

Manuel Danzl

Entwicklung einer Schneidmühle

Diplomarbeit zur
Erlangung des Grades
Diplomingenieur

Eingereicht an der
Fakultät für Maschinenbau

Technische Universität Graz

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik
O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens

Graz, Oktober 2010

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen und Abbildungen der benutzen Quellen gekennzeichnet habe.

Graz, am 5. Oktober 2010

.....
Manuel Danzl

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik durchgeführt.

Ich möchte mich hiermit für die sehr interessante Aufgabenstellung, sowie die sehr kompetente Betreuung und Unterstützung bei den Herren O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens, Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader und Dipl.-Ing. Helmut Puschnig bedanken.

Ein großer Dank gebührt auch meinen Freunden, welche mich beim Korrekturlesen der Arbeit sehr unterstützt haben.

Meiner Familie und meiner Frau Uyen möchte ich einen besonderen Dank aussprechen, da sie mich in jeder Hinsicht motiviert und unterstützt hat.

Graz, Oktober 2010

Manuel Danzl

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine innovative Multifunktionsmühle (Kurz: InnoMill) mit variabel einstellbaren Schnittparametern, hohem Massendurchsatz und geringem Energiebedarf entwickelt. Dadurch wurden die Detailbetrachtung des Zerkleinerungsprozesses erst ermöglicht (durchgeführt an Kürbiskernen), da am Markt befindliche Schneidmühlen keine ausreichende Möglichkeit besitzen, den Prozess zu beeinflussen.

Durch analytische Bestimmung der Prozessparameter und nachfolgende empirische Versuche an bereits vorhandenen Prototypen, konnte ein neuer Prototyp mit verbesserten Eigenschaften konstruiert werden.

Für den neu konstruierten Prototyp wurden die Prozessparameter neuerlich analytisch bestimmt. Die empirischen Versuche wurden angelehnt an einen fraktionellen faktoriellen Versuchsplan abgewickelt.

Nach Auswertung und Vergleich der Ergebnisse wurden Konzepte für eine Nullserienmaschine, welche im Mühlenbetrieb eingesetzt und weiter getestet werden sollte, erstellt.

Abstract

The diploma thesis displays the developed process on an innovative multi-function mill (short:InnoMill) with adjustable cutting parameters, high mass flow rate and low power consumption. Thus a detailed exploration of the milling process was enabled (executed on pumpkinseeds), The standard mills on the market did not offer sufficient parameter adjustment capabilities.

By analytical determination of the process parameters and subsequent empirical tests on existing prototypes, a new device was designed and constructed within my research works. On this the process parameters again were refined analytically, using an underlining fractional factorial design; this minimizes the number of empirical studies on the new prototype.

Comparisons, evaluation of the test results as well as the new mill concepts for advanced prototypes are also been presented as a part of this diploma thesis. Furthermore these mills should be used and tested in long-term runs in a pumpkin seed oil factory.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Diplomarbeitentstehung	1
1.2	Technische Ziele	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Zerkleinern	3
2.2	Physik des Bruchvorgangs	3
2.2.1	Bruchfestigkeit	3
2.2.2	Energiebilanz	4
2.3	Zerkleinerungstechnische Stoffeigenschaften [vgl. 11, I - 26f]	5
2.3.1	Beanspruchungsart	6
2.3.2	Partikelgröße	6
2.3.3	Ähnlichkeitsgesetze	7
2.3.4	Zerkleinerungsarbeit [vgl. 12, S.159]	9
2.3.5	Verteilungsfunktion der Bruchstücke Q_3	11
2.3.6	Mahlgutcharakter bei Prallmahlung	11
2.4	Prallmühle [vgl. 11, V - 1]	13
2.4.1	Aufbau [vgl. 7, S. 227] [vgl. 11, V - 16f]	13
2.4.2	Funktionsweise [vgl. 11, V - 17]	15
2.5	Universal-Turbomühle [vgl. 7, S. 189ff]	15
2.5.1	Aufbau und Einsatzbereich	16
2.5.2	Mahlgut- und Partikelverlauf durch die Mühle	17
2.6	Schneidmühle [vgl. 7, S. 236ff]	21
2.6.1	Aufbau	21
2.6.2	Funktionsweise	22
2.7	Zerkleinerung von Kürbiskernen	23
2.7.1	Bruchspannung von Kürbiskernen	23
2.7.2	Fertigutqualität von zerkleinerten Kürbiskernen	26
2.8	Design of Experiments (DoE)	27
2.8.1	Gewähltes DoE Konzept für die Versuchsplanung	27
2.8.2	DoE Konzept auf das Projekt übertragen (Voranalyse)	28

3	Prototypen InnoMill I und InnoMill II	31
3.1	Prototypenbeschreibung	31
3.2	Prinzipieller Mahlgutverlauf durch die Prototypen	32
3.3	Analytische Bestimmung der Prozessparameter	33
3.3.1	Dosiereinrichtung	33
3.3.2	Umfangsgeschwindigkeit	34
3.3.3	Mahlspalt zwischen Rotor und Stator	34
3.3.4	Form, Größe und Anzahl der Zerkleinerungswerkzeuge	35
3.4	Luftströmung	38
3.5	Empirische Ermittlung der Prozessparameter	38
3.5.1	Versuchsdurchführung	38
3.5.2	Dosiereinrichtung	39
3.5.3	Umfangsgeschwindigkeit	43
3.5.4	Rotoraufbau	44
3.6	Energiebedarf der Prototypen	52
4	Prototyp InnoMill III	53
4.1	Konstruktive Richtlinien für den neuen Prototypen	53
4.1.1	Eigenschaften des neuen Prototypen	53
4.1.2	Randbedingungen aus den empirischen Ergebnissen der Prototypen Inno-Mill I und II	53
4.2	Aufbau des Prototypen InnoMill III	54
4.3	Funktionsanalyse der neu konstruierten Bauteile	56
4.3.1	Dosiereinrichtung	56
4.3.2	Lagerhalterung (siehe Abbildung 4.5)	58
4.3.3	Schlagkreuz	58
4.3.4	Sägeblätter	59
4.3.5	Abstandhalter	59
4.3.6	Ausbringerscheibe	61
4.3.7	Gehäuse	61
4.3.8	Konus	62
4.4	Analytische Festlegung der Prozessparameter	62
4.4.1	Dosiereinrichtung	63
4.4.2	Umfangsgeschwindigkeit	64
4.4.3	Luftströmung	64
4.4.4	Mahlspalte und Zähnezahlen für einen Massendurchsatz von 300 kg/h	65
4.5	Empirische Verifizierung der Prozessparameter	68
4.5.1	Versuchsdurchführung	68
4.5.2	Luftströmung	69

4.5.3	Dosiereinrichtung	74
4.5.4	Mahlspalte für die Zähnezahlkombination „Variante A“	75
4.5.5	Erkenntnisse aus den Versuchen mit der Zähnezahlkombination „Variante A“	80
4.5.6	Mahlspalte für die Zähnezahlkombination „Variante B“	80
4.5.7	Umfangsgeschwindigkeit	82
4.6	Verifizierung der Parameter durch „Dauerversuche“	82
4.7	Energiebedarf des Prototypen InnoMill III und Wirkungsgradverbesserung	84
5	Zusammenfassung und Konzepte für eine Nullserienmaschine	85
5.1	Zusammenfassung	85
5.2	Nullserienvariante A	87
5.3	Nullserienvariante B	88
	Literaturverzeichnis	89
	Abbildungsverzeichnis	91
	Tabellenverzeichnis	94
	Anhang	95

1 Einleitung

In diesem Kapitel werde ich kurz auf die Entstehungsgeschichte und die wichtigsten Ziele meiner Diplomarbeit eingehen.

1.1 Diplomarbeitentstehung

Am Ende des Jahres 2007 trat die Firma PAAR-GROUP (PAAR - Technische Entwicklung, Produktion und Verschleißtechnik GmbH) und der Verein der Gründer- und Technologiezentren Deutschlandsberg in Kontakt mit dem Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik (kurz MEEM) an der TU Graz. Es ging um die Mitarbeit an einem von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft GmbH geförderten „CIRCE“ Innovationsprojekt, welches den Titel „Entwicklung einer energieeffizienten Multifunktionsmühle für den Einsatz in der dezentralen Lebensmittelproduktion“ (Kurztitel: InnoMill) trug.

1.2 Technische Ziele

Im Rahmen des Innovationsprojektes wurden technische, wirtschaftliche und soziale Ziele definiert. Meine Diplomarbeit orientiert sich sehr stark an den technischen Zielen.

Zur Umsetzung der technischen Ziele wird ein durch Erfahrungswerte entwickelter Prototyp zur Verfügung gestellt. Die Ziele meiner Diplomarbeit sind wie folgend definiert:

- Entwicklung einer Schneidmühle für Kürbiskerne mit unterschiedlich einstellbaren Parametern
- Reduktion des für den Mahlvorgang erforderlichen Leistungsbedarfs gegenüber den derzeit im Einsatz befindlichen Mühlen (15kW) um mindestens 40 %
- Senkung der Investitions- und Betriebskosten gegenüber den derzeit im Einsatz befindlichen Lösungen um mindestens 30 %
- Verringerung der Wärmeentwicklung während des Mahlvorganges, um eine Überhitzung des Mahlgutes zu verhindern

- Massendurchsatz für ölhaltiges Mahlgut 120 - 160 kg/h
- Weitere mögliche Einsatzbereiche für andere landwirtschaftliche Güter (z.B. Maissilage)

Das Lastenheft war im Bezug auf den „Massendurchsatz“ sehr dynamisch ausgelegt. Auf die endgültige Durchsatzmenge wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zerkleinerungstechnischen Grundlagen, sowie den Prototypen ähnliche Maschinenkonzepte näher beschrieben.

2.1 Zerkleinern

Unter Zerkleinern versteht man das Zerteilen von zusammenhängenden Festkörpern ohne Änderung des Aggregatzustandes. Das zu zerkleinernde Gut ist in der Regel ein Massenprodukt. Es entstehen ungleich große Bruchstücke mit meist irregulärer Form.¹

Zerkleinerungsprozesse spielen in vielen Industriebereichen (z.B. Baustoff-, Lebensmittel-, chemische Industrie) eine sehr wichtige Rolle [vgl. 12, S. 155]. Die wirtschaftliche Bedeutung der Zerkleinerung spiegelt sich auch im Energieverbrauch wider. Im Jahr 1988 wurden rund 6 % der weltweit erzeugten Elektroenergie (400 Mrd kWh/a) für Zerkleinerungsprozesse aufgewendet [vgl. 15, S. 1].

2.2 Physik des Bruchvorgangs

2.2.1 Bruchfestigkeit

Jeder reale Festkörper hat in seinem inneren Aufbau Fehler. Diese Materialfehler sind beispielsweise Gitterleerstellen, Zwischengitteratome, Versetzungen, Korngrenzen, Fremdeinschlüsse, Mikrorisse uvm. Durch äußere Belastungen treten an diesen Stellen erhöhte Spannungskonzentrationen und starke Verzerrungen auf. Dies hat dann zur Folge, dass sich an diesen Stellen ein Riss bilden kann und somit der Bruchvorgang eingeleitet wird. Die technische Bruchfestigkeit liegt deshalb wesentlich unter der theoretischen.

Für Stahl und Glas lässt sich die theoretische Zugfestigkeit mit Hilfe des Elastizitätsmoduls E abschätzen. Die Tabelle 2.1 zeigt die Unterschiede zwischen theoretischer und technischer Zugfestigkeit von Stahl und Glas. ($R_{m,theo} \approx 0,1E$ bis $0,2E$). [vgl. 11, I - 9]

¹M.H. PAHL, „Zerkleinerungstechnik“, 2.Aufl., 1993, S.1

Material	Zugfestigkeit R_m / N/mm^2	
	theoretisch	technisch
Stahl	20.000 - 40.000	300 - 800
Glas	8.000 - 16.000	50 - 200

Tab. 2.1: Theoretische und technische Zugfestigkeiten von Stahl und Glas [11, I - 9]

Die niedrigen Werte für die tatsächliche Bruchspannung σ_{real} lassen sich durch Postulierung einer vorhandenen Risslänge und der Anwendung des Kerbspannungsansatzes von NEUBER [6] (s. Formel 2.1) für einen innen liegenden elliptischen Riss der Länge $2a$ und den Krümmungsradius ρ erklären. Die Nennspannung wird berechnet mit $\sigma_N = \frac{F}{A}$ mit $A = 2 \cdot B \cdot t$ [vgl. 7, S. 8].

Ist die Breite $B \gg a$, kann man, abgesehen von der Rissumgebung, von einem einachsigen Spannungszustand ausgehen. [vgl. 3, S. 17]

$$\sigma_{max} = \sigma_N \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \tag{2.1}$$

Wie man aus Formel 2.1 erkennen kann, hängt die maximale Zugspannung sehr stark vom Krümmungsradius ρ ab. Sie gilt jedoch nur für linear-elastisches Stoffverhalten. [vgl. 11, I - 9]

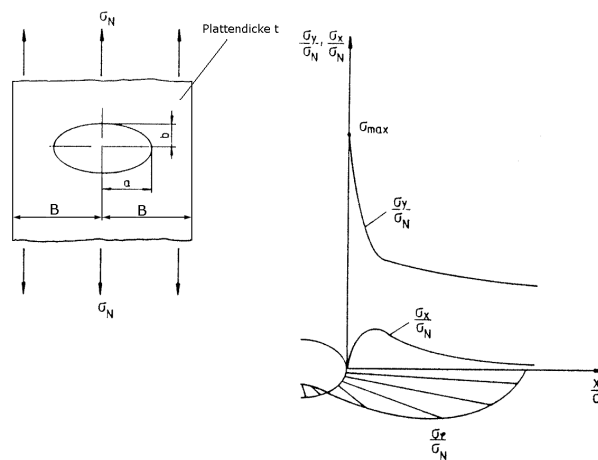


Abb. 2.1: Spannungsverteilung in der Nähe des Kerbgrundes [7, S. 11]

2.2.2 Energiebilanz

Aus der Energiebedingung von H.A. GRIFFITH muss die im Gefüge gespeicherte und beim Fortschreiten des Bruchs freiwerdende elastische Energie ausreichen, damit die nötige Grenzflächenenergie zum Bilden neuer Bruchoberfläche gedeckt wird. Diese gilt jedoch nur für einen reversiblen Bruch. [vgl. 16, S. 312]

In technischen Bruchvorgängen treten an Bruchspitzen immer inelastische Verformungen auf. IRWIN (1948) und OROWAN (1949) fügten diesen inelastischen Energieanteil hinzu. Die vollständige Energiebilanz (berücksichtigt auch nicht mechanische Terme) stammt von Rumpf (1961).

In der Energiebilanz stehen sich Energiequellen und energieverbrauchende Mechanismen gegenüber [vgl. 11, I - 10f]:

Energiequellen

- Äußerer Energievorrat
- Elastisches Spannungsfeld
- Wärmehalt
- Chemisches Potential

Energieverbrauchende Mechanismen

- Erzeugung neuer Grenzflächen
- Inelastische Verformungen an der Bruchspitze
- Elektrische Aufladung der Bruchstücke
- Kinetische Energie elastischer Wellen

2.3 Zerkleinerungstechnische Stoffeigenschaften [vgl. 11, I - 26f]

Damit ein Prozess beurteilt, vorausberechnet oder optimiert werden kann, müssen Kenntnisse über die Stoffeigenschaften vorliegen. In technischen Zerkleinerungsprozessen sind diese Stoffeigenschaften jedoch schwierig zu eruieren, da die zu zerkleinernde Materie in keiner zusammenhängenden Phase vorliegt.

Sie ist dispers, d.h. sie besteht aus Partikeln unterschiedlicher Form und Größe. Zur Bestimmung der Stoffdaten sind Apparaturen zu verwenden, welche eine eindeutige Druck-, Scher- oder Prallbeanspruchung zulassen.

SCHÖNERT gliedert diese Stoffdaten in drei Gruppen:

1. Kennwerte für den Widerstand gegen die Zerstörung der Partikel
 - Festigkeit
 - Flächenbezogene Reaktionskraft
 - Massen- od. volumenbezogenen Zerkleinerungsarbeit
 - Bruchwahrscheinlichkeit

2. Kennwerte für das Ergebnis einer Beanspruchung

- Verteilungsfunktion der Bruchstücke
- Erzeugte Oberfläche

3. Aus (1) und (2) kombinierte Werte

- Energieausnutzung
- Mahlbarkeit
- Zerkleinerungswiderstand

Das Stoffverhalten und die Stoffeigenschaften sind abhängig von der Beschaffenheit des Mahlgutes und von den Beanspruchungsbedingungen (z.B. Beanspruchungsart, Partikelanordnung, Beanspruchungsgeschwindigkeit, Beanspruchungshäufigkeit).

2.3.1 Beanspruchungsart

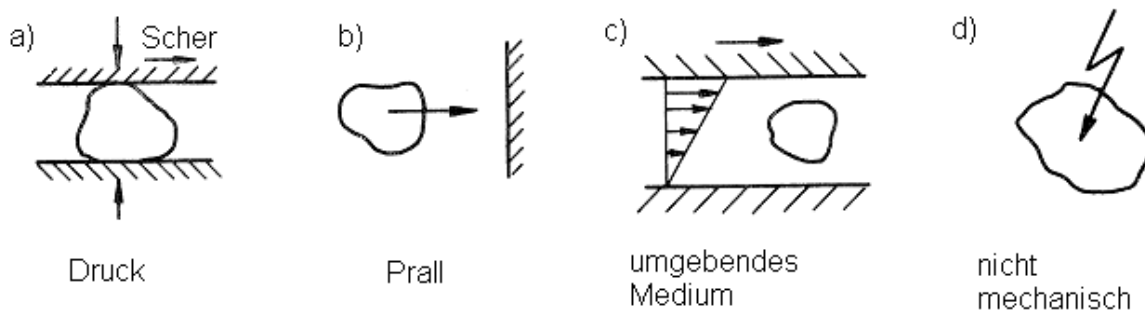


Abb. 2.2: Beanspruchungsarten (Rumpf 1965) [11, I - 27]

Nach der Art der Beanspruchung [11, I - 28] unterscheidet man in:

- zwischen zwei Flächen (Druck-, Scherbeanspruchung)
- an einer Fläche (Prallbeanspruchung)
- durch das umgebende Medium
- durch nicht-mechanische Energiezufuhr

2.3.2 Partikelgröße

Aus der Bruchmechanik geht hervor, dass die Festigkeit mit abnehmender Partikelgröße steigt. Die Ursache ist, dass die Anzahl der Materialfehler (siehe Punkt 2.2.1) abnimmt. Zur Bruchauslösung ist daher eine größere Spannung nötig. [vgl. 15, S. 8] [vgl. 7, S. 23]

2.3.3 Ähnlichkeitsgesetze

Um die Zerkleinerungsarbeit und das Zerkleinerungsergebnis zu verknüpfen wurden folgende Hypothesen und Approximationen mit der Hilfe von empirischen Daten erstellt.

Hypothese nach RITTINGER (1867)

RITTINGER [9] behauptet, dass beim Zerkleinern von Partikeln die erforderliche Arbeit W_R proportional der neu geschaffenen Oberfläche ΔA sein müsse. Diese Hypothese wurde auch auf die maschinelle Zerkleinerung angewendet. [vgl. 11, I - 43] [vgl. 12, S. 158]

$$\frac{\Delta A}{W_R} = \text{const.} \quad (2.2)$$

Ähnlichkeitsgesetz von KICK (1885)

Es beschreibt, dass für eine ähnliche Verformung, geometrisch ähnlicher und physikalisch gleicher Körper, eine dem Volumen proportionale Arbeit zuzuführen ist. Für die Zerteilung eines Würfels mit der Kantenlänge d_1 in kleinere Würfel mit der Kantenlänge d_2 gilt der Zusammenhang. [vgl. 12, S. 158]

$$W_K \sim \log \frac{d_1}{d_2} \quad (2.3)$$

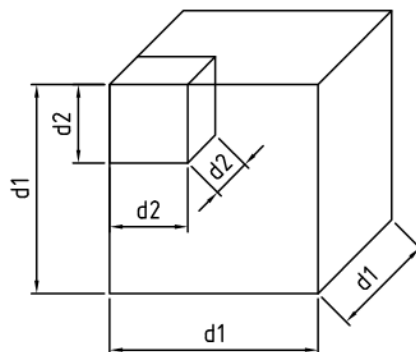


Abb. 2.3: Geometrisch und physikalisch ähnliche Körper

BONDSCHER Formel

Die Anwendung der Zerkleinerungsgesetze auf Körnerkollektive ist nicht zulässig, da in technischen Zerkleinerungsprozessen die Verlustbeiträge einen wesentlichen Anteil an der Größe der Gesamtarbeit haben.

Verluste treten auf durch: [vgl. 12, S. 157]

- Nicht-elastische Deformation (plastische Verformungsanteile der Körner)
- Kinetische Energie der Bruchstücke
- Reibung der Körner untereinander und an den Arbeitsflächen
- Verschleiß der Arbeitsflächen
- Innere Reibung beanspruchter Körner, infolge thermoelastischer Effekte, Schallwellenausbreitung oder Oszillationen elastisch verformter Bruchstücke

Dieser Zusammenhang wurde von BOND (1950) durch eine empirische Näherungsbeziehung für den mittleren Korngrößenbereich angegeben. Die Zerkleinerungsarbeit hängt hauptsächlich von der Korngrößenveränderung und den stofflichen Eigenschaften des Zerkleinerungsgutes und weniger von der Art der Zerkleinerungsmaschine ab. [vgl. 13, S. 124]

$$W_{B,m} = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{d'_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} \right) \quad (2.4)$$

Die massenbezogene Zerkleinerungsarbeit $W_{B,m}$ steht im Zusammenhang mit den 80 % Korngrößen d_{80} bzw. d'_{80} des Aufgabe- bzw. zerkleinerten Gutes. Dieser Wert besagt, dass 80 % der Masse des dispersen Materials kleinere Korngrößen aufweist. Die Stoffeigenschaften des zu zerkleinernden Gutes wird mit dem konstanten Faktor C_B (siehe Tabelle 2.2) berücksichtigt. [vgl. 12, S. 159] [vgl. 13, S.124]

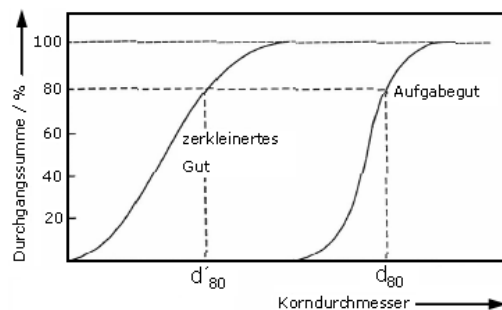


Abb. 2.4: Durchgangssummenverteilung für Aufgabe- und zerkleinertes Gut [13, S. 125]

Material	Dichte $\rho / \text{kg/m}^3$	Nasszerkleinerung $C_B / \text{m}^{2,5}/\text{s}^2$	Trockenzerkleinerung $C_B / \text{m}^{2,5}/\text{s}^2$
Bauxit	2380	340	456
Dolomit	2820	407	546
Eisenerz	3960	556	745
Gips	2690	294	394
Kalisalz	2180	296	397
Kalkstein	2690	418	560
Kies	2700	906	1214
Kohl	1630	409	548
Koks	1510	745	999
Ölschiefer	1760	652	873
Phosphatdünger	2650	469	629
Quarz	2640	460	616
Schlacke	2930	567	760
Siliciumcarbid	2730	942	1262
Ton	2230	256	343
Zementklinker	3090	486	651
Ziegelstein	2590	559	749

Tab. 2.2: Koeffizienten für das Zerkleinerungsgesetz nach Bond [13, S. 125]

2.3.4 Zerkleinerungsarbeit [vgl. 12, S.159]

Unter der Zerkleinerungsarbeit versteht man die gesamte, den Partikeln und dem Beanspruchungswerkzeug zugeführte Arbeit. In technischen Zerkleinerungsprozessen werden jedoch oft die spezifische Zerkleinerungsarbeit (massen-, volums-, oberflächenbezogen) und das Zerkleinerungsverhältnis als Zerkleinerungserfolg herangezogen.

Massenbezogene Zerkleinerungsarbeit:

$$W_m = \frac{W}{m} \quad (2.5)$$

W ...Zerkleinerungsarbeit (von der Maschine geleistete Arbeit)

m ... zerkleinerte Masse

Volumsbezogene Zerkleinerungsarbeit:

$$W_V = \frac{W}{V} \quad (2.6)$$

W ... Zerkleinerungsarbeit (von der Maschine geleistete Arbeit)

V ... zerkleinertes Volumen

Diese Arbeiten eignen sich zum Vergleich von Zerkleinerungsprozessen hinsichtlich des Energieaufwandes. [vgl. 12, S.159]

Die Zerkleinerungsarbeit ist weiters auch eine Funktion der Korngröße und der Beanspruchungsbedingung. [vgl. 15, S. 9]

Die oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit W_A und die Energieausnutzung E_A werden berechnet aus der aufgenommenen Zerkleinerungsarbeit und dem Oberflächenzuwachs durch das Zerkleinern. Sie sind ein wichtiges Maß um die Güte eines Zerkleinerungsprozesses zu beurteilen, vor allem für die Bereiche der Mittel-, Fein- und Feinstzerkleinerung.

$$W_A = \frac{W}{\Delta A} \quad (2.7)$$

$$E_A = \frac{1}{W_A} = \frac{\Delta A}{W} \quad (2.8)$$

W ... Zerkleinerungsarbeit (von der Maschine geleistete Arbeit)

ΔA ... Oberflächenzuwachs durch das Zerkleinern

In Abbildung 2.5 sind die möglichen Zerkleinerungsarten (Einzelkorn, Mehrkorn, Gutbett) dargestellt. Die beste Energieausnutzung wird bei der Einzelkornzerkleinerung erreicht.

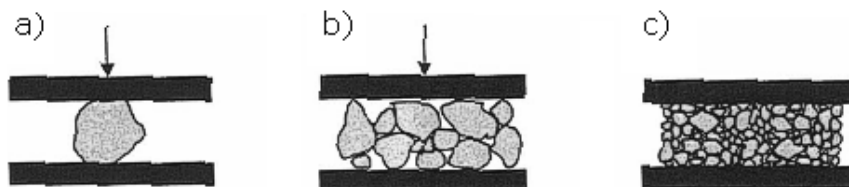


Abb. 2.5: Zerkleinerungsarten: a) Einzelkorn, b) Mehrkorn, c) Gutbett [13, S. 123]

Bei der Mehrkorn- bzw. Gutbettzerkleinerung verschlechtert sich die Energieausnutzung, durch gleichzeitige Beanspruchung mehrerer Körner, sehr rapide. Dies erklärt sich dadurch, dass ein Teil der zugeführten Energie zum Verschieben und für elastische, eventuell auch plastische Verformung der Körner ohne Bruchergebnis aufgebraucht wird und in weiterer Folge dies zu einer Erwärmung des Mahlgutes führt. In der Gutbettzerkleinerung sind die gerade beschriebenen Effekte noch stärker ausgeprägt. Dies kann sogar soweit führen, dass ein in vielen kleinen Körnern eingebettetes Korn auf Grund der hohen Anzahl von Kontaktstellen nicht mehr zerkleinert wird. [vgl. 13, S. 123]

Zur Erkennung von eventuellen Verbesserungsspielräumen sollte immer die Effektivität eines maschinellen Zerkleinerungsprozesses mit Werten aus der Einzelkornzerkleinerung verglichen werden. [vgl. 11, I - 40]

Für die Berechnung des energetischen Wirkungsgrades η der Zerkleinerung, wird nur der Zuwachs an Oberflächenenergie als Nutzarbeit aufgefasst. [vgl. 12, S.159]

$$\eta = \frac{\gamma_A \Delta A}{W} \cdot 100 = \frac{\gamma_A}{W_A} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (2.9)$$

γ_A ...spezifische freie Oberflächenenergie

Maschinentyp	Effektivität	
	von / %	bis / %
Walzenbrecher	70	100
Prallmühlen	25	40
Hammermühlen	17	25
Wälzmühlen	7	15
Kugelmühlen	6	9
Rührwerksmühlen	2	6
Strahlmühlen	1	2

Tab. 2.3: Effektivität von Zerkleinerungsmaschinen auf Basis der assoziierten Energie nach STAIRMAND (1976), Einzelkornzerkleinerung gleich 100% gesetzt. [11, I - 48]

2.3.5 Verteilungsfunktion der Bruchstücke Q_3

Eine weitere Möglichkeit den Zerkleinerungsprozess zu beurteilen ist die Verteilungsfunktion von Bruchstücken (Bruchfunktion) nach einer einmaligen Beanspruchung von Einzelkörnern oder eines Gutbettes.

Für die Verteilungsfunktion wird bevorzugt die Massenverteilung verwendet und nur in Ausnahmefällen die Anzahlverteilung. Sie besitzt das Funktionszeichen Q_3 bzw. q_3 .

$Q_3(x)$ = Massenanteil der Partikel kleiner als x

$q_3(x)dx = dQ_3(x)$ = Massenanteil der Partikel im Größenintervall x bis $x + dx$

2.3.6 Mahlgutcharakter bei Prallmahlung

Die optische Auswertung des Fertiggutes nach der Zerkleinerung von Kürbiskernen ergibt, dass das Ergebnis, aufgrund der Korngrößenverteilung und der Optik der Bruchflächen, einer Prall-

beanspruchung zuzuordnen ist. Deshalb werden in diesem Punkt der Mahlgut Aufbau und die Rissausbreitung bei der Prallmahlung näher beschrieben.

Mahlgut Aufbau bei einer Einzelkornzerkleinerung

Bei der Zerkleinerung lösen Zug- und Schubspannungen Brüche im Feststoffgefüge aus. Diese Spannungsfelder im Gefüge entstehen meist durch mehrere kombinierte Beanspruchungsmechanismen. [vgl 7, S. 223]

Experimentelle Ergebnisse von Einzelpartikelzerkleinerungen [10] (durch Prall) haben gezeigt, dass sich ein sprödharter Festkörper in 3 Zonen (Abbildung 2.6) gliedern lässt: [vgl 7, S. 223]

- Feingutkegel
- Größere Seitensplitter
- Restkegel

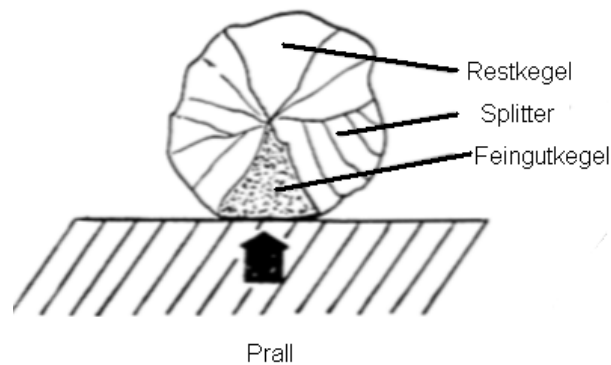


Abb. 2.6: Prallzerkleinerung an einem Einzelkorn [7, S. 223]

Rissausbreitung [vgl 7, S. 223]

Bei einer Prallbeanspruchung entsteht am Festkörper eine Abplattung. Ausgehend von dieser breiten sich im Inneren des Festkörpers kegelförmige Risse mit Schallgeschwindigkeit aus. Das Feingut entsteht innerhalb dieses Kegels (Feingutkegel).

Dem Feingutkegel gegenüber bildet sich ein Restkegel aus. Dazwischen bilden sich mehr oder weniger große Splitter. Der Anteil des Feingutes kann über die Prallgeschwindigkeit gesteuert werden, da bei zunehmender Geschwindigkeit der zugeführte Energiebetrag und somit die resultierenden Spannungen wachsen.

2.4 Prallmühle [vgl. 11, V - 1]

Bei Prallmühlen erfolgt die Energiezufuhr durch mit Werkzeugen ausgestattete Rotoren. Diese haben die Aufgabe, die Partikel zu beschleunigen und zu beanspruchen. Ein positiver Aspekt bei Prallmühlen ist, dass sich eine Einzelkornbeanspruchung mit großer spezifischer Energie realisieren lässt. Abbildung 2.7 vergleicht den theoretisch minimalen Energiebedarf mit jenem aus Erfahrungswerten. Diese Erfahrungswerte werden dann mit den Prototypen InnoMill I bis InnoMill III, in den Unterkapiteln 3.6 und 4.7, verglichen.

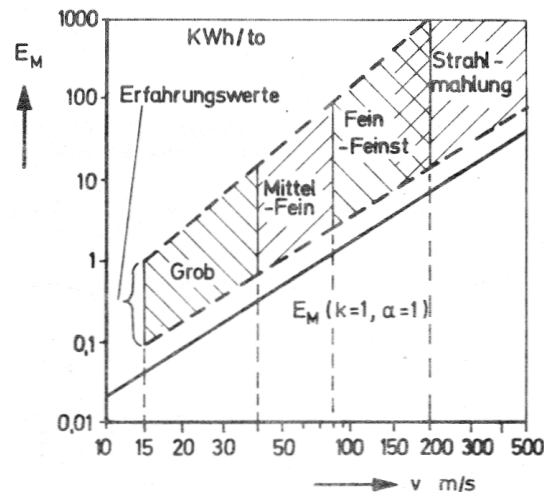
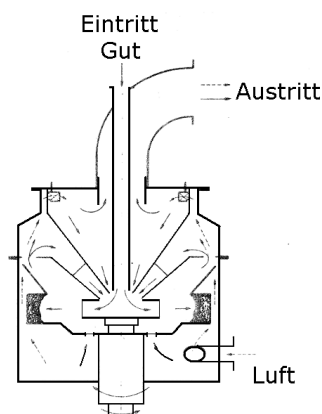


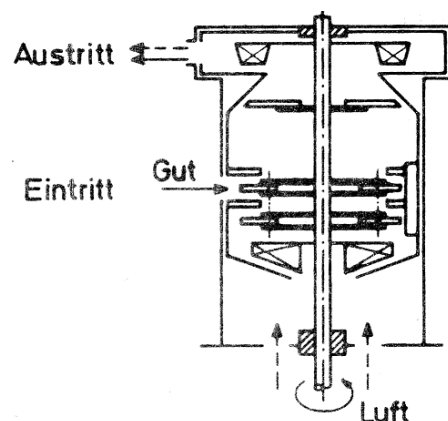
Abb. 2.7: Theoretisch minimaler Energiebedarf und Erfahrungswerte [11, V - 14]

2.4.1 Aufbau [vgl. 7, S. 227] [vgl. 11, V - 16f]

Von Prallmühlen gibt es eine große Zahl unterschiedlicher Bauformen, z.B. Schleudermühlen, Hammermühlen, Stiftmühlen. Abbildung 2.8 zeigt exemplarische Beispiele dieser Mühlen.



Schleudermühle [11, V-17]



Hammermühle mit interner Windsichtung [11, V-19]



Stiftmühle²

Abb. 2.8: Bauformen von Prallmühlen

Der prinzipielle Aufbau von Prallmühlen ist folgender:

- Anzahl und Anordnung der Rotoren

Ein Rotor, zwei koaxiale Rotoren, zwei Rotoren mit parallelen Achsen

- Richtung der Rotorachse

Horizontal, vertikal

- Gutaufgabe

Zentral (Bsp. Abbildung 2.8 Schleudermühle), am Umfang (Bsp. Abbildung 2.8 Hammermühle)

- Mahlgutweg

Radial, axial, tangential

- Rotorwerkzeuge

Gelenkig aufgehängt (Hämmer), starr befestigt (Stifte), keine (Schleuderteller)

- Statorwerkzeuge

Vorhanden, keine

- Feinheitbegrenzung

Sieb oder Rost, Abstand zwischen den Werkzeugen, Klassierung in der Mahlzone durch die Strömungsführung oder durch Klassierer, keine

²http://img.directindustry.de/images_di/photo-p/stiftmuehle-113976.jpg

Die mögliche Anzahl an verschiedenen Kombinationen anhand dieser Aufzählung sind:

$$3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 5 = 1080 \text{ Kombinationen}$$

Einige Kombinationsmöglichkeiten sind jedoch nicht sinnvoll oder schließen sich gegenseitig aus. Beispiele dafür sind: keine Werkzeuge an Rotor und Stator, weiters sind die Gutaufgabe, der Mahlgutweg und die Feinheitbegrenzung in gewissen Maßen von einander abhängig. Durch diese Voranalyse bleiben ca. 200 Kombinationsmöglichkeiten übrig.

2.4.2 Funktionsweise [vgl. 11, V - 17]

Bei Prallmühlen erfolgt der Mahlguttransport grundsätzlich auf zwei Arten. Diese ist abhängig von der Partikelgröße.

- Partikel größer als einige Millimeter: durch Massenkräfte im Schwerfeld
- Kleinere Partikel hauptsächlich durch die Strömung

Die Strömung wird durch den Rotor erzeugt, wobei durch konstruktive Maßnahmen und entsprechende Betriebsweise auf ein zusätzliches Gebläse verzichtet werden kann.

Das gewünschte Fertiggut (Feinheit) wird folgendermaßen realisiert [vgl. 7, S. 227]:

- Umfangsgeschwindigkeit
- Mahlspalte zwischen Rotor und Stator
- Form, Größe und Anzahl der Zerkleinerungswerkzeuge
- Mahlgutkonzentration im Mahlraum
- Verweilzeit des Mahlgutes in der Mühle

2.5 Universal-Turbomühle [vgl. 7, S. 189ff]

Die Universal-Turbomühle ist eine spezielle Form der Prallmühle. Da sie einige Ähnlichkeiten zu den vorhandenen Prototypen aufweist, wird ihr prinzipieller Aufbau und der Mahlgutverlauf durch die Mühle nachfolgend genauer beschrieben.

2.5.1 Aufbau und Einsatzbereich

Turbomühlen werden häufig zur Zerkleinerung von weichen bis mittelharten Materialien eingesetzt. Tabelle 2.4 zeigt einige Beispiele für Materialien, die nach der MOHS-Härte unterteilt worden sind.

Methode	Beispiele	MOHS-Härte
Hartzerkleinern	Feldspat, Korund, Zement, Quarz	6 - 10
Mittelhartzerkleinern	Steinsalz, Kalkspat, Kohle	2 - 5
Weichzerkleinern	Talkum, Graphit, Getreide	<2

Tab. 2.4: Zerkleinerungsmethoden nach der MOHS-Härte [13, S.119]

Charakteristisch für diesen Mühlentyp sind das geringe Bauvolumen und der hohe Massendurchsatz.

Die Rotorgeschwindigkeit liegt im Bereich zwischen 40 m/s und 120 m/s . Das Mahlgut wird durch die kurze Verweilzeit $t < 1\text{s}$ intensiv beansprucht.

Der Bereich für eine wirtschaftliche Vermahlung liegt zwischen $10 \mu\text{m}$ - 1 mm . Durch den Einsatz von Sieben als Stator, wird eine Klassierung und somit eine Beeinflussung der Partikelgrößenverteilung erreicht.

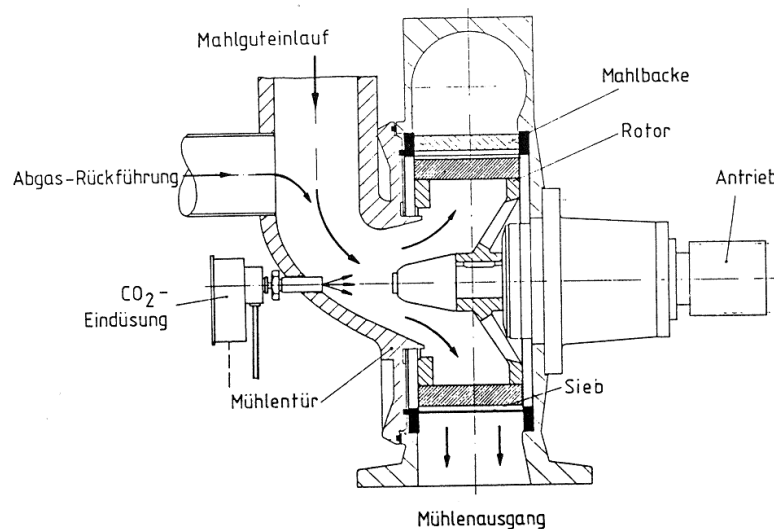


Abb. 2.9: Schema einer Universalmühle mit eingebautem Turborotor und Abgasrückführung [7, S. 192]

Der Rotor von der gezeigten Universalmühle (Abbildung 2.9) verursacht eine Ventilatorwirkung. Dieser kann bedingt durch das Anlagenkonzept (z.B. Abgasrückführung, CO_2 -Eindüsung) noch zusätzlich verstärkt werden.

2.5.2 Mahlgut- und Partikelverlauf durch die Mühle

Der Verlauf des Mahlgutes durch die Mühle lässt sich in folgende vier Phasen gliedern:

1. Eintritt in die Mühle
2. Vorzerkleinerung durch den Rotor
3. Endzerkleinerung in dem rotierenden Gutring³ (Abbildung 2.12) zwischen Rotor und Mahlrost
4. Austritt durch den Mahlrost (Abbildung 2.12)

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Vorzerkleinerung durch den Rotor. Diese Situation wird in [7, S. 193] für Pfefferkörner näher beschrieben.

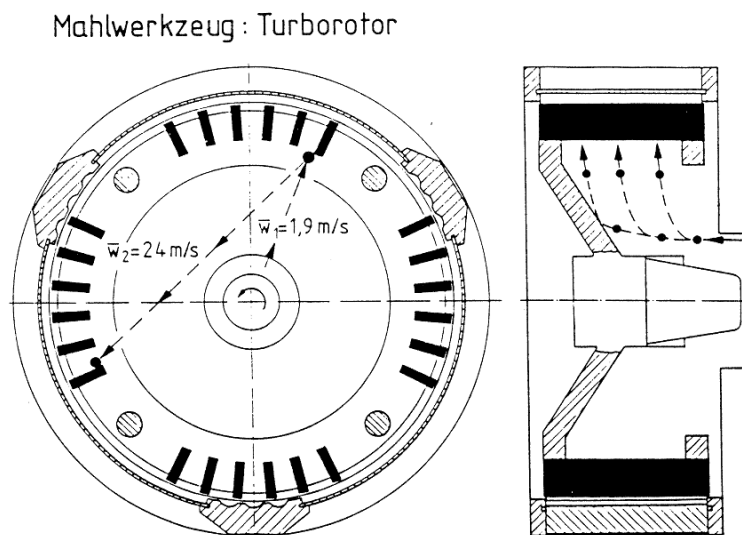


Abb. 2.10: Darstellung der Partikelbewegung in der Eintrittsphase [7, S. 194]

Aus Versuchen geht weiters hervor, dass mit abnehmendem Partikeldurchmesser die Geschwindigkeit vor dem ersten Stoß zunimmt. Prinzipiell kann dieser Zusammenhang aus der Kräftebilanz für Partikel im horizontalen Rohr [2] bestimmt werden.

Für die Kräftebilanz gilt:

$$\text{Widerstandskraft } W - \text{Trägheitskraft } T = 0$$

Laut PAHL können alle übrigen Kräfte vernachlässigt werden, da sie in den zu untersuchenden Bewegungsverhältnissen von untergeordneter Bedeutung sind.

³Der zwischen Sieb und Rotor bewegte Massenstrom wird als Gutring bezeichnet.

Die Kräftebilanz [7, S. 195]:

$$c_w \cdot \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \cdot \frac{\rho_f}{2} \cdot \omega_{rel}^2 = c_s \cdot \frac{\pi}{6} \cdot x^3 \cdot \dot{\omega} \quad (2.10)$$

liefert mit $\omega_{rel} = \omega_0 - \omega$ und der Substitution,

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{d\omega}{ds} \cdot \omega \quad (2.11)$$

die Beziehung:

$$\frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s} \cdot \frac{c_w}{x} \cdot ds = \frac{\omega}{(\omega_0 - \omega)^2} \cdot d\omega \quad (2.12)$$

Durch einmaliges Integrieren erhält man die Gleichung:

$$\frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s} \cdot \frac{c_w}{x} \cdot s \Big|_0^1 = \frac{\omega}{(\omega_0 - \omega)} + \ln(\omega_0 - \omega) \Big|_0^{\omega} + C \quad (2.13)$$

Der linke Term enthält:

- ρ_s Dichte der Partikel
- ρ_f Dichte des Fluides
- x Größe der Partikel
- s Länge des Beschleunigungsweges im Eintritt
- c_w Widerstandsbeiwert der Partikel

Der rechte Term enthält die Geschwindigkeitsverhältnisse mit:

- ω_0 Stationärer Strömungsgeschwindigkeit
- ω Geschwindigkeit der Partikel

Die Gleichung kann durch die Einführung einer Konstanten K

$$K = f(\rho_s, \rho_f, c_w, s) \quad (2.14)$$

zu

$$\frac{K}{x} = f(\omega) \quad (2.15)$$

vereinfacht werden.

Eine exakte Berechnung ist jedoch sehr schwierig, da die Reibungseinflüsse im Eintrittsrohrsystem sowie die Widerstandsbeiwerte, vor allem bei vorgebrochenen Partikeln nicht bekannt sind, somit kann mit der Kräftebilanz nur ein Vergleich der Geschwindigkeiten erfolgen. Für einen Abgleich der Geschwindigkeiten, standen PAHL-Aufnahmen aus einem Hochgeschwindigkeitsfilm zur Verfügung. Diese belegten die Richtigkeit der Annahme.

Der Kontakt von Partikeln und Schlagleisten (Rotor) kann auf drei verschiedenen Arten erfolgen:

- Auftreffen an den radialen Stirnseiten
- Kantenstoß
- Flächenstoß auf der Breitseite in Umfangsrichtung

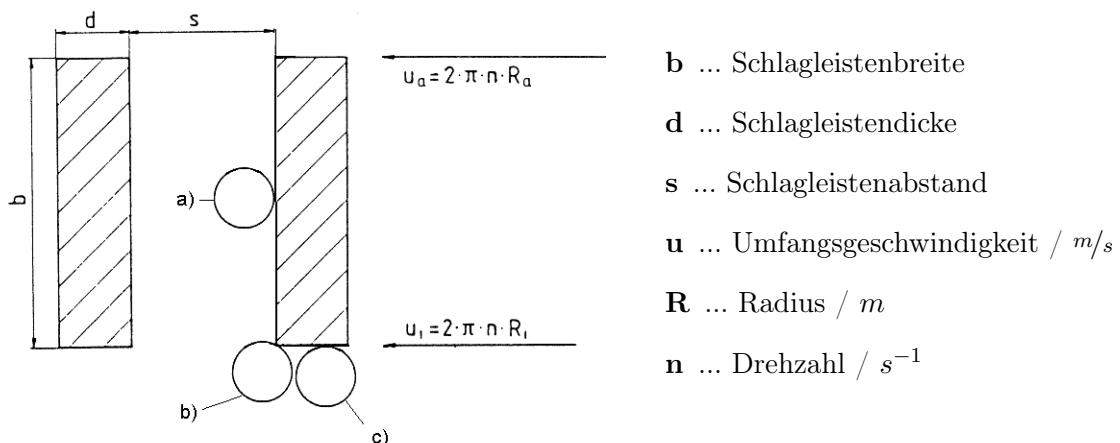


Abb. 2.11: Kontaktarten zwischen Partikel und Schlagleiste (Rotor) [vgl. 7, S.206]

Nach dem Erstkontakt mit dem Rotor erfolgt die Endzerkleinerung im Gutring. Die in Abbildung 2.12 dargestellten Zustände ergeben sich durch nachfolgende Parameter und Randbedingungen.

Massendurchsatz	$\dot{M}_M = 150 \text{ kg/h}$
Mahlrauminhalt (experimentell ermittelt)	$M = 0,02 \text{ kg}$
Gasdurchsatz	$\dot{V}_G = 180 \text{ m}^3/\text{h}$

Die experimentelle Ermittlung des Mahlrauminhaltes erfolgte durch Zerkleinerungsversuche an einer Mühle, die innerhalb sehr kurzer Zeit ($t < 1s$) abgebremst und die Mahlgutzufuhr unterbrochen wurde.

Die Auswertung des Mahlrauminhaltes ergab, mit Hilfe der Massenverteilungssumme Q_3 , dass die Endfeinheit erst nach mehrmaligen Umlauf im rotierenden Gutring erreicht wird.

Um die Anzahl der Umläufe \bar{n} ermitteln zu können ist die Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils $\bar{\omega}_\Phi$ und der mittleren Verweilzeit \bar{t} Voraussetzung.

Die Geschwindigkeitsverteilung der Partikel wurde mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen ermittelt. In der Nähe des Siebes beträgt die Geschwindigkeit $\bar{\omega}_\Phi \approx 5 \text{ m/s}$ und in Rotornähe $\bar{\omega}_\Phi \approx 19 \text{ m/s}$. Die gemittelte Geschwindigkeit beträgt somit $\bar{\omega}_\Phi \approx 12,8 \text{ m/s}$.

$$\bar{t} = \frac{M}{\dot{M}_M} \tag{2.16}$$

$$\bar{n} = \frac{\bar{t} \cdot \bar{\omega}_\Phi}{\pi \cdot D} \approx 9 \tag{2.17}$$

Der im Gutring bewegte Massenstrom \dot{M}_φ wird berechnet mit:

$$\dot{M}_\varphi = \frac{M \cdot \bar{\omega}_\Phi}{\pi \cdot D} \tag{2.18}$$

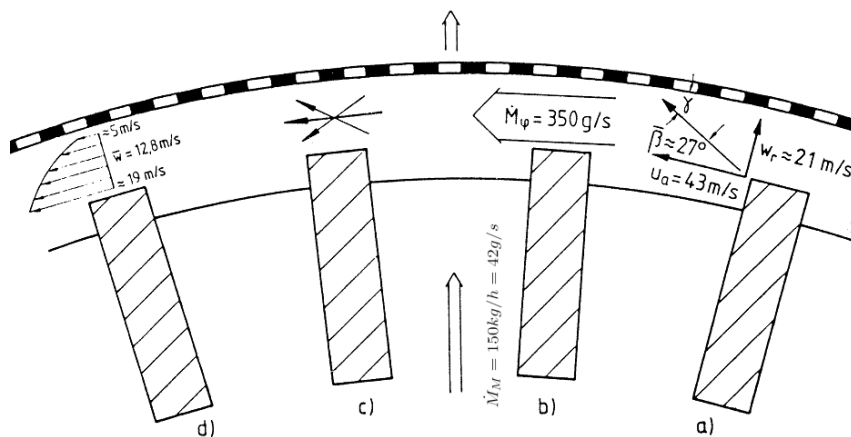


Abb. 2.12: Zustände im rotierenden Gutring bei einem Mahlrost ohne Mahlbacken

2.6 Schneidmühle [vgl. 7, S. 236ff]

Das Zerkleinern in Schneidmühlen erfolgt durch umlaufende Rotormesser und feststehende Statormesser. Das Mahlgut wird im Mahlraum so lange umgewälzt und immer weiter zerkleinert bis die gewünschte Feinheit erreicht ist und das Mahlgut durch die Siebeinlage austreten kann.

2.6.1 Aufbau

Den grundsätzlichen Aufbau einer Schneidmühle zeigt Abbildung 2.13.

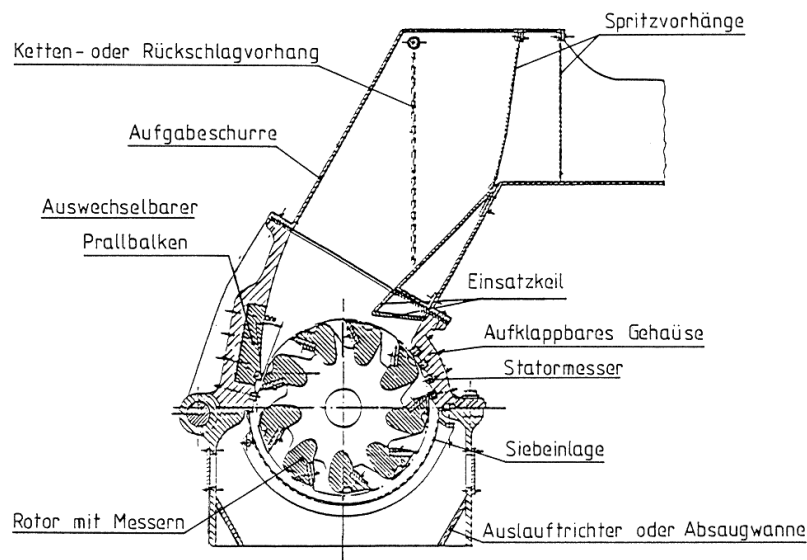


Abb. 2.13: Aufbau einer Schneidmühle [7, S. 236]

Die wichtigsten Bauelemente sind:

- Aufgabeschurre mit Einsatzkeil, Ketten- oder Rückschlagvorhang gegen zurückspringendes Aufgabegut
- Rotor mit mehreren Messern
- Mahlgehäuse mit auswechselbaren Prallbalken und mehreren Statormessern
- Siebeinlage
- Auslauftrichter

2.6.2 Funktionsweise

Bei Schneidmühlen sind folgende Parameter maßgebend um

- a) einen bestimmten Massendurchsatz
- b) das gewünschte Mahlgutergebnis (Feinheit)

zu erreichen:

- Messer

Anzahl, Länge, Anordnung, Verhältnis von Rotor- und Statormessern, geometrische Gestaltung, Messerspalt, Art des Schnittes, Werkstoff

- Rotoren

a) geschlossen, b) offen, c) Spaltrotoren, d) Fräsrotoren (Bsp. siehe Abbildung 2.14)

- Antriebsmotoren

Abstimmung der Motorleistung auf die Schnittleistung

- Mahlraumgestaltung

Einsatzkeil, Prallbalken, Festigkeit, Materialannahme, Selbstdosierung, blockieren, abwürgen

- Sieb

Siebart, Lochgröße und -form, freie Siebfläche, Siebabstand zum Messerkreis

- Schnittgeschwindigkeit wird häufig mit 15 m/s gewählt, kann jedoch in der Praxis stark variieren (z.B. Müllschredderanlage)

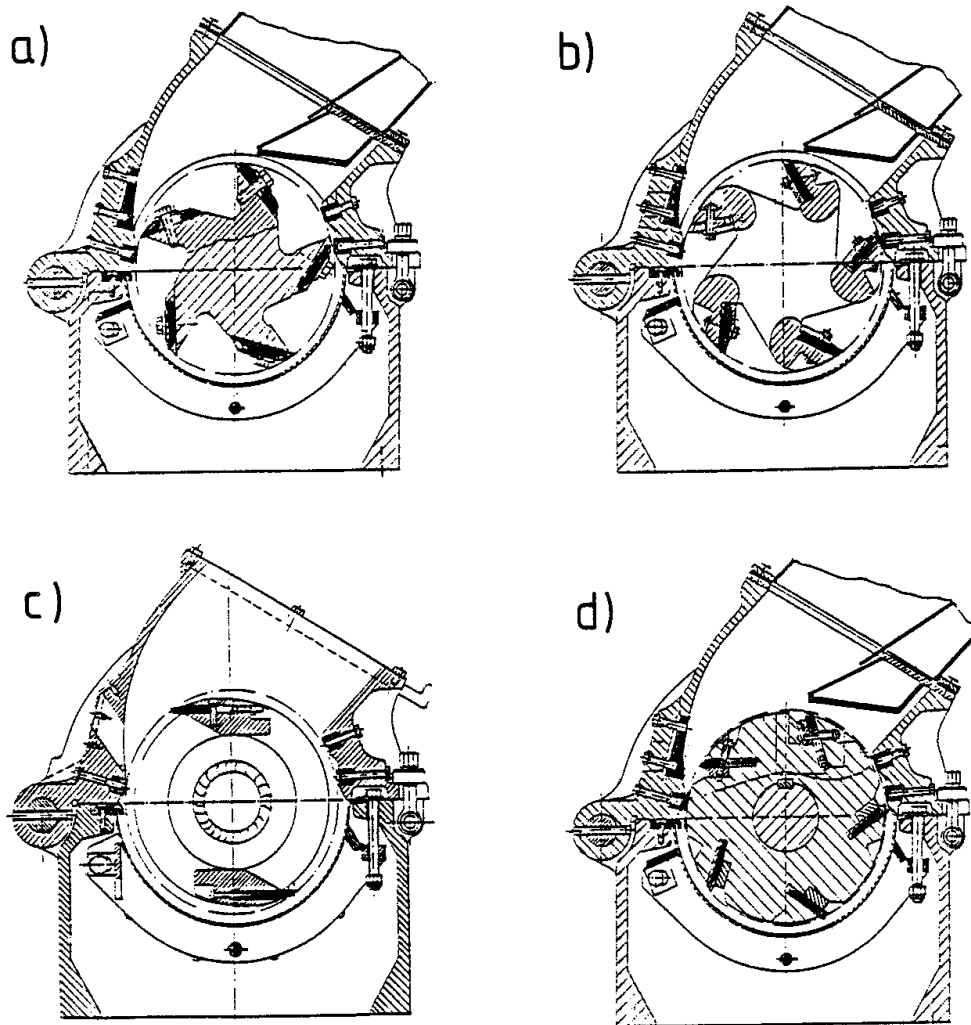


Abb. 2.14: Schneidmühlen mit verschiedenen Rotorbauarten [vgl. 7, S. 238]

2.7 Zerkleinerung von Kürbiskernen

Um die Effektivität einer maschinellen Zerkleinerung zu verbessern, ist es wichtig diese mit den Werten von Einzelkornzerkleinerungen zu vergleichen, um einen eventuellen Verbesserungsspielraum zu erkennen. [vgl. 15, S. 13]

2.7.1 Bruchspannung von Kürbiskernen

Für Kürbiskerne sind nur allgemeine Stoffdaten, wie die durchschnittliche Dichte, Geometrie und Gewicht vorhanden. Darum wurden im Labor Versuche zur Ermittlung der Biegebruchspannung durchgeführt.

Versuchsaufbau

Der gesamte Versuchsaufbau ist in der Abbildung 2.15 schematisch dargestellt. Die Abbildung 2.16 zeigt den verwendeten Kraftaufnehmer mit der Spannvorrichtung und der eingespannten Klinge. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, wird die Klinge mit der stumpfen Seite eingespannt, dadurch soll gewährleistet werden, dass die Körner nur brechen und nicht geschnitten werden.

Das Bruchmoment wird durch einen Dreipunkt-Biegeversuch (Randbedingungen siehe Abbildung 2.17) ermittelt.

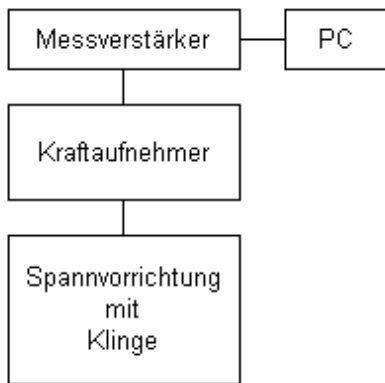


Abb. 2.15: Schematischer Versuchsaufbau für die Einzelkornzerkleinerung

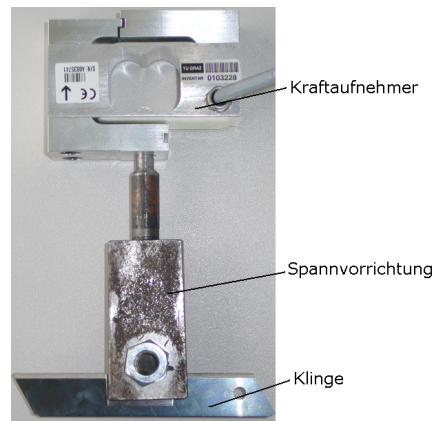


Abb. 2.16: Spannvorrichtung mit eingespannter Klinge und Kraftaufnehmer

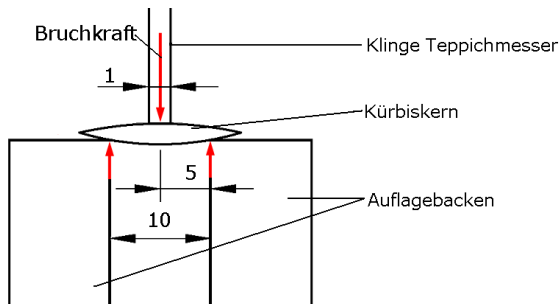


Abb. 2.17: Randbedingungen des Dreipunkt-Biegeversuchs

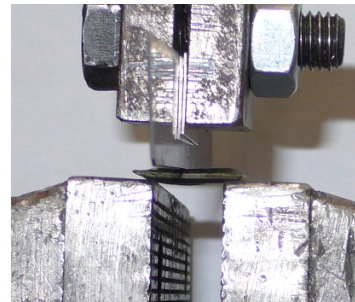


Abb. 2.18: Reale Versuchsanordnung

Versuchsergebnisse

Durch den Versuch wird die Bruchkraft ermittelt und in weiterer Folge das Bruchmoment berechnet. Das Bruchmoment wird über die Korndicke ausgewertet. Abbildung 2.19 zeigt das Ergebnis.

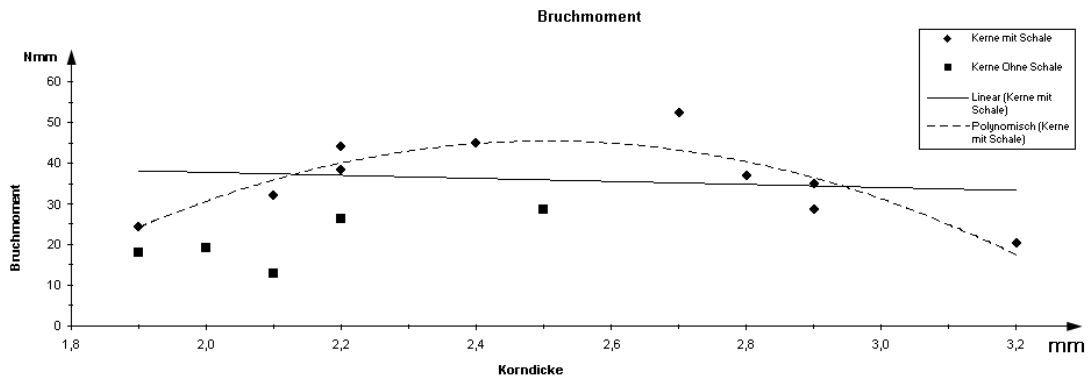


Abb. 2.19: Bruchkraft der Körner in Abhängigkeit der Dicke

Es wurde das Bruchmoment von Kernen mit und ohne Schale getestet. Kerne ohne Schale weisen ein deutlich geringeres Bruchmoment auf. Die vermutete Ursache ist, dass die Schale das Korn vor dem Austrocknen schützt und die Schale selber einen gewissen Teil zur Festigkeit beiträgt.

Betrachtet man das Bruchmoment für verschiedene Korndicken, so fällt auf, dass das höchste Bruchmoment bei Korndicken von ca. 2,5 mm zu erwarten ist. Über dieser Korndicke weist ein Großteil der Körner ein deutlich niedrigeres Bruchmoment auf. Die mögliche Ursache dafür soll eine Analyse der Bruchquerschnitte liefern.

Diese Bruchquerschnitte zeigt die Abbildung 2.20.

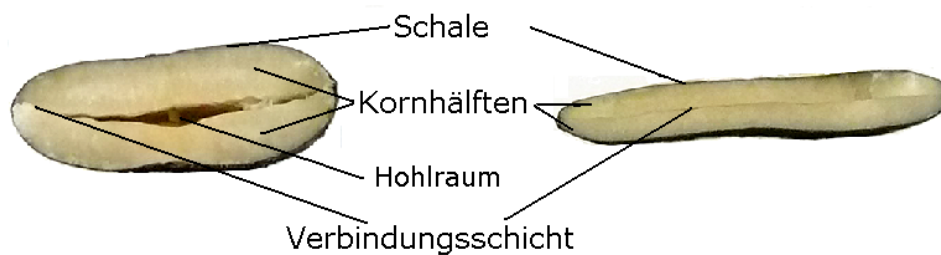


Abb. 2.20: Bruchquerschnitt von Kürbiskernen

Der linke Bruchquerschnitt stammt von einem dicken Kern. Von außen weist dieser keine sichtbaren Schäden auf. Nach dem Bruch stellt man fest, dass die beiden Kornhälften nur mehr am Rand über die Verbindungsschicht verbunden sind. In der Mitte ist diese Schicht sehr trocken und die Kornhälften haben keinen Kontakt zu einander. Eine Vermutung ist, dass die dicken Körner während des Trocknungsvorganges zu warm werden und dadurch die Verbindungsschicht

aushärtet. Weiters dürften dadurch innere Spannungen in den Kornhälften auftreten, welche ebenfalls die Festigkeit des Korns reduzieren.

Im Vergleich dazu ein Bruchquerschnitt von einem dünnen Kern: Die beiden Kornhälften sind auch nach dem Bruch noch miteinander verbunden.

Die Ergebnisse liefern erste Anhaltswerte für das Bruchverhalten von Kürbiskernen. Jedoch lassen sich die Ergebnisse nur schwer auf den maschinellen Prozess übertragen, da die . (Maschine: Energieeinbringung durch Prall, Einzelversuch: Bruch durch langsame Krafterhöhung). Somit hat es wenig Sinn die Bruchenergie der Körner zu berechnen und später mit dem maschinellen Prozessen zu vergleichen.

Eventuell könnten mit einem Versuchsaufbau, der ähnlich dem Kerbschlagbiegeversuch ist, Werte für die Bruchenergie von Kürbiskernen ermittelt werden.

Die Hauptaufgabe der Diplomarbeit ist die Optimierung des maschinellen Zerkleinerungsprozesses, weshalb die Einzelkornuntersuchungen nicht mehr weiter verfolgt wurden.

2.7.2 Fertiggutqualität von zerkleinerten Kürbiskernen

Die Qualitätsdefinition des Fertiggutes ergibt sich aus der Analyse des Fertiggutes von bereits vorhandenen Mühlen und der gewünschten Qualität durch Befragung von Müllern.

Hohe Fertiggutqualität:

- Trocken
- Fein (Korngröße $< 300 \mu m$)
- Annähernd konstante Korngrößenverteilung

Mittlere Fertiggutqualität:

- Trocken
- Fein (mindestens 80 % der Korngröße $< 300 \mu m$)

Niedrige Fertiggutqualität:

- Öliges Fertiggut (Ölaustritt während des Zerkleinerungsvorgang)
- Ungleichmäßige Korngrößenverteilung
- Grobkornanteil $> 20 \%$

Aufgrund ihrer geometrischen Form (Länge und Breite sind im Vergleich zur Dicke groß) ist die Zerkleinerung von Kürbiskernen schwierig. Um die maschinelle Zerkleinerung zu verbessern ist ein sogenannter „Vorschnitt“ (Vergleichmäßigung des Mahlgutes) nötig. Dieser Vorschnitt wird bei den Prototypen mittels Wendeschneidplatten umgesetzt

2.8 Design of Experiments (DoE)

2.8.1 Gewähltes DoE Konzept für die Versuchsplanung

*Design of Experiments (DoE) ist eine Methodik zur Planung und statistischen Auswertung von Versuchen.*⁴

Da Versuche oft viel Zeit und Geld kosten, sollte die Anzahl der Einzelversuche (=Versuchsumfang) möglichst klein sein. [vgl. 5, S. 4]

Die Versuchsplanung nach der **Six-Sigma-Strategie** wird in den letzten Jahren vermehrt als Ansatz zur Beurteilung und Verbesserung aller Prozesse in einem Unternehmen angewandt. Sie besteht aus fünf Phasen DMAIC [5, S. 8]:

1. Definieren (**D**efine);

Kunden und seine Anforderungen identifizieren, den zu verbesserenden Prozess beschreiben und das Verbesserungsziel festlegen

2. Messen (**M**easure);

Messgrößen zur Beurteilung des Prozessergebnisses (Zielgrößen) festlegen, Messmittelfähigkeit und Prozessfähigkeit (σ -Niveau) bestimmen

3. Analysieren (**A**nalyse);

Systematische Beobachtung des Prozesses, Datensammlung und Suche nach Zusammenhängen zwischen Prozessparametern (Inputs) und Zielgrößen (Outputs)

4. Verbessern (**I**mprove);

Versuchsplanung und -auswertung, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Zielgrößen quantitativ zu bestimmen und daraus Verbesserungen abzuleiten

5. Regeln (**C**ontrol);

Prozessregelung, um die erreichte Verbesserung auf Dauer beizubehalten

⁴<http://www.tqu-group.com/downloads/doedownload.pdf>,Stand:22.07.2010

2.8.2 DoE Konzept auf das Projekt übertragen (Voranalyse)

Vor den Prototypenversuchen ist es wichtig eine Voranalyse anhand der **Six-Sigma-Strategie** zu erarbeiten.

Definieren:

Die Anforderungen, der Prozess und das Verbesserungsziel wurden durch den Projektpartner vorgegeben und wurden in Kapitel 1 bereits näher beschrieben.

Messen:

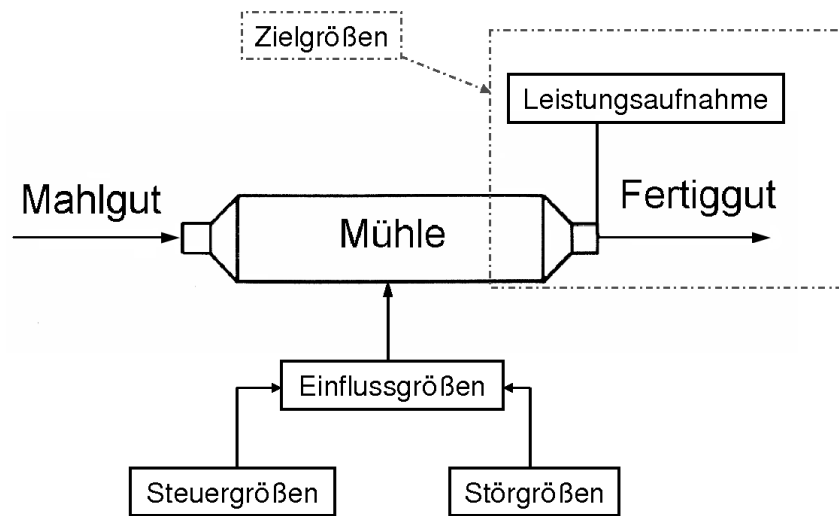


Abb. 2.21: Schema einer Mühlenanlage

Die wichtigsten Zielgrößen im Projekt sind die Leistungsaufnahme und die Qualität des Fertiggutes.

Zur Messung der Leistungsaufnahme wird ein Leistungsmessgerät verwendet. Die Korngrößenverteilung des Fertiggutes wird durch die optische Analyse, mittels einer hochauflösenden Makrokamera und einer Bilderkennungssoftware bewertet. In der Praxis wird sich dieses System jedoch schwer durchsetzen (aufgrund hoher Investitionskosten). Die Analyse erfolgt hier von geschultem Personal, durch stichprobenartige optische Beurteilung des Fertiggutes z.B. Sichtkunde und durch Fühlen der Körnigkeit.

Analysieren:

G. TAGUCHI unterteilt die Einflussgrößen in Steuergrößen und Störgrößen.

Steuergrößen

- Umfangsgeschwindigkeit
- Mahlspalte zwischen Rotor und Stator
- Form, Größe und Anzahl der Zerkleinerungswerkzeuge
- Mahlgutkonzentration im Mahlraum
- Verweilzeit des Mahlgutes in der Mühle
- Luftströmung

Störgrößen

- Mahlguteigenschaften (z.B. Feuchtigkeit, Form...)
- Menschliche Einflüsse
- Einbaubedingungen beim Endkunden

Verbessern:

Damit die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Parametern eruiert werden können sind Versuche nötig.

Regeln:

Ziel ist es den Mahlprozess so zu gestalten, dass das Fertiggut immer dieselbe Qualität, unabhängig vom Bedienungspersonal und den Mahlguteigenschaften, besitzt. D.h. es muss eine Einflussnahme vorhanden sein, um den Mahlprozess reproduzierbar zu beeinflussen.

3 Prototypen InnoMill I und InnoMill II

Für die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge wurden zwei Prototypen zur Verfügung gestellt. In diesem Kapitel werden die Prozessparameter der Prototypen analytisch bestimmt und durch empirische Versuche verifiziert.

Die Zielgrößen in der Diplomarbeit sind: der Massendurchsatz, die Qualität des Fertiggutes und die Leistungsaufnahme der Maschine. Durch „Parametervariationen“ lassen sich die Abhängigkeiten der Prozessparameter auf das Ergebnis bestimmen.

3.1 Prototypenbeschreibung

Die Prototypen, welche zur Verfügung gestellt wurden, sind in Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2 dargestellt. In Tabelle 3.1 sind die konstruktiven Unterschiede der Prototypen aufgelistet. Den prinzipiellen inneren Aufbau der Prototypen zeigt Abbildung 3.3.

Charakteristisch für eine Schneidmühle ist, dass sich am Rotor und am Stator Messer befinden. Bei diesen Prototypen sind jedoch keine Statormesser vorhanden, deshalb sind sie vom Funktionsprinzip eher einer Prallmühle zuzuordnen.



Abb. 3.1: Prototyp InnoMill I

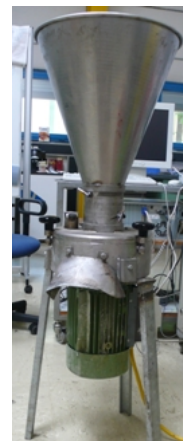


Abb. 3.2: Prototyp InnoMill II

	Prototyp InnoMill I	Prototyp InnoMill II
Leistung Elektromotor	3 kW	4 kW
Nenn Drehzahl Elektromotor	2860 min ⁻¹	2860 min ⁻¹
Sägeblattdurchmesser	235 mm	275 mm
Sägeblatt Nr. 1	48 Zähne	88 Zähne
Sägeblatt Nr. 2	48 Zähne	88 Zähne

Tab. 3.1: Konstruktive Unterschiede der Prototypen InnoMill I und InnoMill II

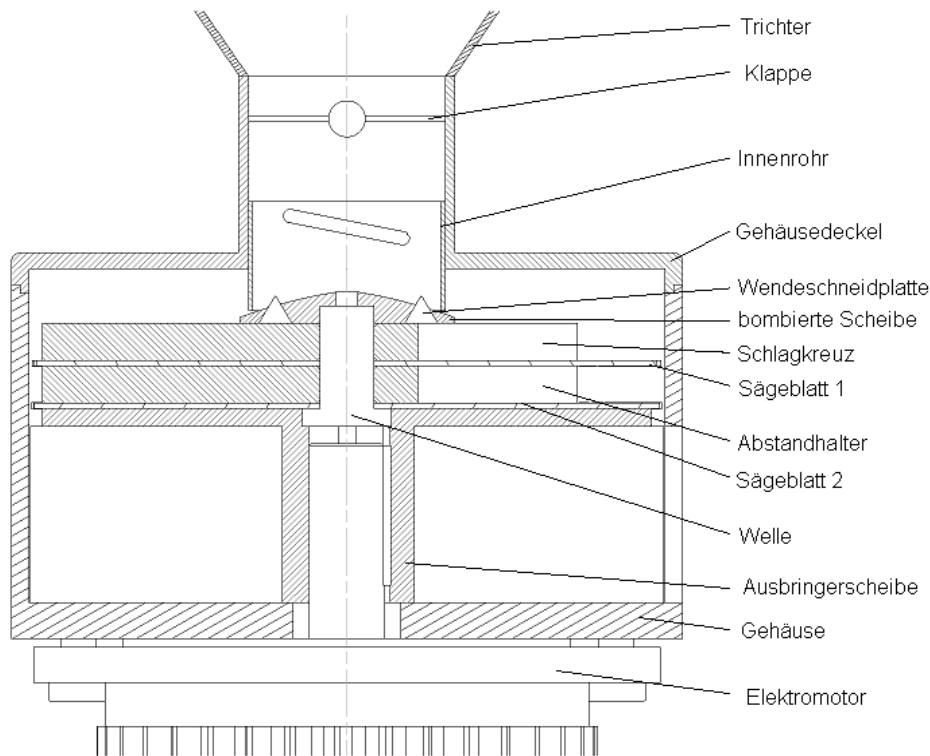


Abb. 3.3: Schematische Schnittdarstellung Prototyp

3.2 Prinzipieller Mahlgutverlauf durch die Prototypen

Der Mahlgutverlauf lässt sich in folgende Phasen gliedern:

1. Einstellen des Massendurchsatzes mittels Dosiereinrichtung
2. Vorzerkleinerung des Mahlgutes durch die bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten und das Schlagkreuz des Rotors
3. Endzerkleinerung des Mahlgutes durch Prallbeanspruchung, herbeigeführt durch die Sägeblätter
4. Ausbringung des Fertiggutes mittels Ausbringerscheibe durch die Auswurföffnung

3.3 Analytische Bestimmung der Prozessparameter

Die Parameter, welche die Zielgrößen beeinflussen sind: (siehe auch Punkt 2.4.2)

- Umfangsgeschwindigkeit
- Mahlpalt zwischen Rotor und Stator
- Form, Größe und Anzahl der Zerkleinerungswerkzeuge
- Mahlgutkonzentration im Mahlraum
- Verweilzeit des Mahlgutes in der Mühle
- Luftströmung durch die Mühle

3.3.1 Dosiereinrichtung

Ein Zerkleinerungsversuch soll, bedingt durch die hohen Mahlgutkosten, mit sehr geringem Mahlguteinsatz pro Versuch erfolgen. Angestrebt wird eine kurze Versuchsdauer (reine Schnittzeit 5 - 10 s) mit reproduzierbaren Ergebnissen.

Die vorhandene Dosiereinrichtung besteht aus einer Klappe und einem höhenverstellbaren Innenrohr. Sie erfüllt folgende Funktionen:

1. Regulierung des Massendurchsatzes
2. Festlegen des Vorzerkleinerungsgrades vom Mahlgut

Der Massendurchsatz wird prinzipiell festgelegt durch: den

- Öffnungswinkel der Klappe
- Freigegebenen Querschnitt (Innenrohr - bombierte Scheibe)

Der Vorzerkleinerungsgrad des Mahlgutes hängt sehr stark vom freigegebenen Querschnitt ab. Dieser bestimmt wie oft das Mahlgut in Kontakt mit den Wendeschneidplatten kommt. Problematisch ist, dass bei großem Vorzerkleinerungsgrad der Massenstrom verringert wird. Deshalb muss ein Kompromiss zwischen hohem Massendurchsatz und noch ausreichender Vorzerkleinerung gefunden werden.

3.3.2 Umfangsgeschwindigkeit

Die Beanspruchungsenergieverteilung soll so gut wie möglich mit der Bruchwahrscheinlichkeitsverteilung der Körner übereinstimmen, damit eine hohe Energieausnutzung erreicht wird.

Damit ergeben sich drei Bereiche:

W_B ...Beanspruchungsenergie

W_Z ...Zerkleinerungsenergie bei der der Bruch des Kornes eintritt

$W_B < W_Z$ Kein Bruch

$W_B = W_Z$ Optimal

$W_B > W_Z$ Überschüssiges Energieangebot, verwertbar für sekundäre Bruchereignisse mit geringer Effektivität

Diese drei Bereiche sind in Abbildung 3.4 dargestellt. [vgl. 12, S. 156][vgl. 15, S. 12]

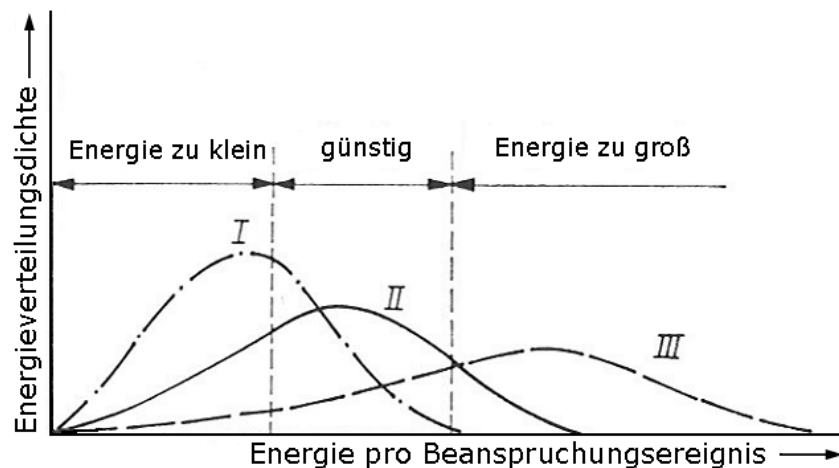


Abb. 3.4: Verteilungsdichten der Beanspruchungsenergie (schematisch) [12, S. 157]

Über die Veränderung der Umfangsgeschwindigkeit kann die optimale Beanspruchungsenergie für Kürbiskerne ermittelt werden.

3.3.3 Mahlpalt zwischen Rotor und Stator

In den theoretischen Grundlagen wird im Unterkapitel (2.5.2) der Zustand im rotierenden Gutring beschrieben. Der Abstand zwischen Rotor und Stator (Mahlpalt) beeinflusst die Anzahl der Umläufe, dadurch hat er eine große Auswirkung auf die Qualität des Fertiggutes.

Das Statorgehäuse von beiden Prototypen ist zylindrisch ausgeführt, dadurch ist der Mahlpalt

(Abstand zw. Sägeblatt und Statorgehäuse siehe Abbildung 3.5) nicht variabel einstellbar. Der maximale Mahlpalt beträgt 5 mm, dieser kann durch Ringeinsätze im Statorgehäuse verändert werden.

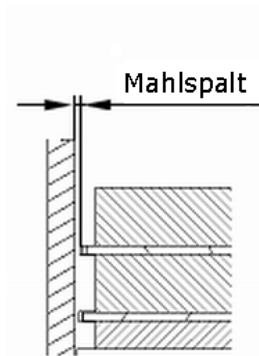


Abb. 3.5: Mahlpalt zwischen Rotor und Statorgehäuse

3.3.4 Form, Größe und Anzahl der Zerkleinerungswerkzeuge

Der Rotor ist aus folgenden Bauteilen aufgebaut (siehe Abbildung 3.3):

- Bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten
- Schlagkreuz
- Sägeblatt Nr. 1
- Abstandhalter
- Sägeblatt Nr. 2
- Ausbringerscheibe

Bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten

Die bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten bewirkt, in Kombination mit dem höhenverstellbaren Innenrohr, eine Vorzerkleinerung des Mahlgutes. Der Vorzerkleinerungsgrad ist abhängig vom freigegebenen Querschnitt des höhenverstellbaren Innenrohrs.

Diese Vorzerkleinerungsmethode hat den Nachteil, dass der Massendurchsatz beeinflusst wird.

Der Massendurchsatz sollte nicht in Abhängigkeit der Vorzerkleinerung stehen. Gezielte bauliche Veränderungen des Prototypen und Versuche, mit bzw. ohne bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten, sollen Aufschluss über die Wirkung dieses System auf den Massendurchsatz und die Qualität des Fertiggutes geben.

Schlagkreuz

Das Schlagkreuz kann durch die Variation der Form, Länge und Anzahl der Schlagarme verändert werden. Durch die Formänderung wird erwartet, dass das vorzerkleinerte Mahlgut besser dem ersten Sägeblatt zugeführt wird.

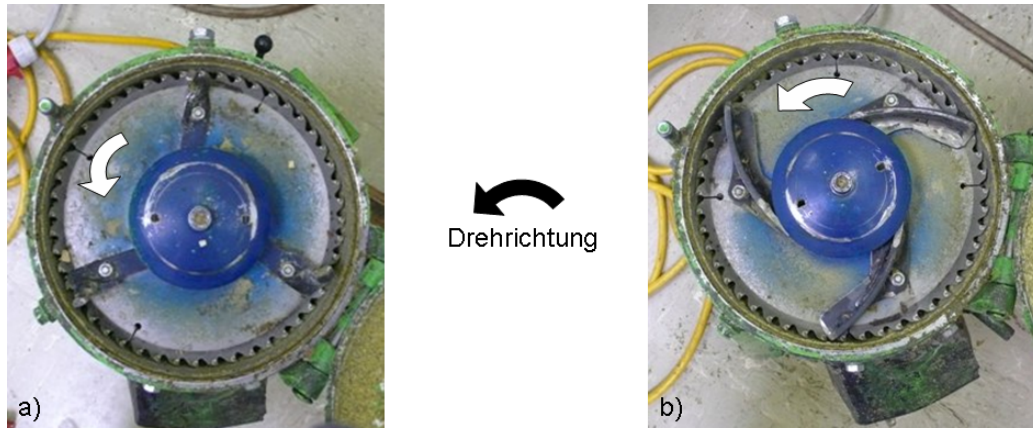


Abb. 3.6: Schlagkreuz: a) Originale Ausführung, b) Modifizierte Ausführung

Sägeblatt

Da es sich um standardisierte Bauteile handelt, sind die Sägeblätter nur mit gewissen Zähnezahlen erhältlich.

Die Zähne der Sägeblätter haben dieselbe Funktion wie die „Schlagleisten“ der Universal-Turbomühle (siehe Punkt 2.5.2). Sie dienen dazu, Energie in das Mahlgut einzubringen und somit einen Bruch der Partikel hervorzurufen. Für den Zerkleinerungserfolg ist die Abstimmung der Schlagleistenparameter (siehe Abbildung 3.7) (Schlagleistenbreite, Schlagleistendicke, Schlagleistenabstand, geometrische Form der Schlagleiste und die Anzahl der Schlagleisten) entscheidend. Diese Parameter bestimmen die Kontaktart zwischen Partikel und Rotor (kein Kontakt, Flächenstoß, Kantenstoß).

Eine weitere Überlegung ist, dass für eine geringe Leistungsaufnahme der Zerkleinerungsgrad pro Stufe in etwa gleich sein soll.

Der Zerkleinerungsgrad ist definiert mit: [vgl. 1, S. 448]

$$\zeta_{O'K} = \frac{\text{spez. Oberfläche des Mahlgutes}}{\text{spez. Oberfläche des Aufgabegutes}} = \frac{O'_K}{O'_{KA}} \quad (3.1)$$

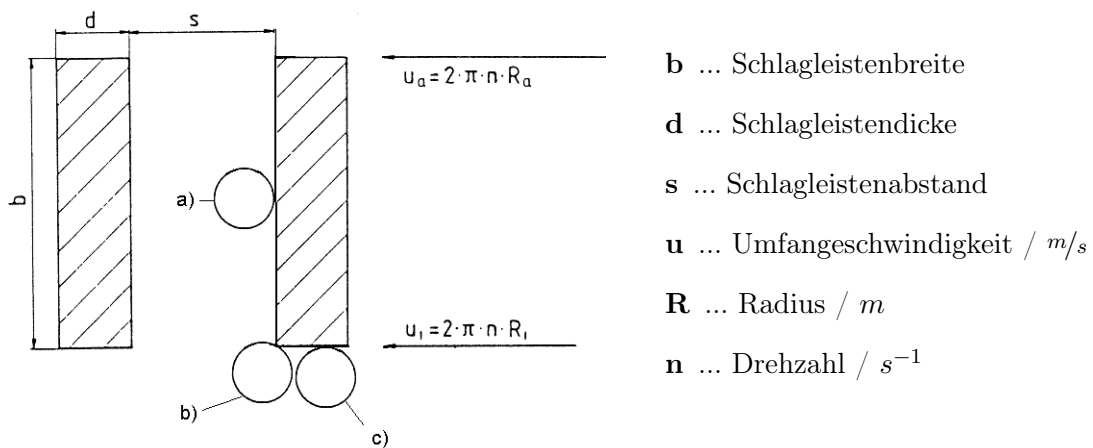


Abb. 3.7: Kontaktarten zwischen Partikel und Schlagleiste (Rotor) [vgl. 7, S.206] (siehe auch Abbildung 2.11)

Diese Parameter auf das Sägeblatt übertragen ergeben, dass die:

- Zähnezahl (Anzahl der Schlagleisten)
- Form der Zähne (Form der Schlagleisten)
- Abstand zwischen den Zähnen (Zahn - Zahnücke) (Schlagleistenabstand)

entspricht.

Wichtig für den Zerkleinerungsprozess ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Anzahl der Sägeblätter (zwei oder drei Sägeblätter). Es wird angenommen, dass die Anzahl der Zähne nach jedem Zerkleinerungsvorgang (Oberflächenvergrößerung) größer werden muss, damit für die höhere Anzahl von Partikeln im Mahlgut eine ausreichende Anzahl von Schlagleisten für eine weitere Zerkleinerung zur Verfügung steht.

Abstandhalter

Der Abstandhalter zwischen den Sägeblättern beeinflusst den Rotoraufbau sowie die Verweilzeit des Mahlgutes im Mahlraum. Aufgrund des größeren Abstands wird erwartet, dass der rotierende Mahlgutring durch Reibung an der Wand und zwischen den Partikeln gebremst wird. Dadurch soll sich die Relativgeschwindigkeit zwischen Mahlgut und Sägeblatt vergrößern. Die Dicke der Abstandhalter kann bei den Prototypen zwischen 5 und 20 mm variiert werden. Größere Abstände sind aufgrund der Prototypenkonstruktion nicht realisierbar.

3.4 Luftströmung

Prallmühlen haben, je nach Ausführung, Strömungsverluste von 20 bis 50 % der Gesamtleistung der Maschine.[vgl. 11, V - 15]

Des Weiteren hat die erzeugte Luftströmung erheblichen Einfluss auf die Verweilzeit des Mahlgutes in der Mühle. Dieser Parameter wird beim Prototyp InnoMill III (Kap. 4.5.2) genauer untersucht.

3.5 Empirische Ermittlung der Prozessparameter

Wie bereits beschrieben wurde, sollten die Versuche mit sehr geringem Mahlguteinsatz pro Versuch erfolgen. Nachfolgend werden die analytisch bestimmten Parameter durch Versuche verifiziert.

3.5.1 Versuchsdurchführung

Der prinzipielle Aufbau der Versuchsanordnung, welche in Abbildung 3.8 dargestellt ist, besteht aus einem InnoMill Prototyp, Leistungsmessgerät, Frequenzumrichter, Messverstärker und PC. Aufgrund des vorhandenen Mahlraumvolumens, muss die Versuchsmasse mindestens 300 Gramm betragen, damit sich kurzzeitig ein stationärer Zustand (Massendurchsatz $\hat{=} 120 - 160 \text{ kg/h}$) einstellen kann.

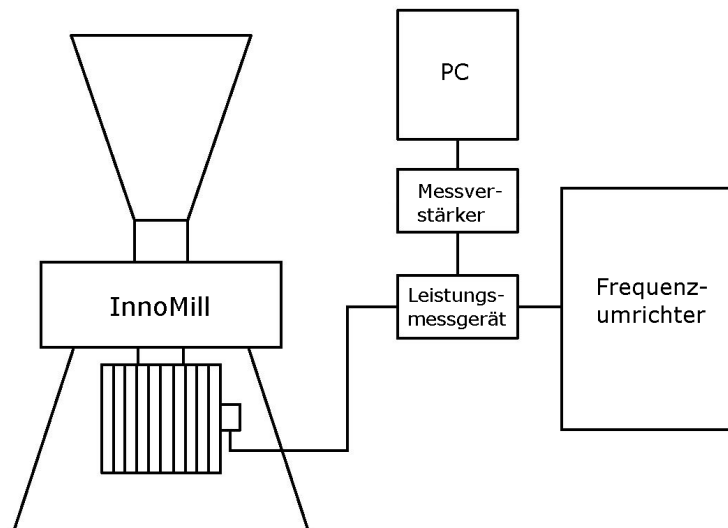


Abb. 3.8: Schematischer Versuchsaufbau

Die Versuchsabwicklung erfolgt folgendermaßen:

- Abwiegen der Versuchsmasse (300 g)
- Einstellen der Umfangsgeschwindigkeit
- Starten der Leistungsmessung
- Zerkleinerungsversuch
- Bewertung der Qualität des Fertiggutes
- Auswertung der Leistungsmessung

3.5.2 Dosiereinrichtung

Der Massendurchsatz für die Versuche wird durch in Kraft Treten eines der zwei folgenden Kriterien festgelegt:

1. Der Ziel-Massendurchsatz (120 bis 160^{kg/h}), oder
2. Das Leistungsvermögen des Motors

ist erreicht.

Bei den Kurzzeitversuchen ist es wichtig, dass sich schnell ein konstanter Massendurchsatz einstellt. Die Analyse zeigt, dass es zwei Möglichkeiten gibt, den Massendurchsatz zu beeinflussen:

1. Öffnungswinkel der Klappe
2. Freigegebener Querschnitt (Innenrohr - bombierte Scheibe)

Originale Dosiereinrichtung

In Abbildung 3.9 sind die Elemente der Dosiereinrichtung (Klappe und Innenrohr) zu sehen, welche in den Prototypen eingebaut sind.

Ein Problem der Dosiereinrichtung mit geringen Versuchsmassen zeigt die Abbildung 3.10. Die Brückenbildung kann nur durch Vergrößerung des Klappenwinkels gelöst werden. Dieser Vorgang erfolgt jedoch unkontrolliert.

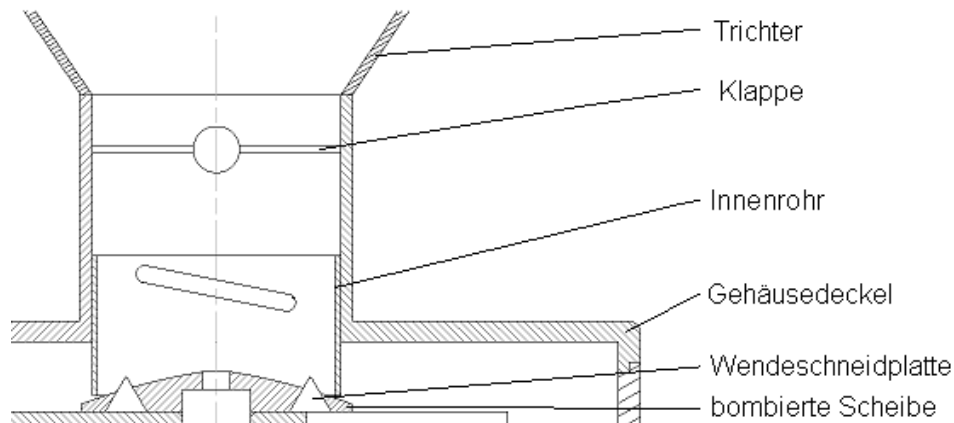


Abb. 3.9: Vorhandene Dosiereinrichtung der Prototypen

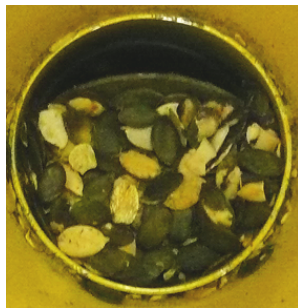


Abb. 3.10: Brückenbildung der Körner bei der Dosierklappe

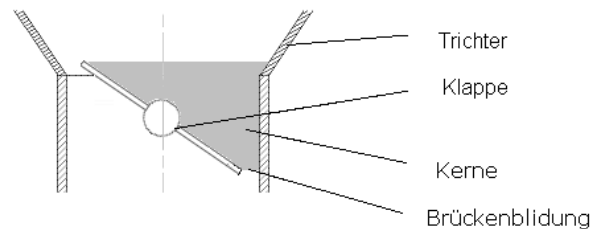


Abb. 3.11: Brückenbildung der Körner bei der Dosierklappe (schematischer Schnitt)

Klappenstellung:(Verhalten siehe Abbildung 3.12)

Durch Veränderung des Klappenöffnungswinkels α wird der Massendurchsatz \dot{Q} verändert. Für die Versuche ist es wichtig einen Auslegungsmassendurchsatz \dot{Q}_a festzulegen. Die Veränderung des Klappenwinkels erhöht auch den Luftdurchsatz (vgl. Drosselklappe). Spätere Untersuchungen der Luftströmung in Kapitel 4.5.2 zeigen, dass diese einen großen Einfluss auf den Massendurchsatz und auch auf die Fertigtgutqualität haben.

Das Verhalten des Massendurchsatzes schematisch dargestellt, da der vorhandene Einfluss der Luftströmung nicht bekannt ist. Des Weiteren ist der Massendurchsatzes \dot{Q} abhängig vom Öffnungswinkel der Klappe α) (siehe Abbildung 3.12).

Bei einem Öffnungswinkel von etwa 30° wird die Brückenbildung der Körner gelöst, es bildet sich folglich ein Massenstrom aus. Dieser steigt sehr stark linear, bis zum Klappenöffnungswinkel von ca. 70° , an. Eine weitere Vergrößerung bewirkt nur mehr eine geringfügige Erhöhung des Massendurchsatzes, jedoch kommt es zu Kornstauungen innerhalb der Maschine. Die Ursache dafür ist, dass das maximale Leistungsvermögen des Elektromotors erreicht ist.

Der „optimale“ Betriebsbereich liegt somit bei einem Klappenöffnungswinkel von ca. 70° . Bei

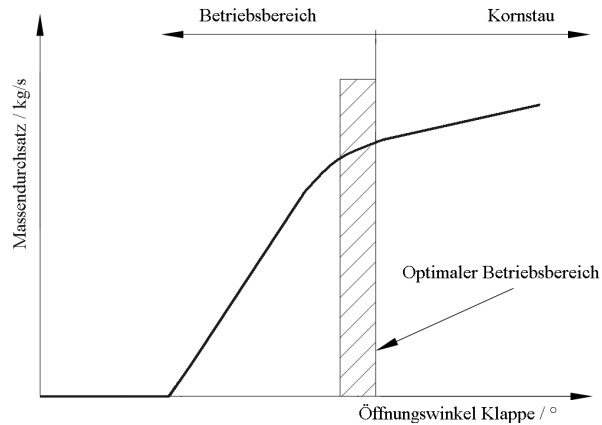


Abb. 3.12: Massendurchsatz abhängig vom Öffnungswinkel der Klappe (schematisch)

diesem ist ein hoher Massendurchsatz möglich und das Leistungsvermögen des Elektromotors ist für den Zerkleinerungsvorgang noch ausreichend.

Durch Veränderung des Klappenwinkels wird nicht nur der Massendurchsatz sondern auch der Luftdurchsatz verändert (siehe Kapitel 4.5.2).

Höhenverstellbares Innenrohr:

Der Massendurchsatz ist nicht nur abhängig vom Öffnungswinkel der Klappe, sondern auch vom freigegebenen Querschnitt zwischen der bombierten Scheibe und dem höhenverstellbaren Innenrohr. Durch diesen freien Querschnitt wird die Vorzerkleinerung des Mahlgutes festgelegt.

Das Verhalten des Parameters „höhenverstellbares Innenrohr“, in Zusammenspiel mit dem Bauteil bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten, wird nur ganz kurz beschrieben, da bei höherer Umfangsgeschwindigkeit auf die bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten verzichtet werden kann (siehe 3.5.4, bombierte Scheibe).

Funktion:

Das höhenverstellbare Innenrohr und die bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten bewirken in Kombination eine Vorzerkleinerung des Mahlgutes. Bei einem geringen Querschnitt (Spalthöhe ca. 5 mm) bildet sich ein geringer Massendurchsatz aus, jedoch wird durch die hohe Anzahl an Kontakten zwischen Mahlgut und Wendeschneidplatten das Mahlgut geknetet und es kommt zu einem ungewollten Ölaustritt.

Durch Vergrößerung des Querschnittes (Spalthöhe ca. 10 mm) erhöht sich der Massendurchsatz, die Anzahl der Kontakte zwischen Mahlgut und Wendeschneidplatten wird geringer (Kneteffekt geringer), somit steigt die Fertigtgutqualität.

Der größte Spalt liefert wie erwartet eine niedrige Fertigtgutqualität mit teils sehr großen Körnern, d.h. der Vorzerkleinerungseffekt geht verloren.

Vor- und Nachteile der originalen Dosiereinrichtung:

Vorteile der Dosiereinrichtung:

- In das Konzept der Maschine integriert
- Kleine Baugröße
- Einfache Herstellung
- Geringe Herstellungskosten

Nachteile der Dosiereinrichtung:

- Sehr lange Einarbeitungszeit für die Bedienung der Dosiereinrichtung (zweifache Einstellungsmöglichkeit Klappe und Innenrohr)
- Optimaler Betriebsbereich schwer einstellbar
- Qualität des Fertiggutes wird beeinflusst
- Für kurzzeitige Versuche mit wenig Masse nicht geeignet

Zusammenfassend kann man sagen, dass dieses Dosiersystem sehr empfindlich auf die Veränderung der Spalthöhe und des Klappenwinkels reagiert. Deshalb wird ein neues Dosiersystem, welches uns einen konstanten Massendurchsatz und somit reproduzierbare Versuchsergebnisse liefert, eingebaut.

Dieses System wird im nächsten Punkt genauer beschrieben.

Dosiereinrichtung Neu

Das neue System sollte wie schon vorher beschrieben einfach in der Handhabung sein und für kurzzeitige Versuche einen konstanten Massenstrom liefern. Ein handelsüblicher Trichter kann durch einfache Modifikationen (Vergrößerung des Auslassdurchmessers), diese Eigenschaften erfüllen und ersetzt die Klappe des alten Dosiersystems. Die Größe des Auslassdurchmessers legt den Massendurchsatz fest.

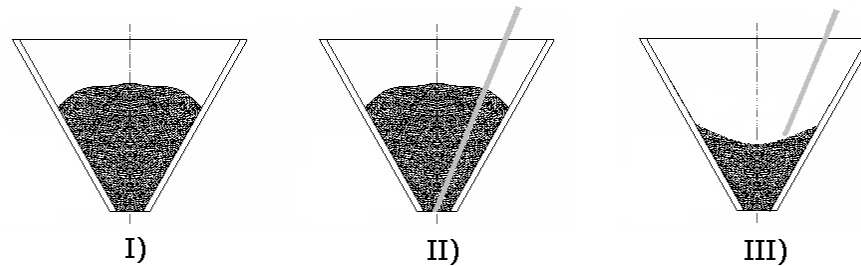


Abb. 3.13: Schematische Darstellung der Funktionsweise der neuen Dosiereinrichtung

Die in Abbildung 3.13 gezeigte Ablauffolge stellt folgende Zustände dar:

- I) Durch die Form des Trichters kommt es zu einer stabilen Brückenbildung.
- II) Diese Brückenbildung wird durch Einbringung einer Störung von außerhalb (dünner Stahldraht) gelöst.
- III) Durch die Wahl des Auslassdurchmessers ($\varnothing = 32 \text{ mm}$) fließen die Körner konstant in die Maschine.

3.5.3 Umfangsgeschwindigkeit

Aus der Analyse (3.3.2) geht hervor, dass die Umfangsgeschwindigkeit eine große Auswirkung auf den Zerkleinerungserfolg haben muss. Diese Annahme soll durch die nachfolgenden Versuche bestätigt werden.

Versuchsablauf

Durch Veränderung der Motorfrequenz mittels Frequenzumrichter kann die Drehzahl der Elektromotoren und somit die Umfangsgeschwindigkeit ($u = r \cdot \omega$) verändert werden. Abbildung 3.14 zeigt das Ergebnis, dass mit steigender Umfangsgeschwindigkeit die Fertiggutqualität stark verbessert werden kann. Die Qualität wurde in drei Klassen eingeteilt. Diese Einteilung ist jedoch zu groß gewählt und spiegelt deshalb das wahre Ergebnis nicht ganz wider. Dieses entspricht eher dem linearen Trend.

Die beste Fertiggutqualität wird mit den Umfangsgeschwindigkeiten 54 und 58 m/s erreicht. Zwischen den beiden Ergebnissen war optisch kein Unterschied mehr ersichtlich, weshalb die niedrigere Umfangsgeschwindigkeit gewählt wurde. Die neue Mühle sollte ohne Getriebe oder Riementrieb gebaut werden. Um dennoch eine hohe Umfangsgeschwindigkeit zu erreichen, sind größere Sägeblattdurchmesser nötig, diese werden mit größeren Durchmessern teurer in der Anschaffung.

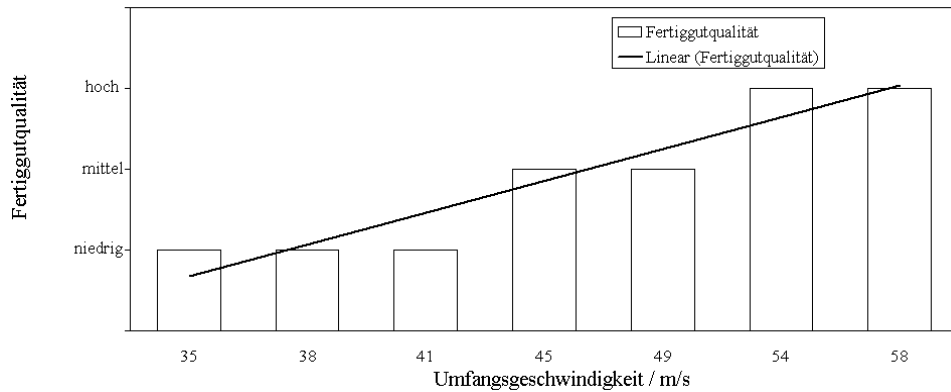


Abb. 3.14: Massendurchsatz/Fertigutqualität abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit

3.5.4 Rotoraufbau

Der Rotor der Prototypen (siehe Abbildung 3.3) besteht aus :

- Bombierter Scheibe mit Wendeschneidplatten
- Schlagkreuz
- Sägeblatt Nr. 1
- Abstandhalter
- Sägeblatt Nr. 2
- Ausbringerscheibe

Bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten

Die Versuchsergebnisse des Parameters *Umfangsgeschwindigkeit* ergeben, dass die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit von 35 auf 54 m/s eine große Qualitätssteigerung mit sich bringt.

Durch Stichprobenversuche wurde dieser Parameter noch einmal überprüft. Das Ergebnis war, dass durch die höhere Umfangsgeschwindigkeit auf die bombierte Scheibe mit Wendeschneidplatten verzichtet werden kann, da diese keinen Einfluss mehr auf die Qualität des Fertiggutes hat.

Die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit hat eine höhere Relativgeschwindigkeit zwischen Mahlgut und Schlagkreuz zur Folge, weiters wird dadurch auch die Beanspruchungsenergie erhöht und diese dürfte genau im optimalen Bereich liegen, in welchem die Beanspruchungsenergie gleich der Bruchenergie ist (siehe Pkt. 3.3.2).

Schlagkreuz

Durch die Verlängerung der Schlagkreuzarme kommt es zu einer Verschlechterung des Zerkleinerungsprozesses. Das Fertiggut ist stark ölhältig und die Leistungsaufnahme sehr hoch. Der Ölaustritt entsteht durch Quetschung des Mahlgutes zwischen Schlagkreuz und Gehäuse. Dieser Quetschvorgang und der Kornstau (siehe Abbildung 3.15) bewirken die hohe Leistungsaufnahme.

Für optimale Ergebnisse müssen die Schlagkreuzarme einen Abstand von mindestens 5 mm aufweisen (Abstand originale Schlagkreuzarme - Statorgehäuse).

Die veränderte Form der Schlagkreuzarme bringt hingegen keine Vorteile im Zerkleinerungsprozess. Darum wird für weitere Versuche das originale Schlagkreuz weiterhin verwendet.

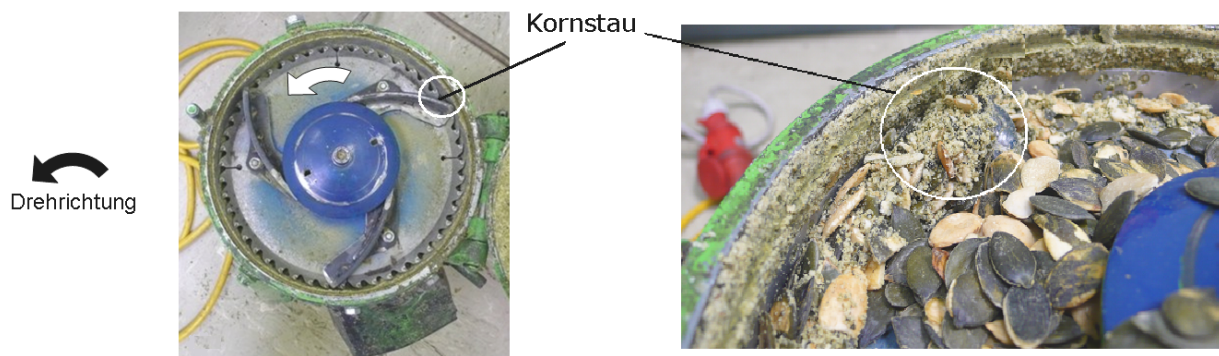


Abb. 3.15: Ergebnis der Schlagkreuzmodifikationen

Sägeblätter

Aus der Analyse geht hervor, dass die Anzahl der Sägeblätter und die Zähnezahlen mit großer Wahrscheinlichkeit einen großen Einfluss auf die Fertiggutqualität und die Leistungsaufnahme haben werden.

2 Sägeblätter:

Tabelle 3.2 zeigt die getesteten Zähnezahlen für die erste und zweite Schnittstufe. Die Sägeblätter mit 36 und 44 Zähnen entstanden durch Modifikation von Sägeblättern mit 72 und 88 Zähnen, bei denen jeder zweite Zahn entfernt wurde.

Sägeblatt 1	Sägeblatt 2
36	72
44	88
72	

Tab. 3.2: Zähnezahlen der Sägeblätter für die erste und zweite Schnittstufe

Die Variation der Sägeblätteranzahl und deren Zähnezahlen bringt folgende Ergebnisse hervor:

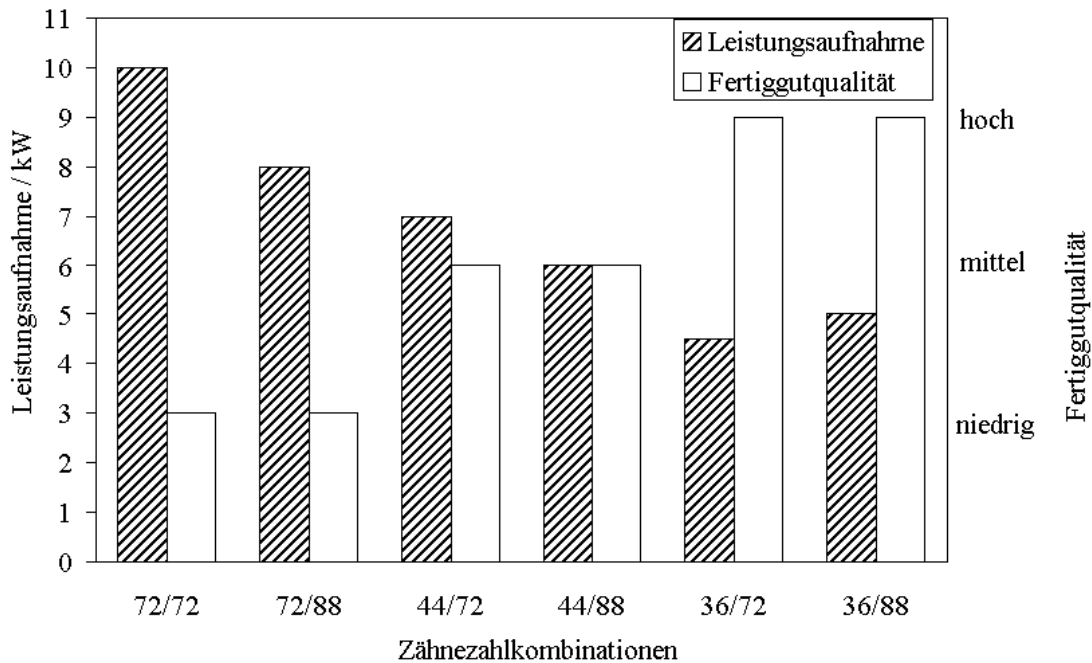


Abb. 3.16: Einfluss der Zähnezahlen auf die Qualität des Fertiggutes und der Leistungsaufnahme

Fertigutqualität

Die höchste Fertigutqualität wird mit den Zähnezahlkombinationen 36/88 und 36/72 erreicht, wobei das Fertigtgut mit 36/88 einen noch höheren Feinanteil besitzt. Mit den Kombinationen 44/88 und 44/72 wird eine mittlere Fertigutqualität erreicht. Einerseits ist es sehr fein und doch finden sich sehr grobe Körner im Fertigtgut. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass sich durch die Zähnezahlen der Sägeblätter ein Mahlgutstrom ausbildet, in dem manche Körner nicht mehr weiter zerkleinert werden. Bei den Kombinationen 72/88 und 72/72 weist das Fertigtgut eine Erwärmung und Ölaustritt auf.

Leistungsaufnahme

Die Leistungsaufnahme verhält sich konträr zur Fertigutqualität. Eine Erwärmung und Ölaustritt weisen darauf hin, dass das Mahlgut in einer Stufe geknetet wird. Vermutlich dürfte in diesem Fall (72/72, 72/88) die Zähnezahl für die erste Stufe zu groß gewählt worden sein.

3 Sägeblätter:

Für eine hohe Ölausbringung ist ein hoher Anteil an sehr feinen Körnern entscheidend. Damit dieser Anteil noch weiter erhöht werden kann, werden Versuche mit drei Sägeblättern durchgeführt. Die Kombination der drei Sägeblättern erfolgt aufbauend auf den Versuchsergebnissen mit zwei Sägeblättern.

Die besten Ergebnisse wurden mit dem Sägeblatt mit 36 Zähnen in der ersten Stufe erzielt, deshalb wird dieses Blatt auch für drei Sägeblätter in der ersten Stufe verwendet. Für die zweite

Stufe empfehlen sich die vorhanden Sägeblätter mit 44 und 72 Zähnen. Das Blatt mit 44 Zähnen weist nur eine geringfügig höhere Zähnezah auf als das Sägeblatt der ersten Stufe weshalb auch die Zerkleinerungsleistung vermutlich nicht steigen wird. Eine bessere Zerkleinerungsleistung wird vom Sägeblatt mit 72 Zähnen erwartet. Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt eine bessere Zähnezah für die zweite Stufe zwischen diesen beiden. In der letzten Stufe geht aus den Vorversuchen hervor, dass eine hohe Zähnezah vorhanden sein soll.

Aus diesen Vorüberlegungen ergeben sich folgende Versuchsanordnungen:

$$V_1 = 36/44/88$$

$$V_2 = 36/72/88$$

Fertigutqualität

Dieses weist bei beiden Versuchsanordnungen eine hohe Qualität auf. Der Feinanteil im Fertigut kann mit der V_1 , im Vergleich mit zwei Sägeblättern (36/88), nur geringfügig erhöht werden. Darum liegt die Vermutung nahe, dass 44 Zähne in der zweiten Stufe zu gering für eine weitere Zerkleinerung des Mahlgutes gewählt sind.

Bei der Versuchsanordnung V_2 konnte der Feinanteil deutlich erhöht werden. Dieser ist vermutlich auf eine höhere Anzahl von Kontakten zwischen Mahlgut und Rotor zurückzuführen.

Leistungsaufnahme

Aufgrund des zusätzlichen Sägeblattes (zusätzliche Zerkleinerungsstufe) ist bei den Versuchsanordnungen mit drei Sägeblättern die Leistungsaufnahme etwas höher als bei jenen mit zwei Schnittstufen (36/72, 36/88).

Folgerungen aus den Versuchen:

Die optimale Einstellung zwischen hoher Fertigutqualität und niedriger Leistungsaufnahme wird mit der Versuchsanordnung V_2 (drei Sägeblätter) erreicht. Der Grund dafür liegt darin, dass in jeder Schnittstufe, bezogen auf die Oberfläche des Mahlgutes, die beste zu realisierende Anzahl an Kontakten zwischen Partikel und Sägeblatt besteht. Mit hoher Wahrscheinlichkeit könnte diese Anzahl an Kontakten zwischen Mahlgut und Sägeblatt, bei größerer Auswahl an verschiedenen Zähnezahlen, noch weiter verbessert werden.

Mahlspalt zwischen Rotor und Stator

Durch die Größe des Mahlspaltes besteht eine weitere Möglichkeit den Feinanteil im Fertiggut zu erhöhen.

Der Mahlspalt kann durch zylindrische Ringeinsätze verändert werden. Diese Ringeinsätze müssen in verschiedenen Dicken angefertigt werden. Damit der Fertigungsaufwand klein bleibt, wird der Mahlspalt nur an einer Schnittstufe variiert.

Die eingesetzten Ringe werden aus Fühlerlehrenblech gefertigt. Die Vorteile sind, dass wenig Verschnittmaterial anfällt und es in verschiedenen Stärken verfügbar ist. Für die Versuche werden vier Ringe mit den Stärken 0,5, 1, 1,5 und 2 mm angefertigt. Der Nachteil ist, dass dieses Material nur eine Breite von 12 mm aufweist.

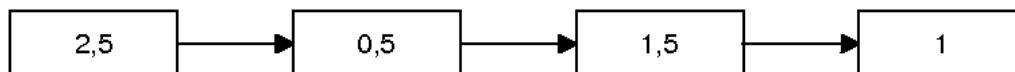
Im Gehäuse befindet sich auf Höhe der letzten Schnittstufe ein Absatz. Dieser wird zur Positionierung des Ringes im Gehäuse verwendet. Aus diesem Grund wird der Mahlspalt der letzten Stufe variiert. In Tabelle 3.3 sind die Mahlspalte und Zähnezahlen für die Schnittstufen zusammengefasst.

Zwei Sägeblätter		Drei Sägeblätter	
Mahlspalt /mm	Sägeblatt Nr.	Mahlspalt /mm	Sägeblatt Nr.
2,5	1 (36 Zähne)	5	1 (36 Zähne)
0,5 - 2,5	2 (72 Zähne)	2,5	2 (72 Zähne)
		0,5 - 2,5	3 (88 Zähne)

Tab. 3.3: Mahlspalte für 2 und 3 Sägeblätter

Vorgehensweise bei der Ermittlung der Mahlspaltgröße für zwei Sägeblätter:

Durch die Ringeinsätze kann der Mahlspalt verkleinert werden. Anhand der Fertiggutqualität wird die Wahl der Mahlspalte erläutert. Das nachfolgende Flussdiagramm zeigt den Verlauf der getesteten Mahlspalte.



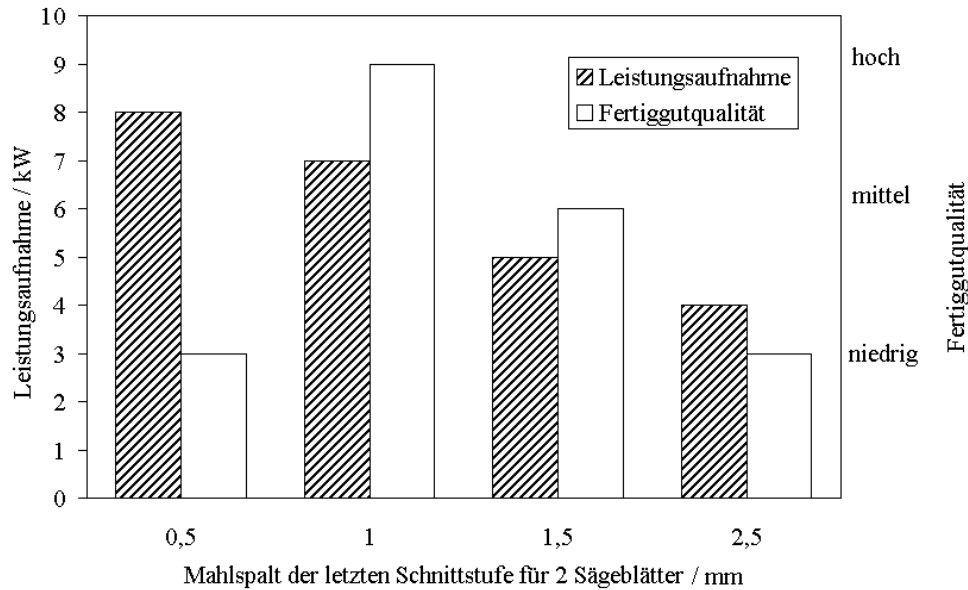


Abb. 3.17: Ergebnis der Variation des Mahlpaltes der letzten Schnittstufe für 2 Sägeblätter

Fertigutqualität

Wie aus dem Ergebnis (siehe Abbildung 3.17) ersichtlich, ist die Fertigutqualität beim größten und kleinsten Mahlpalt sehr niedrig. Das Fertigut weist beim größten Mahlpalt einen sehr hohen Grobkornanteil auf. Beim kleinsten Mahlpalt kommt es zum Ölaustritt während des Zerkleinerungsvorganges.

Der Mahlpalt wird in weiterer Folge auf 1,5 mm verkleinert. Das Fertigut erreicht eine mittlere Qualität, d.h. der Grobkornanteil ist noch zu hoch. Deshalb wird der Mahlpalt auf 1 mm verkleinert.

Mit diesem Mahlpalt kann die höchste Qualität erzielt werden.

Leistungsaufnahme

Am besten für die Leistungsaufnahme wäre ein großer Mahlpalt, jedoch kann mit diesem keine ausreichend hohe Fertigutqualität erreicht werden. Die Leistungsaufnahme steigt mit jeder Verkleinerung des Mahlpaltes. Eine mögliche Ursache dafür könnte die gesteigerte Anzahl an Kontakten zwischen Mahlgut und Sägeblatt sein (ähnlich dem Knetvorgang, der durch die Wendeschneidplatten verursacht wurde).

Vorgehensweise bei der Ermittlung der Mahlpaltgröße für drei Sägeblätter:

Bei der Ermittlung des Mahlpaltes für drei Sägeblätter liegen schon Ergebnisse für zwei Sägeblätter vor. Den Iterationsverlauf der Mahlpalte zeigt das nachfolgende Flussdiagramm. Die Erläuterung für die Auswahl der Mahlpalte erfolgt unter der Zuhilfenahme der Fertigutqualität.

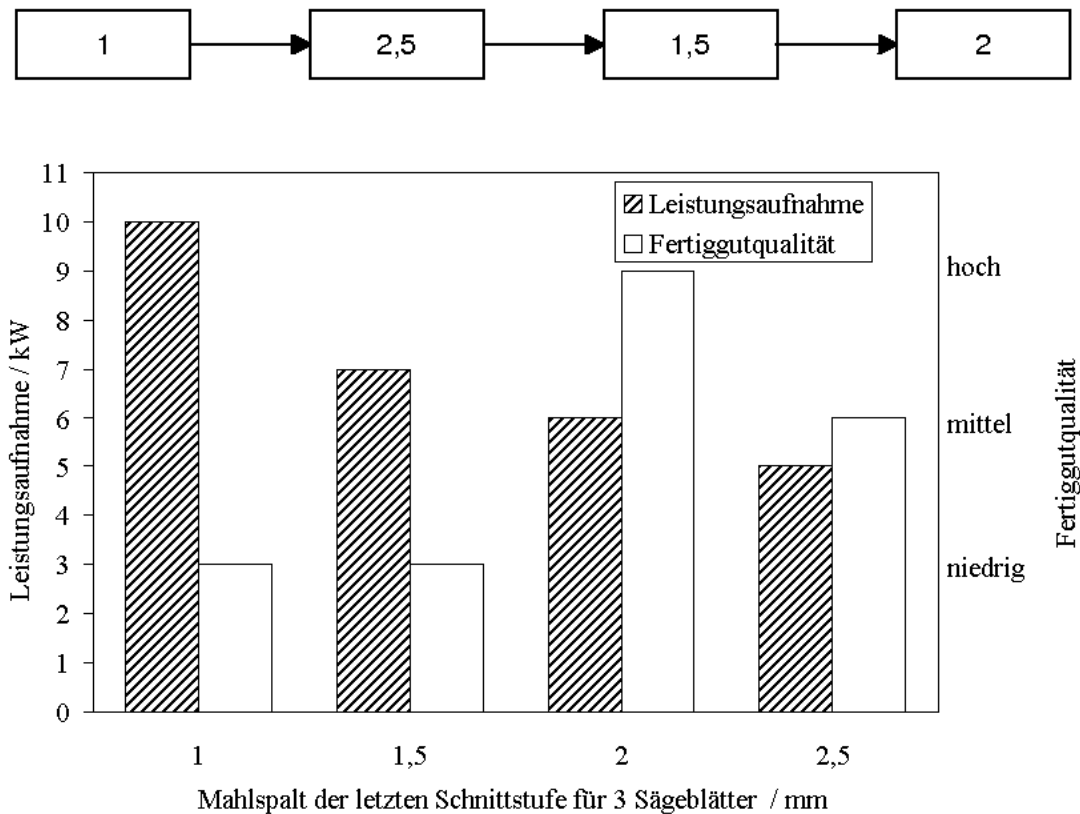


Abb. 3.18: Ergebnis der Variation des Mahlpaltes der letzten Schnittstufe für 3 Sägeblätter

Fertigutqualität

Die Versuche beginnen mit dem „besten“ Mahlpalt für zwei Sägeblätter. Das Fertigut weist eine niedrige Qualität durch Ölaustritt auf, weshalb die Vergrößerung des Mahlpaltes auf 2,5 mm erfolgt. Bei einem Mahlpalt mit 2,5 mm wird eine mittlere Qualität erreicht. Da aber der Grobanteil bei ca. 20 % liegt, erfolgt eine Verkleinerung auf 1,5 mm. Diese Verkleinerung verschlechtert wiederum die Qualität wieder (Ölaustritt).

Der letzte Test erfolgt mit einem Mahlpalt von 2 mm. Mit diesem kann eine hohe Qualität erreicht werden.

Leistungsaufnahme

Betrachtet man die Leistungsaufnahme, so fällt auf, dass sie sich ähnlich verhält wie bei den Versuchen mit zwei Sägeblättern. Die Gründe für die hohe Leistungsaufnahme sind mit sehr hoher

Wahrscheinlichkeit dieselben wie jene, die bereits bei der Ergebnisdiskussion der Leistungsaufnahme für zwei Sägeblätter angeführt wurden.

Aus diesen Versuchen wird abgeleitet, dass die „richtige“ Wahl der Mahlspalte sehr große Auswirkungen auf die Effektivität des Zerkleinerungsprozesses haben dürfte.

Abstandhalter

Durch Veränderung der Dicke des Abstandhalters soll der Einfluss dieses Parameters auf den Zerkleinerungsprozess geklärt werden.

Die getestete Dicke liegt zwischen 5 und 20 *mm*.

Bei Versuchen mit unterschiedlich dicken Abstandhaltern, wird aufgrund des Prototypenaufbaus der Mahlspalt der ersten Stufe von 2,5 auf 5 *mm* vergrößert. Dies hat zur Folge, dass bei den verschiedenen Versuchen die Leistungsaufnahme verringert wird.

Die Auswertung der Versuche ergibt, dass mit größerer Abstandhalterdicke eine verringerte Leistungsaufnahme auftritt.

Mit Veränderung der Abstandhalterdicke wird der Mahlspalt, des ersten Sägeblattes, von 2,5 auf 5 *mm* vergrößert. Dieser Umstand ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Ursache für die verringerte Leistungsaufnahme.

3.6 Energiebedarf der Prototypen

Die Abbildung 3.19 zeigt den minimalen Energiebedarf und Erfahrungswerte von Prallmühlen. Auf der Ordinate ist der Energiebedarf in kWh/t und auf der Abszisse die Umfangsgeschwindigkeit in m/s aufgetragen. Des Weiteren ist die mögliche Feinheit des Fertiggutes in Bereiche eingetragen worden.

In diese Abbildung wurden der Energiebedarf der Prototypen InnoMill I und II sowie jener des modifizierten Prototyps InnoMill II eingetragen. Vergleiche der Prototypen untereinander und mit den Werten aus der Literatur, ermöglichen eine Aussage über die Effizienz der Prototypen.

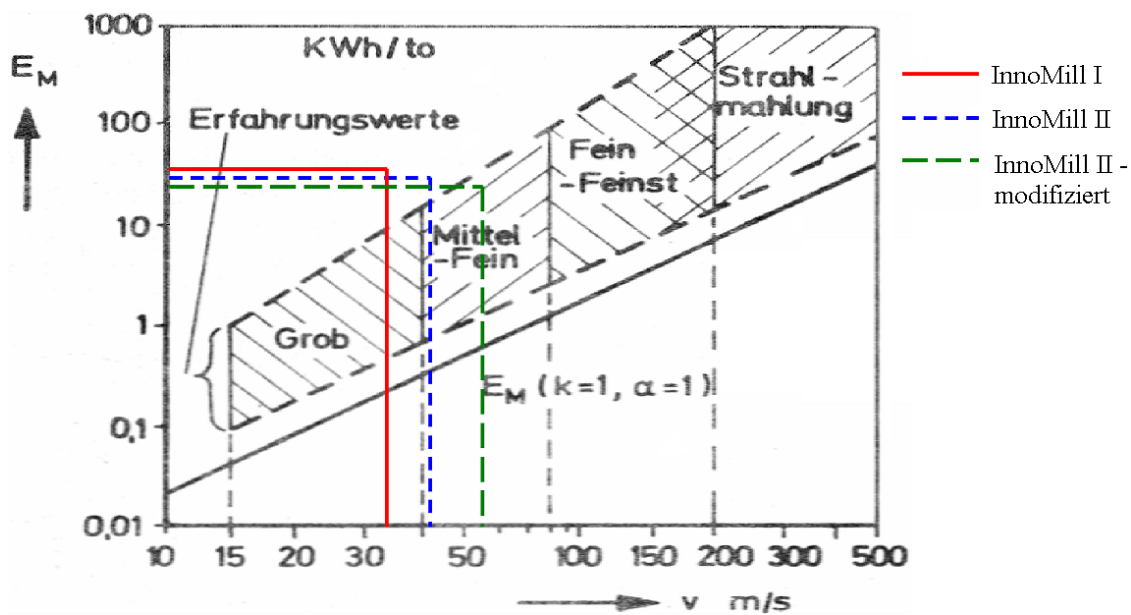


Abb. 3.19: Energiebedarf der Prototypen InnoMill I und InnoMill II (original Abbildung siehe [11, V - 14])

Originale Konfiguration der Prototypen

Die Prototypen im Originalzustand weisen einen sehr hohen Energiebedarf auf. Für das Fertiggut bedeutet die niedrige Umfangsgeschwindigkeit, dass im Schnitt eine *Grobe* Körnung erreicht wird.

Prototyp InnoMill II modifiziert

Der Energiebedarf des modifizierten InnoMill II Prototyps kann durch die Prozessverbesserungen um mindestens 20 %, gegenüber dem Original Prototyp, gesenkt werden. Das Fertiggut weist durch die höher Umfangsgeschwindigkeit eine deutlich höhere Qualität auf.

4 Prototyp InnoMill III

Aufbauend auf den Versuchsergebnissen mit den Prototypen InnoMill I und InnoMill II wurde der Prototyp InnoMill III konstruiert.

Der neue Prototyp soll für die Parametervariationen eine große Variabilität aufweisen. Im ersten Teil dieses Kapitels befindet sich eine analytische Funktionsbeschreibung der neu konstruierten Bauteile. Der zweite Teil beinhaltet die analytische Ermittlung der Prozessparameter und die Verifizierung durch empirische Versuche.

4.1 Konstruktive Richtlinien für den neuen Prototypen

Aufbauend auf den empirischen Ergebnissen der Prototypen InnoMill I und II (siehe Unterkapitel 3.5) wird der Prototyp InnoMill III mit folgenden Eigenschaften und Randbedingungen konstruiert.

4.1.1 Eigenschaften des neuen Prototypen

In Absprache mit den Projektpartnern sollte der Prototyp folgende Anforderungen aufweisen:

- Erreichen der Umfangsgeschwindigkeit ohne Getriebe oder Riementrieb
- Variabel einstellbare Parameter
- Verwendung von Standardteilen (Sägeblätter)
- Möglichkeit der Weiterverwendung als Nullserienmodell durch einfache Modifikationen

4.1.2 Randbedingungen aus den empirischen Ergebnissen der Prototypen InnoMill I und II

Die Auswahl des Elektromotors basiert auf der Zielsetzung der Diplomarbeit (max. Leistungsaufnahme $7,5 \text{ kW}$) und der hohen Wahrscheinlichkeit, dass in einem späteren Serienmodellen ein Motor dieser Leistungsklasse zum Einsatz kommt.

Durch Vergrößerung des Sägeblattdurchmessers auf 350 mm und der Nenndrehzahl des Elektromotors von 2860 min^{-1} ergibt dies eine Umfangsgeschwindigkeit von 52 m/s.

Ein wichtiges Merkmal bei der Auswahl der Sägeblätter ist, dass sie eine ähnlichen Zahnteilung aufweisen sollten. Da die Sägeblätter Standardteile sind und zugekauft werden, wird es schwer dieselbe Zahnteilung wie beim Prototyp InnoMill II zu erreichen. Der Vergrößerungsfaktor wird berechnet aus Umrichterfrequenz/Netzfrequenz = $65\text{Hz}/50\text{Hz} = 1,3$.

Die Tabelle 4.1 zeigt die berechneten und vorhandenen Zähnezahlen und die Abweichung der Zähnezahlen zueinander.

InnoMill II	InnoMill III		
Zähnezahl	Zähnezahl berechnet	Zähnezahl vorhanden	Abweichung / %
36	47	60	27
72	94	84	10,6
88	114	108	5,3

Tab. 4.1: Vergleich der berechneten/vorhanden Zähnezahlen für den neuen Prototyp

Der Mahlspace soll variabel einstellbar sein, diese Forderung wird mit einem konischen Einsatz im Stator gelöst.

Der Prototyp wird somit mit folgenden Randbedingungen konstruiert:

- Leistung Elektromotor: 7,5 kW
- Durchmesser Sägeblatt: 350 mm
- Zähnezahlen der Sägeblätter: 60/84/108
- Mahlspace: 5/2.5/2 mm
- Abstandhalter Dicke: 20 mm
- Konus im Stator für unterschiedliche Mahlspace

4.2 Aufbau des Prototypen InnoMill III

Zur besseren Übersicht zeigt Abbildung 4.1 den Schnitt durch den Prototyp. Die Bauteile werden in Abbildung 4.2 näher beschrieben.

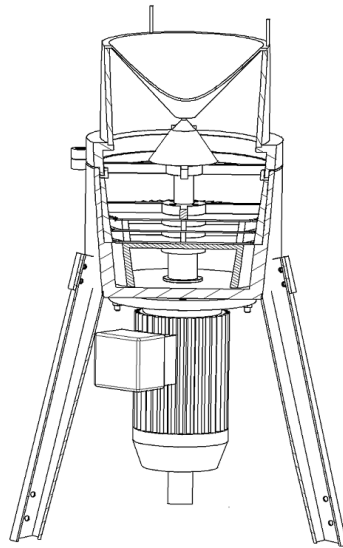


Abb. 4.1: Schnittdarstellung des Prototyp InnoMill III

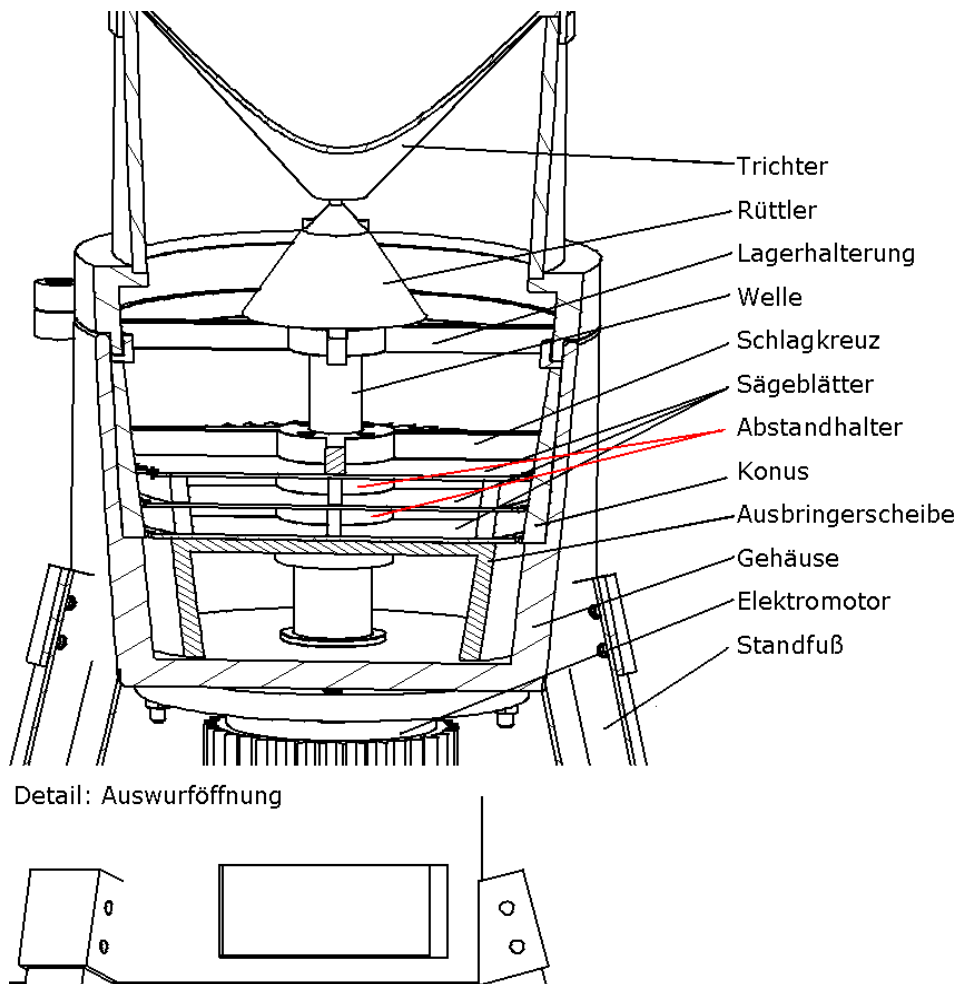


Abb. 4.2: Detailansicht des Prototyp InnoMill III

4.3 Funktionsanalyse der neu konstruierten Bauteile

Die neu konstruierten Bauteile werden mit jenen aus den Prototypen InnoMill I und InnoMill II verglichen. Damit die Funktionalität der Bauteile erhöht werden kann, wird jedes Bauteil einer Funktionsanalyse unterzogen. Auf die Auswirkungen auf den Zerkleinerungsprozess wird in Unterkapitel 4.5 eingegangen.

4.3.1 Dosiereinrichtung

Aus Unterkapitel 3.5.2 geht hervor, dass für kurzzeitig stationäre Zerkleinerungsversuche eine sehr exakt einstellbare Dosiereinrichtung vorhanden sein muss.

Bei den alten Prototypen wurde dieses Problem mittels Trichter gelöst. Beim neuen Prototyp wurde an diesem Prinzip festgehalten, jedoch sollte die Brückenbildung im Trichter durch einen in die Maschine integrierten Rüttler gelöst werden. Der Rüttler ist über die Welle des Rotors mit dem Elektromotor, der für den Zerkleinerungsprozess eingesetzt wird, verbunden.

Die Motivation diese Dosiereinrichtung zu entwickeln bestand darin, dass die Mühle in ferner Zukunft an unterschiedlichen Orten betrieben werden kann (z.B. Mühle für einen Maschinenring).

Zusammenfassend ergeben sich für den Prototyp InnoMill III folgende Vorteile:

- In den Prototypen integriert
- Kein eigener Antrieb nötig
- Einfache Handhabung
- Konstanter Massendurchsatz

Aufbau

Die neue Dosiereinrichtung besteht aus einem Trichter und einem Rüttler. Abbildung 4.3 zeigt die Schnittdarstellung des Rüttlers.

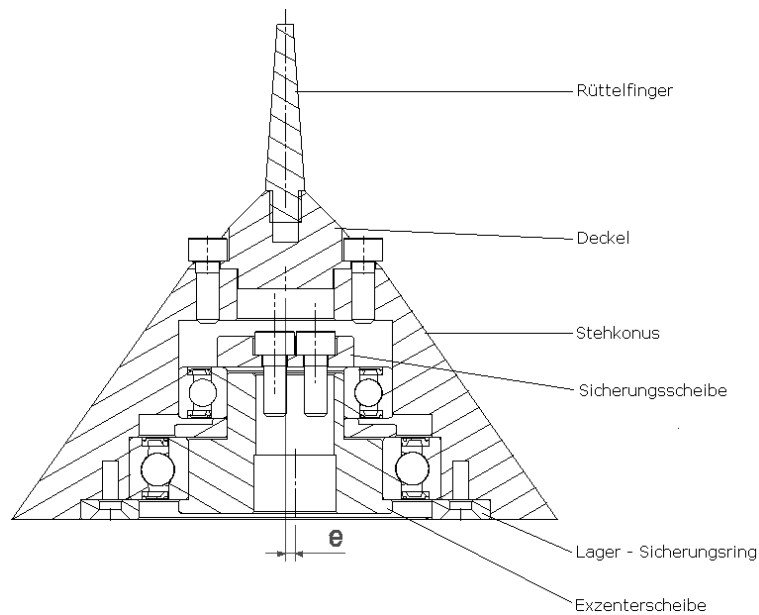


Abb. 4.3: Schnitt durch den Rüttler

Funktionsweise

Abb 4.4 zeigt das Funktionsprinzip des Rüttlers. Die Exzentrerscheibe ist mit der Rotorwelle drehfest verbunden. Der Stehkonus weist eine um den Abstand e versetzte Achse auf.

Durch die zweifache Lagerung und einer Biegefeder wird der Stehkonus von der Drehbewegung der Welle entkoppelt. Der Stehkonus führt aufgrund der außermittigen Drehachse eine Kreisbewegung mit dem Radius e aus.

Der Rüttelfinger, der dieselbe Kreisbewegung wie der Stehkonus ausführt, soll die Brückenbildung des Mahlgutes auflösen und somit für einen Massendurchsatz laut Lastenheft sorgen.

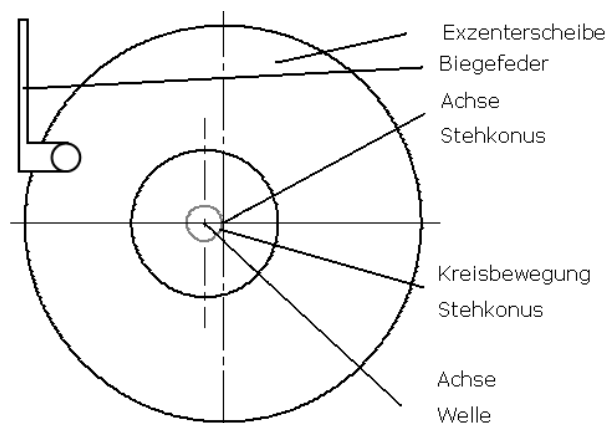


Abb. 4.4: Funktionsprinzip des Rüttlers

4.3.2 Lagerhalterung (siehe Abbildung 4.5)

Der Rotor weist aufgrund der hohen Variabilität des Prototypen einen sehr langen axialen Aufbau auf. Am Wellenende wird noch der Rüttler für die Dosiereinrichtung montiert. Durch die große Unwuchtkraft des Rüttlers besteht die Gefahr, dass ohne Zwischenlager, der Rotor das Gehäuse berührt und dadurch die Maschine zerstört wird. Deshalb wurde diese Lagerhalterung eingebaut.

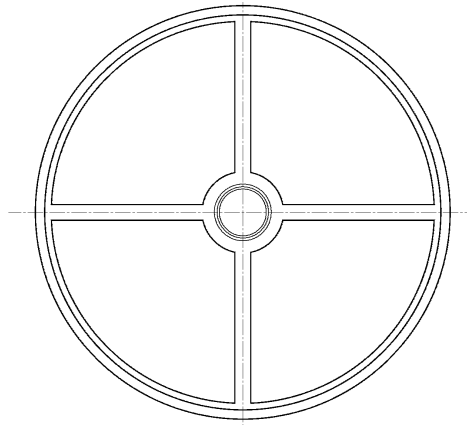


Abb. 4.5: Lagerhalterung des Prototyps InnoMill III

4.3.3 Schlagkreuz

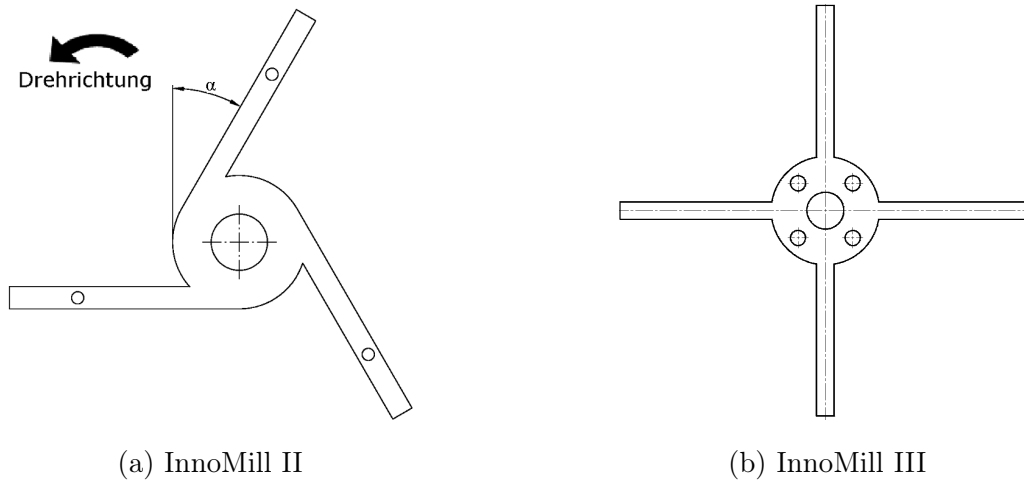
In Abbildung 4.6 sind die Schlagkreuze des Prototyps InnoMill II und des Prototyps InnoMill III gegenübergestellt.

Das Schlagkreuz vom Prototyp InnoMill II weist 3 Schlagarme auf, welche einen Winkel α zur Tangente des Grundkreises aufweisen. Dies soll bewirken, dass die Kerne zum Umfang geführt und dort mit hoher Umfangsgeschwindigkeit zerkleinert werden. Versuche haben bereits gezeigt, dass die Form des Schlagkreuzes keinen Einfluss auf das Mahlergebnis hat.

Hingegen werden durch eine höhere Anzahl von Schlagarmen folgende Aufgaben mit hoher Wahrscheinlichkeit besser erfüllt werden:

- Verstärkung der Luftströmung (Ergebnis siehe Unterkapitel 4.5.2)
- Stärkere Vorzerkleinerung des Mahlgutes

Deshalb sind für den Prototyp InnoMill III *vier* und *sechs* Schlagarme vorgesehen. Eine noch höhere Anzahl wird aufgrund der Mühlengröße als nicht Ziel führend erachtet.



(a) InnoMill II

(b) InnoMill III

Abb. 4.6: Schlagkreuze der Prototypen

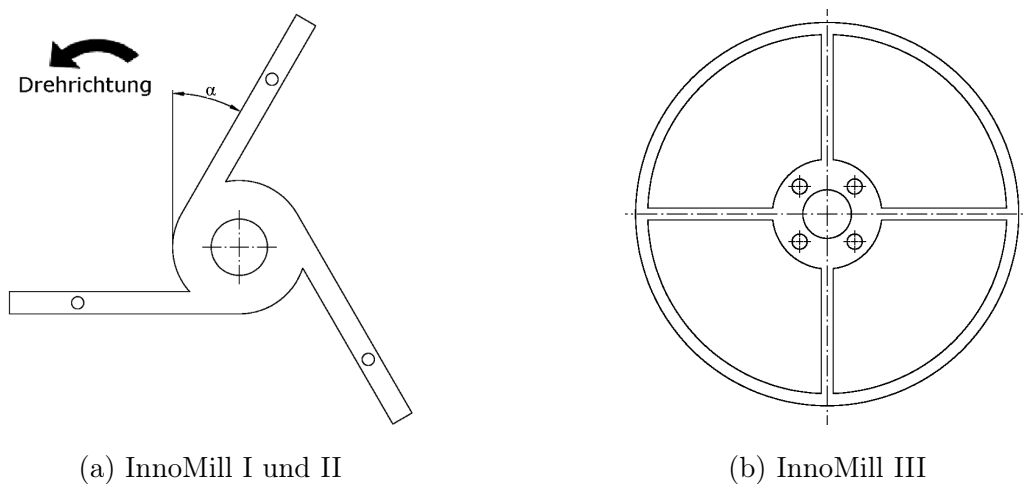
4.3.4 Sägeblätter

In Unterkapitel 3.5.4 wurden verschiedene Zähnezahlen für den Prototyp InnoMill II getestet. Die Auswahl der Sägeblätter für den Prototyp InnoMill III wird in Punkt 4.1.2 genauer erklärt.

Die gewählten Zähnezahlen für die drei Schnittstufen sind: 60/84/108 und der Durchmesser beträgt 350 mm. Der Spanwinkel ist positiv und weist Winkel von 5° auf. Für eine lange Standzeit werden hartmetallbestückte Kreissägeblätter für Nichteisenmetalle verwendet.

4.3.5 Abstandhalter

Die Dicke des Abstandhalters hat eine große Auswirkung auf die Verweildauer des Mahlgutes in der Maschine.



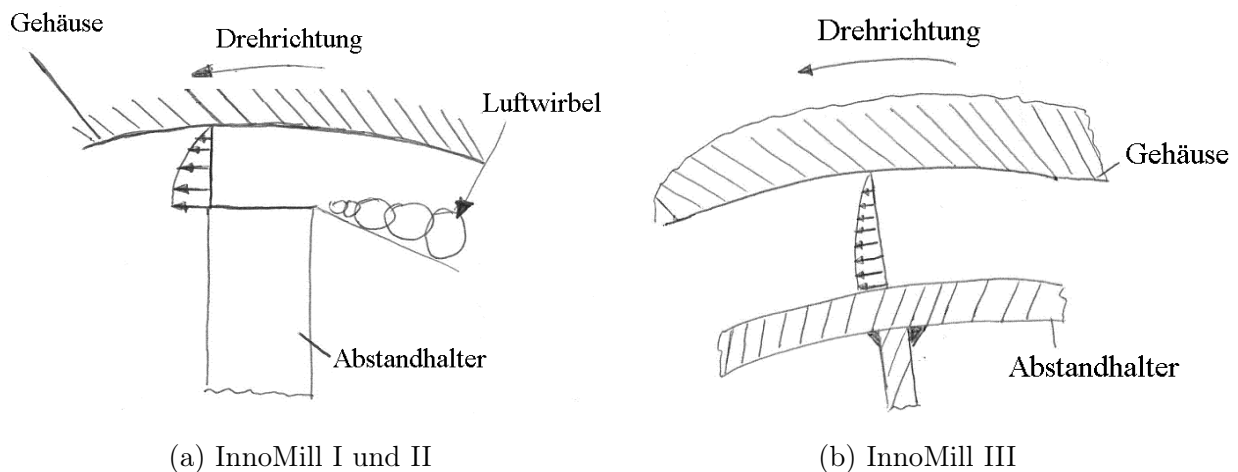
(a) InnoMill I und II

(b) InnoMill III

Abb. 4.7: Abstandhalter der Prototypen

Aus der Literaturrecherche geht hervor (siehe Kapitel 2.4.2), dass die Luftströmung bei kleinen Partikeln hauptverantwortlich für den Transport durch die Mühle ist. Das Geschwindigkeitsprofil der Luftströmung zwischen Rotor und Statorgehäuse, dürfte ähnlich dem in Abbildung 2.12 d) gezeigt sein. Um die Stöße zwischen den Partikeln zu verringern, dürfte das Geschwindigkeitsprofil über die Rotorhöhe eine große Rolle spielen.

Diese Überlegung wird durch die Abbildung 4.8 veranschaulicht.



(a) InnoMill I und II

(b) InnoMill III

Abb. 4.8: Wahrscheinliche Geschwindigkeitsprofile der Luftströmung

InnoMill II:

Der Abstandhalter besitzt drei Schlagarme. Durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit und die geringe Anzahl an Schlagarmen wird vermutet, dass sich hinter dem Schlagarm Luftwirbel ausbilden. Durch diese steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich auch die Anzahl der Kontakte zwischen den Partikeln erhöhen. Dies wiederum würde auch die Leistungsaufnahme erhöhen. Weiters wird vermutet, dass die Partikel durch die Schlagarme beschleunigt werden, was sich wiederum negativ auf die Relativgeschwindigkeit zwischen Partikeln und Sägeblättern auswirken könnte.

InnoMill III:

Der Ring des Abstandhalters wird wahrscheinlich aufgrund der Oberflächenrauigkeit eine Luftströmung hervorrufen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird die Geschwindigkeit der Luftströmung um ein Vielfaches kleiner sein als jene beim Abstandhalter des Prototyps InnoMill II. Da wahrscheinlich keine bzw. nur wenige Luftwirbel vorhanden sind, wird davon ausgegangen, dass auch die Anzahl der Kontakte der Partikel untereinander abnimmt. Der gewünschte Effekt wäre, dass sich durch die geringere Geschwindigkeit der Luft in Kombination mit der Abstandhalterdicke, die Relativgeschwindigkeit zwischen den Partikeln und den rotierenden Sägeblättern vergrößert.

4.3.6 Ausbringerscheibe

Abbildung 4.9 (a) zeigt die Ausbringerscheibe der alten Prototypen. Es sind zwei Flügel zum Ausbringen des Fertiggutes angebracht.

Aufgrund der größeren Abmessungen des neuen Prototyps werden vier Flügel zur Ausbringung des Fertiggutes angebracht. Diese können unter verschiedenen Winkeln an den Ring montiert werden. Die geplante Wirkung ist, dass dadurch die Luft vom Mühleneintritt angesaugt und somit in weiterer Folge der Mahlgutdurchlauf durch die Mühle verbessert wird.

Der äußere Stahlring der neuen Ausbringerscheibe hat die Funktion, dass der Mahlraum begrenzt und somit das Fertiggut schneller ausgebracht wird. Des Weiteren soll durch die Steigerung des Massenträgheitsmoments das Absacken der Drehzahl durch Leistungsspitzen, welche bei einem etwas zu hohen Massendurchsatz auftreten, minimiert werden. Dieses Absacken der Drehzahl hat eine Verschlechterung der Fertiggutqualität zur Folge.

Die positive Auswirkung des höheren Massenträgheitsmoments wird im „Dauerversuch“ mit der Kombination A (siehe Pkt. 4.6) ersichtlich.

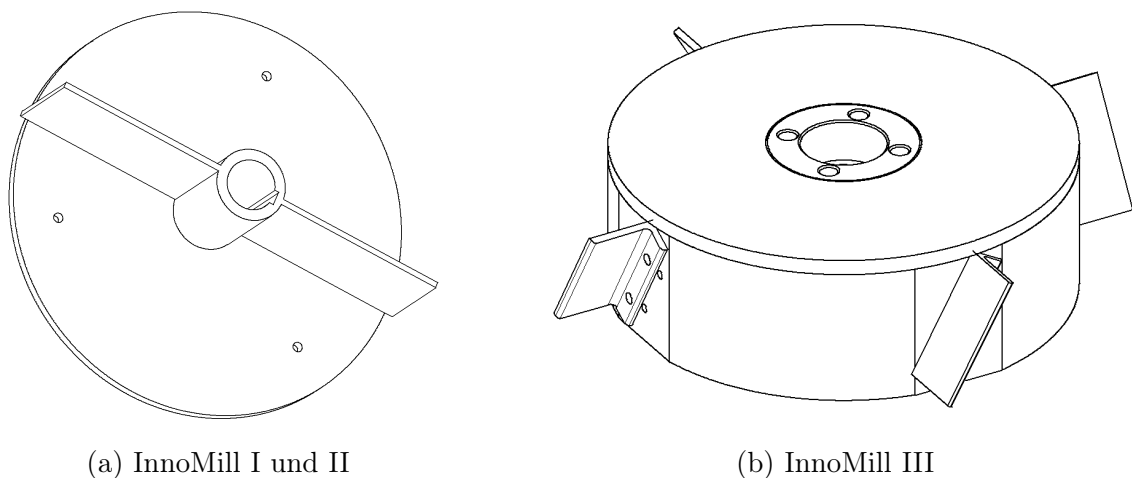


Abb. 4.9: Ausbringerscheiben der Prototypen

4.3.7 Gehäuse

Der Grundkörper des Gehäuses wird sehr massiv ausgeführt. Nach Beendigung der Versuchsreihe soll dieses Gehäuse für die Nullserie modifiziert werden.

4.3.8 Konus

Die Mahlspalte haben einen großen Einfluss auf die Qualität des Fertiggutes und die Leistungsaufnahme. Damit der Einfluss dieses Parameters versuchstechnisch erfasst werden kann, sind variabel einstellbare Mahlspalte nötig.

Dies wird mit einem Konus gelöst und der Mahlspalt wird über die Dicke des Abstandhalters eingestellt (siehe Abbildung 4.10). Durch die Schräge des Konus ist der Mahlspalt über die Höhe des Sägeblattes nicht konstant, deshalb wird der über die Höhe gemittelte Abstand angegeben.

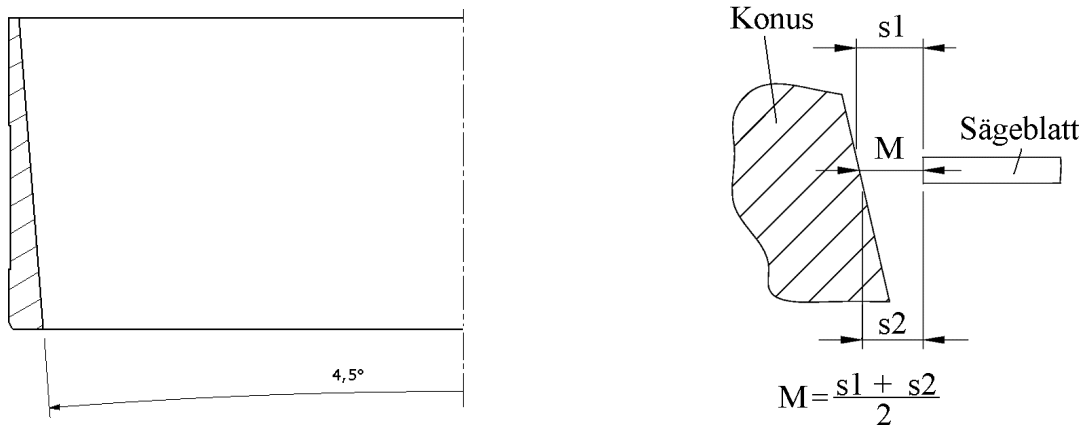


Abb. 4.10: Konischer Einsatz und Kennzeichnung des Mahlspaltes

4.4 Analytische Festlegung der Prozessparameter

Mit Hilfe eines fraktionellen, faktoriellen Versuchsplans soll der Versuchsaufwand durch die gezielte Veränderung mehrerer Parameter minimiert werden.

Die Faktoren/Effekte und deren Wechselwirkungen wurden durch empirische Versuche und Beobachtungen an den Prototypen InnoMill I und InnoMill II ermittelt. Diese Abhängigkeiten sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Parameter							
	A	B	C	D	E	F	G
Abhängig von:	ua	ua	B und G	A, C und E	A, C und D	C	C

Tab. 4.2: Beobachtete und empirisch ermittelte Effekte und deren Abhängigkeiten

A ... Massendurchsatz, Dosierung	E ... Zähnezahlen
B ... Schlagkreuz	F ... Abstandhalter
C ... Luftströmung	G ... Mühlengeometrie
D ... Mahlspalt	ua ... Unabhängig

4.4.1 Dosiereinrichtung

In den Diplomarbeitszielen ist ein Massendurchsatz von 120 bis 160 kg/h angegeben worden.

Der geforderte Massendurchsatz wurde aufgrund der erzielten Resultate mit den Prototypen InnoMill I und II, von den Projektpartnern zu Beginn der Versuchsreihe von 160 auf 200 kg/h erhöht.

Massendurchsatz 200 kg/h

Durch Vergrößerung der Trichterauslassöffnung soll diese Massendurchsatzsteigerung erreicht werden. Abbildung 4.11 zeigt die Möglichkeiten mit welcher der Massendurchsatz beeinflusst wird.

Die Brückenbildung der Körner soll über den Rüttelfinger, welcher in das Mahlgut eintaucht, gelöst werden. Der Massendurchsatz soll über die Eintauchtiefe h gesteuert werden. Je weiter der Rüttelfinger in das Mahlgut eintaucht, desto geringer sollte der Massendurchsatz ausfallen, da die Trichterauslassöffnung verkleinert wird.

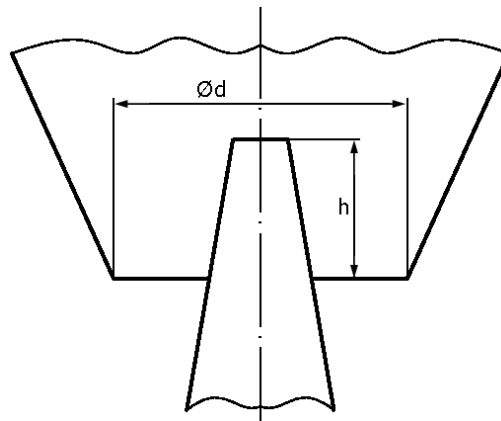


Abb. 4.11: Einstellmöglichkeiten

Hinweis:

Die Dosiereinrichtung „Trichter-Rüttler“ liefert für einen Massendurchsatz von 200 kg/h sehr gute Resultate. Eine Anpassung dieses Systems auf 300 kg/h war im Rahmen der Diplomarbeit nicht zu realisieren. Deshalb wurde die Dosiereinrichtung im Projekt Konstruktiv von Markus Steiner und Carol Hanisch mit dem Titel: „Innomill Dosiervorrichtung für eine Kürbiskernmühle“ auf diesen Massendurchsatz angepasst.

Massendurchsatz 300 kg/h

Für die Zerkleinerungsversuche wurde eine Handdosiereinrichtung gebaut. Diese besteht aus einem Plastiktrichter, welcher unter einer quaderförmigen Schachtel aus Karton angebracht wird. Weiters soll der Karton als Mahlgutpuffer dienen. Der Massendurchsatz wird über die Größe des Auslassdurchmessers festgelegt.



Abb. 4.12: Alternatives Dosiersystem für einen Massendurchsatz von 300 kg/h

4.4.2 Umfangsgeschwindigkeit

Bei den Prototypen InnoMill I und II hatte die Umfangsgeschwindigkeit große Auswirkung auf die Fertigtgutqualität. Mittels Stichprobenversuche mit dem Prototypen InnoMill III soll überprüft werden, ob die Fertigtgutqualität durch diesen Parameter noch weiter gesteigert werden kann.

4.4.3 Luftströmung

Aufgrund der Variabilität des Prototyps entsteht zwischen Schlagkreuz, Lagerhalterung und dem Deckel mit Trichter ein sehr großer Totraum. Dieser Bereich ist in Abbildung 4.13 mittels strichpunktierter Linie und blauer Schattierung gekennzeichnet.

Es wurde beobachtet, dass die Luftströmung bei den verschiedenen Zerkleinerungsversuchen mit den Prototypen InnoMill I und InnoMill II relativ konstant ist. Deshalb soll durch Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Einfluss durch die Veränderungen an der Mühlengeometrie, auf die Luftströmung bestimmt werden. Das verfolgte Ziel ist, dass durch diese Kenntnis die reinen Zerkleinerungsvorgänge besser evaluiert werden können. Ebenso soll die Leistungsaufnahme bedingt durch die Strömungsverluste bestimmt werden.

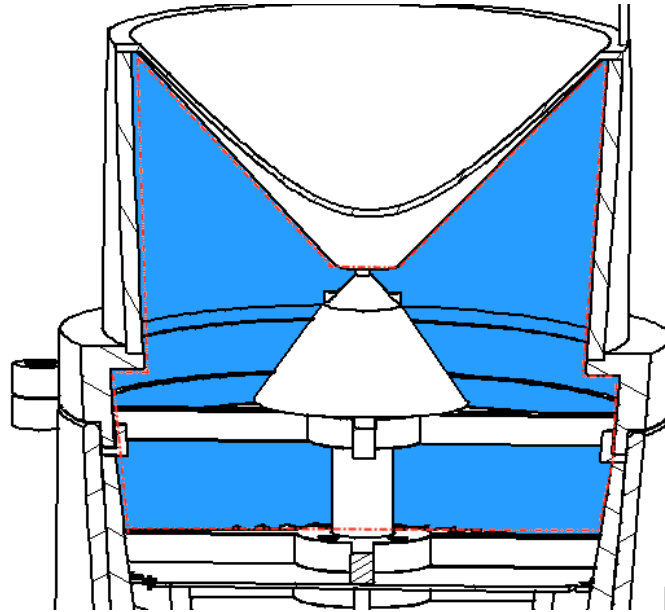


Abb. 4.13: Kennzeichnung des Totraumes in der Mühle

Für die Luftströmung und somit für die Strömungsgeschwindigkeit relevante Parameter sind:

- Größe des Totraumvolumens (Mühlengeometrie)
- Schlagkreuzgeometrie
- Flügelstellung an der Ausbringerscheibe
- Drehzahl / Umfangsgeschwindigkeit

4.4.4 Mahlspalte und Zähnezahlen für einen Massendurchsatz von 300 kg/h

Die Parameter Mahlspalte und Zähnezahlen werden für den Prototypen InnoMill III gemeinsam behandelt. Aus den Versuchen mit den Prototypen InnoMill I und InnoMill II geht hervor, dass die Mahlspalte immer an die Zähnezahl angepasst werden müssen.

Das Ziel dieser Parameteravariationen ist, für jede Schnittstufe jenen Mahlspaltbereich festzulegen mit dem eine hohe Fertiggutqualität und eine geringe Leistungsaufnahme erzielt werden kann.

Als unterer Grenzbereich wird jener Bereich definiert, in dem der Mahlspalt zu klein wird und dadurch die Schnittstufe „überlastet“ ist. Die Anzeichen dafür sind hohe Leistungsaufnahme (Knetvorgänge) und eine schlechte Fertiggutqualität (öliges Fertiggut).

Der obere Grenzbereich ist definiert durch einen zu großen Mahlspalt. Dadurch geht die Zerkleinerungswirkung der Stufe verloren. Ein Anzeichen dafür sind grobe Körner im Fertiggut.

Zähnezahl der Sägeblätter

Die Auswahl der Zähnezahl wird in Punkt 4.1.2 genauer beschrieben. Diese sind mit 60, 84 und 108 Zähnen erhältlich. Die Sägeblätter mit diesen Zähnezahlen können beliebig miteinander kombiniert werden.

Tabelle 4.3 zeigt die Kombinationsmöglichkeiten, welche aufbauend auf den Ergebnissen mit den Prototypen InnoMill I und II (siehe Pkt. 3.5.4) vorteilhaft erscheinen.

Schnittstufe	Zähnezahlkombinationen			
	Variante A	Variante B	Variante C	Variante D
1	60	60	60	60
2	84	84	60	60
3	108	84	84	108

Tab. 4.3: Mögliche Zähnezahlkombinationen

Die Varianten eins und zwei sind zu favorisieren, da die Zahnteilung jener dem Prototypen InnoMill II ähnelt (siehe 4.1.2).

Den Varianten drei und vier wird nur in einem gewissen Rahmen Potential zugeschrieben. Bei der Variante drei sind wahrscheinlich die Zähnezahlen in der zweiten und dritten Schnittstufe zu klein.

Es wird vermutet, dass beim Mahlvorgang mit der Variante drei, durch die niedrigen Zähnezahlen, ein sehr grobkörniges Fertiggut entsteht. Bei Variante vier dürfte mit hoher Wahrscheinlichkeit das Mahlgut durch die hohe Zähnezahl in der dritten Stufe geknetet werden. Dieses Kneten ruft in weiterer Folge Mahlgutablagerungen in der Maschine hervor.

Mahlspalte

Durch die Ergebnisse mit den alten Prototypen liegen Mahlspalte vor, mit denen der Zerkleinerungsprozess „gut“ funktioniert.

Diese Daten werden zur Abschätzung der Mahlspalte für den Prototyp InnoMill III herangezogen. Die Bereiche und die möglichen Zähnezahlen sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Schnittstufe	Mahlspalt / mm	Zähnezahl
1	4 - 8	60
2	2 - 5	60, 84
3	0,5 - 2	84, 108

Tab. 4.4: Erwartete Mahlspaltbereiche der unterschiedlichen Schnittstufen

Um die Anzahl der Einzelversuche niedrig zu halten wurde folgendes Ablaufschema zur Ermittlung der Mahlspalte festgelegt.

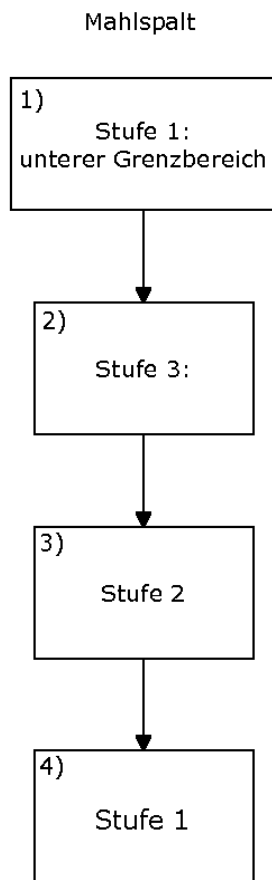


Abb. 4.14: Versuchsablauf zur Bestimmung der Mahlspalte

1) Erste Stufe

Bevor das Mahlgut die erste Schnittstufe erreicht, wird es immer durch das Schlagkreuz beansprucht. Damit die Anzahl der Parameter sinkt, empfiehlt es sich den unteren Grenzbereich ohne zweite und dritte Stufe zu ermitteln.

2) Dritte Stufe

Aus den Versuchen mit den alten Prototypen ist bekannt (siehe Kapitel 3.5.4, Sägeblätter), dass die dritte Stufe auf Veränderungen am sensibelsten reagiert.

Der Mahlspalt für die Stufe zwei ist vorerst unbekannt. Dieser orientiert sich am vorhandenen Mahlspalt des Prototyps InnoMill II.

3) Zweite Stufe

Diese Stufe kann mit den bereits „funktionierenden“ Mahlspaltbereichen der Stufen eins und drei untersucht werden.

4) Erste Stufe

Durch neuerliche Überprüfung des Mahlspaltes der ersten Stufe soll der obere Grenzbereich festgelegt werden. Des Weiteren soll der Einfluss der ersten Stufe auf die Fertigtgutqualität ermittelt werden.

4.5 Empirische Verifizierung der Prozessparameter

Die Versuchsdurchführung hat dieselbe Ablauffolge wie bei den Prototypen InnoMill I und InnoMill II. Der neue Prototyp hat ein größeres Mahlraumvolumen, wodurch die Versuchsmasse von 300 auf 1000 Gramm erhöht werden muss, damit kurzzeitig ein stationärer Betriebszustand erreicht wird. Das Verhalten der Handdosiereinrichtung wird in Punkt 4.5.3 beschrieben.

4.5.1 Versuchsdurchführung

Den prinzipiellen Aufbau der Versuchsanordnung, bestehend aus Prototyp InnoMill III, Leistungsmessgerät, Frequenzumrichter, Messverstärker und PC, zeigt Abbildung 4.15.

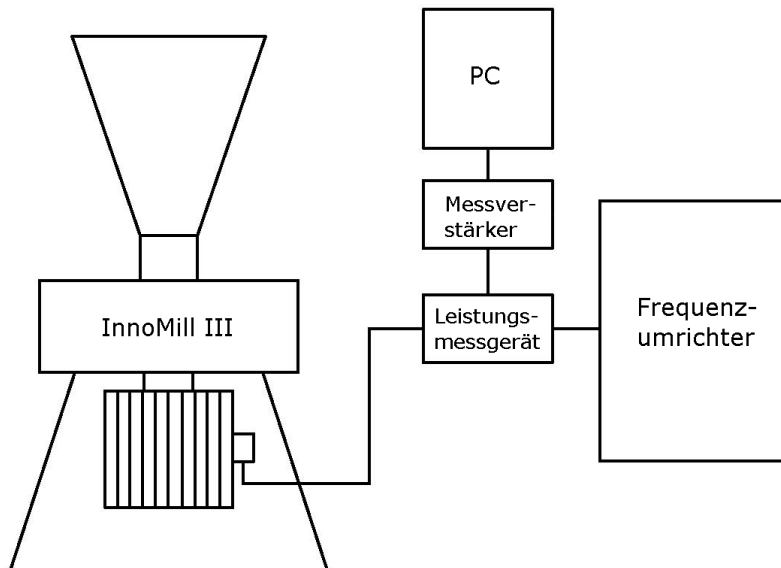


Abb. 4.15: Schematischer Versuchsaufbau InnoMill III

Die Versuchsabwicklung erfolgt folgendermaßen:

- Abwiegen der Versuchsmasse (1000 g)
- Einstellen der Umfangsgeschwindigkeit
- Starten der Leistungsmessung
- Durchführung des Zerkleinerungsversuchs
- Optische Bewertung der Qualität des Fertiggutes
- Auswertung der Leistungsmessung

4.5.2 Luftströmung

Durch den variablen Aufbau des Prototyps ändert sich bei jeder Versuchskonfiguration die Mühlengeometrie. Geschwindigkeitsmessungen der Luftströmung sollen Aufschluss, über die Auswirkung bei Veränderung der Mühlengeometrie, bringen.

Versuchsablauf

Die Strömungsgeschwindigkeit wird an den drei vorher genannten Positionen unter verschiedenen Bedingungen gemessen.

Es werden folgende Parameter variiert:

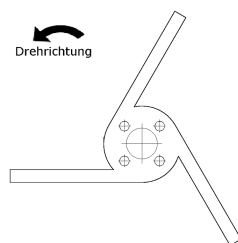
- Drehzahl des Elektromotors
- Schlagkreuz (siehe Abbildung 4.16)

Ohne Schlagkreuz, Veränderung der Anzahl der Schlagkreuzarme, Form der Schlagkreuzarme, Flügel an den Schlagkreuzarmen

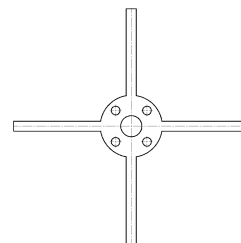
- Ausbringerscheibe

Veränderung der Flügelstellung an der Ausbringerscheibe

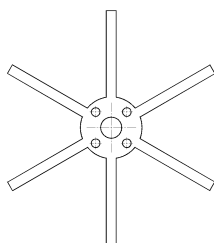
- Größe des Totraumvolumens



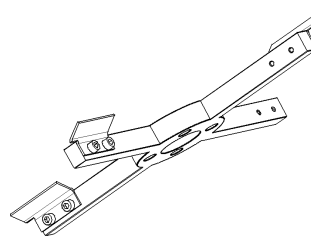
(a) 3 Arme



(b) 4 Arme

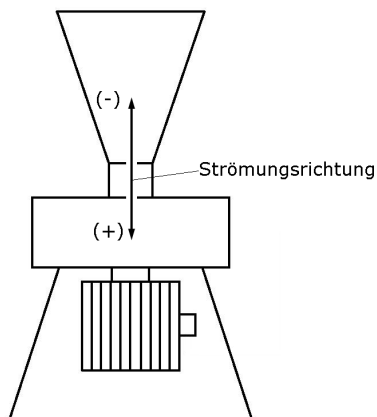


(c) 6 Arme



(d) 4 Arme mit Flügel

Abb. 4.16: Schlagkreuzgeometrien für die Strömungsmessung



Die Luftströmung, welche in die selbe Richtung wie der Mahlgutstrom wirkt ist mit (+) und die entgegen wirkende mit (-) festgelegt.

Abb. 4.17: Definition der Strömungsrichtung

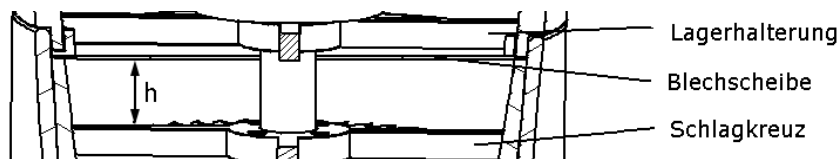


Abb. 4.18: Kennzeichnung der Totraumhöhe

Messgerät und Messpositionen

Messgerät

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit wurde ein Flügelrad-Anemometer (siehe Abbildung 4.19) verwendet.

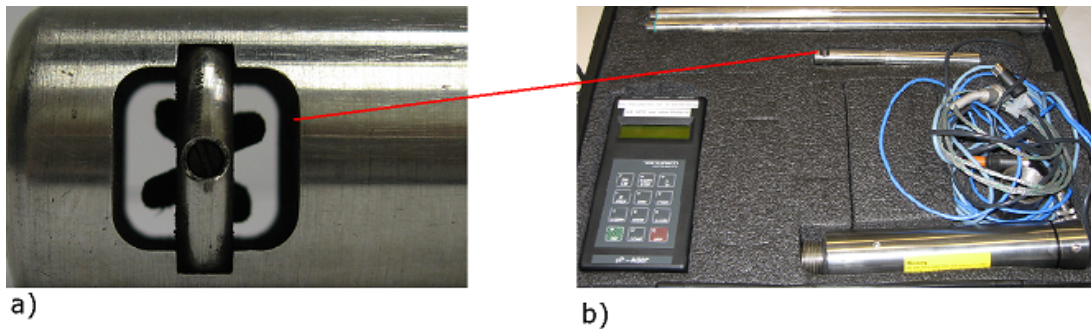


Abb. 4.19: Flügelrad Anemometer zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit

Für die Messung wird das Flügelrad an einer Lanze befestigt. Die Lanze wird mit der Hand an die jeweiligen Messpositionen gehalten. Dadurch treten folgende Fehler auf:

- Messposition variiert
- Das Flügelrad wird nie exakt senkrecht zur Achse angeströmt

Diese Ungenauigkeiten können jedoch vernachlässigt werden, da es nicht um die Strömungsgeschwindigkeiten, sondern vielmehr um die Tendenz geht.

Messpositionen

Die Festlegung der Messpositionen erfolgt nach Versuchen mit dem Prototypen. Diese Positionen sind in der Abbildung 4.20 (a) bis (c) markiert.

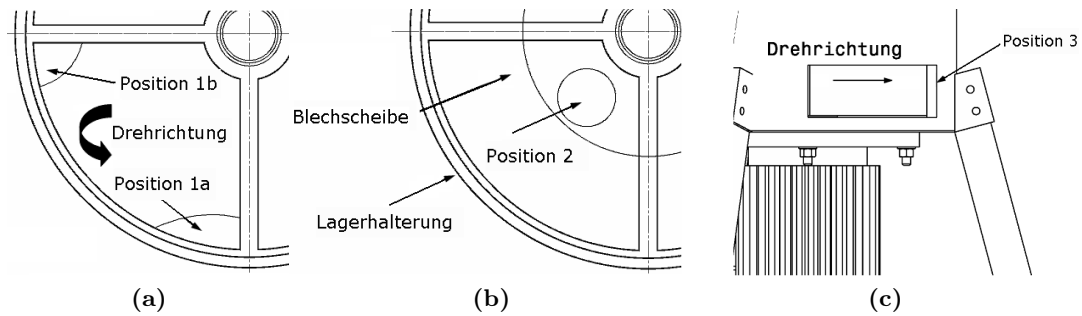


Abb. 4.20: Positionen für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung

Messposition eins:

Die Lagerhalterung beeinflusst das Profil der Strömung sehr stark. Position 1a) liegt im Stau-punkt vor dem Lagerkreuz, während die Position 1b) direkt hinter dem Lagerkreuz im „Wind-schatten“ liegt.

Dadurch soll der Einfluss der Lagerhaltergeometrie auf die Luftströmung ersichtlich werden.

Messposition zwei:

Zwischen Konus und Lagerhalterung wird eine Blechscheibe eingebaut. Damit wird die Strömung nicht mehr durch den Lagerhalter beeinflusst und es lässt sich das Totraumvolumen der Mühle verkleinern.

Messposition drei:

Diese Messposition befindet sich an der Auslassöffnung. Die Austrittsgeschwindigkeit hängt sehr stark vom Aufbau am Mühleneintritt ab.

Messergebnisse

Messpositionen 1a, 1b und 2:

Die Strömungsgeschwindigkeiten werden mit verschiedenen Umrichterfrequenzen an den Positionen 1a), 1b) und 2) gemessen. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 4.21. Tabelle 4.5 zeigt die eingestellte Frequenz sowie die berechnete Motordrehzahl und Umfangsgeschwindigkeit des Rotors.

Umrichterfrequenz / Hz	Drehzahl Elektromotor / min^{-1}	Umfangsgeschwindigkeit / m/s
30	1716	31
40	2288	42
50	2860	52

Tab. 4.5: InnoMill III: Eingestellte Umrichterfrequenz, berechnete Drehzahl (Elektromotor) und Umfangsgeschwindigkeit

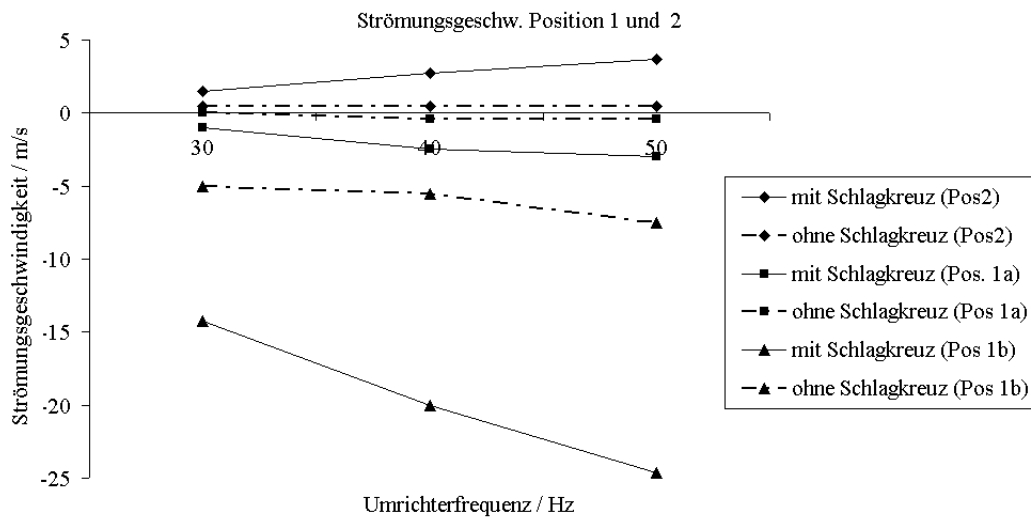


Abb. 4.21: Strömungsgeschwindigkeiten an den Messpositionen 1a, 1b und 2

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Änderung am Mühlenaufbau (Einbau der Blechscheibe zwischen Konus und Lagerhalterung) sehr große Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung hat.

Wie bereits erwartet, ist die Geschwindigkeitsverteilung an den Positionen 1a) und 1b) sehr unterschiedlich. Die Position 1b) weist für unterschiedliche Drehzahlen annähernd die selbe Strömungsgeschwindigkeit auf.

Durch die Verkleinerung des Totraums mittels Blechscheibe, zeigt die Luftströmung in die selbe Richtung wie der Mahlstrom.

Die Form der Schlagkreuze und die Anzahl der Schlagarme haben im Vergleich zur Änderung der Mühlengeometrie nur geringe Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeit. Sie weichen vom eingetragenen Mittelwert im Bereich von maximal $\pm 5\%$ ab.

Ohne Schlagkreuz ist die erzeugte Strömung kaum spürbar, was auch die Messergebnisse widerspiegeln. Jedoch sind diese Ergebnisse sehr wichtig, da somit der Anteil der Strömungsverluste, bedingt durch die Sägeblätter und die Ausbringerscheibe, bestimmt werden kann.

Messposition 3:

Die Veränderung des Aufbaus am Mühleneintritt hat sehr große Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeit am Austritt.

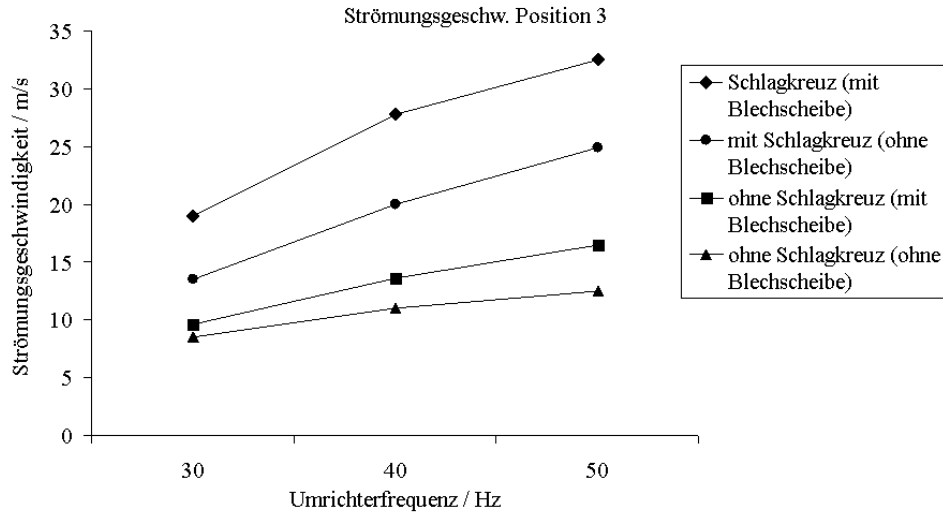


Abb. 4.22: Strömungsgeschwindigkeit an der Messposition 3

Wie bereits an den Positionen eins und zwei ist die Strömungsgeschwindigkeit ohne Schlagkreuz am geringsten. Durch die Verkleinerung des Totraumvolumens mittels Blechscheibe ist die Strömungsgeschwindigkeit am Austritt um 25 % höher. Die Auswirkung einer weiteren Verkleinerung des Totraumvolumens zeigt die Abbildung 4.23.

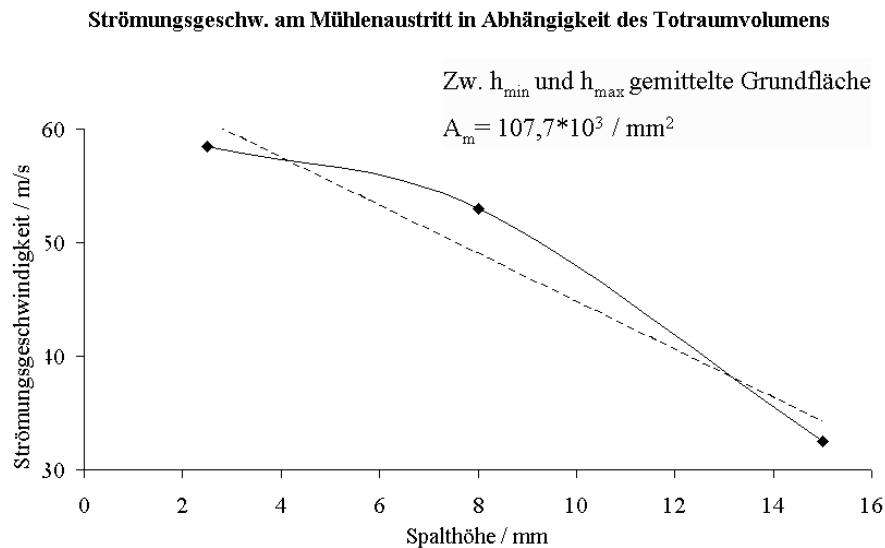


Abb. 4.23: Auswirkung der Größe des Totraumvolumens auf die Strömungsgeschwindigkeit an der Messposition 3

Durch die Verkleinerung des Totraumvolumens wird eine um bis zu 60 % höhere Austrittsgeschwindigkeit erreicht. Der Luftdurchsatz [m^3/s] erhöht sich dadurch sehr stark und die direkte Folge davon ist, dass die Verweilzeit des Mahlgutes verkürzt wird.

Die Veränderung der Flügelstellung an der Ausbringerscheibe bringt im Vergleich zur Veränderung des Totraumvolumens vernachlässigbare Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeit mit sich, weshalb nicht weiter darauf eingegangen wird.

Leerlaufleistung:

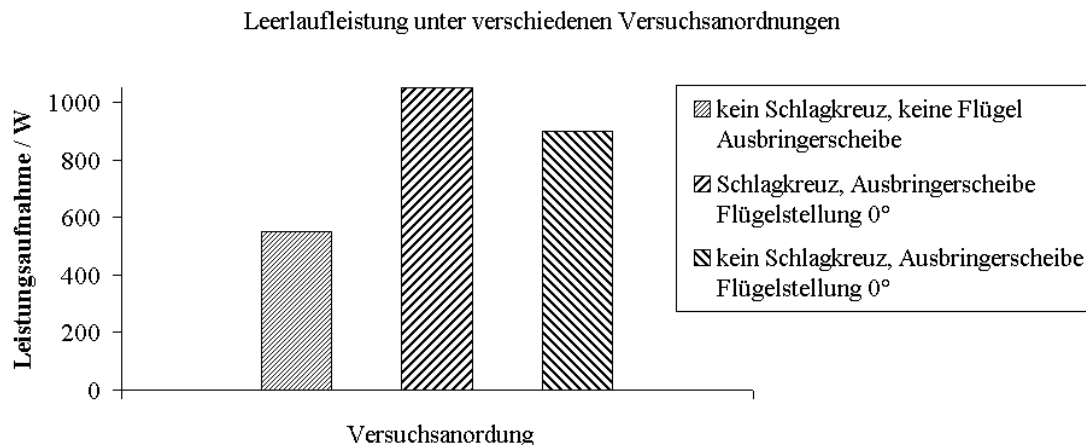


Abb. 4.24: Gemessene Leistungsaufnahme beim Leerlauf des Prototypen

Die geringste Leistungsaufnahme wird mit der Versuchsanordnung ohne Schlagkreuz und ohne Flügel an der Ausbringerscheibe erreicht. Montiert man Flügel an der Ausbringerscheibe, so wird die Leistungsaufnahme beinahe verdoppelt. Die erzeugte Strömung ist auch in diesem Fall noch nicht zufriedenstellend. Hingegen erhöht sich die Leistungsaufnahme mit montiertem Schlagkreuz nicht mehr wesentlich, jedoch wird der Luftdurchsatz deutlich erhöht.

Die günstigste Variante ist jene mit einem Schlagkreuz und Flügel an der Ausbringerscheibe, sie weist das beste Verhältnis *erzeugte Luftströmung / aufgenommene Leistung* auf.

4.5.3 Dosiereinrichtung

Versuche für die Dosiereinrichtung „Trichter-Rüttler“ ergeben, dass sich eine Massendurchsatzsteigerung von 160 auf 200 kg/h durch Vergrößerung der Trichter-Auslassöffnung erreicht werden kann. Wie bereits erwartet wurde, sind für 300 kg/h eine Überarbeitung und tiefgreifendere Modifikationen nötig.

Die alternative Dosiereinrichtung (per Hand) hat den Vorteil, dass sie aufgrund der verwendeten Materialien (Kunststoff und Karton) schneller auf einen Massendurchsatz von 300 kg/h modifiziert werden kann.

Der Versuch mit der alternativen Dosiereinrichtung läuft folgendermaßen ab:

- Verschließen des Trichterauslaufs
- Einfüllen der Versuchsmasse
- Öffnen des Trichterauslaufs
- Lösen der Brückenbildung der Körner mittels Rüttelbewegungen

Der lineare Mittelwert der Versuchsreihen ergibt einen Massendurchsatz von etwas mehr als 300 kg/h .

Bis zur Versuchsmasse von 400 g liegt der Massendurchsatz der Versuche etwas unter dem linearen Mittelwert, der Grund dafür ist, dass sich erst durch die Rüttelbewegungen ein konstanter Massenstrom ausbildet.

4.5.4 Mahlspalte für die Zähnezahlkombination „Variante A“

Die Zähnezahlen für die „Variante A“ sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Schnittstufe	Zähnezahlkombination
	Variante A
1	60
2	84
3	108

Tab. 4.6: Zähnezahlkombination der „Variante A“

Erste Schnittstufe, Zähnezahl 60

Für die erste Schnittstufe kommt nur das Sägeblatt mit 60 Zähnen in Frage. Aufgrund der Erfahrungen mit den Prototypen InnoMill I und II werden keine Versuche mit höheren Zähnezahlen durchgeführt.

Die untere Grenze dieses Mahlspaltes kann unabhängig von der zweiten und dritten Schnittstufe ermittelt werden.

Aufgrund des höheren Massendurchsatzes wird der Mahlspalt zu Beginn bei 6,5 mm festgelegt und in 0,4 mm -Schritten verkleinert. Die 0,4 mm ergeben sich durch den Konuswinkel und den zur Verfügung stehenden Abstandhalter.

Über die Fertiggutqualität kann keine Aussage getroffen werden, da die Versuche ohne zweite und dritte Schnittstufe durchgeführt werden. Zur Bestimmung des unteren Grenzbereichs können die Leistungsaufnahme, die Mahlgutbeschaffenheit (z.B. Ölaustritt) und Ablagerungen vor der Schnittstufe herangezogen werden.

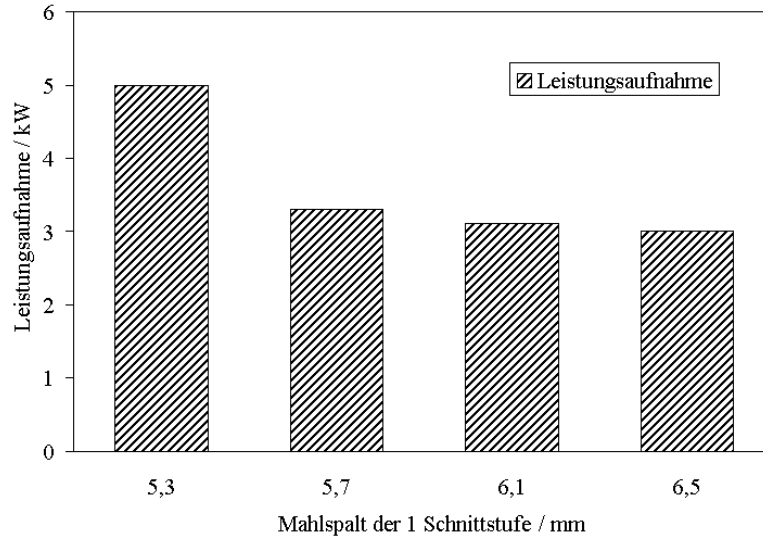


Abb. 4.25: Untere Grenze für den Mahlpalt der ersten Schnittstufe

Die Veränderungen des Mahlpaltes von 6,5 auf 5,7 mm hat kaum Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme. Beim Versuch mit einem Mahlpalt von 5,3 mm tritt eine drastisch erhöhte Leistungsaufnahme auf. Nach dem Versuch werden Kornstauungen vor der ersten Schnittstufe festgestellt. Diese sind die Ursache für die erhöhte Leistungsaufnahme.

Daraus wird abgeleitet, dass der untere Grenzbereich des Mahlpaltes zwischen 5,7 und 5,3 mm liegt. Aus diesem Versuch wird der Mahlpalt der ersten Stufe für die weiteren Mahlpalt Parameterstudien mit 6,5 mm festgelegt.

Mahlpalt der dritten Schnittstufe, Zähnezahl 108

Für die dritte Stufe kommt in der ersten Variante das Sägeblatt mit 108 Zähnen zum Einsatz. Dieses weist durch die hohe Anzahl an Zähnen eine kleine Zahnlücke auf.

Der Mahlpalt der ersten Stufe wurde um 1,5 mm größer als bei den Prototypen InnoMill I und II gewählt. Bezieht man sich auf den Mahlpalt für die zweite Stufe bei den alten Prototypen (2,5 mm) so dürfte der neue Mahlpalt bei ≥ 4 mm günstig sein. Deshalb wird der Mahlpalt für die zweite Stufe mit 4,3 mm festgelegt.

Schnittstufe	Zähnezahl	Mahlspalt / mm
1	60	6,5
2	84	4,3
3	108	0,5 - 2,1

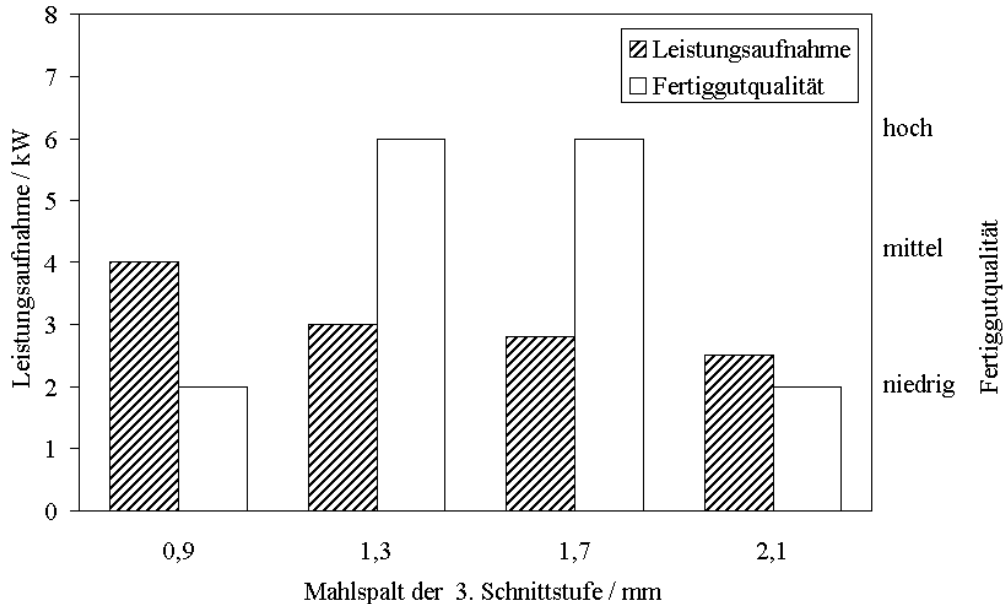


Abb. 4.26: Mahlspalt(M) Stufe 3, Zähnezahl 108; $M_1 = 6,5 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_2 = 4,3 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$

Fertiggutqualität

Ausgehend vom größten Mahlspalt mit $2,1 \text{ mm}$ wird der Mahlspalt verändert. Beim größten Mahlspalt befinden sich viele große Körner im Fertiggut, weshalb die Fertiggutqualität niedrig ist. Die Veränderung des Mahlsपालtes auf $1,7$ und $1,3 \text{ mm}$ bringt eine große Qualitätssteigerung des Fertiggutes mit sich. Beim Versuch mit $0,9 \text{ mm}$ ist die Fertiggutqualität aufgrund der sehr starken Erwärmung und des Ölaustrittes sehr niedrig. Des Weiteren waren sehr starke Ablagerungen vor der dritten Schnittstufe zu beobachten.

Leistungsaufnahme

Die Leistungsaufnahme steigt stetig mit Verringerung des Mahlsपालtes an. Beim geringsten Mahlspalt werden maximal 4 kW gemessen. Diese 4 kW werden aber nur als untere Grenze angesehen, da durch die starken Ablagerungen und damit einhergehenden Mahlspaltverkleinerung die Leistungsaufnahme sehr stark steigen dürfte.

Für die dritte Schnittstufe wird, aufgrund dieser Versuchsreihe, ein Mahlspalt von $1,3 \text{ mm}$ als optimal angesehen.

Mahlspalt der zweiten Schnittstufe, Zähnezahl 84

In der zweiten Stufe wird das Sägeblatt mit 84 Zähnen verwendet. Die für die Parametrisierung der zweiten Stufe eingestellten Mahlpalte zeigt die nachfolgende Tabelle.

Schnittstufe	Zähnezahl	Mahlspalt / mm
1	60	6,5
2	84	2,5 - 4,9
3	108	1,3

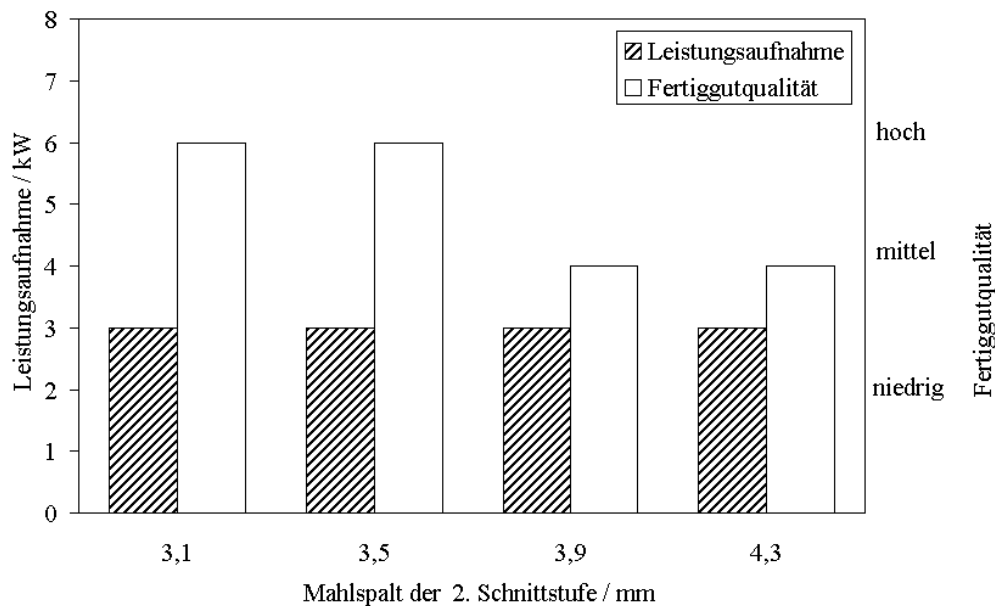


Abb. 4.27: Mahlspalt Stufe 2, Zähnezahl 84; $M_1 = 6,5 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_3 = 1,3 \text{ mm}$ $Z_3 = 108$

Fertigutqualität

Eine Veränderung des Mahlpaltes von 4,3 mm auf 3,5 mm bringt eine deutliche Qualitätssteigerung des Fertiggutes mit sich. Die Veränderung auf 3,1 mm bringt keine merkliche Verbesserung. Aufgrund der leichten Fertigguterwärmung wird der Mahlspalt nicht mehr weiter verkleinert, da es ein Zeichen für die Erreichung des unteren Grenzbereichs ist.

Leistungsaufnahme

Die aufgenommene Leistung bleibt konstant bei 3 kW.

Der Mahlspalt der zweiten Stufe wird für die Parametrisierung der ersten Stufe mit 3,9 mm festgelegt. Durch diese Maßnahme soll der Zerkleinerungsanteil der ersten Schnittstufe ermittelt werden. Sollten Verbesserungen der Fertigutqualität auftreten, so können diese der ersten Schnittstufe zugerechnet werden.

Mahlpalt der ersten Schnittstufe, Zähnezahl 60

Der untere Grenzbereich des Mahlpaltes der ersten Stufe wurde bereits bestimmt (siehe Abbildung 4.25). Aus diesem geht hervor, dass der untere Mahlpalt $\geq 5,7 \text{ mm}$ sein muss. Mit dieser Bestätigungsmessung soll der obere Grenzbereich der ersten Schnittstufe ermittelt werden.

Schnittstufe	Zähnezahl	Mahlpalt / mm
1	60	$\geq 5,7$
2	84	3,9
3	108	1,3

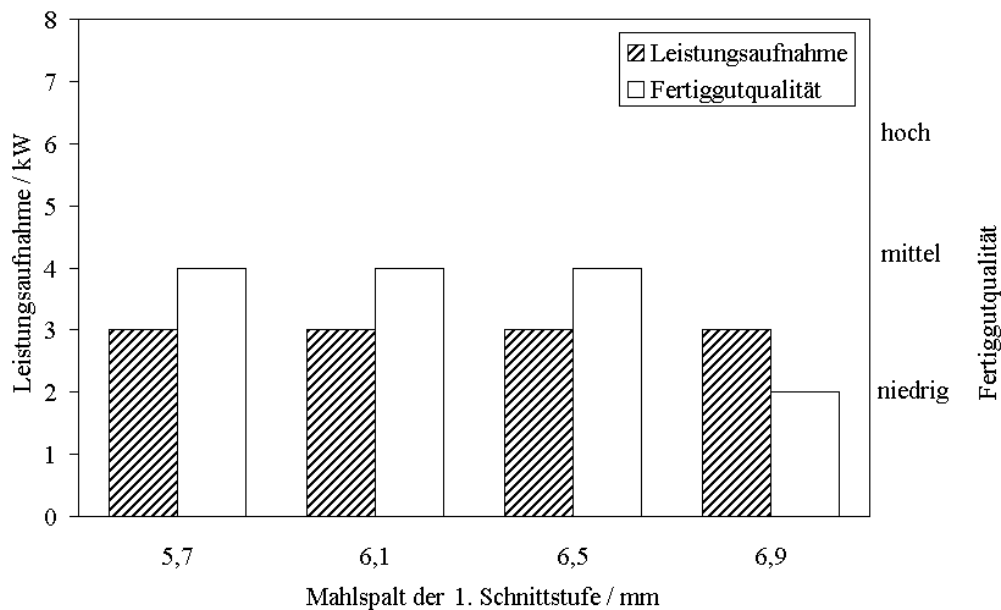


Abb. 4.28: Mahlpalt Stufe 1, Zähnezahl 60; $M_2 = 3,9 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$; $M_3 = 1,3 \text{ mm}$ $Z_3 = 108$

Fertigutqualität

Ausgehend vom unteren Grenzbereich wurde der Mahlpalt vergrößert. Das Fertigut weist bis Mahlpalt $6,5 \text{ mm}$ eine mittlere Qualität auf. Bei einem noch größeren Mahlpalt sinkt die Fertigutqualität, da die Kornstücke noch größer werden.

Leistungsaufnahme

Die Veränderung der Mahlpalte von $5,7$ auf $6,9 \text{ mm}$ hat keine Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme. Diese bleibt konstant bei 3 kW .

4.5.5 Erkenntnisse aus den Versuchen mit der Zähnezahlkombination „Variante A“

Für die erste Versuchsreihe sind die Resultate sehr aussagekräftig. Zur weiteren Steigerung der Fertiggutqualität sollten weitere Untersuchungen des unteren Grenzbereichs für die dritte Schnittstufe vorgenommen werden.

Eine wichtige Erkenntnis der Versuche ist, dass die Zähnezahlen der ersten und zweiten Stufe in Kombination mit den Mahlspalten gut funktionieren. Diese beiden Stufen haben große Auswirkungen auf die Fertiggutqualität. Die dritte Stufe hat bei richtiger Auslegung der ersten beiden Stufen eine noch höhere Fertiggutqualität zur Folge. Auffällig ist, dass die dritte Stufe nur in einem sehr engen Bereich sehr gut funktioniert ($Z_3=108$, $M_3 = 1,3-1,7 \text{ mm}$). Aufgrund dieses engen Bereichs ist es wahrscheinlich, dass es bei veränderten Mahlguteigenschaften Probleme auftreten werden.

Darum sollen Versuche mit der Zähnezahlkombination „Variante B“ zeigen, ob sich Mahlspaltbereich der Stufe drei, durch eine geringere Zähnezahl, vergrößern lässt .

4.5.6 Mahlspalte für die Zähnezahlkombination „Variante B“

Wie bereits beschrieben, werden Versuche für den Mahlspalt der dritten Schnittstufe mit niedriger Zähnezahl vorgenommen. Der Mahlspalt der ersten Stufe wird in der Bereichsmitte ($6,1 \text{ mm}$) gewählt.

Für die zweite Stufe wird vermutet, dass sie bereits den Großteil des Fertiggutes produziert. Die Überprüfung soll so funktionieren, dass der Mahlspalt der zweiten Stufe mit dem oberen und unteren Grenzbereich festgelegt wird. Der Mahlspalt der dritten Stufe wird ausgehend von $1,3 \text{ mm}$ beginnend verkleinert.

Schnittstufe	Zähnezahl	Mahlspalt / mm	
		V_1	V_2
1	60	6,1	6,1
2	84	3,9	3,1
3	84	0,5 - 1,3	0,5 - 1,3

Tab. 4.7: Mahlspalte für die Zähnezahlkombination „Variante B“

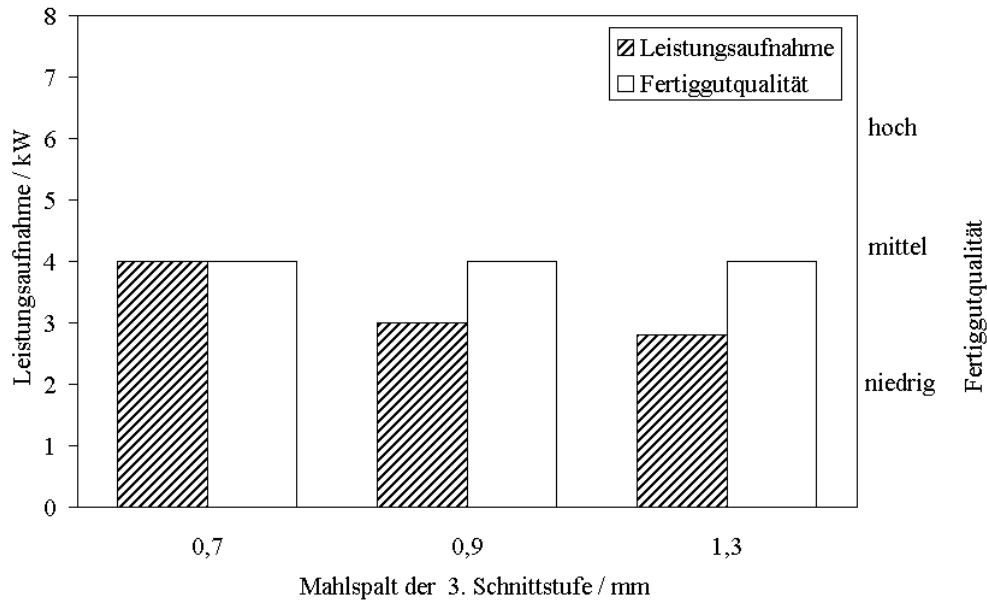


Abb. 4.29: Mahlpalt Stufe 3, Zähnezahl 84; $M_1 = 6,1 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_2 = 3,9 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$

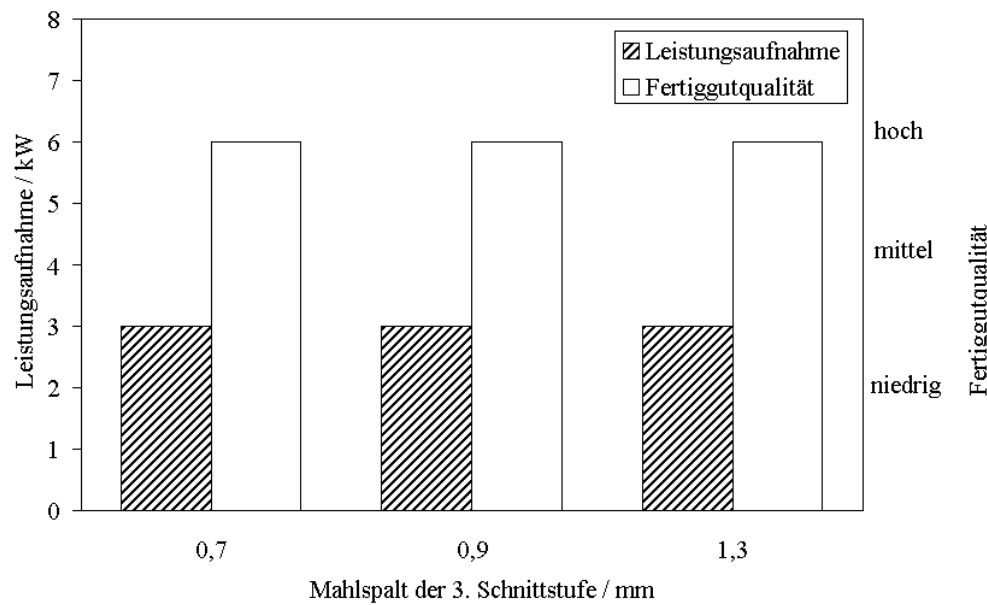


Abb. 4.30: Mahlpalt Stufe 3, Zähnezahl 84; $M_1 = 6,1 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_2 = 3,1 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$

Der Mahlpalt der dritten Stufe mit 84 Zähnen ist kleiner zu wählen als jener mit 108 Zähnen.

Beim Versuch mit der Anordnung V_1 erhöht sich die Leistungsaufnahme mit verkleinertem Spalt. Das Fertiggut ist teilweise inhomogen (Grobanteil 5 %, mittlere Qualität). Beim Mahlpalt von 0,7 mm waren starke Mahlgutablagerungen vor der dritten Stufe festzustellen. Als unterer Grenzbereich wird somit der Mahlpalt mit 0,9 mm angesehen.

Beim Versuch mit der Anordnung V_2 bleibt die Leistungsaufnahme konstant bei 3,5 kW. Das Fertiggut ist trocken, fein und weist eine homogene Korngrößenverteilung auf (hohe Qualität). Beim Mahlpalt von 0,7 mm traten wieder Mahlgutablagerungen vor der dritten Stufe auf.

Das Fertiggut mit der Versuchsanordnung V_1 weist ein teilweise inhomogenes Fertiggut auf (Grobanteil 5 %). Dieser Grobanteil kann jedoch nicht signifikant mit Verkleinerung des Mahlpaltes der dritten Stufe verringert werden. Deshalb wird die Annahme bestätigt, dass der Hauptteil des Fertiggutes bereits nach der zweiten Stufe vorliegt und die dritte Stufe für die Zerkleinerung von einzelnen großen Körnern wichtig ist.

4.5.7 Umfangsgeschwindigkeit

Die Überprüfung des Parameters Umfangsgeschwindigkeit ergibt, dass eine höhere Umfangsgeschwindigkeit keine signifikante Qualitätssteigerung mehr mit sich bringt.

4.6 Verifizierung der Parameter durch „Dauerversuche“

Nach Auswertung der Kurzzeitversuche wurden zwei Mahlpalt Zähnezahlkombinationen gefunden, welche für einen „Dauerversuch“ geeignet wären. Die Fertiggutqualität wird später in Bezug auf die Ölausbringung getestet.

Beide Kombinationen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Schnittstufe	Kombination D ₁		Kombination D ₂	
	Zähnezahl	Mahlpalt / mm	Zähnezahl	Mahlpalt / mm
1	60	6,1	60	6,1
2	84	3,1	84	3,1
3	108	1,3	84	0,9

Tab. 4.8: Kombinationen für die Dauerversuche

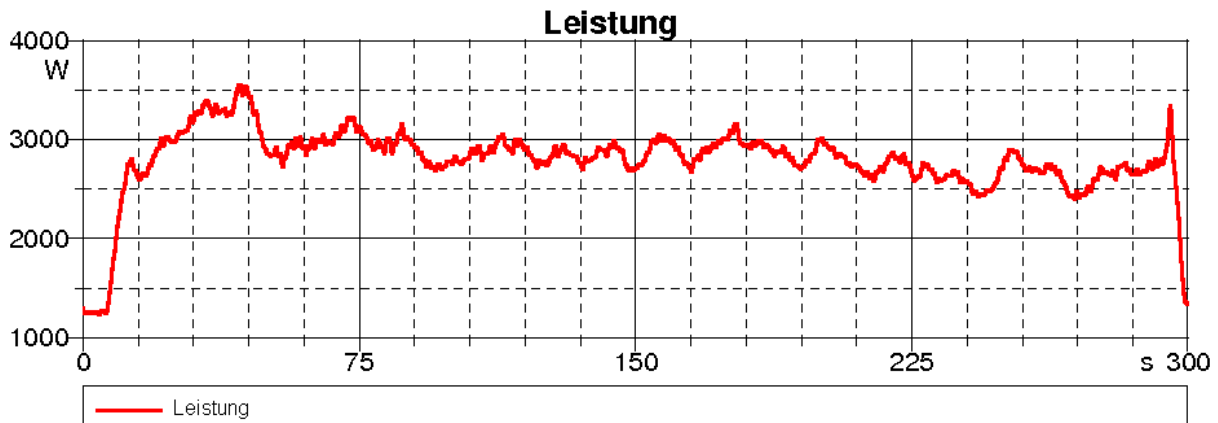


Abb. 4.31: Dauerversuch Kombination D₁, 25 kg

Der Versuch mit der Kombination D₁ brachte das gewünschte Ergebnis. Es waren keine Ablagerungen in der Mühle. Das Fertiggut war trocken und fein und hatte eine homogene Korngrößenverteilung.

Das Fertiggut wurde bei einer Ölmühle verarbeitet und gepresst. Durchschnittlich werden mit dieser Mühle 0,38 - 0,40 l Öl pro kg Fertiggut gewonnen. Aus dem, mit der Kombination D₁, erzeugten Fertiggut konnten 0,35 l Öl pro kg Fertiggut gewonnen werden.

In Bezug auf das Lastenheft (max. Leistungsaufnahme 7,5 kW) war die Leistungsaufnahme mit maximal 3,5 kW um mehr als 50 % niedriger. Jedoch ist zu bemerken, dass die Leistungsaufnahme relativ stark zwischen 2,7 und 3,1 kW schwankt. Im Betrieb fällt dies durch einen unrunder Lauf und leichte Drehzahlschwankungen. Durch das hohe Massenträgheitsmoment treten aber keine Lastspitzen auf.

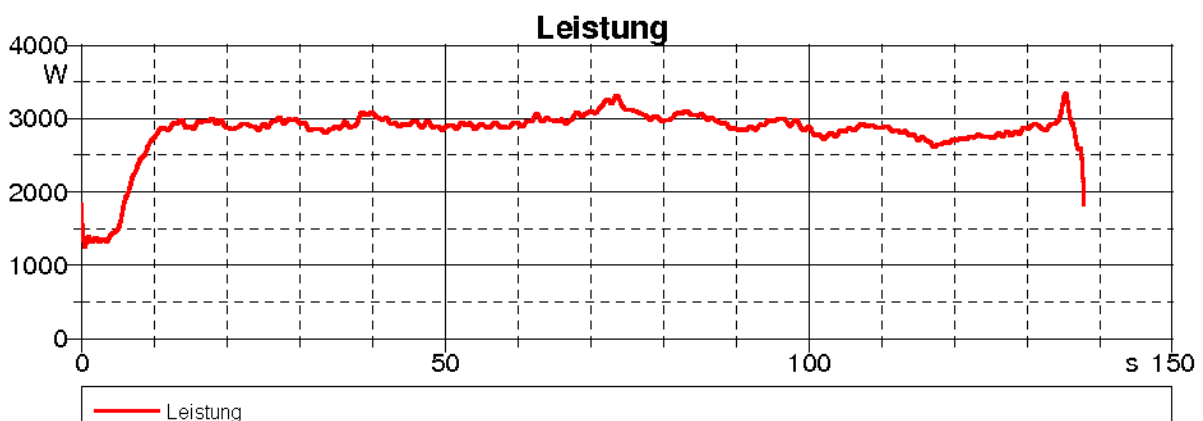


Abb. 4.32: Dauerversuch Kombination D₂, 10 kg

Der Versuch mit der Kombination D₂ brachte ebenso ein sehr gutes Ergebnis. Es waren wiederum keine Ablagerungen in der Mühle. Das Fertiggut war ebenfalls trocken und fein und hatte eine homogene Korngrößenverteilung.

Mit dieser Kombination konnte das Ergebnis auf 0,38 l Öl pro kg Fertiggut verbessert werden.

Die Leistungsaufnahme war mit 3 kW ebenfalls sehr niedrig. Positiv fällt auf, dass die Leistungsaufnahme kaum schwankt, d.h. es dürften auch ohne Schwungmasse der Ausbringerscheibe kaum Lastspitzen auftreten.

4.7 Energiebedarf des Prototypen InnoMill III und Wirkungsgradverbesserung

In Abbildung 4.33 ist der Energiebedarf aller Prototypen eingetragen.

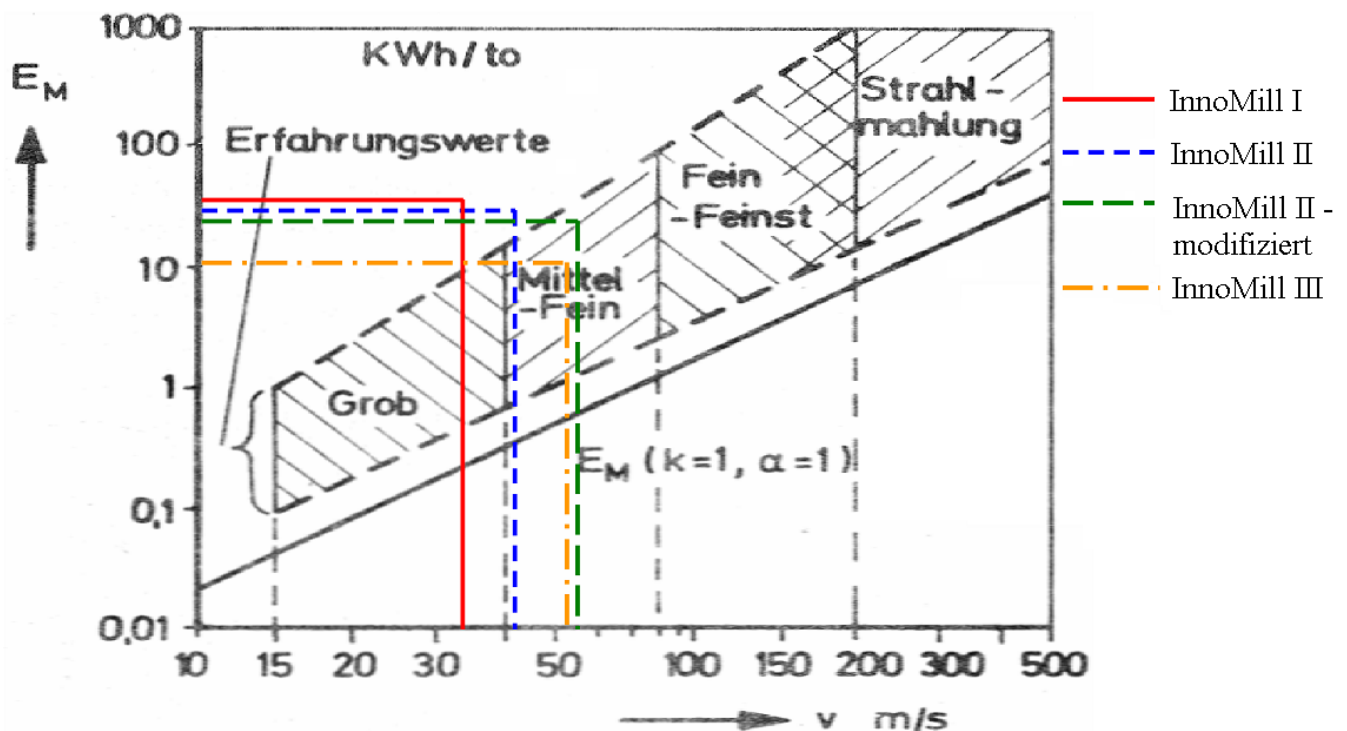


Abb. 4.33: Energiebedarf des modifizierten Prototyps InnoMill II und des Prototyps InnoMill III (original Abbildung siehe [11, V - 14])

Durch die Verbesserungen im Zerkleinerungsprozess kann der Energiebedarf des Prototyps InnoMill III um 65 % gegenüber dem Prototyp InnoMill I gesenkt werden, bei wesentlich höherer Fertiggutqualität.

5 Zusammenfassung und Konzepte für eine Nullserienmaschine

In diesem Kapitel werden die Versuche kurz zusammengefasst. Weiters gibt es einen Ausblick in der Form von zwei Konzepten für eine Nullserienmaschine

5.1 Zusammenfassung

Im Mahlprozess sind, wie bereits bekannt, viele Parameter von einander abhängig. Die Versuchsergebnisse bestätigen eine Vielzahl der getroffenen Annahmen. Jedoch werden bei den Versuchen Effekte beobachtet, die durch folgende Annahme erklärt werden sollen:

Die Mühle wird dafür in drei Bereiche aufgeteilt.

Schlagkreuz und erste Schnittstufe:

Ich gehe davon aus, dass das Mahlgut durch das Schlagkreuz und die erste Schnittstufe vorzerkleinert wird. Dieses vorzerkleinerte Mahlgut wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine sehr inhomogene Korngrößenverteilung (Mehrkornzerkleinerung) aufweisen. Die Körner werden möglicherweise durch eine Kombination aus Schwerkraft und Luftströmung zur zweiten Schnittstufe transportiert. Aus Versuchen geht hervor, dass dickere Abstandhalter von Vorteil waren. (Erhöhung der Verweildauer des Mahlgutes)

Zweite Schnittstufe:

Die Versuche mit den Prototypen (Variationen der Sägeblätter und Mahlspalte) haben ergeben, dass bereits ein Großteil des Mahlgutes die Endfeinheit des Fertiggutes besitzt. Der Mahlguttransport wird vermutlich aufgrund der Feinheit der Partikel von der Luftströmung bestimmt.

Dritte Schnittstufe und Auslassöffnung:

Durch den hohen Feinanteil im Mahlgut treten bei falscher Mahlspaltauslegung, Pressagglomerationen vor der dritten Stufe auftreten. Dabei haftet das Mahlgut sehr stark an der Gehäusewand. Diese Ablagerungen verkleinern bzw. verschließen den Mahlspalt. Dadurch verändert sich der gesamte Zerkleinerungsprozess bzw. dieser kann dadurch sogar abbrechen.

Die Auslassöffnung hat ebenso großen Einfluss auf die Verweildauer des Mahlgutes in der Mühle. Wird die Luftströmung beim Austritt behindert (die Gestaltung der Auslassöffnung ist entscheidend), so kann dies ebenso zu Pressagglomerationen führen.

Massendurchsatz und Fertiggutqualität:

Bisher konnte der Massendurchsatz gesteigert werden, ohne dass die Fertiggutqualität sinkt. Jedoch können unter gewissen Bedingungen Pressagglomerationen auftreten. Dies sind ein Hinweis dafür sein, dass die Mahlgutkonzentration bereits sehr groß ist. Eine Steigerung des Massendurchsatzes hat eine mit hoher Wahrscheinlichkeit weitere Erhöhung der Mahlgutkonzentration zur Folge. Für diese müssten die Mahlspalte vergrößert werden, damit es zu keinen Pressagglomerationen kommt. Dadurch dürfte aber die gewünschte Zerkleinerungswirkung verloren gehen.

Es empfiehlt sich für noch höhere Massendurchsätze empfehlen die Baugröße zu verändern oder den Zerkleinerungsprozess zu überdenken. Anstelle einer Mühle könnten zwei Mühlen mit jeweils zwei Schnittstufen und einem zwischen geschalteten Klassierer verwendet werden. Dieser Klassierer sorgt dafür, dass bereits vorhandenes Fertiggut nach der ersten Mühle aus dem Prozess entfernt wird. Damit könnte die Mahlgutkonzentration der zweiten Mühle gesenkt werden. Somit könnte eine hohe Fertiggutqualität auch bei hohen Massendurchsätzen sichergestellt werden.

Nachteil einer solchen Konstruktion ist, dass der Aufwand und die Investitionskosten dieser Anlage, durch den Klassierer und die zweite Mühle, stark steigen würden.

Die Investitionskosten dieser Anlage soll gering ausfallen, deshalb werden nachfolgend zwei Maschinenkonzepte für eine Nullserie vorgestellt, welche in einem Mahlgutdurchlauf das Fertiggut herstellen.

5.2 Nullserienvariante A

Nachfolgende Abbildung zeigt die erste Nullserienvariante:

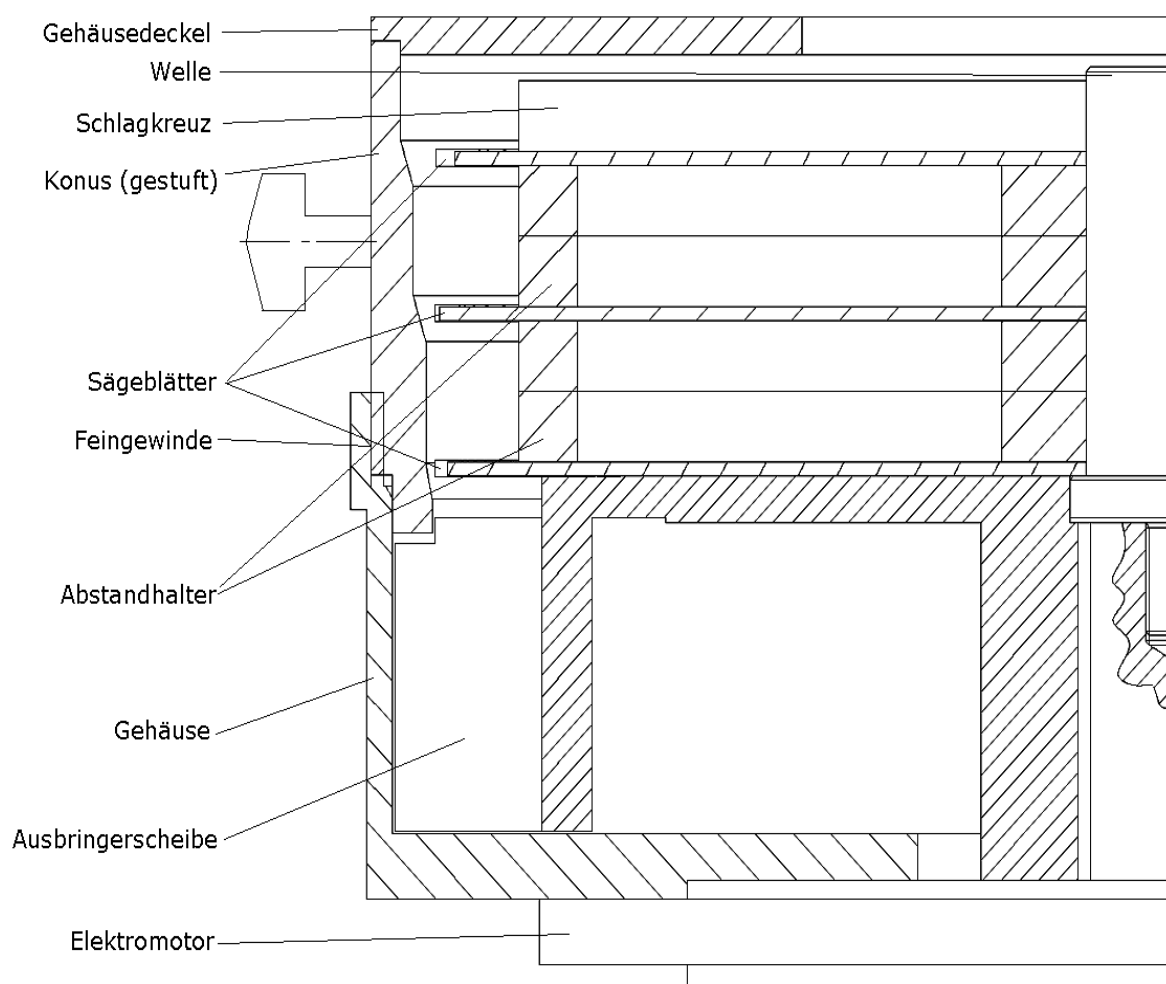


Abb. 5.1: Nullserienkonzept Variante A

Ein Großteil der Bauteile kann aus dem Prototyp InnoMill III übernommen werden. Neu ist der gestufte Konus und der Verstellmechanismus mittels Feingewinde am Gehäuse.

Die Zähnezahlen, Mahlpaltbereiche und die Dicke der Abstandhalter ist in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Schnittstufe	Zähnezahl	Mahlpalt / mm	Schlagkreuz/ Abstandhalter
1	60	5 - 8	Schlagkreuz 4 Arme
2	84	2 - 5	Stufe 1 - 2: 30mm
3	84	0,5 - 2	Stufe 2 - 3: 30mm

Tab. 5.1: Zähnezahlen, Mahlpalte und Dicke der Abstandhalter

Wie aus Tabelle 5.1 ersichtlich ist, sind die Mahlpaltbereiche groß gewählt, damit auch mit niedrigeren Massendurchsätzen oder mit veränderten Mahlguteigenschaften eine hohe Fertiggutqualität und geringe Leistungsaufnahme erreicht werden kann. Weiters soll durch die Wahl der Mahlpalte der Verschleiß, der durch das Mahlgut entsteht, ausgeglichen werden.

Die Regelung für den Luftdurchsatz ist nicht in Abbildung 5.1 dargestellt. Aus den Versuchen mit den Prototypen geht hervor, dass es sehr wichtig ist, den Luftdurchsatz und somit die Verweildauer des Mahlgutes zu regeln. Der Luftdurchsatz könnte über eine Drosselklappe oder ein Schieberventil begrenzt werden.

5.3 Nullserienvariante B

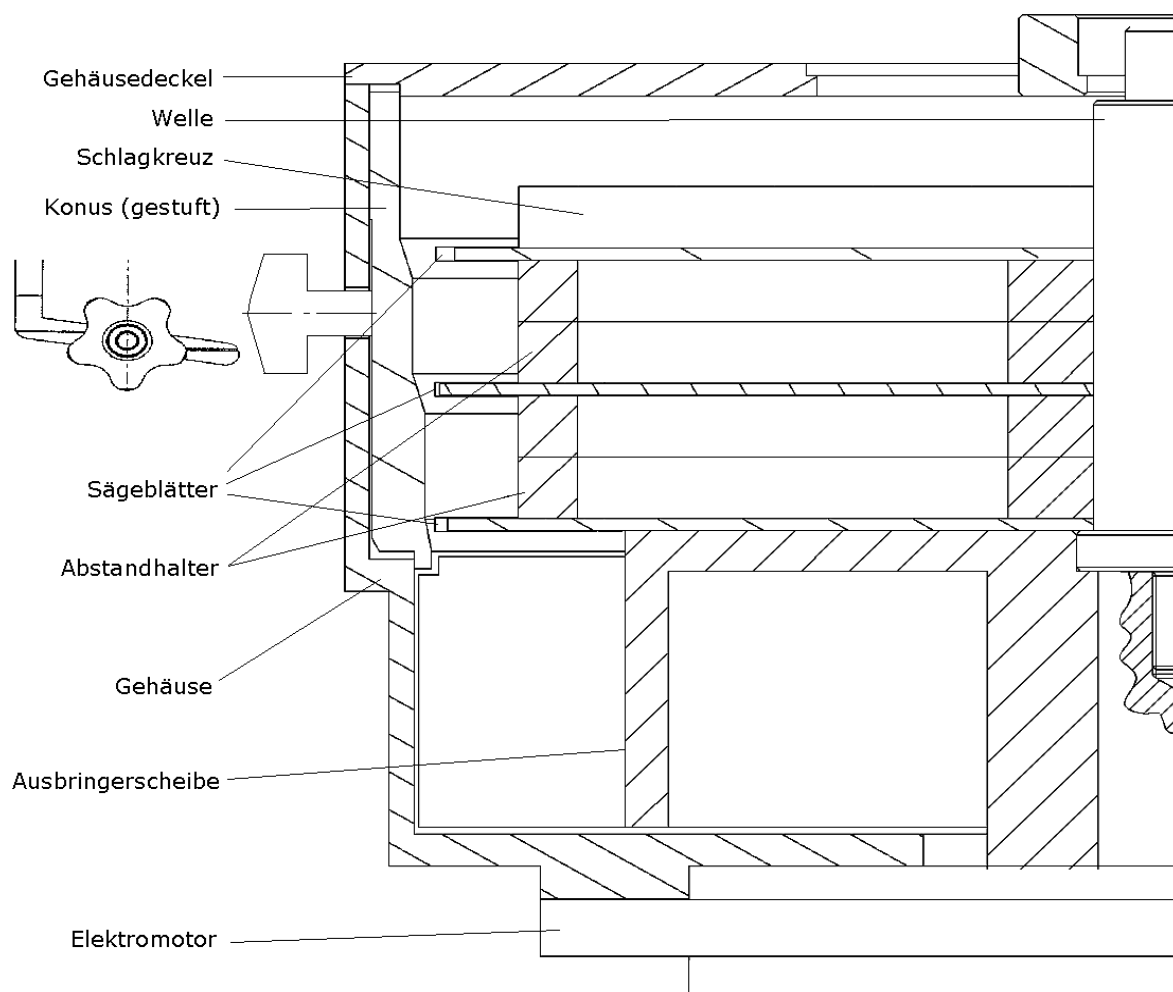


Abb. 5.2: Nullserienkonzept Variante B

Die Nullserienvariante B verwendet die selben Bauteile und Mahlpaltbereiche wie die Variante A. Der Unterschied besteht nur im Mechanismus zum Einstellen des Mahlpaltes. (Langloch)

Literaturverzeichnis

- [1] BATEL, W.: *Über die Zerkleinerung in Stiftmühlen*. Braunschweig : Chemie-Ingenieur-Technik 32, 1960
- [2] BRAUER, H.: *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen*. Aarau : Sauerländer
- [3] FELDMANN, M. ; UNIVERSITÄT, Institut und Lehrstuhl für S. RWTH AACHEN A. RWTH AACHEN (Hrsg.): *"Grundlagen der Bruchmechanik"*. <http://www.stb.rwth-aachen.de/lehre/umdrucke/bruchmech3.pdf>, Abruf: 12. August 2010
- [4] GIGER, B. ; TQU-AG (Hrsg.): *„Design of Experiments“, Einführung in die statistische Versuchsplanung*. <http://www.tqu-group.com/downloads/doedownload.pdf>, Abruf: 22. Juli 2010
- [5] KLEPPMANN, W. ; BRUNNER, F.J. (Hrsg.): *Taschenbuch Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren*. 4. Aufl. München/Wien : Carl Hanser Verlag, 2006. – ISBN 3-446-406117-44 oder 978-3-446-40617-9
- [6] NEUBER H.: *Kerbspannungslehre*. 1. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 1985
- [7] PAHL, M. H.: *Zerkleinerungstechnik*. 2. Aufl. Köln : TÜV Rheinland GmbH, 1993. – ISBN 3-343-00843-5 od. 3-88585-682-4
- [8] P.HAGEDORN: *Technische Mechanik, Band 2: Festigkeitslehre*. Verlag Harri Deutsch. – ISBN 978-3-8171-1778-9
- [9] RITTINGER P.: *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*. 1. Auflage. Berlin : Ernst und Korn, 1867
- [10] SCHÖNERT, K.: *Die Grenzen der Zerkleinerung bei kleinen Korngrößen*. Chemie-Ingenieur-Technik 43, 1971. – 773–777 S.
- [11] SCHÖNERT, K.: *„Zerkleinern“, Unterlagen zu einem Kontaktstudium*. 2. Aufl. Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 1977

- [12] SCHUBERT, H. ; „UA.“ ; G.GRUHN (Hrsg.) ; „UA.“ (Hrsg.): „Verfahrenstechnik“ *Mechanische Verfahrenstechnik II*. 1. Aufl. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1979
- [13] SCHWISTER K.: *Taschenbuch der Verfahrenstechnik*. 2. Aufl. Leipzig : Carl Hanser Verlag, 1985. – ISBN 3-446-22843-8
- [14] STAIRMAND, C.J.: *The energy efficiency of milling processes 4. Europ. Symp. Zerkleinern, Nürnberg (1975)*. Verlag Chemie, 1976
- [15] STAUDINGER, G.: *Skriptum Mechanische Verfahrenstechnik (Kapitel 9)*. Graz, 2004
- [16] ULLRICH, H.: „*Mechanische Verfahrenstechnik*“, *Berechnung und Projektierung*. 1. Aufl. Berlin/Heidelberg/New York : Springer Verlag, 1967

Abbildungsverzeichnis

2.1	Spannungsverteilung in der Nähe des Kerbgrundes [7, S. 11]	4
2.2	Beanspruchungsarten (Rumpf 1965) [11, I - 27]	6
2.3	Geometrisch und physikalisch ähnliche Körper	7
2.4	Durchgangssummenverteilung für Aufgabe- und zerkleinertes Gut [13, S. 125]	8
2.5	Zerkleinerungsarten: a) Einzelkorn, b) Mehrkorn, c) Gutbett [13, S. 123]	10
2.6	Prallzerkleinerung an einem Einzelkorn [7, S. 223]	12
2.7	Theoretisch minimaler Energiebedarf und Erfahrungswerte [11, V - 14]	13
2.8	Bauformen von Prallmühlen	14
2.9	Schema einer Universalmühle mit eingebautem Turborotor und Abgasrückführung [7, S. 192]	16
2.10	Darstellung der Partikelbewegung in der Eintrittsphase [7, S. 194]	17
2.11	Kontaktarten zwischen Partikel und Schlagleiste (Rotor) [vgl. 7, S.206]	19
2.12	Zustände im rotierenden Gutring bei einem Mahlrost ohne Mahlbacken	20
2.13	Aufbau einer Schneidmühle [7, S. 236]	21
2.14	Schneidmühlen mit verschiedenen Rotorbauarten [vgl. 7, S. 238]	23
2.15	Schematischer Versuchsaufbau für die Einzelkornzerkleinerung	24
2.16	Spannvorrichtung mit eingespannter Klinge und Kraftaufnehmer	24
2.17	Randbedingungen des Dreipunkt-Biegeversuchs	24
2.18	Reale Versuchsanordnung	24
2.19	Bruchkraft der Körner in Abhängigkeit der Dicke	25
2.20	Bruchquerschnitt von Kürbiskernen	25
2.21	Schema einer Mühlenanlage	28
3.1	Prototyp InnoMill I	31
3.2	Prototyp InnoMill II	31
3.3	Schematische Schnittdarstellung Prototyp	32
3.4	Verteilungsdichten der Beanspruchungsenergie (schematisch) [12, S. 157]	34
3.5	Mahlspalt zwischen Rotor und Statorgehäuse	35
3.6	Schlagkreuz: a) Originale Ausführung, b) Modifizierte Ausführung	36
3.7	Kontaktarten zwischen Partikel und Schlagleiste (Rotor) [vgl. 7, S.206] (siehe auch Abbildung 2.11)	37
3.8	Schematischer Versuchsaufbau	38

3.9	Vorhandene Dosiereinrichtung der Prototypen	40
3.10	Brückenbildung der Körner bei der Dosierklappe	40
3.11	Brückenbildung der Körner bei der Dosierklappe (schematischer Schnitt)	40
3.12	Massendurchsatz abhängig vom Öffnungswinkel der Klappe (schematisch)	41
3.13	Schematische Darstellung der Funktionsweise der neuen Dosiereinrichtung	43
3.14	Massendurchsatz/Fertiggutqualität abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit	44
3.15	Ergebnis der Schlagkreuzmodifikationen	45
3.16	Einfluss der Zähnezahlen auf die Qualität des Fertiggutes und der Leistungsaufnahme	46
3.17	Ergebnis der Variation des Mahlpaltes der letzten Schnittstufe für 2 Sägeblätter	49
3.18	Ergebnis der Variation des Mahlpaltes der letzten Schnittstufe für 3 Sägeblätter	50
3.19	Energiebedarf der Prototypen InnoMill I und InnoMill II (original Abbildung siehe [11, V - 14])	52
4.1	Schnittdarstellung des Prototyp InnoMill III	55
4.2	Detailansicht des Prototyp InnoMill III	55
4.3	Schnitt durch den Rüttler	57
4.4	Funktionsprinzip des Rüttlers	57
4.5	Lagerhalterung des Prototyps InnoMill III	58
4.6	Schlagkreuze der Prototypen	59
4.7	Abstandhalter der Prototypen	59
4.8	Wahrscheinliche Geschwindigkeitsprofile der Luftströmung	60
4.9	Ausbringerscheiben der Prototypen	61
4.10	Konischer Einsatz und Kennzeichnung des Mahlpaltes	62
4.11	Einstellmöglichkeiten	63
4.12	Alternatives Dosiersystem für einen Massendurchsatz von 300 kg/h	64
4.13	Kennzeichnung des Totraumes in der Mühle	65
4.14	Versuchsablauf zur Bestimmung der Mahlpalte	67
4.15	Schematischer Versuchsaufbau InnoMill III	68
4.16	Schlagkreuzgeometrien für die Strömungsmessung	69
4.17	Definition der Strömungsrichtung	70
4.18	Kennzeichnung der Totraumhöhe	70
4.19	Flügelrad Anemometer zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit	70
4.20	Positionen für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung	71
4.21	Strömungsgeschwindigkeiten an den Messpositionen 1a, 1b und 2	72
4.22	Strömungsgeschwindigkeit an der Messposition 3	73
4.23	Auswirkung der Größe des Totraumvolumens auf die Strömungsgeschwindigkeit an der Messposition 3	73
4.24	Gemessene Leistungsaufnahme beim Leerlauf des Prototypen	74

4.25	Untere Grenze für den Mahlpalt der ersten Schnittstufe	76
4.26	Mahlpalt(M) Stufe 3, Zähnezah 108; $M_1 = 6,5 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_2 = 4,3 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$	77
4.27	Mahlpalt Stufe 2, Zähnezah 84; $M_1 = 6,5 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_3 = 1,3 \text{ mm}$ $Z_3 = 108$	78
4.28	Mahlpalt Stufe 1, Zähnezah 60; $M_2 = 3,9 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$; $M_3 = 1,3 \text{ mm}$ $Z_3 = 108$	79
4.29	Mahlpalt Stufe 3, Zähnezah 84; $M_1 = 6,1 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_2 = 3,9 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$	81
4.30	Mahlpalt Stufe 3, Zähnezah 84; $M_1 = 6,1 \text{ mm}$ $Z_1 = 60$; $M_2 = 3,1 \text{ mm}$ $Z_2 = 84$	81
4.31	Dauerversuch Kombination D ₁ , 25 kg	83
4.32	Dauerversuch Kombination D ₂ , 10 kg	83
4.33	Energiebedarf des modifizierten Prototyps InnoMill II und des Prototyps InnoMill III (original Abbildung siehe [11, V - 14])	84
5.1	Nullserienkonzept Variante A	87
5.2	Nullserienkonzept Variante B	88

Tabellenverzeichnis

2.1	Theoretische und technische Zugfestigkeiten von Stahl und Glas [11, I - 9]	4
2.2	Koeffizienten für das Zerkleinerungsgesetz nach Bond [13, S. 125]	9
2.3	Effektivität von Zerkleinerungsmaschinen auf Basis der assoziierten Energie nach STAIRMAND (1976), Einzelkornzerkleinerung gleich 100% gesetzt. [11, I - 48] . .	11
2.4	Zerkleinerungsmethoden nach der MOHS-Härte [13, S.119]	16
3.1	Konstruktive Unterschiede der Prototypen InnoMill I und InnoMill II	32
3.2	Zähnezahlen der Sägeblätter für die erste und zweite Schnittstufe	45
3.3	Mahlspalte für 2 und 3 Sägeblätter	48
4.1	Vergleich der berechneten/vorhanden Zähnezahlen für den neuen Prototyp	54
4.2	Beobachtete und empirisch ermittelte Effekte und deren Abhängigkeiten	62
4.3	Mögliche Zähnezahlkombinationen	66
4.4	Erwartete Mahlspaltbereiche der unterschiedlichen Schnittstufen	66
4.5	InnoMill III: Eingestellte Umrichterfrequenz, berechnete Drehzahl (Elektromotor) und Umfangsgeschwindigkeit	72
4.6	Zähnezahlkombination der „Variante A“	75
4.7	Mahlspalte für die Zähnezahlkombination „Variante B“	80
4.8	Kombinationen für die Dauerversuche	82
5.1	Zähnezahlen, Mahlspalte und Dicke der Abstandhalter	87

Anhang

- Auszug aus dem Versuchsplan
- Diagramme von Messungen der Luftströmungsgeschwindigkeit

Auszug Versuchsplan

Nr	Zähnezahl			Mahlpalt / mm			Totraum-	Leistung / W	Massen-	Aussage Versuch	Maschine (Ablagerungen)
	Z1	Z2	Z3	Sp.1	Sp.2	Sp.3	höhe / mm				
1	60	84	108	7,3	4,7	1,7			180	Sehr inhomogens Mahlgut (ein Teil sehr fein, ein Teil sehr grob), trocken	
2	60	84	108	6,9	4,3	1,3			180	Sehr feines Mahlgut, wenig Grobanteil, trocken	
3	60	84	108	6,9	4,3	2,1			180	hoher Grobanteil, trocken	
4	60	84	108	6,9	4,3	1,3			180	Sehr feines Mahlgut, wenig Grobanteil, trocken	
5	60	84	108	6,9	4,3	1,3					
6	60	84	108	6,9	4,3	1,3			180	Sehr homogenes Fertiggut, trocken	Sehr gute Auflösung der Brückenbildung
7	60	84	108	6,5	4,3	1,3		keine LM	300	sehr homogenes Fertiggut 90% sehr fein, 10% Grobanteil	keine Nennwerten Ablagerungen
8	60	84	108	6,5	4,3	1,3			300	sehr homogenes Fertiggut 90% sehr fein, 10% Grobanteil	sehr leichte Ablagerungen unter der letzten Schnittstufe
9	60	84	108	6,5	4,3	1,3		keine LM	300	sehr homogenes Fertiggut	Probleme beim Ausurf, Mahlgut bleibt im Auswurftrichter liegen. Sehr viel Fertiggut oberhalb der 3. Schnittstufe. --> Luftströmung fehlt
10	60	84	108	6,5	4,3	1,3		3300	300		Test ob, die aus dem Vorversuch verursachte Stopfung wieder aufgelöst wird. Es sind noch Ablagerungen vor der 3. Schnittstufe vorhanden.
11	60	84	108	6,5	4,3	1,3	8	3000	300	Fertiggut fein mit augenscheinlich mehr Grobanteil als Versuche 17,18	Durch das Absenken der Deckenplatte, Strömungsgeschw.erhöhung. Kürzere Verweildauer in der Schneidzone--> erhöhter Grobanteil
12	60	84	108	6,5	4,3	0,9	8	4000	300	Sehr gutes, feines Mahlgut mit wenig Grobanteil, trocken, aber nur 1,5 kg getestet	Nach 1,5 kg schon sehr starke ölige Ablagerungen vor der 3. Schnittstufe, weiters waren schon Ölkugeln vorhanden.
13	60	84	108	6,5	4,3	1,7	8	2600	300	Mahlgut sehr trocken, 75% fein, 25% sehr grobes Mahlgut	keine nennenswerten Ablagerungen in der Maschine
14	60	84	108	6,5	3,9	1,3	8	3000	300	sehr homogenes Fertiggut 95% sehr fein, 5% Grobanteil	keine Ablagerungen vor der 3. Stufe.
15	60	84	108	6,1	3,9	1,3	13	3500	300	sehr homogenes feines Mahlgut, nur einige grobe Körner dabei	keine Ablagerungen von Mahlgut
16	60	84	108	6,5	3,5	1,3	8mm	3000	300	Sehr homogenes feines trockenes Malgut 98%, 1-2% Größere	leichte Ablagerungen unter 3. Stufe, Übergang-Ende Konus- Gehäuse
17	60	84	108	6,5	3,1	1,3	8	3000	300	Es wird sehr feiner Staub aus der Einfüllöffnung geblasen. Fertiggut: sehr fein, homogen	nach 1,5 kg noch keine Probleme
18	60	84	108	5,7	3,9	1,3	18	3100	300	sehr homogenes feines Mahlgut, nur einige grobe Körner dabei	leichte Ablagerungen unter 3. Schnittstufe, Durch großen Abstand Decke - Flügel --> Ablagerungen bei Scheibe
19	60	84	108	6,9	3,9	1,3	9mm	3000	300	feines homogenes Fertiggut 95% etwas, Rest gröbere Körner	beginnende Ablagerungen vor der 3. Stufe
20	60	84	84	6,1	3,9	0,9	13	2900	300	feines trockenes Fertiggut 95% sehr gut, 5 % Grobanteil	keine Ablagerungen in der Maschine
21	60	84	84	6,1	3,9	0,5	13	4500	300	leicht erwärmtes Mahlgut, Mahlgut homogen aber tendentiell etwas gröber als mit 108 Zähne in der letzten Stufe	sehr starke ölige Ablagerungen zwischen 2. und 3. Stufe
22	60	84	108	6,1	3,5	1,3	13	4000	300	!!!neue Kerne!!! Die etwas Trockener sind als die Alten; Mahlgut sehr homogen fein trocken. Kaum grobe Körner	leichte Ablagerungen unter 3. Stufe Übergang-Ende Konus- Gehäuse, leichte Ablagerungen Deckenscheibe-Konus
23	60	84	108	5,7	3,5	1,3	18	4000	300	Mahlgut sehr homogen fein trocken	starke Ablagerungen in der ganzen Maschine
24	60	84	108	6,1	3,1	1,3	13	3900	300	Sehr fein homogen trocken nur vereinzelt große Körner	
25	60	84	108	5,7	3,1	1,3	18		300		
26	60	84	84	6,1	3,9	0,7	8	5000	300	homogen fein trocken 95%, 5% Grobanteil	starke Ablagerungen zwischen 2 und 3 Stufe
27	60	84	84	6,1	3,9	1,3	13	3300	300	teilweise homogenes Mahlgut, sehr grober Körner dabei	keine Ablagerungen in der Maschine
28	60	84	84	6,1	3,5	0,9	8mm	3700	300	feines trockenes homogenes Fertiggut 98% sehr gut, 1-2 % Grobanteil(wahrscheinlich durch Hochfahren)	Ablagerungen vor 3. Schnittstufe
29	60	84	84	6,1	3,1	0,9	13	5000	300	sehr feines homogenes trockenes Fertiggut	Ablagerungen vor 3. Schnittstufe
30	60	84	84	6,1	3,1	1,3	13	4300	300	sehr feines homogenes trockenes Fertiggut, vereinzelt grobe Körner	leichte Ablagerungen unter 3. Schnittstufe
31	60	84	84	5,7	3,1	1,3	13mm	4000	300	sehr feines homogenes trockenes Fertiggut 95%, 5% 2-3 mm große Körner	leichte Ablagerungen zwischen 2 und 3 Schnittstufe
32	60	84	108	6,1	3,9	1,3	13	5500	300	Mahlgut sehr fein, homogen, trocken	Ablagerungen unter und in der 3. Schnittstufe, schlecht für Dauerversuch
33	60	84	84	6,1	3,1	1,3	13	4100	300	Fertiggut trocken homogen fein 97%, 2-3% Grobanteil	keine Ablagerungen in der Maschine
34	60	84	84	6,1	3,1	0,9	13		300		ABBRUCH wegen zu hoher Leistungsaufnahme, sehr starke Ablagerungen vor 3. Stufe
35	60	84	108	6,1	3,5	1,7	13		300		ganze Maschine voll!!!!!!
36	60	84	108	6,1	3,9	1,3	13	4000	300	Mahlgut trocken fein, ca 5% Grobanteil	keine Ablagerungen in der Maschine
37	60	84	108	6,1	3,1	1,3	13	3500	300	Fertiggut sehr homogen fein, nur vereinzelt grobe Körner	keine Ablagerungen in der Maschine
38	60	84	84	6,1	3,1	0,9	13	4000	300	homogenes feines trockenes Fertiggut, erhöhter Grobanteil	keine Ablagerungen in der Maschine
39	60	84	84	6,1	3,1	0,9	13	4000	330	homogenes feines trockenes Fertiggut, erhöhter Grobanteil	keine Ablagerungen in der Maschine

Strömungsgeschwindigkeit unter konstanter Totraumhöhe

Messpositionen

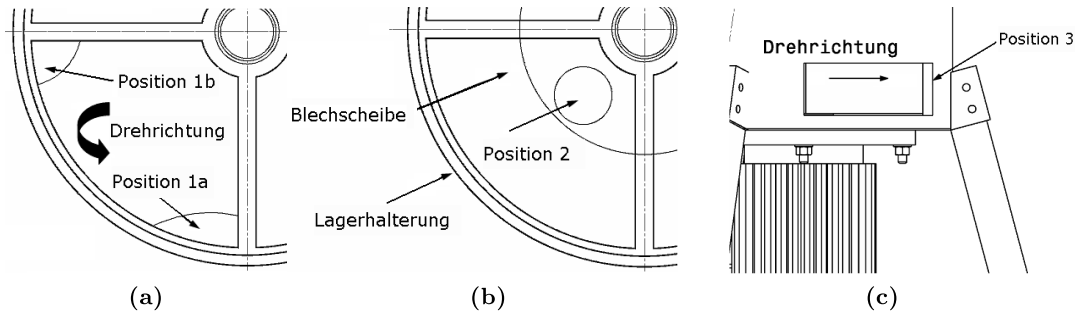
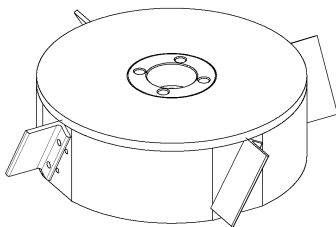


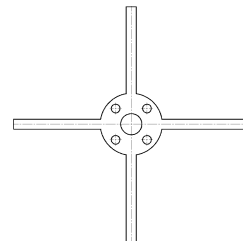
Abb. 5.3: Positionen für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung

Versuchsanordnungen

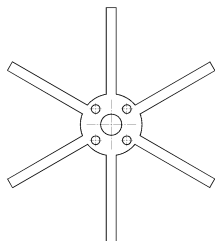
- Totraumhöhe = Konstant (15 mm)
- Schlagkreuz (ohne, 4 Arme, 6 Arme, 4 Arme mit Flügel)
- Ausbringerscheibe: Flügelstellung (0° , 30° , 60°)
- Strömungsrichtung der Luft in Mahlgutrichtung ist positiv Definiert



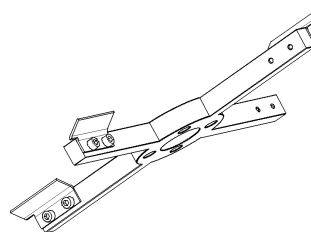
Ausbringerscheibe Prototyp InnoMill III



Schlagkreuz 4 Arme

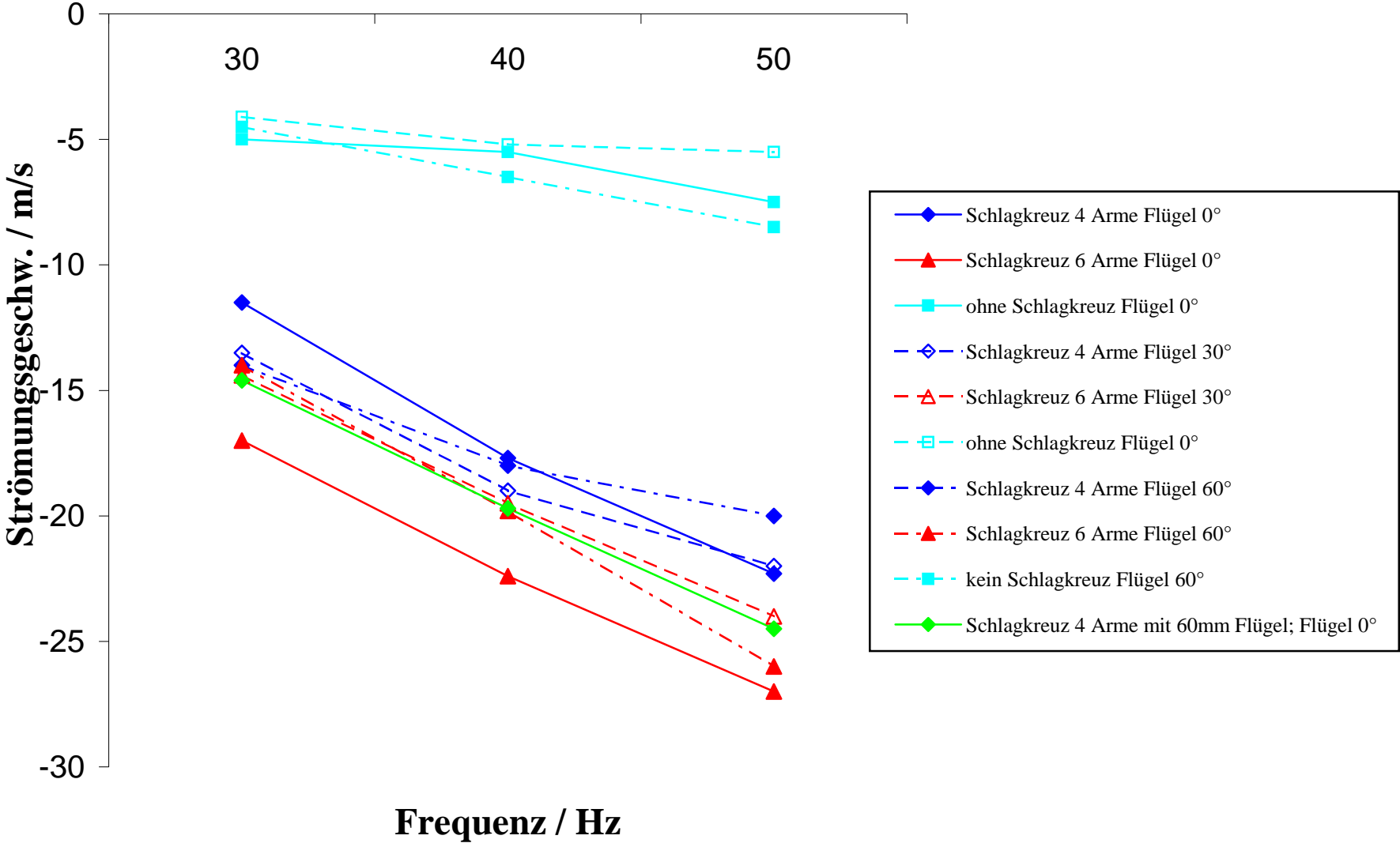


Schlagkreuz 6 Arme

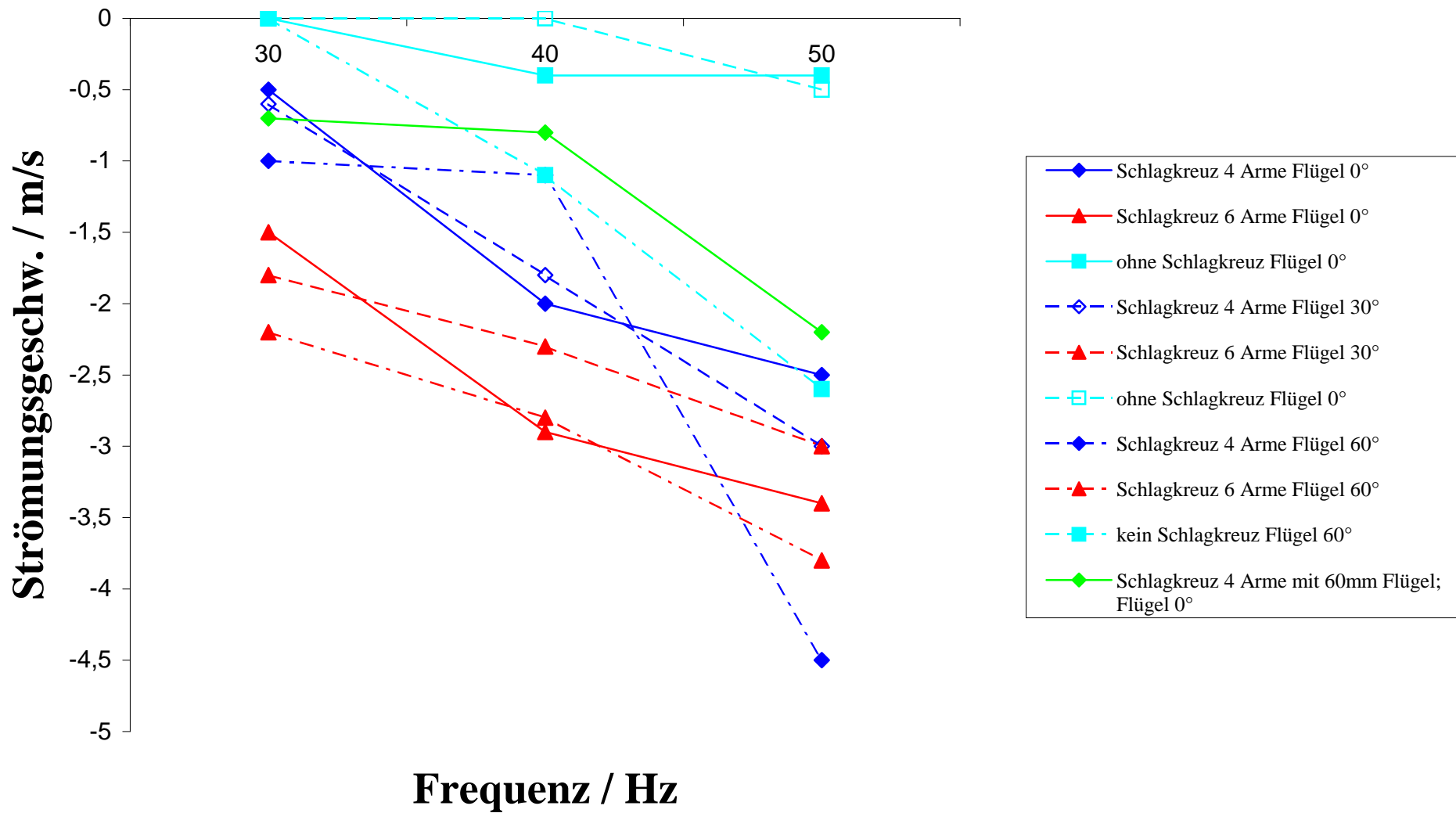


Schlagkreuz 4 Arme mit Flügel

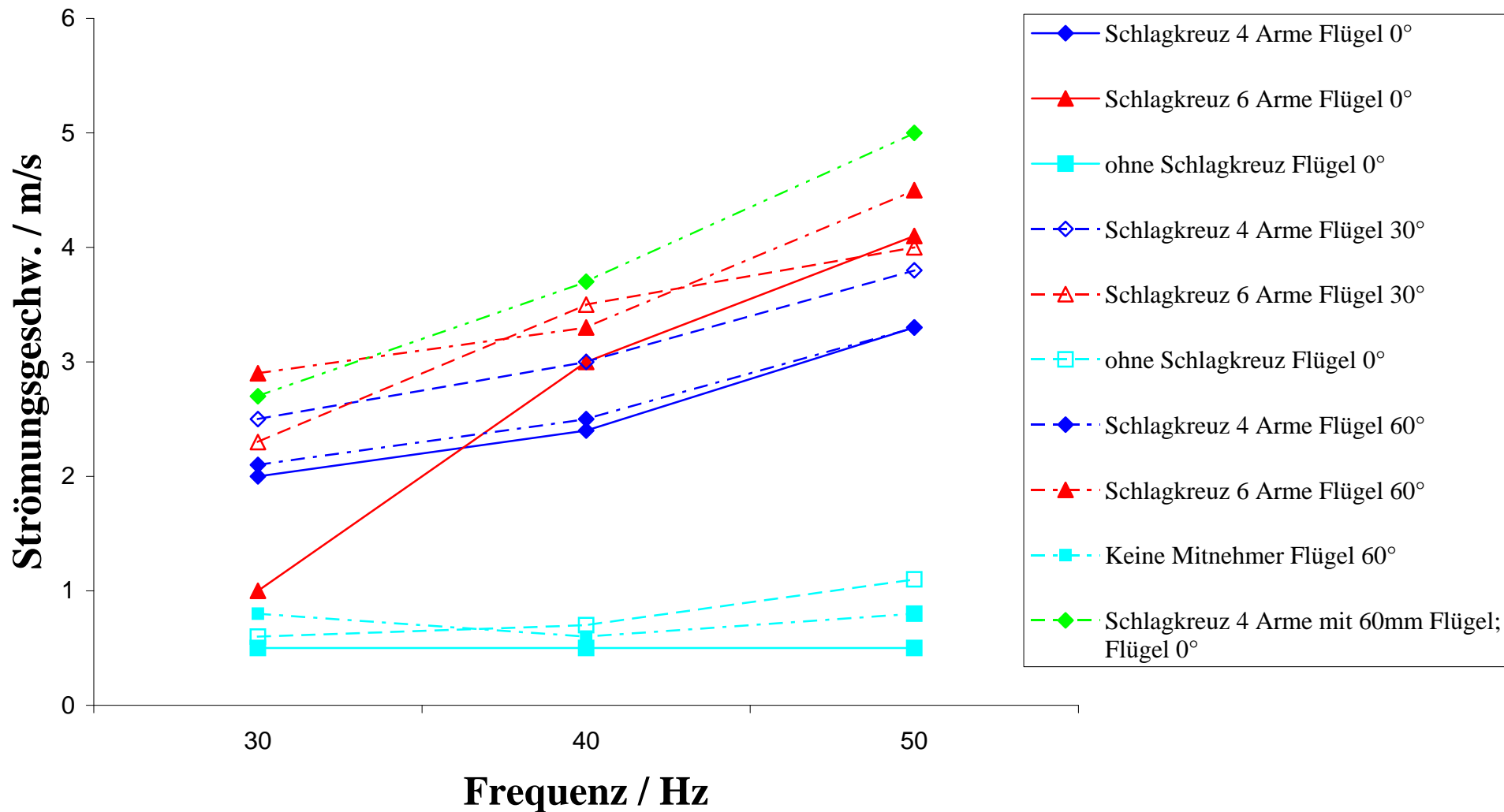
Strömungsgeschw. Stelle 1a



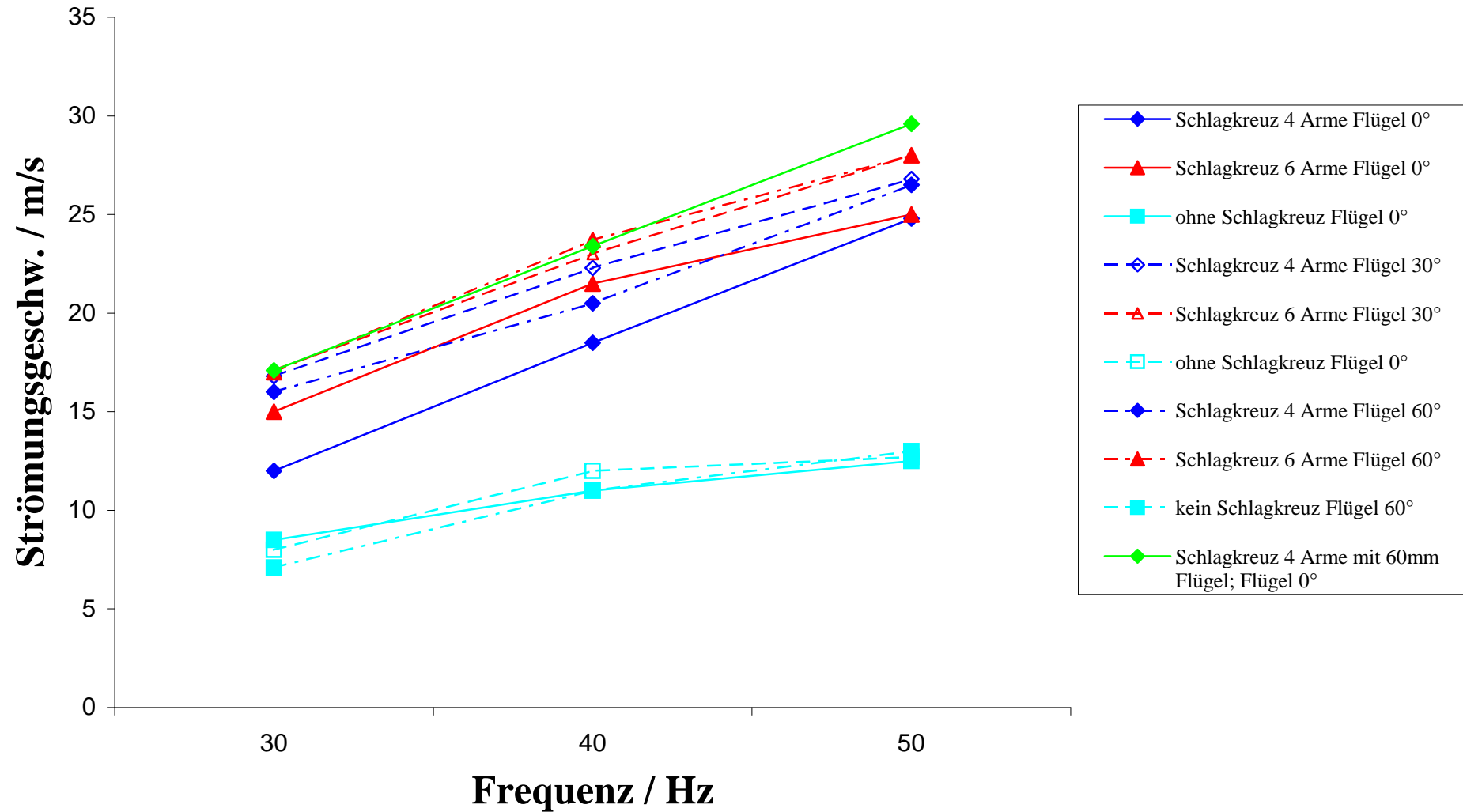
Strömungsgeschw. Stelle 1b



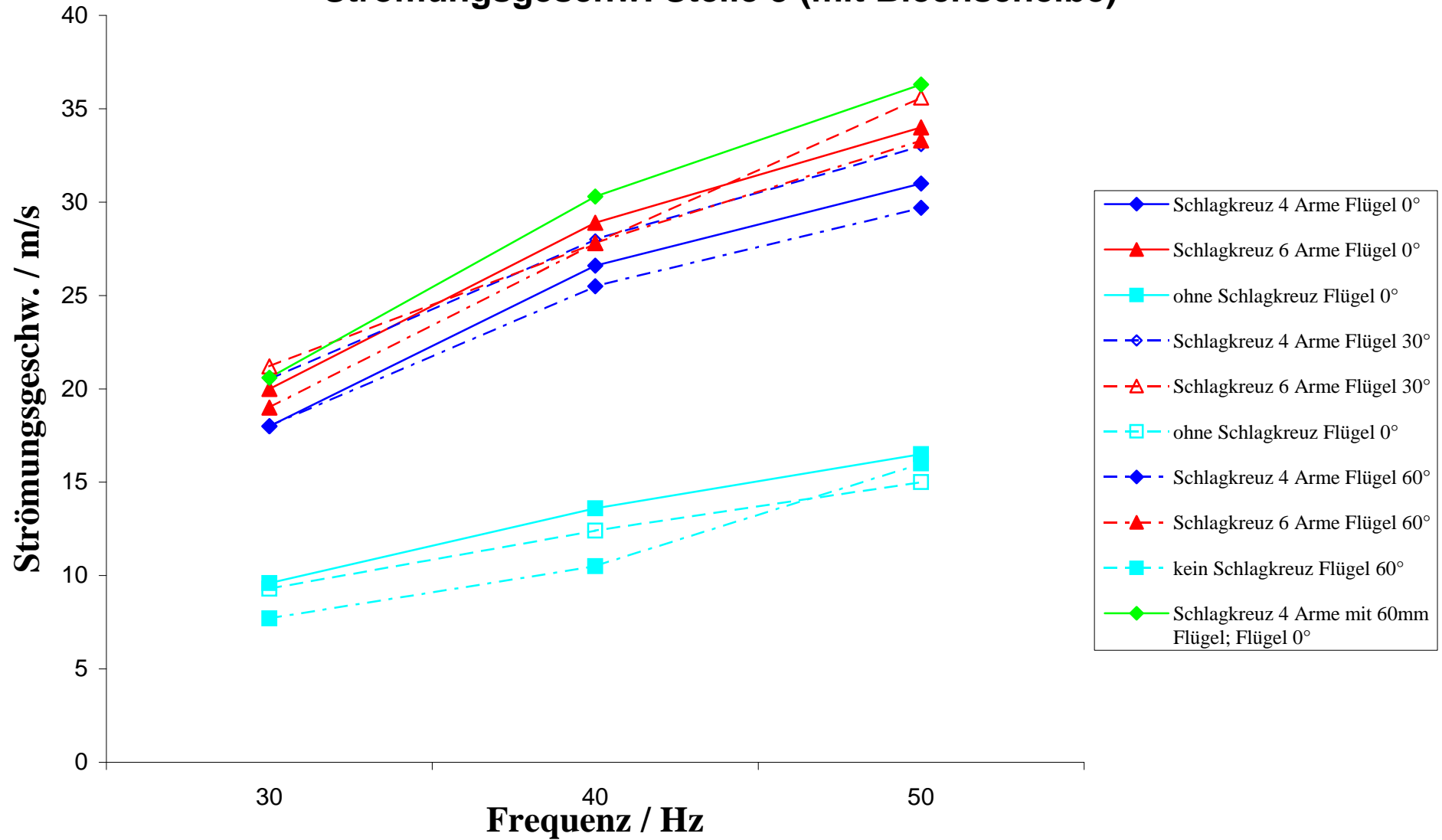
Strömungsgeschw. Stelle 2



Strömungsgeschw. Stelle 3 (ohne Blechscheibe)

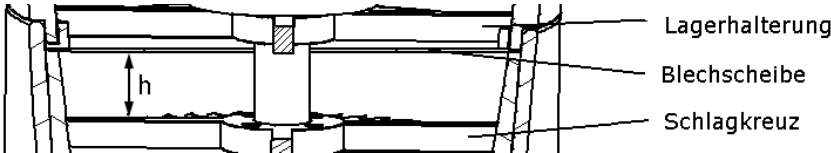


Strömungsgeschw. Stelle 3 (mit Blechscheibe)

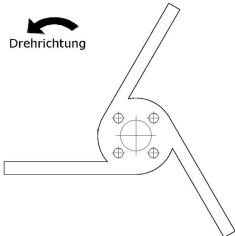


Strömungsgeschwindigkeit unter Variation der Totraumhöhe

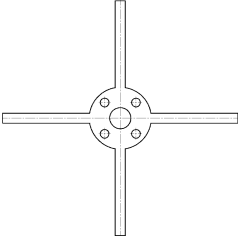
- Totraumhöhe = Variabel
- Schlagkreuz (3 Arme, 4 Arme, 6 Arme, 4 Arme mit Flügel)
- Ausbringerscheibe: Flügelstellung 0°



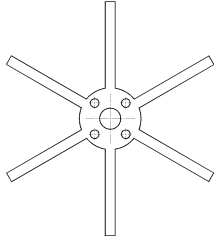
Kennzeichnung der Totraumhöhe



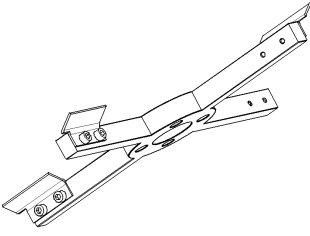
Schlagkreuz 3 Arme



Schlagkreuz 4 Arme



Schlagkreuz 6 Arme



Schlagkreuz 4 Arme mit Flügel

Austrittsgeschwindigkeit d. Luftströmung (Pos.3) in Abhängigkeit der Totraumhöhe

