bedeutet, je steiler der Span auf die Wand auftrifft, desto mehr

kinetische Energie wird beim Stoß in Wärme umgewandelt und steht somit nicht mehr als Bewegungsenergie zur Verfügung. Je flacher der Span auf die Wand auftrifft, desto mehr kinetische Energie bleibt erhalten.

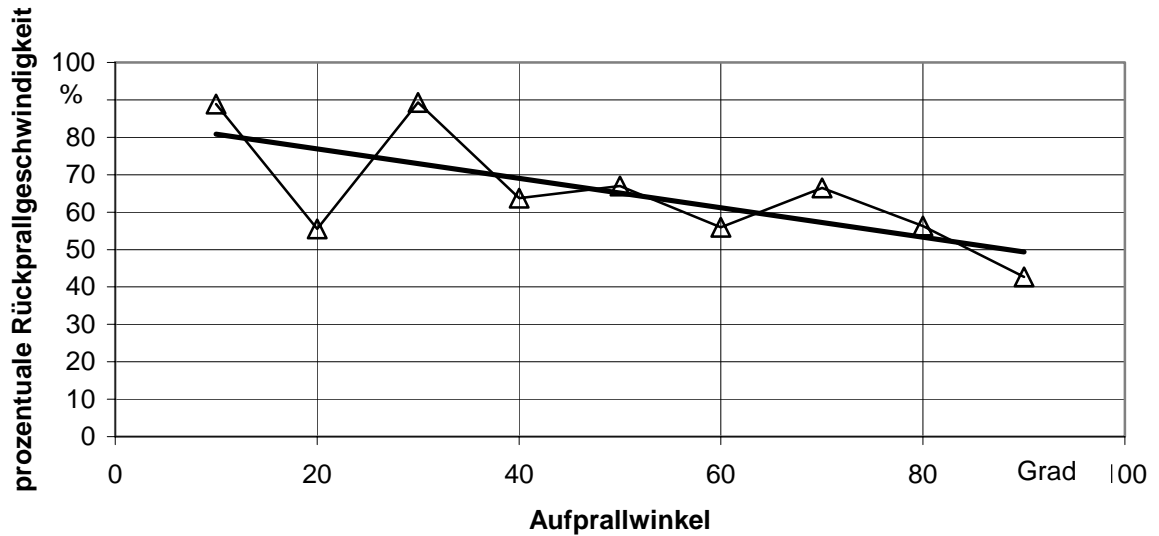


Bild 7.16: Prozentsanteil der Rückprallgeschwindigkeiten bei GGV

Vergleichende Untersuchungen mit unterschiedlichen Holzspänen ergaben eine deutliche Abhängigkeit der Geradensteigung der prozentualen Rückprallgeschwindigkeit vom Spanmaterial (Art des Holzwerkstoffes). Allerdings ist die Abweichung zwischen ähnlichen Materialien so gering, dass sowohl die Holzspäne unterschiedlicher Holzarten und Holzwerkstoffe als auch die Metallspäne unterschiedlicher Metalle zu eine Ausgleichsgeraden zusammengefasst werden können. Bild 7.17 zeigt den Vergleich der Metallspäne zu unterschiedlichen Holzspänen. Es sind sowohl die unterschiedlichen Steigungen der Ausgleichsgerade von Metall- zu Holzspänen als auch die geringen Unterschiede zwischen den Holzspänen ersichtlich

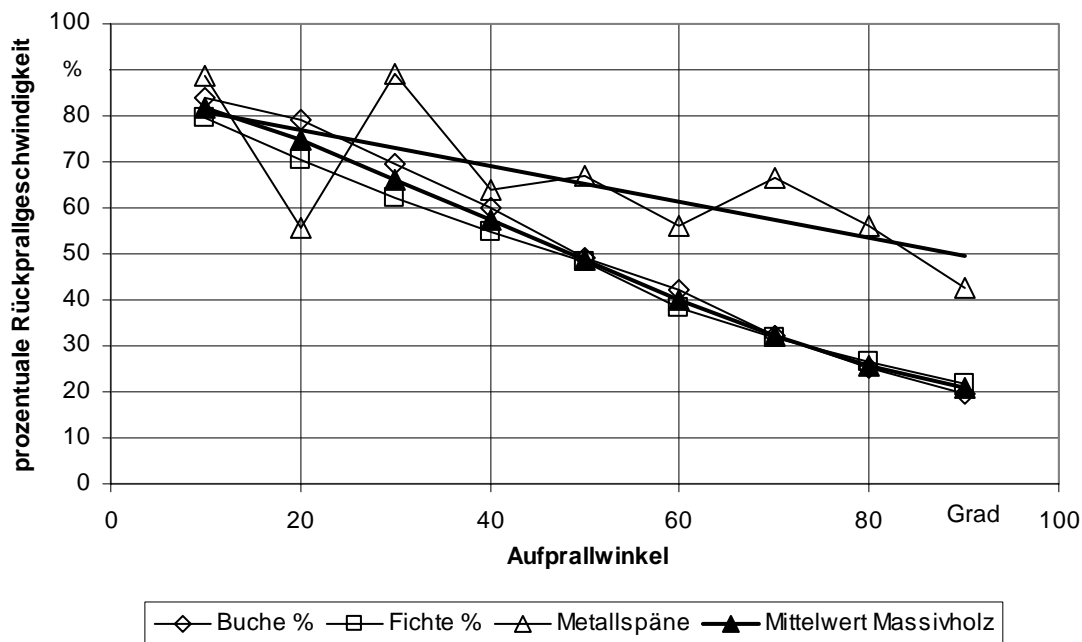


Bild 7.17: Einfluss des Spanmaterials auf die Rückprallgeschwindigkeit

7.10 Mathematische Applikation der Rückprallgeschwindigkeit

Für die Simulationsrechnung wird die Spangröße zur Bestimmung der Rückprallgeschwindigkeit somit nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sich alle Spangrößen annähernd gleich bezüglich der Geschwindigkeitsreduktion beim Stoß verhalten. Es wird auch nicht nach den Rückprallwinkeln der Späne nach dem Stoß differenziert, da sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Rückprallwinkel und der Geschwindigkeitsreduktion ergibt.

Die prozentuale Geschwindigkeitsreduktion ermittelt sich somit nach dem Diagramm in Bild 7.16 folgendermaßen:

$$\text{Metallspäne:} \quad \Delta v = -0,3974 \cdot \alpha_{ap} + 85 \quad (7.13)$$

In die Gleichung wird der Aufprallwinkel der Späne auf die Wand in Grad $\alpha_{ap} \in [0,90]$ eingesetzt.

Aus der ermittelten prozentualen Geschwindigkeitsreduktion wird schließlich die tatsächliche Geschwindigkeitsreduktion in m/s nach folgender Formel 7.15 aus der Anfangsgeschwindigkeit der Partikel berechnet.

$$v_2 = \frac{\Delta v}{100} \cdot v_1 \quad (7.15)$$

8 Simulation

Die ermittelten Versuchsergebnisse müssen abschließend in einem Werkzeug zur Simulation des Spänefluges für unterschiedlichste Absaughauben münden. Es ist jedoch nicht möglich, ohne den Berichtsrahmen zu sprengen, hier auf alle Einzelheiten der Partikelflugsimulation, und deren Umsetzung einzugehen. Kapitel 8 beschränkt sich somit auf die wesentlichste Umsetzung der gewonnenen Daten in die Partikelflugberechnung und auf die Grundstruktur des Simulationsprogramms. Eine CD mit dem entwickelten Simulationsprogramm findet sich dem Abschlussbericht angehängt.

8.1 Strömungsberechnungsprogramme

Die Strömungssimulation von Fluiden wird seit langer Zeit von diversen Programmpaketen ermöglicht (ANSYS-Flotran, CFX, Fluent). Da es sich bei der Strömungssimulation allerdings um einen sehr komplexen und rechenintensiven Vorgang handelt, haben sich am Markt, neben den Standardsoftwareanbietern auch eine Reihe von Nischenanbietern etabliert, die für ganz spezielle Strömungsprobleme angepasste Lösungen anbieten. Mit der Strömungsberechnung wird die Grundlage für die Partikelsimulation gelegt. Das Ziel der Strömungssimulation ist eine möglichst realistische Berechnung der Geschwindigkeitsverteilungen an allen Knotenpunkten im Modell. Dabei werden noch keine Späne berücksichtigt. Diese Vorgehensweise ist bis zehn Volumenprozent Späne in der Luftströmung zulässig.

8.1.1 Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware

Die Simulationsrechnung soll bei diversen Maschinenherstellern durchgeführt werden können. Das bedeutet, sie muss auf gängigen Workstations und Arbeitsplatzrechnern lauffähig sein. Eine Simulationssoftware, die speziell auf Großrechner ausgelegt ist, ist für die meisten potentiellen Anwender eines derartigen Programmpaketes nicht wirtschaftlich. Zudem soll die Simulation von Spanräumen und Absaughauben kein Verfahren für besonders problematische Anwendungen darstellen, sondern bei den entsprechenden Firmen zum Standard in der Konstruktion von Absaugelementen werden. Eine deutliche Verbesserung der Späneerfassung kann aber nur erreicht werden, wenn möglichst viele Absaugelemente einem Optimierungsprozess durch die Simulationsrechnung schon während der Konstruktion unterzogen werden.

ANSYS-Flotran bietet dazu eine gute Grundlage als Simulationssoftware. Es sind alle notwendigen Werkzeuge einer Strömungssimulation vorhanden. Zudem ist die Software speziell auf Workstations und gut ausgestattete Arbeitsplatzrechner ausgelegt. Bei aufwändigeren Rechnungen ist eine parallele Simulationsrechnung auf mehreren dieser Rechner in einem Firmennetzwerk möglich, was die notwendige Rechenzeit reduziert. Auf die eigentliche Simulationsrechnung soll hier nicht näher eingegangen werden, da auf den Stand der

Simulationsrechnung in Kapitel 2.4 schon eingegangen wurde. Für die Berechnungen im Rahmen der hier dokumentierten Untersuchungen wurden ANSYS-Flotran ausgewählt. Die erstellte Partikelsimulationssoftware kann aber bei einer Anpassung der Importfilter auch mit den Daten anderer Strömungssimulationsprogramme betrieben werden.

8.1.2 Ablauf der Strömungssimulation

Es sind bei der Strömungssimulation unterschiedliche Ansätze möglich. Bei bekanntem Auswurfverhalten der Späne aus dem Werkzeug und bekannter Lüfterwirkung des Werkzeugs muss nur das Absaugelement oder der Maschinenraum der Maschine, in welchem das Werkzeug betrieben werden soll, modelliert und simuliert werden.

Als Randbedingungen wird dem Strömungsmodell der Absaughaube bzw. des Arbeitsraums der Maschine an der Stelle der Absaugung die dort vorgegebene Luftgeschwindigkeit als Randbedingung aufgeprägt. Alle anderen Öffnungen des Modells bekommen als Randbedingung eine Druckdifferenz von $\Delta p = 0$ aufgeprägt. Dies bedeutet, je nach den Strömungsverhältnissen, die sich im Modell einstellen, dass an diesen Stellen Luft ein- bzw. auch ausströmen kann. Alle restlichen Wände bekommen die Randbedingung $v = 0$ als Randbedingung. Bild 8.1 zeigt die Strömungssimulation eines Arbeitsraumes einer Werkzeugmaschine.

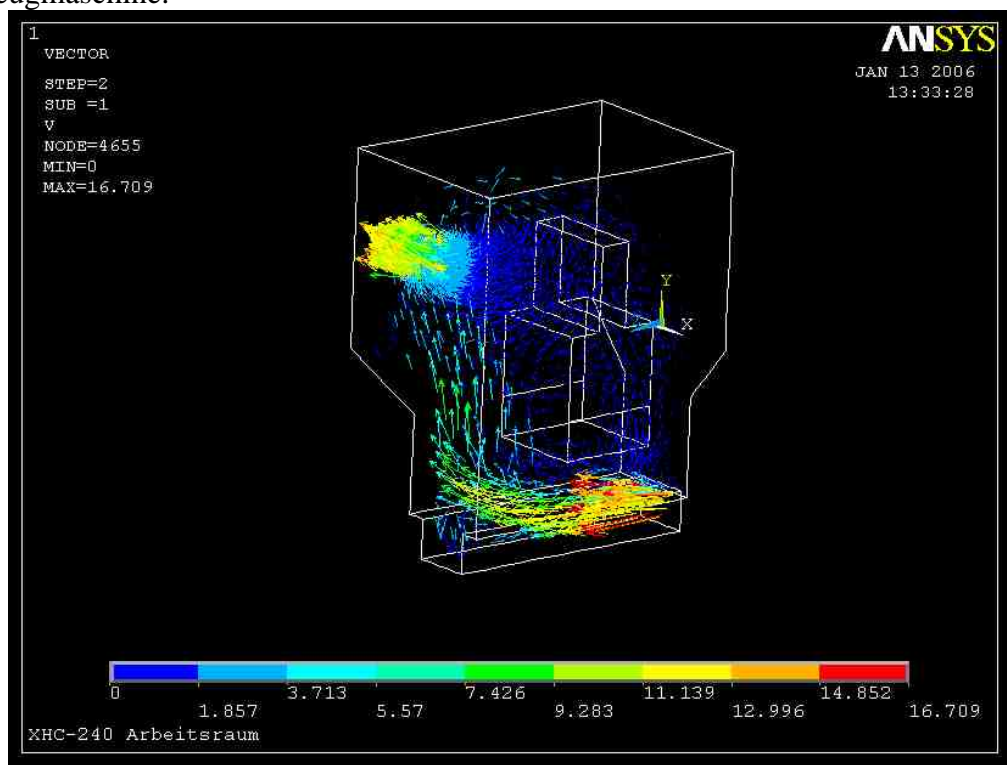


Bild 8.1: Strömungssimulation eines Arbeitsraumes einer Werkzeugmaschine

Sind jedoch die Strömungsverhältnisse am Werkzeug und das Auswurfverhalten der Späne aus dem Werkzeug nicht bekannt, so ist die Strömung im Spanraum des drehenden

Werkzeugs ebenfalls zu berechnen. Hier muss anstelle der festen Wände entweder mit bewegten Wänden oder einem drehenden Koordinatensystem die Drehbewegung des Werkzeugs definiert werden. Als Randbedingungen erhalten alle offenen Flächen wiederum eine Druckdifferenz von $\Delta p = 0$, d. h. hier kann die Strömung durch die Begrenzungsflächen ein- bzw. austreten. Alle Wandflächen erhalten die Randbedingung $v = 0$, da für den mitbewegten Beobachter im drehenden System an der mitdrehenden Wand keine Luftbewegung auftritt. Alle so berechneten Luftgeschwindigkeiten werden im drehenden System angezeigt und sind in diesem statisch. Bild 8.2 zeigt die Strömungssimulation eines einfachen Spanraums.

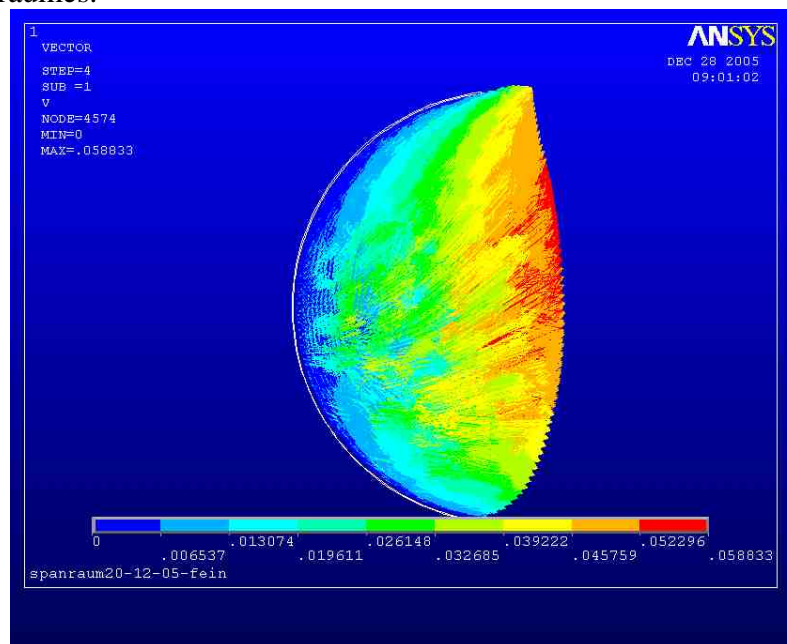


Bild 8.2: Strömungssimulation eines Spanraums

8.2 Partikelflugsimulation

Die Partikelsimulation in Absaughauben gliedert sich immer in zwei Stufen. Die erste Stufe stellt die Strömungssimulation, die zweite Stufe die Partikelflugsimulation dar. Zur Vernetzung der beiden Simulationsstufen sind zwei Konzepte mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen denkbar, welche nachfolgend behandelt werden sollen.

8.2.1 Struktur der Partikelflugsimulation

Modell "Zusatzprogramm", die eng verzahnte Lösung, stellt ein Zusatzprogramm zur Strömungssimulation dar. Die Vorteile dieser Lösung liegen hauptsächlich im geringen Programmieraufwand, da das Zusatzprogramm sehr viele Routinen des klassischen FEM-Programms nutzen kann. Es ist also hauptsächlich nur die reine Partikelflugsimulation zu programmieren. Für alle Darstellungsoptionen des Modells, der Strömung, des Berechnungsergebnisses, aber auch zur Generierung und Bereitstellung einiger zur

Partikelberechnung notwendiger Daten, wird auf fertige Module des FEM-Programms zurückgegriffen, die nur abgefragt werden müssen. Dadurch kann die Partikelsimulation, die teilweise sehr aufwändig zu erstellenden Darstellungsroutinen der FEM-Berechnung nutzen. Nachteilig an dieser eng verzahnten Lösung ist die komplizierte Bedienung des Zusatzprogramms, da ein FEM-Programm, welches nicht auf die Partikelflugsimulation ausgelegt ist, durch unterschiedlichste Kniffe und manuelle Eingaben bedient werden muss, damit die Partikelsimulation möglich und darstellbar wird. Außerdem entsteht durch die enge Verzahnung eine Reihe von teilweise sehr rechenzeitintensiven Schnittstellen. Dies kann am Beispiel der Positionsabfrage des Partikels auf seiner Flugbahn im Modell genauer erläutert werden.

Die Kommunikation des Partikelberechnungsprogramms mit der FEM-Software beschränkt sich auf Makros und Abfragen, die zwischen den Programmen übergeben werden. So muss beispielsweise während der Flugbahnberechnung nach jedem Rechenschritt die aktuelle Position des Partikels neu bestimmt werden. Beim Modell "Zusatzprogramm" geschieht dies, indem über ein Makro in der FEM-Berechnung mit der aktuellen Partikelposition abgefragt wird, ob sich diese noch im Modell und wenn ja, in welchem Netzelement befindet. Dazu muss das FEM-Programm bei jeder Positionsbestimmung einen kompletten Suchalgorithmus durchlaufen, da sich der Partikel ja im letzten Element befinden könnte. Dies ist umständlich und führt zu einer erhöhten Rechenzeit, da bei notwendigerweise kleinen Weginkrementen der Flugbahnberechnung die Positionsabfrage sehr häufig durchgeführt werden muss.

Die enge Verzahnung beider Programme hat zur Folge, dass sie in der Regel zusammen gelinkt werden müssen. Eine Zugriffsberechtigung auf den Quellcode des FEM-Programms ist hierzu notwendig. Nachteilig wirkt sich weiter die geringe Flexibilität der Partikelflugsimulation aus, sie ist fest an das eingesetzte FEM-Programm gebunden.

Das Modell "unabhängiges Programm", die eigenständige Lösung, stellt ein vollständig autarkes Simulationsprogramm für die Partikelsimulation dar. Hauptvorteil dieser Lösung ist die hohe Flexibilität. Das Programm kann mit beinahe jedem Strömungsberechnungsprogramm eingesetzt werden, wenn der Datentransfer zwischen den Programmen durch Datenexport aus dem FEM-Programm ermöglicht werden kann. Es ist somit lediglich für jedes Strömungsberechnungsprogramm ein eigener Datenimportfilter zu schreiben. Vorteilhaft wirkt sich die Verkürzung der Rechenzeit durch den Wegfall der Vernetzung beider Programme aus. Auch ist das eigenständige Partikelsimulationsprogramm einfacher zu bedienen, da es speziell auf die angestrebte Problemlösung angepasst ist. Nachteilig hingegen wirkt sich der erhöhte Programmieraufwand für die Darstellungsroutinen aus, die im Strömungsberechnungsprogramm schon vorhanden sind.

Um ein autarkes Programm zu betreiben, werden alle benötigten Daten, wie Modell, Vernetzung und Strömungsgeschwindigkeiten an den Netzknoten aus der Strömungsberech-

nung importiert. Nun hat das Programm selbst die volle Kontrolle über die gesamte Datenbasis. Dies ermöglicht eine deutlich effektivere und auch rechenzeitminimierte Programmierung. Beispielsweise kann bei der oben erläuterten Positionsbestimmung des Partikels während der Flugbahnberechnung auf wesentlich leistungsfähigere Algorithmen zurückgegriffen werden. So braucht kein kompletter Suchalgorithmus bei der Positionsabfrage gestartet werden. In vielen Fällen reicht die Abfrage, ob sich der Partikel noch im gleichen Element der Vernetzung befindet. Hat der Partikel das ursprüngliche Element verlassen, brauchen nur die angrenzenden Elemente überprüft werden, die leicht durch die gemeinsamen Knoten gefunden werden können. Zusätzlich entfällt der Aufwand Daten über Schnittstellen zwischen verschiedenen Programmen übergeben zu müssen.

Aufgrund des geringeren Programmieraufwandes wurde zunächst die eng an die FEM-Software gekoppelte Lösung umgesetzt. Es wurde ein Partikelsimulationsprogramm in der Programmiersprache Fortran 77 (der Sprache, in welcher auch die Strömungssimulation programmiert wurde) geschrieben. Es zeigte sich jedoch schnell, dass diese Vorgehensweise bald an Grenzen stößt. So war es aufgrund der unvermeidlichen Schnittstellen der Programme untereinander nicht möglich, die Rechenzeit in einem erträglichen Rahmen zu halten. Weiter waren auch etliche programmtechnische Notwendigkeiten für den Partikelflug, wie beispielsweise die exakte Bestimmung des Auftreffpunktes und Auftreffwinkels eines Partikels auf den Modellrand (Absaughaubenwand) nicht befriedigend zu lösen, da derartige Berechnungen im Strömungsberechnungsprogramm nicht vorgesehen sind. Aufgrund dieser Unzulänglichkeiten des Modells "Zusatzprogramm" musste die aufwändiger zu programmierende Lösung "unabhängiges Programm" angegangen werden. Ein Großteil der nachfolgend beschriebenen Details der Programmierung stammt aus diesem nun realisierten Programm (Chip-Si 1.0).

8.2.2 Ablauf der Partikelflugsimulation

Zuerst wird im Strömungsberechnungsprogramm ein Modell des Simulationsgebietes der Strömung generiert und eine Strömungssimulation durchgeführt. Dazu sind auf allen Rändern des Modells Randbedingungen aufzubringen. Das rotierende Werkzeug verhält sich dabei wie ein Lüfter und muss gesondert betrachtet werden.

Bei der Partikelsimulation in Chip-Si 1.0 muss nun das Modell bzw. die Knotenkoordinaten für welche Strömungsgeschwindigkeitswerte berechnet wurden und die zugehörigen Flächen des Modells exportiert und in der Partikelberechnungssoftware wieder importiert werden. Die Partikelberechnung wird nun eigenständig mit den importierten Daten ohne das Strömungssimulationsprogramm durchgeführt. Die berechneten Ergebnisse können mit eigenständigen Darstellungsroutinen zur Auswertung der Ergebnisse weiter verarbeitet werden. Auch ein Export der Daten in ein CAD-Programm über Import-Export-Schnittstellen ist denkbar, jedoch noch nicht realisiert.

Sollen die Daten über das FEM-Programm visualisiert werden, so müssen sie in diesem wieder importiert werden. Dies ist zwar aufwändig, grundsätzlich aber möglich.

8.3 Umsetzung der Untersuchung in Chip-Si 1.0

Nachfolgend soll auf einige wesentliche Eigenschaften des erstellten Programms eingegangen werden. Aufgrund des Umfangs der Programmierung ist es nicht möglich, auf alle Einzelheiten einzugehen. Auch würde es den Umfang der Dokumentation sprengen, den gesamten Quellcode im Anhang abzudrucken. Es soll jedoch versucht werden, möglichst chronologisch die Vorgehensweise der Partikelflugsimulation darzustellen. Bild 8.3 (aufgrund der Komplexität des Programmablaufs als A3-Seite nachfolgend eingheftet) zeigt den für die Partikelflugsimulation wesentlichen Ablauf. Um die Darstellung so übersichtlich wie möglich zu halten, wurde auf alle programmierten Darstellungsoperationen und deren Unterprogramme und Klassen im Ablaufdiagramm verzichtet. Die nicht dokumentierte Modelldarstellung wurde mit OpenGL realisiert.

Bild 8.3: Programmablauf

8.3.1 Oberfläche des Partikelsimulationsprogramms Chip-Si 1.0

Den Hauptteil des Bildschirms nimmt die Darstellungsfläche für das FEM-Modell ein. Am unteren rechten Bildschirmrand wird der Status der importierten Daten angezeigt. Erst wenn alle Daten des Modells, alle Luftgeschwindigkeiten und alle offenen Modellflächen eingelesen sind, kann die Simulationsrechnung gestartet werden. Die restliche Fläche rechts im Darstellungsfenster wird von der Steuerung zur Anzeige des Modells eingenommen. Die Modelldarstellung kann entweder dynamisch mit der Maus (Auswahl: "Dynamic control" oder in einzelnen Schritten mit den entsprechenden Schaltflächen durchgeführt werden. Die eigentliche Steuerung des Datenimports und der Berechnung geschieht über das Menü über dem Darstellungsfenster. Die einzelnen Schritte hierzu werden nachfolgend noch näher erläutert.

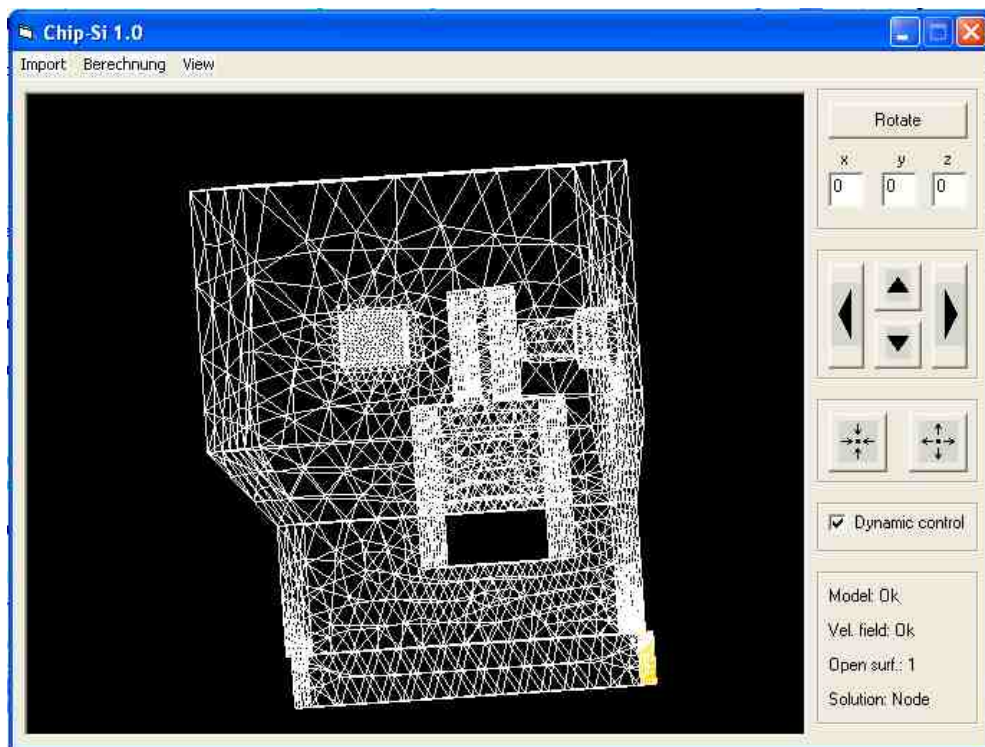


Bild 8.5 Oberfläche des Partikelsimulationsprogramms Chip-Si 1.0

8.3.2 Import der Knotendaten

Zuerst muss das eigentliche FEM-Modell in das Partikelberechnungsprogramm importiert werden. Das FEM-Modell besteht dabei aus einer Vielzahl an Elementen mit wiederum einer definierten Anzahl an Knoten pro Element. Das Partikelberechnungsprogramm ist hier ausschließlich auf die Tetraedervernetzung eines Modells ausgelegt. Die Programmierung wurde jedoch so konzipiert, dass andere Vernetzungen nachträglich ohne Probleme ergänzt werden können. Bild 8.6 zeigt das Fenster zum Import der Knoten- und später auch der Elementdaten.

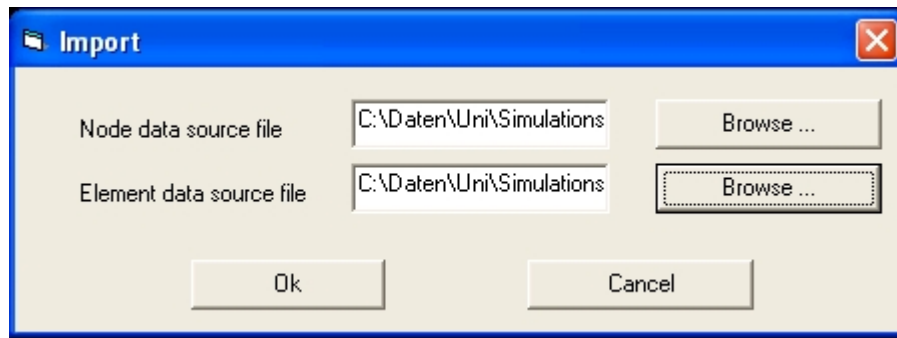


Bild 8.6: Import der Knoten- und Elementdaten

ANSYS ist in der Lage die Knotendaten in folgender Form als Ascii-File zu exportieren (Bild 8.7). Alle aus dem Strömungsberechnungsprogramm exportierten Daten werden zukünftig, wie auch im Bild 8.7 geschehen, in der Schriftart Courier New mit Rahmen dargestellt, um sie eindeutig als ANSYS-Exportfiles zu kennzeichnen. Jeder Knoten des Elementes besitzt eine eindeutige Knotennummer, welche ihn eindeutig identifiziert. Weiter sind für jeden Knoten die x-, y-, und z-Koordinaten einzulesen.

```

LIST ALL SELECTED NODES.   DSYS=  0
SORT TABLE ON  NODE  NODE  NODE

  NODE          X              Y              Z
  1    0.135000000000    0.105000000000    0.550000000000E-01
  2    0.650000000000E-01  0.175000000000    0.550000000000E-01
  3    0.133654969628    0.118656322540    0.550000000000E-01
  4    0.129671567277    0.131787840262    0.550000000000E-01
  5    0.123202872865    0.143889916306    0.550000000000E-01
  6    0.114497474687    0.154497474679    0.550000000000E-01
  7    0.103889916319    0.163202872856    0.550000000000E-01
  8    0.917878402763E-01  0.169671567271    0.550000000000E-01
  9    0.786563225526E-01  0.173654969626    0.550000000000E-01
 10    0.000000000000    0.130980762113    0.550000000000E-01
 11    0.512012722040E-01  0.173626489865    0.550000000000E-01
 12    0.379440499055E-01  0.169559860320    0.550000000000E-01

```

Bild 8.7: Knotendaten in ANSYS

8.3.3 Import der Elementdaten

Das eigentliche FEM-Modell setzt sich aus den finiten Elementen zusammen. Bei den hier verwendeten Tetraederelementen besitzt jedes Element 4 Knoten. Die Exportfunktion von ANSYS stellt neben der im Partikelsimulationsprogramm notwendigen Elementnummer und den Knotennummern noch weitere für die Strömungssimulation notwendige Daten zur Verfügung. Diese werden nicht importiert. Weiter ist ANSYS für Elemente mit bis zu 8 Knoten ausgelegt. Für Elemente mit weniger Knoten werden die nicht benötigten Knotendaten in der Exportfunktion einfach durch doppelt ausgegebene Knoten belegt (Bild

8.8). In das Partikelsimulationsprogramm werden der erste, zweite, dritte und fünfte Knoten importiert. Mit dem Import der Knoten- und Elementdaten ist das gesamte geometrische Modell, welches zur Partikelberechnung benötigt wird, komplett importiert.

| LIST ALL SELECTED ELEMENTS. (LIST NODES) | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| ELEM | MAT | TYP | REL | ESY | SEC | NODES | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1423 | 1424 | 424 | 424 | 332 | 332 | 332 | 332 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1423 | 424 | 333 | 333 | 332 | 332 | 332 | 332 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1423 | 1424 | 1425 | 1425 | 424 | 424 | 424 | 424 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1423 | 1425 | 426 | 426 | 424 | 424 | 424 | 424 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1423 | 1425 | 1424 | 1424 | 1426 | 1426 | 1426 | 1426 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1427 | 1428 | 1429 | 1429 | 118 | 118 | 118 | 118 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 118 | 1427 | 1430 | 1430 | 1429 | 1429 | 1429 | 1429 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1428 | 1431 | 1432 | 1432 | 133 | 133 | 133 | 133 |

Bild 8.8: Elementdaten in Ansys

8.3.4 Import der Luftgeschwindigkeiten an den Knoten

Als nächstes sind die Berechnungsergebnisse der Strömungssimulation, d. h. die Luftgeschwindigkeiten an den einzelnen Knoten ins Modell zu importieren. Aus ihnen kann später während der Partikelflugsimulation an jedem Punkt innerhalb des Modells eine Luftgeschwindigkeit berechnet werden. Bild 8.9 zeigt das Fenster zum Import der Luftgeschwindigkeiten.

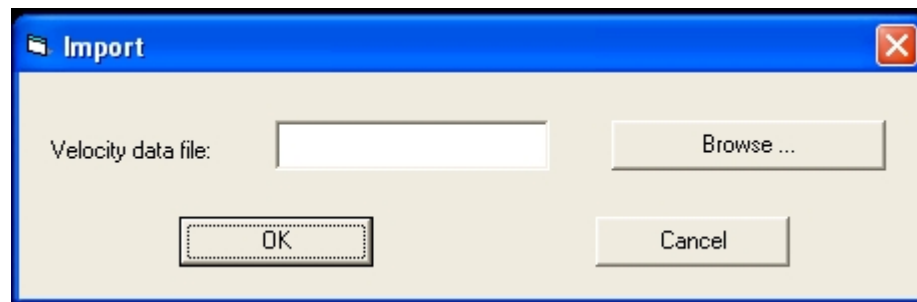


Bild 8.9: Import der Luftgeschwindigkeiten an allen Knoten

Von Ansys werden die Knotennummer in der ersten Spalte, der Betrag der Luftgeschwindigkeit der Luft am Knoten in der zweiten Spalte und die Luftgeschwindigkeiten in den drei Koordinatenachsen x, y und z in den Spalten 3-5 exportiert. Ins Modell werden nur die Luftgeschwindigkeiten in den Koordinatenachsen bezüglich der schon vorhandenen Knotennummer importiert.

Nun sind alle Berechnungsergebnisse aus der Strömungsberechnung, die für eine Simulation des Partikelfluges notwendig sind, in Chip-Si 1.0 übernommen.


```

PRINT V      NODAL VECTOR COMPONENTS
          ***** POST1 VECTOR COMPONENT LISTING *****
LOAD STEP    2  SUBSTEP=    1
TIME=        0.0000      LOAD CASE=  0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE      VSUM      DIRECTION VECTOR (X,Y,Z)
  1      9.690      0.72242  0.69146  0.00000
  2      9.690     -0.69146  0.72242  0.00000
  3      9.690      0.57364  0.81911  0.00000
  4      9.690      0.40282  0.91528  0.00000
  5      9.690      0.21652  0.97628  0.00000
  6      9.690      0.02189  0.99976  0.00000
  7      9.690     -0.17357  0.98482  0.00000
  8      9.690     -0.36237  0.93204  0.00000
  9      9.690     -0.53723  0.84343  0.00000
 10      9.690     -0.92745 -0.37394  0.00000
 11      9.690     -0.82030  0.57194  0.00000
 12      9.690     -0.91694  0.39902  0.00000

```

Bild 8.10: Luftgeschwindigkeiten an den Knoten in Ansys

8.3.5 Import der offenen Flächen

Für eine Erfassungsgradberechnung muss bekannt sein, an welchen Flächen das Modell von den Spänen verlassen werden kann. Dazu werden die entsprechenden offenen Flächen importiert. Hier ist es notwendig, die Importfunktion so zu gestalten, dass eine beliebig große Anzahl an Ein- bzw. Auslassöffnungen generiert werden kann. Somit muss jede einzulesende Fläche nach der Auswahl der entsprechenden ANSYS-Exportdatei einzeln bestätigt werden. Erst wenn alle Flächen gewählt wurden, werden diese durch das Schließen des Fensters (siehe Bild 8.11) endgültig übernommen.

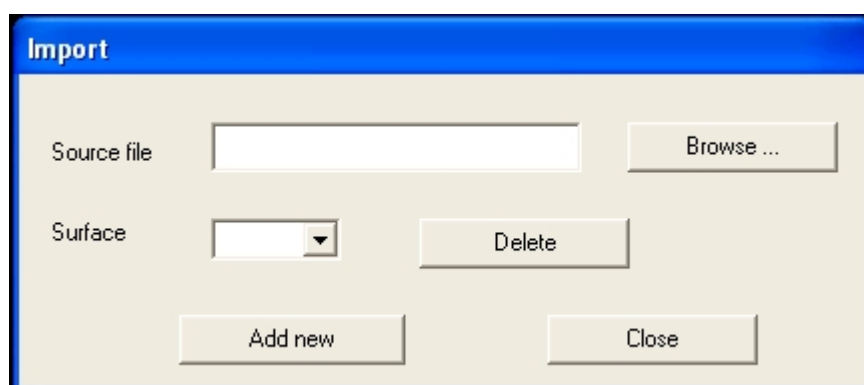


Bild 8.11: Import aller offenen Modellflächen

Um im Modell festlegen zu können, welche Flächen für Späne durchlässig sein sollen, müssen die Knoten dieser Flächen bekannt sein. Dazu muss für jede Fläche des Modells im Strömungsberechnungsprogramm eine Exportdatei generiert werden, welche die Knotennummern enthält. Die weiteren ebenfalls exportierten Koordinaten etc. werden ignoriert, da

diese schon bekannt sind. Jedem so festgelegten Knoten einer offenen Fläche wird in einer zusätzlichen Variable der Knoten-Collection ein Kennwert hinterlegt, welcher ihn als Knoten einer offenen Fläche charakterisiert.

```

LIST ALL SELECTED NODES.  DSYS= 0
SORT TABLE ON  NODE  NODE  NODE

  NODE      X      Y      Z      THXY  THYZ  THZX
1224  0.34000  0.11000  0.67500E-01  0.00  0.00  0.00
1225  0.34000  0.87500E-01  0.90000E-01  0.00  0.00  0.00
1226  0.34000  0.10418  0.68267E-01  0.00  0.00  0.00
1227  0.34000  0.98750E-01  0.70514E-01  0.00  0.00  0.00
1228  0.34000  0.11000  0.11250  0.00  0.00  0.00
1229  0.34000  0.88267E-01  0.95823E-01  0.00  0.00  0.00
1230  0.34000  0.90514E-01  0.10125  0.00  0.00  0.00
1272  0.34000  0.13250  0.90000E-01  0.00  0.00  0.00
1273  0.34000  0.11582  0.11173  0.00  0.00  0.00
1274  0.34000  0.12125  0.10949  0.00  0.00  0.00
1275  0.34000  0.13173  0.84177E-01  0.00  0.00  0.00
1276  0.34000  0.12949  0.78750E-01  0.00  0.00  0.00
1308  0.34000  0.12125  0.93014E-01  0.00  0.00  0.00
1309  0.34000  0.11050  0.10212  0.00  0.00  0.00
1310  0.34000  0.11285  0.79366E-01  0.00  0.00  0.00
1311  0.34000  0.10026  0.84375E-01  0.00  0.00  0.00
1312  0.34000  0.99587E-01  0.96205E-01  0.00  0.00  0.00
1313  0.34000  0.10892  0.90893E-01  0.00  0.00  0.00
3172  0.34000  0.94090E-01  0.74090E-01  0.00  0.00  0.00
3173  0.34000  0.94090E-01  0.10591  0.00  0.00  0.00

```

Bild 8.12: Knotendaten der offenen Modellflächen

8.3.6 Definition des Werkstoffs

Dem Partikelsimulationsprogramm muss weiter bekannt sein, aus welchem Werkstoff die Späne bestehen. Zurzeit lassen sich diverse Holzwerkstoffe sowie die untersuchten Aluminium-Legierung bzw. GGV auswählen. Weiter können zwei Flüssigkeiten definiert werden. Diese werden bei der Partikelberechnung als Kugeln mit definiertem Durchmesser angenommen.

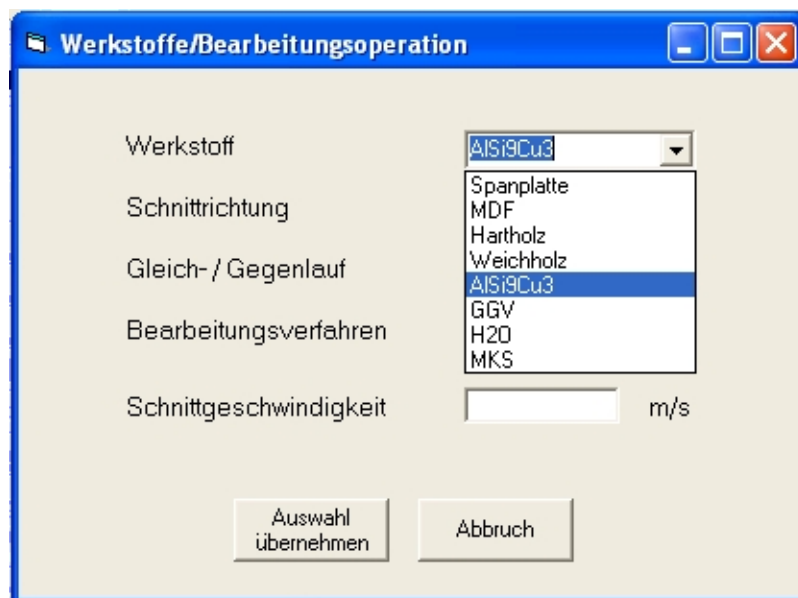


Bild 8.13: Auswahl des Werkstoffs

Die weiteren Auswahloptionen wie Schnittrichtung, Gleich- und Gegenlauf und das Bearbeitungsverfahren werden nur für die Späne der Massivhölzer bzw. der Holzwerkstoffe benötigt. Die Schnittgeschwindigkeit wird bei allen Werkstoffen gebraucht. Sie wird als Anfangsgeschwindigkeit für die Späne verwendet. Sollen Tröpfchen von Wasser oder MMS verwendet werden, so ist die Schnittgeschwindigkeit dort mit der Anfangsgeschwindigkeit (z. B. der Ausblasgeschwindigkeit am Werkzeug) gleichzusetzen.

8.3.7 Strömungsrandbedingungen am Werkzeug

Es gibt zwei unterschiedliche Möglichkeiten, die Randbedingungen der Strömungsgeschwindigkeit am Werkzeugumfang in die Berechnung der Absaughaube einfließen zu lassen. Welche Möglichkeiten nutzbar sind, hängt stark vom verwendeten Strömungssimulationsprogramm ab. Ist die emittierte Strömungsgeschwindigkeit des Werkzeugs aus Versuchen oder Messungen bekannt, so kann sie über ein Makro als Randbedingung in das Modell eingesetzt werden. Die Versuche können mit wenig Zeitaufwand mit jeder frei drehenden Spindel durchgeführt werden. In vielen Fällen ist eine Messung eines vorhandenen Werkzeugs schneller durchgeführt, als die nachfolgend beschriebene Simulationsrechnung.

Ist die Strömungsgeschwindigkeit um das Werkzeug nicht bekannt oder kann sie nicht gemessen werden, da das Werkzeug nicht vorliegt, kann sie in einer ersten Stufe simuliert und die berechneten Ergebnisse, die mit drehendem Koordinatensystem berechnet werden müssen, auf das stehende System übertragen und in die Rechnung als Randbedingung eingesetzt werden. Dazu muss das Simulationsprogramm in der Lage sein, drehende Systeme wie Lüfter etc. zu berechnen. ANSYS-Flotran ermöglicht diese Simulationsrechnung. Dies bedeutet, die Simulationsergebnisse liegen im drehenden System vor und müssen, bevor sie als Randbedingungen für die Simulationsrechnung der Absaughaube einsetzbar sind, in das stehende System umgerechnet werden. In die Simulationsrechnung wird über den ganzen Werkzeugumfang eine gemittelte Strömungsgeschwindigkeit mit einem gleich bleibenden Abströmwinkel eingesetzt. Dazu wird für jeden Knoten am Werkzeug ein eigenes lokales Koordinatensystem tangential und normal zur Werkzeugoberfläche definiert, in welchem der Geschwindigkeitsvektor der Strömung bekannt ist. Die in diesem Koordinatensystem eingesetzte Strömungsgeschwindigkeit in x- und y-Richtung muss nun in das Gesamtkoordinatensystem zurückgerechnet und auf den Knoten aufgebracht werden. Manuell muss in dieses ANSYS-Makro nur die Fläche, an der die Luftgeschwindigkeit als Randbedingung aufgebracht wird, eingegeben werden, sowie die Koordinaten der Werkzeugachse und die Luftgeschwindigkeit bezogen auf das lokale Koordinatensystem am Werkzeugumfang. Zum Aufbringen der Randbedingungen auf das Modell wird dann einfach das Makro ausgeführt.

```

! Einbeziehung der Werkzeuggeschwindigkeit
alls
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!      INPUT - SECTION
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! select all areas, from which particles may start
asel,s,,,20,24,4
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
nsla,s,1
/prep7
!!!!! Tangential velocity
VTang=6.7
!!!!! Radial velocity
VRad=7
!!!!!
!! X and Y coordinates of the tools center
CenterX = 0.065D0
CenterY = 0.105D0
!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*get,NumSelNodes,NODE,,count
NodeNum=0
*do,iIdx,1,NumSelNodes
  NodeNum=NDNEXT(NodeNum)
  CoordX=NX(NodeNum)
  CoordY=NY(NodeNum)

  !Berechne radialen vektor
  dRadVecX=CoordX-CenterX
  dRadVecY=CoordY-CenterY
  dNormRadVec=dRadVecX**2+dRadVecY**2
  dNormRadVec=sqrt(dNormRadVec)
  dRadVecX=dRadVecX/dNormRadVec
  dRadVecY=dRadVecY/dNormRadVec

  !Berechne tangentialen vektor
  dTangVecX=-dRadVecY
  dTangVecY=dRadVecX
  dTangVecZ= 0.0
  dNormTangVec=dTangVecX**2+dTangVecY**2+dTangVecZ**2
  dNormTangVec=sqrt(dNormTangVec)
  dTangVecX=dTangVecX/dNormTangVec
  dTangVecY=dTangVecY/dNormTangVec
  dTangVecZ=dTangVecZ/dNormTangVec

  !Berechnung des Geschwindigkeitsvektors am Werkzeug
  VelX=VTang*dTangVecX+VRad*dRadVecX
  VelY=VTang*dTangVecY+VRad*dRadVecY
  VelZ=0.0
  d,NodeNum,VX,VelX
  d,NodeNum,VY,VelY
  d,NodeNum,VZ,VelZ
*enddo

```

Soll die berechnete Strömungsgeschwindigkeit eines Spanraums in das Modell der Haube eingesetzt werden, so muss aus den Abströmbedingungen des Spanraumes ein Mittelwert über den Werkzeugumfang generiert werden. Diese üblicherweise als radiale und tangentiale

Luftgeschwindigkeit am Werkzeugumfang bekannte Strömungsgeschwindigkeit wird dann an jedem Knotenpunkt des neuen Modells in eine Luftgeschwindigkeit bezüglich des Koordinatensystems des neuen Modells umgerechnet und den einzelnen Knoten aufgeprägt. Dies kann dann über den Export der Befehle für das Strömungsberechnungsprogramm durch die Partikelsimulation geschehen.

8.3.8 Neudefinition der Randbedingungen des Modells

Die Partikelflugsimulation benötigt zusätzliche Informationen über die Knoten des Modells, die in dieser Form in der Strömungssimulation nicht vorgesehen sind. Es müssen folgende Unterscheidungen getroffen werden:

- Knoten liegt nicht auf dem Rand des Modells (Innenknoten).
- Knoten liegt auf dem Rand des Modells und liegt auf der Wand.
- Knoten liegt auf dem Rand des Modells und liegt auf einer Einlassfläche.
- Knoten liegt auf dem Rand des Modells und liegt auf einer Auslassfläche.
- Knoten liegt auf dem Rand des Modells und liegt auf dem Werkzeug.

Es ergibt sich weiter die Problematik, dass es für Knoten, die auf dem Rand zwischen beispielsweise Rand und Auslass liegen, möglich ist, sowohl Rand als auch Auslass zu sein. Dies folgt aus der Tatsache, dass beim Verlassen des Elementes, in welchem sich ein Spanpartikel bei der Flugbahnsimulation befindet, geprüft werden muss, ob es sich bei der Auslassfläche um eine Randfläche des Modells handelt. Dies geschieht am einfachsten, indem alle 3 Knoten, welche die Elementbegrenzungsfläche aufspannen, bezüglich ihrer Randbedingungen abgefragt werden, ob sie im Modell liegen. Wird einer der drei Knoten als im Modell liegend identifiziert, kann es sich nicht um eine Randfläche handeln. Wird keiner der Knoten der Elementfläche als im Modell liegend erkannt, muss es sich zwangsläufig um eine Randfläche des Modells handeln. Nun ist es wichtig, um welche Art von Randfläche es sich handelt. Trifft der Span auf eine Wand, so muss eine Reflexion des Partikels ausgelöst werden. Trifft der Span auf eine andere Begrenzungsfläche muss er der jeweiligen Flächenkategorie zugeordnet werden (Beispiel: Span verlässt das Modell an Auslassfläche) und die Berechnung des nächsten Spanpartikels am Werkzeug wird ausgelöst. Der gleiche Knoten, der auf dem Rand zwischen Wandfläche und Auslassfläche liegt, muss damit für die Begrenzungsfläche des Netzelements, welches an die Auslassfläche angrenzt, als Auslassflächenknoten und für das Netzelement, welches an die Wandfläche angrenzt, als Wandknoten identifiziert werden können. Somit ist es nicht möglich die Randbedingungen eines Knotens in einer Variablen kodiert abzulegen. Für die Definition der Randbedingungen auf einem Knoten muss für jede mögliche Randdefinition (Wand, Einlass, Auslass, Werkzeug) eine eigene Variable definiert werden.

Es gibt prinzipiell zwei unterschiedliche Vorgehensweisen, dem Modell in Chip-Si 1.0 mitzuteilen, welchen Status die Knoten bezüglich der Randbedingungen des Modells haben:

a) Generierung der Unterscheidung im Strömungsberechnungsprogramm

Da für diese Zusatzinformationen keine Variable in ANSYS-Flotran vorgesehen ist, wird die ENKE-Variable, welche normalerweise die turbulente kinetische Energie der einzelnen Knoten beinhaltet, verwendet und manuell mit einem Makro (SetEnke.mac) verändert. Dieser Schritt kann aber erst nach Abschluss der Strömungsberechnungen erfolgen, da die ENKE-Werte abhängig vom eingesetzten Turbulenzmodell in der Simulationsrechnung benötigt werden. Einen gravierenden Vorteil bietet hier ein eigenständiges Berechnungsprogramm, da die Knoteninformationen hier in eine eigens dafür deklarierte Variable geschrieben werden können. Dadurch ist eine, auch versehentliche Verfälschung der Partikelberechnung durch die Knoteninformationen über die Wandeigenschaften (Auslass, Einlass, Wand, Volumen) nicht möglich. Abhängig vom Modell muss das Makro zur Einsetzung der Knotenbedingungen in die ENKE-Werte von Flotran jeweils manuell angepasst werden. So sind die Select-Befehle an die im Modell tatsächlich vorhandenen Flächen und Linien und deren Nummern anzupassen.

```

/prep7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!      Begin part 0
!set all ENKE-Values to 0
alls
*get,NumSelNodes,NODE,,count
NodeNum=0
! set ENKE values for all nodes equal 0
*do,iIdx,1,NumSelNodes
    NodeNum=NDNEXT(NodeNum)
    d,NodeNum,ENKE,0
*enddo
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!      Begin part 1
!deselect all areas where particles may run through
asel,u,,,12
!mh1,mh2
asel,u,,,26
!mh3,mh4
!asel,u,,,27
asel,u,,,6
!!      End part 1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! select all nodes associated with the remaining areas
nsla,s,1
*get,NumSelNodes,NODE,,count
NodeNum=0
! set ENKE values for all nodes associated to areas where
! particles must not run through equal -1
*do,iIdx,1,NumSelNodes
    NodeNum=NDNEXT(NodeNum)
    d,NodeNum,ENKE,-1
*enddo
alls

```

Die ENKE-Werte werden auf die Knoten des Volumenmodells nach folgendem Schema vergeben:

- "0" für alle Knoten, die im Inneren des Modells liegen.
- "-1" für alle Knoten, die auf Randflächen liegen und zu einer Wand gehören.
- "-2" für alle Knoten, die auf Randflächen und zu einem Einlass gehören.
- "-3" für alle Knoten, die auf einer Randfläche liegen zu einem Auslass gehören.
- "-4" für alle Knoten, die auf einer Randfläche liegen und zum Werkzeug gehören.
- "-5" für alle Knoten die auf einer Randfläche liegen und zum Werkzeug und der Wand gehören.
- ... (Alle möglichen Kombinantionen benötigen ihre eigene ENKE-Nummer).

Da eine Variable für alle Randzustände verwendet wird, müssen dieser Variablen sehr viele unterschiedliche Zustände der einzelnen Knoten zugewiesen werden können. Zudem müssen diese Zustände in der richtigen Reihenfolge im ANSYS-Makro gewählt werden (Flächen vor Linien), da beispielsweise ein Knoten zwischen einer Wand- und einer Auslassfläche bei der Auswahl der entsprechenden Fläche immer den ENKE-Wert der jeweiligen Fläche zugewiesen bekommt. Werden zuerst die Flächen mit ENKE-Werten belegt, so erhält der Randknoten zwischen zwei Flächen mehrmals einen neuen Enkewert. Anschließend an die Flächen müssen die Begrenzungslinien erneut selektiert werden, um Ihnen ihren korrekten ENKE-Wert als Knoten, beispielsweise zwischen Wand- und Auslassfläche, zuzuweisen.

Aufgrund der unterschiedlich gesetzten ENKE-Werte für die Knoten des Modells kann das nach der Strömungssimulation eingesetzte Flugbahnrechnungsprogramm entscheiden, an welcher Stelle die Späne das Simulationsgebiet verlassen dürfen oder ob ein Wandkontakt vorliegt und die Routine zur Spänereflexion aufgerufen werden muss.

Nachteil dieser Vorgehensweise ist die sehr aufwändige und fehleranfällige Flächenauswahl im Strömungsberechnungsprogramm selbst. Zumal streng auf die Reihenfolge der ENKE-Wertzuzuweisung geachtet werden muss. Vorteilhaft ist jedoch die einfache Definition der Randbedingungen, über die im Strömungsberechnungsprogramm vorhandenen Flächen- und Liniennummern.

b) Import der einzelnen Randflächen in Chip-Si 1.0

Die zweite Möglichkeit die Randbedingungen zu definieren, besteht im separaten Import aller unterschiedlicher Randbedingungen in Chip-Si 1.0. Dazu bedient man sich eines einfachen Tricks. Die einzelnen Flächen (Wand, Einlass, Auslass, Werkzeug) werden in ANSYS nacheinander selektiert und mit einer Randbedingung versehen (beispielsweise Druckdifferenz). Diese Randlasten werden entweder direkt auf dem Knoten aufgebracht oder beim Berechnungsstart von ANSYS (Berechnung von 0 Iterationen) auf die Knoten des Modells übertragen und können dann einfach als Auflistung der Randlasten als Ascii-File exportiert

werden. Diese Files mit unterschiedlichen Randbedingungen können nun nacheinander in Chip-Si 1.0 eingelesen werden. Dabei werden nur jeweils die Randbedingungen gesetzt, die gerade eingelesen werden. Somit ist es einfach möglich einem Knoten mehrere voneinander unabhängige Randbedingungen zu geben.

Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist die Notwendigkeit 0 Iterationen in der Strömungsberechnungssoftware ANSYS rechnen zu müssen oder die Randbedingungen direkt auf die Knoten aufbringen zu müssen, sowie das anschließend notwendige Löschen der "falschen" Randbedingungen. Werden als Randbedingungen Luftgeschwindigkeiten verwendet, hat es zur Folge, dass diese beim Export der Daten aus ANSYS in alle drei Koordinatenrichtungen aufgeteilt exportiert werden. Für den Datenimport ergeben sich dadurch aber keine Nachteile, außer dass die Randbedingung dreimal nacheinander auf den gleichen Knoten aufgebracht wird (Rechenzeit).

Vorteilhaft bei dieser Lösung ist hingegen die geringere Fehleranfälligkeit, da die Randbedingungen nicht in einer festen Reihenfolge aufgebracht werden müssen. Es ist nur darauf zu achten, die alten Randbedingungen vor dem Export der neuen komplett zu löschen. Auch ist die Definition der Randbedingungen einfacher, weil selbsterklärend. Es wird in Chip-Si 1.0 definiert, welche Randbedingungen eingelesen werden. Es ist nicht notwendig, diese in einem Macro-File von Hand zu definieren.

Alles in allem geben diese Vorzüge den Ausschlag, dass die zweite Möglichkeit, d. h. der Import der einzelnen Randflächen in Chip-Si 1.0 implementiert wurde.

8.3.7 Starten der Simulation

Die letzten einzulesenden Daten sind die Startbedingungen für die zu berechnenden Partikel sowie die notwendige Festlegung einer maximalen Iterationsanzahl pro Partikel (siehe Bild 8.14). Die Vorgabe einer maximalen Iterationsanzahl verhindert, dass sich einzelne Partikel im Modell (beispielsweise in einem Wirbel) totlaufen und die Rechnung so unverhältnismäßig lange verzögert wird. Wird diese maximale Iterationsanzahl erreicht, wird die Berechnung der Partikelflugbahn abgebrochen und der nächste Partikel der Liste gestartet. Die Option "Spanraumberechnung durchführen" bereitet die Option vor, das drehende System des Werkzeugs separat zu betrachten (siehe Kapitel 8.4.4). Hier müssen andere Anfangsbedingungen und Flugbahnberechnungsmodule in die Berechnung eingesetzt bzw. angewendet werden (Start der Späne an der Schneidkante, Ermittlung der Flugbahn im drehenden System, etc.).

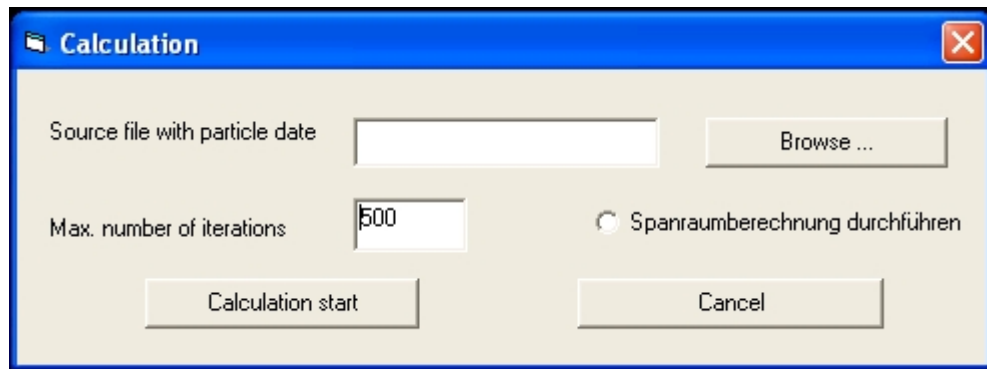


Bild 8.14: Start der Simulationsrechnung

Das zu importierende Partikeldatenfile enthält eine Reihe von Informationen zu den Anfangsbedingungen des Partikelfluges. In der ersten Zeile des Files wird nur die Anzahl der für die Berechnung vorhandenen Partikel definiert. Im Falle des Beispielfiles (siehe Bild 8.15) sind dies 13 Partikel. Nachdem die Partikelanzahl gelesen ist, werden folgende Daten für jeden Partikel definiert:

1. Partikelnummer
2. Startkoordinaten im kartesischen Koordinatensystem xyz
3. Partikelgeschwindigkeit in xyz-Richtung
4. Partikelquerschnitt in m^2
5. Partikelmasse in kg

| | | | | | | | | |
|----|--------------|--------------|--------------|---------|----------|---------|--------------|--------------|
| 13 | | | | | | | | |
| 1 | 0.266688E-08 | 0.790192E-01 | 0.305096E-01 | 8.16210 | -20.4204 | 0.00000 | 0.134455E-03 | 0.254768E-05 |
| 2 | 0.550140E-02 | 0.681230E-01 | 0.492611E-01 | 11.5853 | -18.6920 | 0.00000 | 0.477947E-03 | 0.168423E-03 |
| 3 | 0.252842E-02 | 0.734199E-01 | 0.483065E-01 | 9.92118 | -19.6260 | 0.00000 | 0.272956E-03 | 0.313716E-04 |
| 4 | 0.715742E-02 | 0.655762E-01 | 0.369009E-01 | 12.3854 | -18.1718 | 0.00000 | 0.560539E-03 | 0.223413E-03 |
| 5 | 0.616370E-02 | 0.670752E-01 | 0.360035E-01 | 11.9144 | -18.4840 | 0.00000 | 0.107024E-04 | 0.113332E-08 |
| 6 | 0.594372E-03 | 0.775789E-01 | 0.411764E-01 | 8.61458 | -20.2336 | 0.00000 | 0.207412E-03 | 0.935216E-05 |
| 7 | 0.153921E-01 | 0.556132E-01 | 0.396013E-01 | 15.5153 | -15.5848 | 0.00000 | 0.609790E-04 | 0.319713E-06 |
| 8 | 0.921935E-02 | 0.627091E-01 | 0.497877E-01 | 13.2861 | -17.5240 | 0.00000 | 0.995323E-04 | 0.973215E-06 |
| 9 | 0.184273E-01 | 0.527412E-01 | 0.388963E-01 | 16.4176 | -14.6312 | 0.00000 | 0.127203E-03 | 0.303510E-05 |
| 10 | 0.188042E-01 | 0.524077E-01 | 0.387740E-01 | 16.5223 | -14.5128 | 0.00000 | 0.164293E-03 | 0.653939E-05 |
| 11 | 0.179375E-01 | 0.531819E-01 | 0.433146E-01 | 16.2791 | -14.7851 | 0.00000 | 0.388326E-03 | 0.564209E-04 |
| 12 | 0.113446E-01 | 0.600434E-01 | 0.361650E-01 | 14.1235 | -16.8563 | 0.00000 | 0.419071E-03 | 0.709111E-04 |
| 13 | 0.182256E-01 | 0.529217E-01 | 0.409959E-01 | 16.3609 | -14.6946 | 0.00000 | 0.915746E-04 | 0.757952E-06 |

Bild 8.15: Partikeldaten

8.3.8 Spanmassenfaktor

Für die Berechnung einer Absaughaube können nicht alle entstehenden Späne berechnet werden. Dies würde die Rechenkapazität jedes Großrechners überschreiten. Es muss eine Vereinfachung getroffen werden, um die Rechenzeit in vernünftigen Grenzen zu halten. Dies kann dadurch geschehen, dass nur eine exemplarische, statistisch ausreichende Anzahl an Spänen (in der Regel 1000) berechnet wird, denen ein so genannter Spanmassenfaktor zugewiesen wird. Sinnvollerweise werden die zu berechnenden Späne nach den Spangrößenklassen der Siebanalyse gewählt, da in dieser Staffelung die Spangrößenverteilungen incl. der Spanmassen und Dimensionen aus den Versuchen bekannt sind.

Der Spanmassenfaktor wird jedem zu berechnenden Span einzeln zugewiesen. Er gibt den prozentualen Anteil des berechneten Spans an der Gesamtmasse der Späne an. Das heißt, der Spanmassenfaktor ist immer eine Zahl zwischen Null und Eins. Die Summe aller Spanmassenfaktoren aller Späne einer Simulationsrechnung muss dadurch immer Eins ergeben. Der Spanmassenfaktor wird, für die Darstellung der Berechnungsergebnisse verwendet.

8.3.9 Generierung der Spanmassenverteilung von Spanpartikel am Werkzeug

Für die manuelle Generierung der Spanmassenverteilung muss eine Auswurfcharakteristik des Werkzeugs vorgegeben werden (Bild 8.16). Mit dieser vorgegebenen Massenverteilung wird über eine Wahrscheinlichkeitsbetrachtung vor der Startpunktgenerierung des Partikels der Winkelbereich definiert, in welchem der Span sich befinden soll. Innerhalb des Winkelbereichs und über die Werkzeugbreite wird nochmals linear interpoliert. Der so gefundene Startpunkt wird dem Span schließlich zugewiesen.

| 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| 100° | 110° | 120° | 130° | 140° | 150° | 160° | 170° | 180° |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

Hinweis: Die Spanverteilung wird in % vom Austrittspunkt der Schneide aus dem Werkzeug in Drehrichtung gemessen!

Hinweis: Alle Felder zusammen müssen 100 % ergeben!

Abbruch OK

Bild 8.16: Eingabe der Spanmassenverteilung am Werkzeug

8.3.10 Startrichtung der Spanpartikel (Näherung)

Als Startrichtung der Späne wird vereinfachend die Richtung tangential zur Werkzeugaußenkontur angenommen. Dies ist nicht ganz korrekt, da die Späne teilweise entlang der Werkzeugschneide durch auf sie wirkende Fliehkräfte aus dem Spanraum rutschen. Sie erhalten somit auch eine, wenn auch kleinere radiale Geschwindigkeitskomponente, die bei dieser Näherung vernachlässigt wird.

8.3.11 Startgeschwindigkeit der Spanpartikel (Näherung)

Die Startgeschwindigkeit der Späne wird mit der Umfangsgeschwindigkeit = Schnittgeschwindigkeit des Werkzeugs gleichgesetzt. Auch dies ist eine Vereinfachung, da Späne,

wenn sie keinen Kontakt zur Spanraumwand haben, der Schneide minimal vorausseilen. Im Vergleich zur Schnittgeschwindigkeit sind diese Geschwindigkeitsdifferenzen jedoch marginal.

8.3.12 Berechnung der Partikelflugbahn

Die Bewegungsgleichung der Späne wird durch folgende, in der Berechnung angewandte, gewöhnliche Differentialgleichung (Formel (8.1)) beschrieben:

$$\dot{V}_P = \frac{\rho_P - \rho_F}{\rho_P + c_A \rho_F} g - 0,75 \frac{c_W \rho_F}{d_p (\rho_P + c_A \rho_F)} (V_P - V_F) |V_P - V_F| \quad (8.1)$$

mit:

V_P : Partikelgeschwindigkeit

V_F : Fluidgeschwindigkeit

ρ_P : Partikeldichte

ρ_F : Fluiddichte

d_p : Partikeldurchmesser

c_W : c_W -Wert

c_A : Koeffizient der scheinbaren Masse

Die Differentialgleichung wird mit Hilfe des Euler-Verfahrens numerisch gelöst. Unter den vorgegebenen Anfangsbedingungen von Startpunkt und Startgeschwindigkeit liefert das Euler-Verfahren eine Trajektorie (Flugbahn), auf der sich der Span im Luftraum der Haube bewegt.

8.3.13 Darstellung der Spanflugbahn

Im eng mit der Strömungsberechnung verzahnten Programm wird der Stand der Berechnung in einem Ausgabefenster als Textfile ausgegeben. Eine Ausgabe wird immer dann generiert, wenn der Partikel auf ein Randelement des Modells trifft. Es wird jeweils die Nummer des aktuell berechneten Spans und dessen Position und Geschwindigkeit (jeweils aufgeteilt in die kartesischen Koordinaten x , y , z) ausgegeben. Aus der ausgegebenen Spannummer lässt sich dann ersehen, ob der Span beim Kontakt mit dem Modellrand reflektiert wurde (die Spannummer bleibt bei der nächsten Ausgabe identisch) oder ob er das Modell verlassen hat (es wird ein neuer Span berechnet). Auch kann beobachtet werden, ob sich der Span noch bewegt oder ob er sich evtl. im Modell totgelaufen hat (Geschwindigkeiten und Position verändern sich nicht mehr). Eine Darstellung der Flugbahn ist jedoch aufgrund der dafür benötigten Rechenzeit durch die dazu notwendige Rücktransformation der Daten ins FEM-Programm nicht darstellbar. ANSYS-Flotran ist darauf ausgelegt, die gesamten Berechnungsergebnisse einer Strömungssimulation komplett und nach der Berechnung anzuzeigen. Für eine Darstellung der Flugbahn müsste jedes mal das gesamte Modell übergeben, gelesen und

schließlich ausgegeben werden, was aufgrund der dafür benötigten Rechenzeit nicht angebracht erscheint.

Die Darstellungsmöglichkeiten von Chip-Si 1.0 sind dagegen weit günstiger. Durch die Übernahme des Modells als Linienmodell kann hier sehr einfach die aktuelle Flugbahn des Partikels ohne deutliche Rechenzeitverlängerung durch einfaches Anhängen eines Linienelementes an die letzte Position des Partikels dargestellt werden (siehe Bild 8.17).

8.3.14 Abbruch der Berechnung

Ohne die Darstellung der Flugbahn ist eine Beurteilung der Berechnung auf evtl. Fehler durch den Bediener nicht möglich. Durch die online aktualisierte Darstellung der Partikelflugbahn kann der Bediener sehr schnell Fehler in der Simulationsrechnung erkennen und gegebenenfalls die Rechenoperation vorzeitig abbrechen und nach einer Fehlerbeseitigung erneut starten. So kann sehr viel unnötige Rechenzeit gespart werden, wenn der Bediener nicht erst nach Beendigung der Simulationsrechnung erkennt, ob eine Rechnung brauchbare Ergebnisse liefert.

Eine weitere Möglichkeit, unnötige Rechenzeit zu sparen, ist die Definition eines Abbruchkriteriums beim Erreichen eines definierten Zustands. Ein Abbruchkriterium kann beispielsweise das Erreichen eines konstanten Erfassungsgrades sein.

Damit sich die Rechnung nicht an Spänen aufhängt, welche sich in einem Wirbel totlaufen, wird eine maximale Iterationsanzahl festgelegt, nach welcher die Berechnung des Einzelspanes auf jeden Fall abgebrochen wird. Zudem wird die Berechnung von Spänen, die sich in der Absaughaube nicht mehr bewegen ($v \rightarrow 0$) durch eine Überprüfung der Partikelgeschwindigkeit ebenfalls abgebrochen, um Späne zu erkennen, die sich in der Haube abgesetzt haben.

8.3.16 Berechnen der Luftgeschwindigkeit am Span

Die Späne befinden sich nach den einzelnen Berechnungsschritten irgendwo in den finiten Elementen des Modells. Da die Luftgeschwindigkeiten der Strömungsberechnung immer an die Knoten der Elemente gekoppelt sind, muss zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit an den Koordinaten des Partikels der Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeiten (vektoriell) in Abhängigkeit von den Distanzen des Partikels zu den einzelnen Knoten im Element, in dem sich der Partikel befindet gebildet, werden.

8.3.16 Berechnung des c_w -Werts über der Partikelflugbahn

Der c_w -Wert eines Partikels hängt in erster Linie von der Reynoldszahl, d. h. seinen Partikelmaßen zur ihm am Berechnungspunkt umgebenden Luftgeschwindigkeit, ab. Nachdem die Luftgeschwindigkeit am Spanflugpunkt, wie oben gezeigt, berechnet wurde, kann für jeden Partikel in diesem Punkt mit der aktuellen Fluggeschwindigkeit eine Differenzgeschwindigkeit

keit, die der relativen Luftgeschwindigkeit bezüglich des frei fliegenden Partikels entspricht, berechnet werden. Aus dieser Differenzgeschwindigkeit wiederum lässt sich nun die Re-Zahl über die hinterlegte Funktion berechnen. Mit dem ermittelten c_w -Wert kann dann mit den bekannten Werten der Spanquerschnittsfläche und der berechneten relativen Fluggeschwindigkeit des Partikels die Widerstandskraft auf den Partikel in Flugrichtung ermittelt werden.

8.3.17 Erkennung des Modellrandes

Es wurden zwei verschiedene Vorgehensweisen bei der Modellranderkennung untersucht:

- a) Modellranderkennung durch Prüfung der Partikelposition
- b) Modellranderkennung durch Elementeigenschaften

Modellranderkennung durch Prüfung der Partikelposition

Die Modellranderkennung durch Prüfen der Partikelposition ist für den Bediener des Programms mit sehr wenig Aufwand verbunden. Es müssen von ihm lediglich die offenen Flächen des Modells spezifiziert werden. Bei jedem Berechnungsschritt wird in diesem Falle vom Programm Chip-Si 1.0 geprüft, in welchem Element der Vernetzung sich der Partikel aktuell befindet bzw. ob er sich überhaupt noch im Modell befindet. Dabei wird ein sehr effektiver Suchalgorithmus verwendet, der es gestattet sehr schnell von einem Element zum nächsten möglichen Element zu gelangen, in welchem sich der Partikel am Ende des Rechenschrittes befinden kann. Dieser Suchalgorithmus ist allerdings nicht 100%ig bezüglich des ermittelten Ergebnisses. Somit muss speziell dann, wenn der Suchalgorithmus feststellt "der Partikel befindet sich außerhalb des Modells", dies nochmals durch eine Suche über alle Netzelemente überprüft werden. Diese Überprüfung findet somit im Modell bei fehlgeschlagenem Suchalgorithmus statt. Dabei wird die Suche über alle Elemente abgebrochen, sobald ein Element gefunden wurde, in dem sich der Partikel befindet. Als Rechenzeitintensiv erweist sich der Algorithmus hauptsächlich dann, wenn der Partikel wirklich den Modellrand überschritten hat. In diesem Falle kann der Sicherheitssuchalgorithmus durch alle Netzelemente kein Ergebnis liefern, was bedeutet, dass zwangsläufig alle Netzelemente durchsucht werden müssen. Somit steigt die benötigte Rechenzeit einer Partikelsimulation mit der Anzahl der Wandkontakte des Partikels bei dieser Modellranderkennung stark an.

Modellranderkennung durch Elementeigenschaften

Bei der zweiten Form der Modellranderkennung werden vom Bediener mehr Eingaben ins Programm erwartet. Es müssen alle Randbedingungen (einschließlich der Begrenzungslinien) des Modells aus der Strömungssimulation in die Partikelsimulation importiert werden. Dabei muss auch eine Unterscheidung in Wandflächen und offene Flächen getroffen werden. Im

Programm Chip-Si 1.0 werden die dort importierten Randbedingungen des Modells den Randknoten des importierten Modells als Eigenschaften aufgeprägt.

Die Randerkennung ist nun wesentlich einfacher. Es wird beim Verlassen jedes Elementes geprüft, welche Eigenschaften die Randknoten der Elementflächen aufweisen, an der der Partikel das Element verlässt. Weisen alle drei Randknoten der Fläche (bei der Vernetzung können ausschließlich Tetraederelemente verwendet werden) die gleichen Randbedingungen (Wand, offene Fläche, etc.) auf, so muss es sich zwangsläufig (und nur dann) um einen Modellrand dieser Spezifikation handeln. Aus der Art der Randbedingung lässt sich einfach ermitteln, ob es sich beim Modellrand um eine Wand oder eine offene Fläche des Modells handelt. Dadurch entfällt die Sicherheitsüberprüfung aller Modellelemente komplett. Allerdings funktioniert diese Modellranderkennung nur bei einem vollständigen Import aller Randflächen inklusive deren Begrenzungslinien durch den Programmbediener. Wurden die Randbedingungen nicht vollständig importiert, bricht das Programm die Berechnung mit einer Fehlermeldung ab sobald ein Partikel das Modell an einem Modellrand ohne Randbedingungen verlässt.

Im Berechnungsprogramm wurden beide Methoden implementiert, so dass der Benutzer die freie Auswahl hat, mit welcher Methode er arbeiten möchte.

8.3.18 Berechnung der Reflexion an der Haubenwand

Jeder einzelne Span für sich stößt mit der festen Wand zusammen und wird auf eine bestimmte Art (Rückprallwinkel und Rückprallgeschwindigkeit) wieder zurückgeworfen. Als Problematisch stellt sich bei der Implementierung des Rückpralls an der festen Wand des Modells jedoch heraus, dass die Späne mit einer bestimmten Verteilung (Wahrscheinlichkeit) bezüglich des Winkels und der Geschwindigkeit zurückprallen (siehe Kapitel 7). Dieses unterschiedliche Rückprallverhalten aus den Reflexionsversuchen gilt es nun sinnvoll im Berechnungsprogramm einzubringen.

In aufwändigen Versuchen wurden die Rückprallwahrscheinlichkeiten der Späne ermittelt. Diese Rückprallverteilung am Auftreffpunkt ist im Programm abgelegt. Trifft nun ein Span auf den Modellrand und wird dieser nach Kap. 8.3.18 als Wand erkannt, so wird in einem ersten Schritt der Aufprallwinkel des Spanes auf die Wand ermittelt. Bezüglich des Aufprallwinkels kann aus der Datenbank entnommen werden, mit welcher Rückprallwahrscheinlichkeit bezüglich des Rückprallwinkels der Span sich wieder von der Wand lösen wird. Über die Wahrscheinlichkeitsrechnung (siehe Kapitel 5.5) bekommt der Span nun seinen Rückprallwinkel zugewiesen. Wird eine genügend große Anzahl an Spänen simuliert, so ergibt sich damit insgesamt ein realistisches Bild der Wandreflexion. Bild 8.17 zeigt dies durch drei unterschiedliche Partikelflugbahnen. Es wurden dabei drei identische Partikel mit identischen Startbedingungen berechnet. Es ist zu erkennen, dass die Partikel sich bis zum

ersten Wandkontakt somit auf exakt der gleichen Flugbahn bewegen. Nach dem ersten Auftreffen unterscheiden sich die Flugbahnen, da der Rückprallwinkel abhängig von der Rückprallwahrscheinlichkeit des Partikels ermittelt wurde.

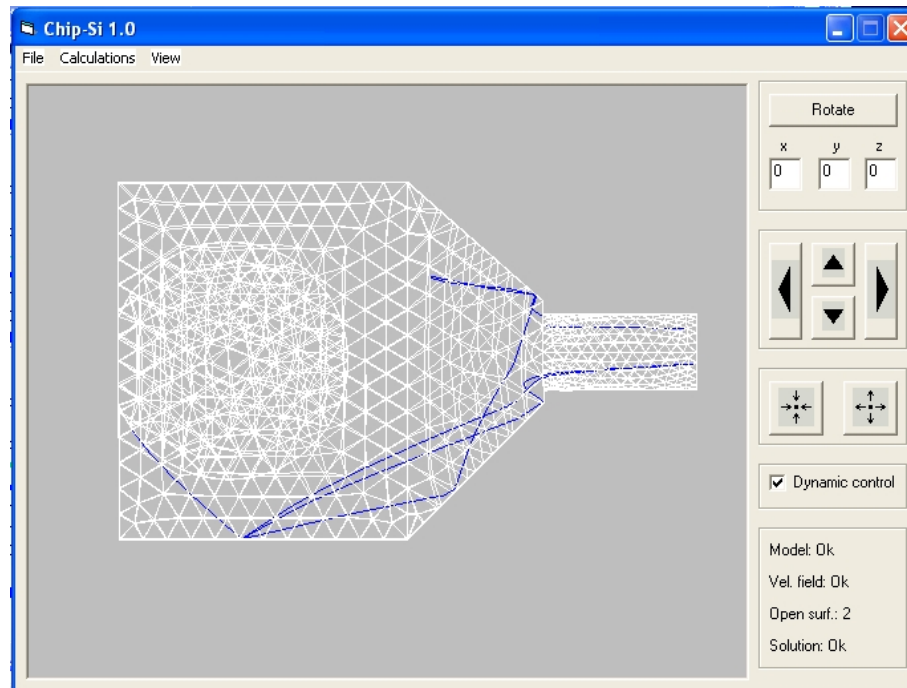


Bild 8.17: Unterschiedliche Partikelflugbahnen durch wahrscheinlichkeitsgesteuerten Rückprallwinkel an der Haubenwand

8.3.19 Geschwindigkeitsreduzierung an der Haubenwand

Die Rückprallgeschwindigkeit der einzelnen Späne streut sehr stark. Es konnte jedoch in Kapitel 7.9.2 bereits nachgewiesen werden, dass sich die durchschnittliche Rückprallgeschwindigkeit der Späne, bezogen auf den Aufprallwinkel, linear verhält. Damit wird in die Simulationsrechnung nur die Formel zur Berechnung der mittleren Rückprallgeschwindigkeit integriert und mit dieser bei allen Rückprallproblemen die Rückprallgeschwindigkeit des Spanes reduziert. Unabhängig vom Rückprallwinkel bekommt jeder Span diese reduzierte Geschwindigkeit, welche nur vom Aufprallwinkel abhängt, zugewiesen.

8.3.20 Berechnung des Erfassungsgrades

In Chip-Si 1.0 kann durch die Selektion der entsprechenden Flächen (Einlass- und Auslassflächen) und durch Aufsummieren der Spanmassenfaktoren ein Erfassungsgrad berechnet werden. Hier erweist es sich als günstig, die Spanmassenfaktoren so festzulegen, dass die Summe aller Späne = 1 ergibt. Dadurch stellt der aufsummierte Spanmassenfaktor an der Absaugschnittstelle direkt den Späneerfassungsgrad dar. Dieser Späneerfassungsgrad kann als Abbruchkriterium der Berechnung verwendet werden.

8.4 Berechnung des Spanraumes als drehendes System

Da es nicht möglich ist, die vielen unterschiedlichen Spanraumformen in eine ausreichend genaue Näherung zu überführen, muss der Spanraum als eigenständiges System berechnet und der Spanflug in ihm simuliert werden. Nachfolgend werden die dazu notwendigen Schritte genau beschrieben. Eine vollständige Umsetzung aller Schritte in das Partikelsimulationsprogramm war aufgrund der zur Verfügung stehenden Zeit noch nicht möglich.

8.4.1 Strömungsberechnung des drehenden Spanraumes

Im Spanraum herrschen nur für den mitbewegten Beobachter stationäre Strömungsverhältnisse. Er hat den Eindruck als ströme stationär Luft in den Spanraum ein und wieder an anderen Flächen aus. In ANSYS-Flotran wird solch ein System als ein System mit drehendem Koordinatensystem berechnet. Als Randbedingungen wird dem Volumenmodell des Spanraumes im stationären mitbewegten Fall an allen Wänden die übliche Randbedingung $v = 0$ und an allen offenen Flächen, durch die Luft ein- oder ausströmen kann $\Delta p = 0$ aufgegeben. Die Luftströmung durch den Spanraum kommt durch die Drehung des Koordinatensystems mit $\omega \neq 0$ zustande.

Bei der Berechnung der Strömung im drehenden Spanraum muss bei der Umsetzung auf die stehende Umgebung beachtet werden, dass alle am Spanraumumfang berechneten Geschwindigkeiten entgegengesetzt zur Drehrichtung mit der Umfangsgeschwindigkeit des Punktes $v = \omega \cdot r$ umgerechnet werden müssen. Bild 8.2 zeigt ein Berechnungsbeispiel eines Spanraumes im drehenden System.

8.4.2 Berechnung des Strömungsrandbedingungen am Werkzeug

Ein berechneter Spanraum stellt nur einen kleinen Teil des Werkzeugumfangs dar. Für die Simulation der Strömung in der stehenden Haube benötigt man am Werkzeug jedoch stationäre Abströmbedingungen. Deshalb muss das Berechnungsergebnis am Umfang des Spanraumes beim Übertragen auf die feste Haube über den Werkzeugumfang gemittelt werden. Allenfalls kann diese Mittelung noch bezüglich der Drehachse des Werkzeugs differenziert werden. Eine transiente Simulationsrechnung in diskreten Zeitschritten ist schon durch die dafür benötigte Rechenzeit nicht sinnvoll. Zusätzlich muss die gemittelte Geschwindigkeit an der Umfangsfläche des Spanraumes, wie in Kapitel 8.4.1 erläutert, mit der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs vektoriell subtrahiert werden.

8.4.3 Startbedingungen der Spanpartikel an der Werkzeugschneide

Im Gegensatz zum flächenförmigen Werkzeugumfang, auf dem sich die Startpunkte der Spanflugbahnen beim Werkzeug in der stehenden Absaughaube verteilen, liegen alle Startpunkte der Partikelflugbahnen bei der Simulation des Spanraumes auf einer Linie. Alle

Startpunkte beginnen an der Werkzeugschneide und enden an einer offenen Modellgrenze des Spanraumes (Punkt an dem die Späne das Werkzeug verlassen). Bild 8.18 zeigt exemplarisch die Zerspanung eines sehr klein brechenden Werkstoffs, an welchem jedoch gut die Streuung der Startflugrichtung und die Streuung der Spangeschwindigkeit gezeigt werden kann. Bei Werkstoffen, die über den ganzen Schnittbogen zusammenhängende Späne bilden, muss an dieser Stelle mit dem Schwerpunkt des Spanes gerechnet werden. Es ist ganz am Anfang der Zerspanung die Richtung und die Spangeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Werkstoff und den Winkeln am Werkzeug zu ermitteln. Diese beiden Parameter sind in der Rechnung als Anfangswerte mit ihrer entsprechenden Streuung zu verwenden.

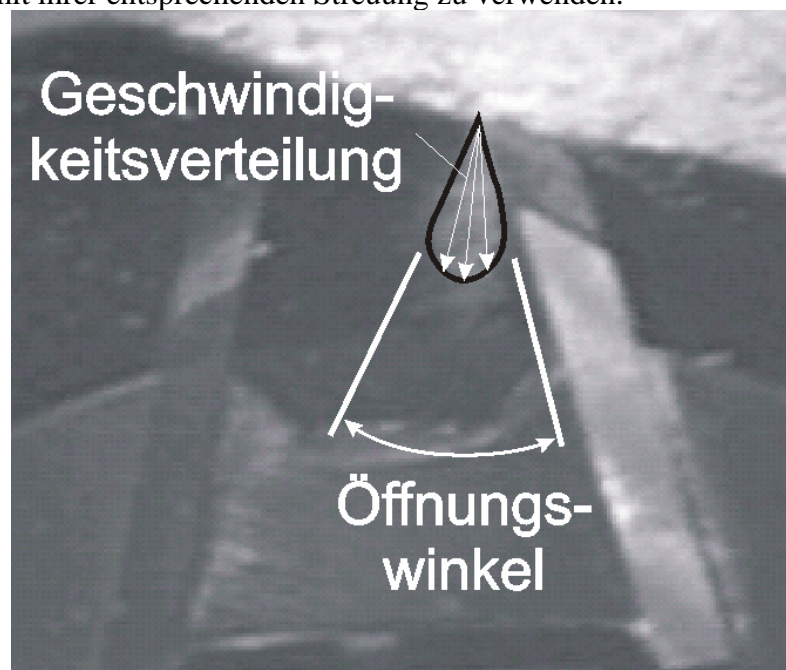


Bild 8.18: Startbedingungen der Spanpartikel an der Werkzeugschneide

8.4.4 Flugbahnberechnung der Spanpartikel im Spanraum

Die Spanflugbahn durch den Spanraum wird aus zwei Gründen berechnet. Zum einen kann dadurch der Spanraum selbst optimiert werden. Zum anderen kann das Auswurfverhalten des Werkzeugs simuliert werden. Für die Optimierung des Werkzeugs beispielsweise bezüglich günstiger Spanabfuhr oder der Vermeidung von Doppelzerspanungsvorgängen ist es meistens ausreichend, die Partikelflugbahnen zu beurteilen. Für die Charakterisierung des Spanauswurfverhaltens eines Werkzeuges ist es jedoch notwendig, über die gesamte Flugbahn des Partikels die Flugzeit mit zu berechnen. Nur so kann schließlich über die Winkelgeschwindigkeit des Werkzeuges der korrekte Auswurfzeitpunkt (und damit der Auswurfort) ermittelt werden, welcher die Startbedingung des Spanes im stehenden System des Erfassungselementes darstellt. Wird nun zusätzlich noch der Austrittswinkel des Spanes beim Verlassen des Modells mit rotierenden Koordinaten übertragen und ins stehende Hauben-

modell transformiert, so erübrigt sich auch die Auswurfuntersuchung der Späne aus dem Werkzeug.

8.4.5 Werkzeugdrehung und Stoßbedingungen

Die Berechnung der Partikelflugbahn im drehenden System kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Zum einen kann der Vorgang im drehenden, zum anderen im stehenden System betrachtet werden. Nachfolgend werden beide Vorgehensweisen diskutiert.

Spanflug im Spanraum des Werkzeugs im stehenden System

Der Span selbst befindet sich eigentlich immer im stehenden System. Sobald er sich von der Schneide des Werkzeugs gelöst hat, wird er nur noch von der ihn umgebenden Luftgeschwindigkeit beeinflusst. Soll er auch bezüglich seiner Flugbahn im stehenden System berechnet werden, so muss, da das Modell des Spanraums konstant gehalten werden soll, die Strömung im Netzelement (in dem sich der Partikel befindet) mit der Drehgeschwindigkeit der einzelnen Netzknoten $v = \omega \cdot r$ korrigiert werden, da die Strömung, welche in der Strömungssimulation berechnet wurde, sich auf den mitbewegten Beobachter bezieht. Bezüglich des stehenden Beobachters bewegt sich der gesamte Spanraum mit der Winkelgeschwindigkeit ω . Nun kann mit der korrigierten Strömungsgeschwindigkeit die Partikelflugbahn berechnet werden (Bild 8.19).

Als nächsten Schritt muss nun geprüft werden, ob die Wand des Spanraums in diesem Zeitschritt mit dem Partikel kollidiert ist und wenn ja, mit welchen Geschwindigkeiten und an welchem Punkt des Modells, da das gesamte Modell sich ja mit der Winkelgeschwindigkeit ω bezüglich des stehenden Beobachters bewegt. Insgesamt erweist sich diese Berechnung als sehr aufwändig.

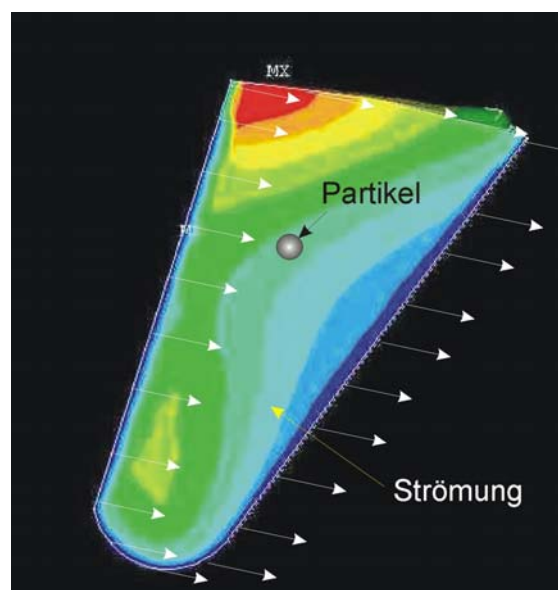


Bild 8.19: Berechnung der Spanflugbahn im stehenden System

Spanflug im Spanraum des Werkzeugs im drehenden System

Bezüglich des drehenden Systems müssen in der Berechnung nicht die Strömung und die Modellränder korrigiert werden, sondern nur die Fluggeschwindigkeit des Partikels. Dies ergibt sich aus der einfachen Überlegung, dass alle berechneten Grundlagen aus der Strömungssimulation sich bereits im drehenden System befinden. Lediglich der Spanpartikel, welcher sich aus Sicht des mitbewegten Beobachters, würde er bezüglich des stehenden Systems stillstehen, mit der Geschwindigkeit $v = \omega \cdot r$ auf die Schneide zu bewegt, muss korrigiert werden. Wird zur Geschwindigkeit des Partikels also entgegen der Drehgeschwindigkeit die Geschwindigkeit $v = \omega \cdot r$ mit r als Abstand von der Drehachse hinzuaddiert, so ergibt sich die korrekte Flugbahn. Diese Vorgehensweise ist wesentlich einfacher umsetzbar (Bild 8.20). Es ist allerdings darauf zu achten, dass die Geschwindigkeit des Partikels am Austritt aus dem Spanraum beim Übertragen auf das stehende System auf dieselbe Weise mit der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs zu korrigieren ist.

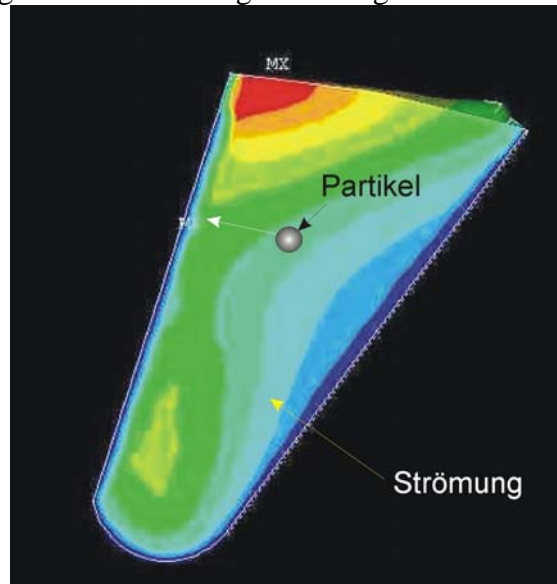


Bild 8.20: Berechnung der Spanflugbahn im drehenden System

9 Zusammenfassung

Das abgeschlossene Forschungsprojekt befasste sich mit der Simulation des Spanfluges metallischer Werkstoffe sowohl in Absaugelementen als auch im Arbeitsraum der Maschine. Streng betrachtet kann auch der Arbeitsraum der Maschine als ein großes Erfassungselement betrachtet werden. Um den Spanflug zu simulieren, waren diverse Grundlagenuntersuchungen notwendig, die so bislang nicht aus der Literatur zur Verfügung standen. Diese notwendigen Zusammenhänge und Untersuchungen wurden im abgeschlossenen Forschungsvorhaben ermittelt.

Zuallererst wurde eine Abschätzung getroffen, welche der vielen Einflussgrößen sich in relevanter Weise auf die Späneerfassung und den Flug der Späne auswirken. Anhand dieser Abschätzung wurden dann diverse Einzelproblematiken ausführlicher untersucht.

Zuerst war es notwendig, die spanspezifischen Größen wie die Spangrößenverteilung des Spangemisches, das Gewicht der Einzelspäne bzw. den Spanquerschnitt eines durchschnittlichen Spanpartikels senkrecht zu seiner Anströmung zu kennen. Diese spanspezifischen Kennwerte wurden mittels Siebanalyse und Wiegen der Späne bzw. Festlegung einer realistischen Näherung des Spanquerschnittes aufgrund der Siebanalyse ermittelt.

Weiter ist die Kenntnis des Luftwiderstandsbeiwertes der einzelnen Spanpartikel von elementarer Bedeutung. Hierzu wurde ein Versuchsstand entworfen und gebaut, in dem die Spanpartikel im Gegenstromprinzip auf ihre spezifische Endfallgeschwindigkeit hin untersucht werden konnten. Aus dieser spezifischen Endfallgeschwindigkeit im Kräftegleichgewicht kann der Luftwiderstandsbeiwert des einzelnen Spanes ermittelt werden.

Ein weiterer wichtiger Untersuchungsschwerpunkt lag in der Ermittlung der korrekten Stoßvorgänge zwischen Partikel und Hauben- bzw. Arbeitsraumwand. Da es sich hier um einen sehr chaotischen Vorgang handelt, war besondere Sorgfalt auf die genaue Wiedergabe des Stoßvorganges in der Simulationsrechnung zu legen. Auch hierfür wurde eigens ein Versuchsstand entwickelt, in dem sowohl die Geschwindigkeitsreduktion der Späne beim Stoß mit der Wand als auch deren Rückprallwinkelverteilung konkret in Abhängigkeit vom Aufprallwinkel ermittelt werden kann.

Alle durchgeführten Untersuchungen wurden schließlich in einem Partikelsimulationsprogramm Chip-Si 1.0 zusammengeführt. Die dazu notwendigen grundsätzlichen Schritte und Überlegungen wurden ausführlich dokumentiert. Mit diesem Simulationsprogramm kann nun der Späneflug sowohl in einem Absaugelement als auch im Arbeitsraum einer Maschine untersucht und bewertet werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Gottlöber, C.: Spanungsprozesse in der Holzbearbeitung, Teil 1: Motivation und Prozessanalyse, In: HOB – Die Holzbearbeitung, 7/8 (2003), S. 55-57
- [2] Heisel, U.; Tröger, J.; Müller, S.; Dressler, M.: *Späneentsorgung durch Sedimentation. In: Innovative Technologien des Umweltschutzes*. Deutsche-tschechische Fachtagung anlässlich des „Tages der deutschen Umwelttechnik“ 20.-23. Oktober 1998 in Brno. Herausgeber Hauthal, W. T.; Kuhlke, W.S. 87 – 103.
- [3] Fischer, R.: Development of an Innovative Milling Tool with Interior Drain of Chips. In: Proceeding of the 14th International Wood Machining Seminar, Paris-Epinal-Cluny, France, 12.-19.9.1999
- [4] Heisel, U.: Zeitgemäße Erfassungseinrichtungen verbessern die Späneabfuhr, In: MM – Maschinenmarkt, 106 (2000) Nr. 12, S. 24 – 28
- [5] Heisel, U.; Tröger, J.; Müller, S.; Haag, M.: Späneerfassung an Bearbeitungszentren (Teil 1), In: HOB – Die Holzbearbeitung, 6 (2000), S. 90 – 93
- [6] Heisel, U.; Tröger, J.; Müller, S.; Haag, M.: Späneerfassung an Bearbeitungszentren (Teil 2), In: HOB – Die Holzbearbeitung, 6 (2000), S. 60 – 65
- [7] Heisel, U.; Tröger, J.; Müller, S.; Haag, M.: Späneerfassung an Bearbeitungszentren (Teil 3), In: HOB – Die Holzbearbeitung, 6 (2000), S. 79 – 84
- [8] Heisel, U.; Tröger, J.; Haag, M.; Dressler, M.: Spänestrahls gezielt leiten – Neue Wege zur Verbesserung der Späneerfassung in Holzbearbeitungsmaschinen (Teil 1. In: HK – Holz- und Kunststoffverarbeitung 7/8 (1999) S. 74 - 76
- [9] Heisel, U.; Tröger, J.; Haag, M.; Dressler, M.: Spänestrahls gezielt leiten – Neue Wege zur Verbesserung der Späneerfassung in Holzbearbeitungsmaschinen (Teil 1. In: HK – Holz- und Kunststoffverarbeitung 9 (1999) S. 74 - 77
- [10] Heisel, U.; Tröger, J.; Haag, M.; Dressler, M.: Spänestrahls gezielt leiten – Neue Wege zur Verbesserung der Späneerfassung in Holzbearbeitungsmaschinen (Teil 1. In: HK – Holz- und Kunststoffverarbeitung 7/8 (1999) S. 78 – 81
- [11] Welschhof, G.: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen. VDI Forschungsheft 492, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1962
- [12] Siegel, W.: Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung körniger Stoffe in waagrechten Rohren und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze. VDI-Forschungsheft 538, Düsseldorf: VDI-Verlag 1970

- [13] Flatow, J.: Untersuchungen über den pneumatischen Fördervorgang in lotrechten Rohrleitungen. VDI-Forschungsheft 555, Düsseldorf: VDI-Verlag 1973
- [14] Weidner, G.: Grundsätzliche Untersuchungen über den pneumatischen Fördervorgang, insbesondere über die Verhältnisse bei Beschleunigung und Umlenkung. In: Forschung 21. Bd. (1955) Nr. 5, S. 145-153
- [15] Möller, H.: Untersuchungen über den pneumatischen Transport von Feinstaub in einer horizontalen Förderleitung. Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, 1964
- [16] Bohnet, M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Absetzen, das Aufwirbeln und den Transport feiner Staubteilchen in pneumatischen Förderleitungen. VDI-Forschungsheft 507. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965
- [17] Weber, M.: Kompressible Rohrströmung von Gas-Feststoffgemischen bei hohen Materialbeladungen. Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, 1966
- [18] Ahland, E.O.: Strömungsvorgänge im vertikalen feststoffbeladenen Förderrohr mit austretendem Freistrah. Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1996
- [19] Mühle, J.: Partikelbewegung in Strömungen mit rotationssymmetrischer Geschwindigkeitsverteilung. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1969
- [20] Piplies, L.: Experimentelle Untersuchungen an Gas-Feststoff-Rohrströmungen. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1970
- [21] Barth, W.: Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen. In: Chemie-Ingenieur-Technik 30 (1958), Nr. 3, S. 171-180
- [22] Molerus, O.: Zur Beschreibung feststoffbeladener Strömungen. In: Chemie-Ingenieur-Technik 49 (1977), Nr. 12, S. 945-955
- [23] Adam, O.: Feststoffbeladene Luftströmungen hoher Geschwindigkeit. In: Chemie-Ingenieurs-Technik 29 (1957), Nr. 3, S. 151-159
- [24] Muschelknautz, E.; Krambock, W.: Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit feinkörnigen Produkten. In: Chemie-Ingenieur-Technik 41 (1969), Nr. 21, S. 1164-1172
- [25] Meyer, H.: Allgemeine Gesetzmäßigkeiten bei der pneumatischen Förderung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 1959
- [26] Sawatzki, O.: Über den Einfluss der Rotation und der Wandstöße auf die Flugbahn kugeligter Teilchen im Luftstrom. Technische Hochschule Karlsruhe. Dissertation, 1961
- [27] Dehning, C.: Numerische Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Partikeln in turbulenter Kanalströmung bei hohen Reynoldszahlen. Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1993

- [28] Karman, T.V.; Rubach, H.: Über den Mechanismus des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes. In: Physikalische Zeitschrift 13 (1912)
- [29] Gasterstädt, J.: Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorgangs. In: Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens. (1924), Nr. 265
- [30] Möller, W.: Experimentelle Untersuchungen zur Hydrodynamik der Kugel. In: Physikalische Zeitschrift 39 (1938), Nr. 2, S. 57-80
- [31] Mohr, E.: Der Beschleunigungswiderstand bewegter Körper in einer Flüssigkeit. In: Zeitschrift angewandter Mathematik und Mechanik 32 (1952), Nr. 2/3, S. 87-88
- [32] Kürten, H.; Raasch, J.; Rumpf, H.: Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfeld konstanter Geschwindigkeit. In: Chemie-Ingenieurs-Technik 38 (1966), S. 941-942
- [33] Müller, W.: Zur Theorie der Kräfte bei der beschleunigten Bewegung eines Körpers in der reibungslosen Flüssigkeit. In: Ingenieur Archiv 14 (1944), Nr. 5, S. 332-350
- [34] Neumark, S.: Beschleunigungswiderstand geradlinig bewegter Körper in einer idealen Flüssigkeit. In: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 16 (1936), S. 117-120
- [35] Schmidel, J.: Experimentelle Untersuchungen über die Fallbewegung von Kugeln und Scheiben in reibenden Flüssigkeiten. In: Physikalische Zeitung 29 (1928), S. 593-610
- [36] Wieselberger, C.: Neuere Feststellungen über die Gesetze des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes. In: Physikalische Zeitschrift 22 (1921), Nr. 11, S. 321-328
- [37] Schauki, N.: Der Widerstand von Zylinder und Kugel bei stationären Strömungsverhältnissen. Universität Karlsruhe, Dissertation, 1972
- [38] Schuchart, P.: Widerstandsgesetze für den pneumatischen Feststofftransport in geraden Rohren und Rohrkrümmern. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1968
- [39] Barth, W.: Die Bestimmung des Luftwiderstandes von schwebenden staubförmigen Teilchen. In: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. 25/27 (1947), Nr. 5/6, S. 157-159
- [40] Molerus, O.: Teilchenbewegung in einem pulsierenden Strömungsfeld. In: Chemie-Ingenieurs-Technik 36 (1964), Nr. 11, S. 866-870
- [41] Molerus, O.: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit kugelförmiger Teilchen in einem vertikal pulsierenden Strömungsfeld. In: Chemie-Ingenieur-Technik 40 (1968), Nr. 11, S. 522-524

- [42] Müller, K. Wessel, J.: Berechnung von Teilchenbahnen im Windsichter mit dem elektronischen Analogrechnern. In: Aufbereitungs-Technik (1963), Nr. 6, S. 235-242
- [43] Kalthoff, W.: Dynamische Eigenschaften von Zweiphasenströmen: Ein Simulationsansatz für Partikel in Flüssigkeiten. Universität Stuttgart, Dissertation, 1997
- [44] Gumz, W.: Zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit von Teilchen beliebiger Gestalt. In: Arch. F. ges. Wärmewirtschaft Jg. 1 (1950) Nr. 2
- [45] Marktübersichten. FEM. Computer Graphik Markt 1993/94, Heidelberg 1994
- [46] Nelepa, E.: Was nehme ich? Konkurrierende Methoden beim Preprocessing für FE-Analysen. In: Konstruktionspraxis Nr. 1, Würzburg 1995
- [47] Fröhlich, P.: FEM-Leitfaden. Einführung und praktischer Einsatz von Finiten-Element-Programmen. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Mailand, Paris, Tokyo: Springer, 1995
- [48] Anderl, R: CAD-Schnittstellen, München Wien 1993
- [49] Mailhack, S.: Schnittstellentools für neutrale CAD-Schnittstellen. In: CAD-CAM Report Nr. 9, Heidelberg 1994
- [50] Lösch, R.: Untersuchungen zur flexiblen Erzeugung von 3D-Rechnernetzen zur Strömungsberechnung beim Vorentwurf einfacher Konfigurationen. Universität Stuttgart, Dissertation, 1997
- [51] Mayr; Thallhofer: Numerische Lösungsverfahren in der Praxis. FEM – BEM – FDM, München Wien 1993
- [52] Knothe, Wessels: Finite Elemente, Berlin, Heidelberg New York, 1991
- [53] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden. Matrizen und lineare Algebra, Berlin Heidelberg New York, 1986
- [54] Kämmler; Franek; Recke: Einführung in die Methode der finiten Elemente, München Wien 1988
- [55] Müller; Rehfeld: FEM für Praktiker. Basiswissen und Arbeitsbeispiele zur Methode der Finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS, 2. Auflage, Ehningen 1994
- [56] Müller, G.: Finite Elemente. Einführung in das Arbeiten mit ANSYS, Heidelberg 1989
- [57] Nasitta; Hagel: Finite Elemente. Mechanik, Physik und Nichtlineare Prozesse, Berlin Heidelberg New York 1992
- [58] Rother, K: ANSYS Benutzerhandbuch, Grafing 1994
- [59] Zienkiewicz, O: Methode der finiten Elemente, 2. Auflage, München Wien 1984
- [60] Altenbach, Fischer: Finite-Elemente-Praxis, Leipzig 1991

- [61] Schmitt, G.: Fortran-Kurs technisch orientiert. Einführung in die Programmierung mit FORTRAN 77. 8. Aufl. München, Wien: Oldenbourg, 1992
- [62] Sieber, H.: Höhere FORTRAN-Programmierung. Anleitung zum optimalen Programmieren. 2. Aufl. Berlin, New York: de Gruyter, 1980
- [63] Monadjemi, P.: Visual Basic 6. Kompendium. Haar bei München. Markt und Technik 1999
- [64] Schlenker, G.; Ecker, A.: Visual Basic 6 incl. VBA. Kaarst. bvh-Verlag, 1999
- [65] Kämper, S.: Grundkurs Programmieren mit Visual Basic. Vieweg, 2003
- [66] Franke, M.: Visual Basic 6. Düsseldorf. Data Becker. 1998
- [67] Barth, R.; Beier, E.; Pahnke, B.: Grafikprogrammierung mit OpenGL. Bonn, Paris u. a. Addison-Wesley, 1996
- [68] Illyés, A.; Bauer, H.: Die Energiewandlung bei ein- und mehrmaligem Stoß einer Partikel gegen eine feste Wand. In: VDI-Forschungsheft 640/87 (1987).
- [69] Bohl, W.: Technische Strömungslehre. 8. Aufl. Würzburg: Vogel-Verlag, 1989
- [70] Buschmann, Koessler: Handbuch für den Fahrzeugingenieur. 8. Auflage. Stuttgart: Deutsche-Verlags-Anstalt, 1973
- [71] von Koenig-Fachsenfeld, R.: Aerodynamik des Kraftfahrzeugs. Frankfurt: Verlag der Motor-Rundschau, 1951
- [72] Luftkräfte am Kraftfahrzeug. Deutsche Kraftfahrzeugforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 184, 1966
- [73] Kraftfahrttechnisches Taschenbuch, Fa. Bosch
- [74] Wagner, W.: Strömung und Druckverlust. 4. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 1997.
- [75] DIN 66 160
- [76] Gonell, H. W.: Ein Windsichtverfahren zur Bestimmung der Kornzusammensetzung staubförmiger Stoffe. In: VDI-Zeitung 70 (1928), S. 945
- [77] Jiru, P.: Bestimmung der minimalen Luftgeschwindigkeiten für pneumatischen Transport, Trocknung und Sortierung von Spänen sowie von Mahlgut. Drevarsky Vyskum 3 (1958) Nr. 2, S. 243 – 262.
- [78] Rackwitz, G.: Die Sichtung im senkrechten Luftstrom. In: Holz als Roh- und Werkstoff 25 (1967)
- [79] Wessel, J.: Schwerkraftwindsichter. In: Aufbereitungstechnik 5/1962 S. 222 – 230
- [80] DIN 66 118