

Optimieren der Reinigung von Hanffasern auf Kammschütteln

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen
Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Ralf Pecenka

aus Strausberg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Ay
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Fürll
Tag der mündlichen Prüfung: 18. März 2008

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB). Finanziell wurde das Projekt im Rahmen der Forschungsförderung des Hochschul- und Wissenschaftsprogramms als Kooperationsvorhaben mit der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus gefördert. Dem BMBF und dem MWFK des Landes Brandenburg sei deshalb an dieser Stelle gedankt.

Wissenschaftlich angeregt und betreut wurde das Projekt durch Prof. Dr.-Ing. habil. Ch. Fürll und Prof. Dr.-Ing. habil. P. Ay. Der gewährte Freiraum bei der Bearbeitung sowie die gleichermaßen fordernde wie fördernde Arbeitsatmosphäre in der Abteilung 3 des ATB boten günstige Bedingungen für die Durchführung. Die bereichernde Kooperation mit dem Lehrstuhl für Aufbereitungstechnik der BTU Cottbus machte diese Arbeit möglich und lieferte den notwendigen verfahrenstechnischen Hintergrund. Meinen Betreuern gebührt deshalb an dieser Stelle besonderer Dank.

Wertvolle Hilfe erfuhr ich insbesondere von Dr. rer. agrar. H.-J. Gusovius von der BTU Cottbus im Rahmen des gemeinsam bearbeiteten Projektes aber auch von Studenten in Studien- und Diplomarbeiten, durch Mithilfe bei Versuchen. Entscheidend haben Holger Brüning und Sebastian Below zum Ergebnis der Arbeit beigetragen.

Besonders haben mich ebenso die Kolleginnen und Kollegen der Abteilung aber auch die Mitarbeiter der Zentralwerkstatt durch ihre große Hilfsbereitschaft und Zusammenarbeit laufend unterstützt. Herzlicher Dank gilt hier besonders Herrn Weber für die geduldige Auswertung der vielen Versuche und Herrn Krebs für den Bau der Versuchseinrichtung.

Ganz besonderer Dank gilt nicht zuletzt meiner Familie für die aktive Unterstützung und die gewährten Freiräume, da sie auf viele gemeinsame Stunden verzichten musste.

Potsdam, den 23. Juli 2008

Ralf Pecenka

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Inhaltsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis	VI
Zusammenfassung	VIII
1 Einleitung	1
2 Zielstellung der Arbeit	4
3 Hanf als nachwachsender Rohstoff in Deutschland	6
3.1 Die Hanfpflanze	7
3.2 Anwendungsbereiche des Hanfes in Deutschland	9
3.3 Die mechanische Gewinnung von Hanffasern	11
3.4 Grundlegende Anforderungen an wettbewerbsfähige Aufschlussanlagen	16
3.4.1 Kostenstruktur bestehender Anlagen	17
3.4.2 Ökonomische Zielstellungen für effiziente Aufschlussanlagen	19
4 Die Faserreinigung	20
4.1 Aufgabe und Funktionsstruktur der Faserreinigung	20
4.2 Eigenschaften des Eingangsmaterials	21
4.3 Stand der Technik in der Faserreinigung	28
4.3.1 Aufbau typischer Aufschlussanlagen und Reinigungslinien	28
4.3.2 Textiltechnische Verfahren der Faserreinigung	31
4.3.3 Reinigungsverfahren in der Landtechnik	35
4.3.4 Verfahrenstechnik zum Klassieren und Separieren	35
4.3.5 Systematik der Verfahren zur Faserreinigung	37
4.4 Anforderungen an die Faserreinigung	39
4.4.1 Anforderungsliste	39
4.4.2 Erfüllung der Anforderungen	41

5	Kammschüttel zur Faserreinigung	43
5.1	Stand der Technik	43
5.2	Erweiterte Anforderungen an Kammschüttel	46
5.3	Präzisierte Aufgabenstellung und Neuheitswert einer optimierten Kammschüttel	47
5.4	Maschinenkonzeption einer Kammschüttel	48
5.5	Kammschüttel-Versuchsstand	50
5.5.1	Versuchsaufbau und –durchführung	50
5.5.2	Grundlegende Versuchsergebnisse	54
5.6	Optimieren der Siebfläche und des Materialtransports	58
5.6.1	Varianten der Siebflächegestaltung	58
5.6.2	Einflussparameter des Materialtransports	61
5.6.3	Einflussparameter der Flockenauflösung	62
5.6.4	Versuchsergebnisse zur Siebraumgestaltung	63
5.6.5	Versuchsergebnisse zum Einfluss grundlegender Betriebsparameter	67
5.7	Optimieren des Antriebs	69
5.7.1	Funktionsanalyse des Kurbeltriebs	70
5.7.2	Konstruktion eines Schwingungsdämpfers	73
5.7.3	Versuchsergebnisse	74
5.8	Schlussfolgerungen für die Modellierung	76
6	Modellentwicklung für den Massestrom in einer Kammschüttel	78
6.1	Modellierung von Masseströmen in Siebmaschinen	78
6.2	Modellierung des Massestroms in einer Kammschüttel	79
6.2.1	Kinematik und Kinetik des Faserflockentransports	79
6.2.2	Schräger Wurf der Faserflocken	84
6.2.3	Berechnung des Massestroms	87
6.3	Bewertung des Massestrommodells	89
6.3.1	Versuchsdurchführung und -ergebnisse	89
6.3.2	Modellvalidierung	90

7	Modellentwicklung für das Trennverhalten von Fasern und Schäben	91
7.1	Modelle zur Beschreibung von Trennprozessen	91
7.2	Modellierung des Trennverhaltens von Fasern und Schäben	92
7.2.1	Grundlagen	92
7.2.2	Grundidee für ein Modell der Faser-Schäben-Trennung	94
7.2.3	Entwicklung eines geometrisch-statistischen Modells	95
7.2.4	Aufbau des geometrisch-statistischen Modells	99
7.3	Ergebnisse und Modellvalidierung	111
8	Simulationsergebnisse mit einem Kammschüttel-Gesamtmodell	115
8.1	Einfluss von Schüttelfrequenz, Maschinenneigung und Schüttelwinkel auf die Schäbenabscheidung	117
8.2	Einfluss der Sieblänge auf die Schäbenabscheidung	119
8.3	Diskussion	120
9	Einsatz des Kammschüttel-Gesamtmodells im Konstruktions- und Entwicklungsprozess	121
9.1	Konstruktionstechnische Überarbeitung der Kammschüttel	121
9.2	Auslegung einer anforderungsgerechten Kammschüttel	121
9.3	Bestimmung der Material- und Betriebsparameter für die Simulation	122
9.3.1	Simulationsergebnisse	125
9.3.2	Weitere Konstruktionsvorgaben	126
9.4	Umsetzung der Konstruktionsvorgaben in einem Prototypen	127
9.5	Fazit	132
10	Fehlerquellen	133
11	Ausblick	135
12	Anhang	136
13	Literatur	154

Symbolverzeichnis

ΔV	m^3	Volumendifferenz
a	m	Schüttelamplitude für Siebmodell
A	m	Faserflockegröße
A_{Durch}	m^2	Durchtrittsfläche einer Sieböffnung (allgemein)
A_{eff}	m^2	effektive Durchtrittsfläche einer Sieböffnung (Modell)
A_f	%	Siebfreifläche
A_{Loch}	m^2	Lochfläche einer Sieböffnung (allgemein)
a_s	m	Sieböffnung bzw. Sieblochdurchmesser
A_w	m^2	Lochfläche einer Sieböffnung (Modell)
b	m	Kurbellänge
b_f	m	Faserdicke
b_k	m	Durchfallweite
b_s	m	Sieb- bzw. Rostbreite
c	m	Zinkenabstand
c_1		Korrekturfaktor
d	m	Schäbendurchmesser
d_{kor}	m	korrigierter Schäbendurchmesser
d_s	m	Lochabstand
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
F_μ	N	Reibkraft
F_B	N	Fliehkraft
F_{BR}	N	Kraft auf die am Zinken haftende Flocke in Wurfrichtung
F_{BT}	N	Fliehkraft auf die am Zinken haftende Flocke (vom Rost abgehoben)
F_G	N	Gewichtskraft
F_v	N	Luftwiderstandskraft
g	m/s^2	Fallbeschleunigung
G	N	Gewichtskraft
h	m	Abstand zwischen Siebebenen/-wänden
h_{FSG}	m	Höhe des Materialstrom auf der Siebfläche in der Kammschüttel
h_{min}	m	Abstand zwischen Zinken und Schüttelrost
K_f		Korrekturfaktor
L	m	Kantenlänge eines Würfels einer Porengröße
L_p	m	Pleuellänge
L_s	m	Sieblänge
L_w	m^3	Lochvolumen
L_z	m	Zinkenlänge
m	kg	Masse
M	Nm	Moment
\dot{m}	kg/h	Massestrom
n		Anzahl der Schüttelkämme
N	N	Normalkraft
P		Gelenkpunkt des Kurbeltriebs
q	m^{-1}	Materialkonstante für Faserflocken
r	m	Kurbelscheibenradius
s		Schäbenanzahl im Siebmodell
t	s	Zeit
t_a		Flächenverhältnis
v	m/s	Geschwindigkeit
w	m	Öffnungsweite einer Pore
\bar{w}	m	mittlere Porengröße
x	m	x-Koordinate
x_0	m	x-Koordinate zum Zeitpunkt $t=0$
y	m	y-Koordinate
z		Anzahl von Siebebenen

ε	1/s	Winkelbeschleunigung
φ	°	Zinkenwinkel
φ_0	°	Phasenverschiebung (Schüttelwinkel der Kämme)
φ_b	°	Schüttelwinkel zum Zeitpunkt des Abwurfs der Faserflocke vom Zinken
φ_{ges}	°	Gesamtschüttelwinkel
φ_{max}	°	Schüttelamplitude
φ_r	°	Rückwärtswurfwinkel
φ_v	°	Vorwärtswurfwinkel
γ	°	Neigungswinkel des Schüttelkanals
γ_b	°	Wurfwinkel
μ		Reibwert
Ω	rad/s	Kreisfrequenz
ρ	kg/m ³	Dichte
ω	1/s ²	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

0	Abwurfzeitpunkt (Zinkenspitze)
a	Amplitude
b	Abwurfzeitpunkt (Flocke)
E	Ebene
f	Faser bzw. Faserflocke
fa	Faserflocke am Prozessbeginn
fe	Faserflocke am Prozessende
FS	Faserstrom
FSG	Faser-Schäben-Gemisch
ges	gesamt
i	Laufvariable
j	Laufvariable
k	Laufvariable
KB	Kammschüttelbereich
LK	Lochklasse
m	Laufvariable
n	Laufvariable
q	Laufvariable
r	Laufvariable
rel	relativ
s	Siebboden im Massestrommodell
s	Schäben
SK	Schäbenklasse
t	Laufvariable
z	Zinken

Abkürzungen

ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BTU	Brandenburgische Technische Universität
MWFK	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur
TM	Trockenmasse

Zusammenfassung

Naturfasern erleben seit etwa 20 Jahren weltweit eine Renaissance. Sie werden erfolgreich zu Bau- und Dämmstoffen und als Verstärkungsfasern in Verbundwerkstoffen für höherwertige Funktionen im Automobil- und Flugzeugbau weiterverarbeitet. Bei jährlich steigender Nachfrage kann der Bedarf an Kurzfasern für industrielle Anwendung durch die einheimischen Produzenten von Hanf- und Flachsfasern nicht gedeckt werden. Naturfasern werden sich in Technik und Wirtschaft aber nur dann langfristig etablieren können, wenn sie die Forderungen nach kontinuierlicher und zuverlässiger Bereitstellung in geforderter, gleich bleibender Qualität und zu wettbewerbsfähigen Preisen erfüllen. Der Landwirt wiederum wird Naturfaserpflanzen nur dann anbauen, wenn er zu anderen Agrarprodukten vergleichbare Deckungsbeiträge erzielt. Die größten Defizite in der gesamten Verfahrenskette liegen derzeit in den Bereichen Faseraufschluss und Qualitätsmanagement. Deshalb müssen die verfahrenstechnischen Prozesse in der Fasergewinnung aus geröstetem und ungeröstetem Hanf-, Flachs- und Ölleinstroh optimiert werden.

Der Entwicklung neuer Anlagenkomponenten am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wurde zunächst eine Betrachtung der ökonomischen Rahmenbedingungen bestehender Aufschlussanlagen vorangestellt, um die geeignete Schwerpunkte für effiziente Modernisierungen zu identifizieren. Gemäß dieser Analyse werden für den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb gegenwärtig folgende Forderungen gestellt: Das eingesetzte Aufschlussverfahren muss sich für die störungsfreie Verarbeitung unterschiedlicher Faserstrohhrohstoffe und -qualitäten bei einem Massestrom von mehr als 2,5 t/h Faserstroh eignen. Die Anlagen müssen im Vergleich zur bestehenden Praxis einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen und gleichzeitig eine gesteigerte Ausbeute an hochwertigen Fasern und Schäben garantieren. Am ATB wurde eine Pilotanlage für vertiefende Untersuchungen zur Naturfasergewinnung aufgebaut. Schlüsselmaschine der Anlage ist eine neuartige Faseraufschlussmaschine, die nach dem Prinzip des Prallaufschlusses arbeitet. Mit dem neuen Aufschlussprinzip und den dargestellten ökonomischen Anforderungen werden auch an alle anderen Verfahrensschritte veränderte Forderungen gestellt. In der vorliegenden Arbeit soll daher ein weiterer zentraler Prozessschritt des mechanischen Trockenaufschlusses, die Faserreinigung detailliert untersucht und am Beispiel einer Kammschüttel für die Reinigung von Hanffasern optimiert werden.

Zunächst wurde hierfür der Verfahrensabschnitt Faserreinigung einer umfassenden Analyse unterzogen. Auf der Basis der für ein leistungsfähiges Reinigungssystem formulierten Anforderungsliste hat sich gezeigt, dass Kammschüttel die besten Voraussetzung für die Erfüllung der technischen und wirtschaftlichen Forderungen haben. Kammschüttel haben sich als kostengünstige Reinigungsmaschinen in der klassischen Langfaserreinigung bewährt, da sie sich durch ein einfaches Maschinenkonzept bei guter Reinigungsqualität auszeichnen. Zur Umsetzung des Maschinenkonzepts in der modernen Kurzfasergewinnung war jedoch eine grundlegende Überarbeitung des Systems erforderlich. Da in der Fachliteratur bisher nur das

grundlegende Wirkprinzip einer Kammschüttel dokumentiert war, wurde für detaillierte Untersuchungen geeigneter Betriebs- und Konstruktionsparameter eine Versuchsschüttel für die Verarbeitung von Hanffaser-Schäben-Gemischen entwickelt und erprobt. Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung einer ersten Reinigungsstufe, mit der sich in einer insgesamt nur zweistufigen Reinigungslinie die aus der ökonomischen Analyse abgeleiteten Anforderungen erfüllen lassen. Dies bedeutet für die Faserreinigung einen Massedurchsatz von mindestens 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch bei einem Restschäbengehalt unter 7 Masse-% und minimalen Faserverlusten von weniger als 5 Masse-% der der Reinigung zugeführten Fasern.

Im Rahmen der Analyse der Reinigung von Hanffasern wurden die Transport- und die Siebprozesse in einer Kammschüttel detailliert untersucht, da in der Fachliteratur hierzu bisher keine Beiträge aus der Faserindustrie und der Forschung bekannt waren. Aufbauend auf diesen Untersuchungen konnten erstmals grundlegende Modelle für den Massestrom und das Trennverhalten von Fasern und Schäben entwickelt und zu einem Kammschüttel-Gesamtmodell zusammengefügt werden. Das Massestrommodell basiert auf den durch die Zinken im Siebraum ausgelösten Wurfprozessen. Unter Berücksichtigung der geometrischen Rahmenbedingungen und der Materialeigenschaften lässt sich die Transportgeschwindigkeit der Faserflocken durch den Schüttelkanal und folglich der Massestrom berechnen. Für das Trennen von Fasern und Schäben wurde ein neuartiges Siebmodell entwickelt. Die Eigenschaften von Faser-Schäben-Gemischen unterscheiden sich erheblich von den in der Literatur der mechanischen Verfahrenstechnik beschriebenen Siebgütern. Ausgehend von diesen Eigenschaften erwies sich ein dreidimensionales geometrisch-statistisches Modell als geeignet für die Modellierung der Schäbenabscheidung aus den Faserflocken.

Das Kammschüttel-Gesamtmodell wurde als Werkzeug für die konstruktionstechnische Überarbeitung dieses Reinigungssystems entwickelt. Durch seinen Einsatz lassen sich auf der Grundlage von wenigen Tastversuchen die Auswirkungen der für die Reinigungsleistung wesentlichen Parameter Schüttelfrequenz und Amplitude sowie Maschineneigung und Sieblänge simulieren. Durch diese den Konstruktionsprozess begleitenden Simulationsrechnungen können nicht nur die Entwicklungszeiten für neue Maschinen verkürzt sondern auch die Entwicklungskosten reduziert werden.

Mit Hilfe der Simulationsrechnungen konnte ein Prototyp einer Kammschüttel entwickelt werden, der verschiedene technische Neuerungen in der Siebraumgestaltung und dem Antrieb aufweist. Durch Variation ausgewählter praxisrelevanter Parameter wurde das bestehende Maschinenkonzept einer Kammschüttel optimiert. Auf Grundlage der Simulationsrechnungen konnten in wenigen Schritten geeignete Konstruktionsvorgaben für die Hauptabmessungen des Schüttelkanals und weitere zentrale Betriebsparameter gefunden werden. Mit der hier im Ergebnis vorgestellten Konstruktion steht für die Reinigung von prallaufgeschlossenen Hanffaser-Schäben-Gemischen eine optimierte Reinigungsmaschine zur Verfügung, die alle auf der Grundlage der Praxiserfahrungen erarbeiteten Anforderungen erfüllt.

1 Einleitung

Hanf- und Flachsfasern haben sich auf der Grundlage der Anbauförderung durch die EU als hochwertiger einheimischer Rohstoff für eine Vielzahl innovativer Produkte z.B. in der Bau- und der Automobilindustrie etabliert [FNR 2000]. Im Jahr 2005 wurden allein in der deutschen Automobilindustrie ca. 19.000 t Naturfasern verarbeitet, davon ca. 1.800 t Hanffasern und 12.200 t Flachsfasern [KARUS et al. 2006, FNR 2006]. Bemerkenswert hierbei ist, dass der gegenwärtige Bedarf der Industrie an hochwertigen Fasern aus einheimischem Anbau nicht gedeckt werden kann. Auf der Grundlage der EU-Altautorichtlinie und moderner Entwicklungen für die konkurrenzfähige Herstellung von Verbundwerkstoffen auf Naturfaserbasis gingen Prognosen im Jahr 2003 noch von einer Steigerung des Bedarfs an Naturfasern auf ca. 70.000 t pro Jahr¹ allein für diese Branche innerhalb der nächsten Jahre aus [KAUP et al. 2003]. Auch wenn sich trotz jährlichem Wachstum diese Prognosen nicht auf derart hohem Niveau erfüllt haben, sind die Naturfasern ein wichtiger Rohstoff nicht nur für die Automobilindustrie. Gefragt sind in den verschiedenen Wachstumsmärkten qualitativ hochwertige Fasern von garantierter gleichbleibender Qualität [MÜSSIG 2001]. Die Bereitstellung dieser Fasern aus einheimischer Produktion ist nur in enger Zusammenarbeit von Landwirtschaft und Faseraufbereitung unter einem übergreifenden Qualitätsmanagement möglich. Zentrale Fragen des Faserpflanzenanbaus [DRESCHER et al. 1997, MASTEL et al. 1998, BÓCSA et al. 2000], zur Röste [HEINEMANN 1995, SCHROTH 1995] und geeigneten Ernteverfahren konnten in den letzten Jahren zufriedenstellend gelöst werden [FNR 1997, Basetti et al. 1998, ISENSEE et al. 1999, GUSOVIUS 2002, MASTEL et al. 2002, PASILA 2004]. Gegenwärtig bestehen die größten Defizite im Faseraufschluss und im Qualitätsmanagement [GUSOVIUS 2006, SCHMID 2006, SEEGER 2006, PECENKA et al. 2006]. Mit den in Deutschland industriell genutzten herkömmlichen Aufschlussverfahren, z.B. in den Anlagen der Hersteller Bahmer, Laroche, Temafa und Demaitere [GSCHOßMANN 1995, MORGNER 1999, POILLET 2000], werden ca. 55% der gesamten Faserkosten im Bereich des Faseraufschlusses verursacht. Trotz der hohen Investitionen von über 2 Millionen Euro arbeiten diese Anlagen nicht störungsfrei und die geplanten Massedurchsätze können nicht realisiert werden. Mit dem schrittweisen Absenken der EU-Beihilfen für den Faserpflanzenanbau und die Erstverarbeitung auf das Getreideniveau stellen sich zusätzliche Herausforderungen an die Anlagenbetreiber. Der Spielraum von Faserstrohpreis und Verkaufspreis für Fasern und Schäben ist gering. Den Landwirten muss ein attraktiver Preis für das Faserstroh gezahlt werden, um die Rohstoffversorgung der Aufschlussanlagen zu sichern. Andererseits ist der erzielbare Verkaufspreis der

¹ für Hanf, Flachs, Sisal, Jute und Kenaf – die klassischen Baumwoll- und Holzfasern bleiben hier unberücksichtigt

Endprodukte aufgrund der Konkurrenz zu den am Markt etablierten Produkten begrenzt [KAUP et al. 2003].

Langfristig wird sich nur dann eine zuverlässige Wertschöpfungskette vom Anbau, über die Faseraufbereitung bis hin zur faserverarbeitenden Industrie entwickeln, wenn die derzeitigen verfahrenstechnischen Probleme in den Faseraufschlussanlagen zufriedenstellend gelöst werden können.

Die Praxiserfahrungen der letzten Jahre im Hanf- und Flachsfaseraufschluss haben gezeigt, dass für die Herstellung hochwertiger technischer Industriefasern neue Verfahren zur Lösung der bestehenden verfahrenstechnischen Probleme gefragt sind [MUNDER et al. 2003, ALEX et al. 2003]. Der Entwicklung neuer Anlagenkomponenten am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wurde zunächst eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bestehender Aufschlussanlagen vorangestellt, um auf der Basis dieser Analyse die Schwerpunkte notwendiger Modernisierungen zu identifizieren. Alle Prozessschritte der Erstverarbeitung wurden am ATB untersucht und teilweise neuartige Lösungen entwickelt. Als Ergebnis dieser Betrachtung und eigener Praxiserfahrungen in einer Pilotanlage zum Aufschluss von Hanf-, Flach- und Ölleinstroh wurden neue Wirkprinzipien und maschinentechnische Lösungen für folgende Prozessstufen erarbeitet und erprobt:

- das Auflösen der Strohballen,
- das Dosieren des Langstrohs,
- das Einkürzen des Strohs und der Fasern auf eine definierte Länge,
- das Entholzen durch Prallaufschluss und
- das Reinigen der Fasern.

Die Hauptkomponenten der Pilotanlage am ATB sind: Ballenauflöser, Metall- und Steinabscheidung, Strohdosierer, Aufschlussmaschine, Stufenreiniger und Horizontalöffner (Abb. 1.1). Schlüsselmaschine der Anlage ist die neu entwickelte Faseraufschlussmaschine, die nach dem Prinzip des Prallaufschlusses arbeitet. Der Massestrom dieser Maschine beträgt bis zu 3 t/h für Hanfstroh [FÜRLLE et al. 2007].

Die Entholzung ist in der Aufschlussmaschine so intensiv, dass Schäben kaum noch mit den Fasern verbunden sind. Dadurch vereinfacht sich die nachfolgende Reinigung erheblich, so dass mit nur einem Stufenreiniger und einem Horizontalöffner der für technische Faseranwendungen geforderte niedrige Schäbengehalt erreicht wird. Üblicherweise sind diese Reinigungseinrichtungen aber auf einen Massestrom von ca. 1000 kg/h begrenzt. Es sind daher dringend leistungsfähigere Verfahren für die Faserreinigung gefragt, die eine störungsfreie, faserschonende und verlustarme Fasergewinnung garantieren.

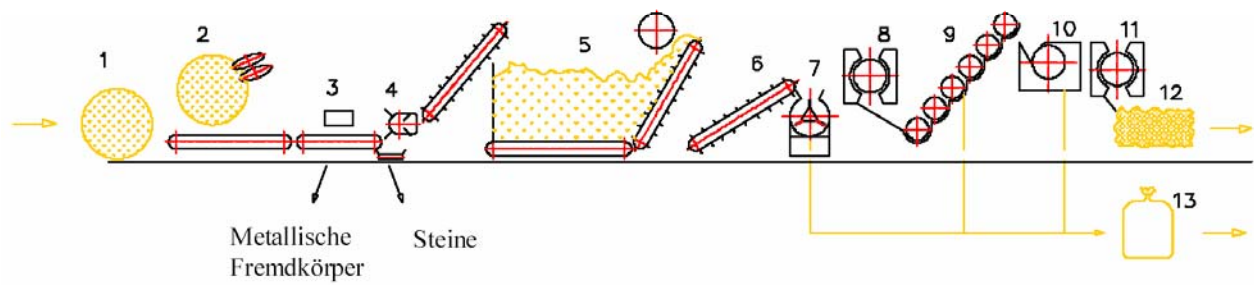


Abb. 1.1: Technologisches Schema der Pilotanlage [FÜLL et al. 2003]

1	Strohballen	6	Steilförderer	11	Kondenser
2	Ballenauflöser	7	Aufschlussmaschine	12	Faserballen
3	Metalldetektor	8	Kondenser	13	Schäben
4	Steinabscheider	9	Stufenreiniger		
5	Dosierer	10	Horizontalöffner		

2 Zielstellung der Arbeit

Die Funktion der Faserreinigung besteht vorrangig im Separieren der Schäben¹ und des Staubs aus den Fasern sowie in der Faserverfeinerung [NÖTZOLD 1969]. Je nach eingesetzter Aufschlusstechnologie (Brecherwalzen oder Hammermühle) muss die Reinigungstrecke auch noch eine weitere Entholzung der Fasern gewährleisten [MORGNER 1999, BRÜNING 2001, POILLET 2000]. Grundsätzlich haben die Arbeitsorgane der in der Faserreinigung eingesetzten Maschinen große Ähnlichkeiten mit den in Mähdreschern üblichen Dresch-, Trenn- und Reinigungseinrichtungen. Trotz dieser Ähnlichkeiten ist jedoch festzustellen, dass Korn-Stroh- und Faser-Schäben-Gemische erhebliche Unterschiede in ihrem Siebverhalten aufweisen. Die Schäben neigen stark zum Verhaken in den Faserflocken und die geringen Unterschiede bez. Dichte und Schwebegeschwindigkeit erfordern eine Modifizierung der bisher genutzten Verfahren. In der klassischen Langfaserreinigung wird die Hauptlast der Faserreinigung meist von Siebmaschinen – so genannten Kammschütteln, Wergschütteln- bzw. Wergschwingmaschinen [MARQUART 1919, SIEBENEICHER 1956] – bewältigt (Abb. 2.1), welche aus einem feststehenden Siebrost mit darüber befindlichen schwingenden Kämmen als Sieb- und Transporthilfe bestehen.

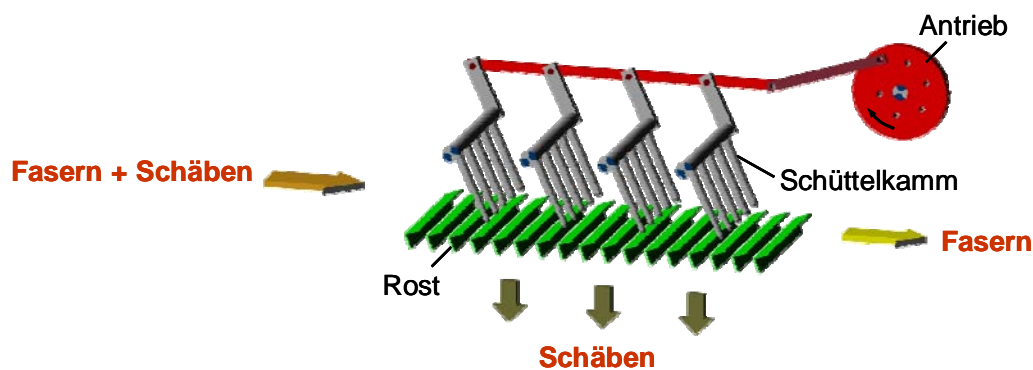


Abb. 2.1: Kammschüttel zur Reinigung von Naturfasern

Kammschüttel haben sich in der Langfaserreinigung bewährt, da sie sich durch ein einfaches und robustes Maschinenkonzept bei guter Reinigungsqualität auszeichnen. Zur Umsetzung des Maschinenkonzepts in der modernen Kurzfasergewinnung war eine Überarbeitung des Systems notwendig. Die gegenwärtig in der Praxis betriebenen Kammschüttel weisen vorwiegend noch den technischen Entwicklungsstand der Hochzeiten der Bastfaserverarbeitung in Europa von vor ca. 50 Jahren auf.

¹ verkleinerte Holzbestandteile der Hanfstängel

Deshalb wurden detaillierte Untersuchungen zur konstruktiven Gestaltung sowie zu günstigen Betriebs- und Reinigungsbedingungen an einer Versuchsschüttel notwendig. Zielstellung der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung einer ersten Reinigungsstufe auf der Grundlage einer Kammschüttel mit einem Massedurchsatz von mindestens 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch bei einem Restschäbengehalt unter 7 Masse-% und minimalen Faserverlusten. Die gesamte Reinigungslinie soll dabei die aktuellen Anforderungen an die Faserqualität in nur zwei bis max. drei Reinigungsstufen erfüllen.

Um dieses Ziel zu erreichen, waren insbesondere folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Analyse des Stands der Technik,
- Erarbeiten der ökonomischen und technischen Anforderungen an die Faserreinigung in leistungsfähigen Aufschlussanlagen zur Kurzfasergewinnung,
- Entwickeln einer Versuchskammschüttel,
- Experimentelle Untersuchungen zur Faserreinigung an der Versuchsschüttel,
- Überarbeiten des Maschinenkonzeptes auf der Grundlage der Praxiserfahrungen aus dem Versuchsbetrieb,
- Analyse und Modellierung des Massestroms durch eine Kammschüttel,
- Analyse und Modellierung des Trennverhaltens von Fasern und Schäben,
- Entwickeln eines Gesamtmodells einer Kammschüttel,
- Anwenden und Bewerten des Gesamtmodells für die Überarbeitung der Maschinenkonstruktion einer Kammschüttel und
- Erstellen eines konstruktiven Entwurfs einer Kammschüttel für den industriellen Einsatz in einer Faseraufschlussanlage mit Prallaufschluss auf der Grundlage von Simulationsrechnungen und der Praxiserfahrungen.

3 Hanf als nachwachsender Rohstoff in Deutschland

Bis ins 19. Jahrhundert bildete Hanf zusammen mit Flachs die Grundlage für die Faserproduktion in Europa. Dabei wurde Hanf aufgrund der hohen Zugfestigkeit seiner Fasern geschätzt. Aus Hanffasern wurden hoch beanspruchte Produkte wie Schiffssegel, Seile und Uniformen hergestellt. Doch nicht nur die Hanffasern wurden verwendet, so dienten die Hanfsamen als hochwertiges Nahrungsmittel und zur Gewinnung von Speise- und Lampenöl. Die im Hanf enthaltene Droge wurde als Schmerz- und Heilmittel genutzt.

Das Ende der Segelschiffahrt läutete gleichzeitig auch den langsamen Niedergang des Hanfanbaus ein, da ein wesentlicher Absatzmarkt für die Hanffaser verloren ging. Gleichzeitig wurden Hanf und Flachs auf dem Textilmarkt von der Baumwolle verdrängt, die wesentlich leichter maschinell zu verarbeiten war. Einen kurzen Aufschwung erlebte der Hanfanbau in Deutschland während der beiden Weltkriege, da es an Importfasern wie Baumwolle fehlte. Mit dem Aufkommen der Kunstfasern jedoch wurde Hanf fast vollständig verdrängt.

Das Interesse in Deutschland an dem nachwachsenden Rohstoff Hanf ist vor ca. 10 Jahren neu erwacht. Ursache hierfür ist einerseits die gestiegene Nachfrage der Verbraucher nach umweltfreundlichen Produkten, die leicht wiederzuverwerten oder problemlos zu entsorgen sind. Andererseits hat auch die Industrie, die nach Alternativen zu fossilen Rohstoffen und Energien forscht, die Hanfpflanze als nachwachsenden Rohstoff mit werkstofftechnisch herausragenden Eigenschaften wiederentdeckt. Die Landwirtschaft profitiert von der gestiegenen Nachfrage und erhofft sich mit neuen Kulturen aus dem Bereich der nachwachsenden Rohstoffe neue Einkommensquellen zu erschließen. Durch die lange Anbaupause zwischen den 1960er und 1990er Jahren ging jedoch das landwirtschaftliche und industrielle Know-how von Hanfanbau und -verarbeitung zum großen Teil verloren [BÖRGER 1926, BRÖCKERS et al. 1995, HESCH et al. 1996].

Es ist also an der Zeit, dem Stand der Technik angepasste Anbau- und Erntetechniken sowie passende Aufschluss- und Verarbeitungsverfahren zu entwickeln, da die traditionellen Technologien nicht mehr konkurrenzfähig sind.

3.1 Die Hanfpflanze

Hanf, *Cannabis sativa*, ist eine einjährige, ursprünglich zweihäusige Pflanze der gemäßigten Breiten (siehe Abb. 3.1). Die Hanfpflanze kann eine Wuchshöhe von bis zu 5 m erreichen.

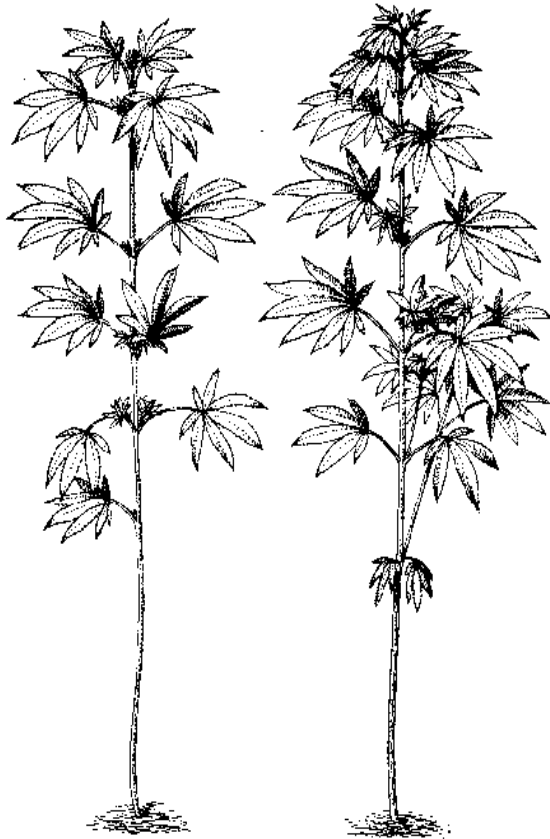


Abb. 3.1: Junge Hanfstängel vor der Blüte
[HERZOG 1927]

Von einer spindelförmigen Pfahlwurzel zweigen zahlreiche, je nach Boden teilweise sehr starke Seitenwurzeln ab. Sie erreichen eine Länge von bis zu 2 m und durchwurzeln den Boden bis in eine Tiefe von über 1 m. Die Pflanze ist in Abhängigkeit von der Wuchsform mehr oder weniger stark verzweigt, im Bestand unterbleibt die Verzweigung in der Regel. Der Stängel trägt in Abständen von 10 bis 40 cm Blätter, die aus 5 bis 11 Einzelblättchen zusammengesetzt sind. Im dichten Bestand, wie Faserhanf auf dem Acker angebaut wird, sind nur noch die Spitzen der Pflanze beblättert. Die Oberfläche der Pflanze ist von Drüsenhaaren bedeckt, welche klebrige Ausscheidungen produzieren. Dieses Harz enthält psychoaktive Substanzen aus der Gruppe der Tetrahydrocannabinoide (THC). Hanf ist in Bezug auf den Pflanzenschutz wenig anspruchsvoll, da er von Krankheiten und Schädlingen kaum

befallen wird. Es wird über einige Pilzkrankheiten und unspezifische tierische Schädlinge berichtet. Diese führen aber praktisch zu keinen Ernteaufschlägen, so dass auf den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verzichtet werden kann. Aufgrund seiner Schnellwüchsigkeit und Konkurrenzkraft unterdrückt Hanf bei dichter Saat in der Regel alle Unkräuter, so dass Pflegemaßnahmen normalerweise nicht nötig sind [MARQUART 1919, HEUSER 1924, HESCH et al. 1996].

Struktureller Aufbau der Hanfstängel

Der grundlegende Aufbau eines Hanfstängels ist in Abbildung 3.2 als Querschnitt durch den Stängel dargestellt. Der Großteil der Biomasse entfällt auf den Holzkern (H). Aus dem den Holzkörper umschließenden Kambrium (K) bilden sich nach innen neue Holzzellen und nach außen primäre und sekundäre Faserzellen (Sklerenchymzellen), sowie Parenchymzellen. Die Bastfaserzellen sind untereinander mit Kittsubstanzen (Lignin, Pektin) als Faserbündel

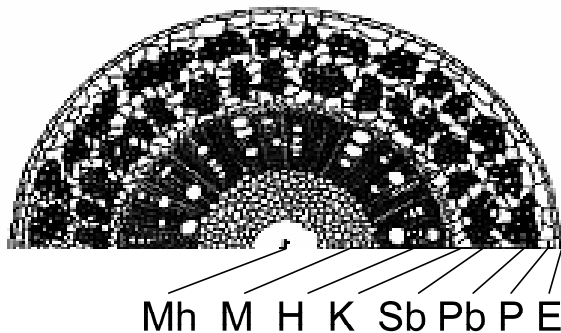


Abb. 3.2: *Querschnitt eines Hanfstängels, oben: 32-fach vergrößert unten:[Hesch et al. 1996, verändert]*

Mh	Markhöhle
M	Mark
H	Holz
K	Kambrium
Sb	Sekundärbastring
Pb	Primärbastring
P	Parenchym
E	Epidermis

Stängels zu bewirken. Die Bastfasern zeigen eine sehr unterschiedliche Ausbildung und sind 5 bis 55 mm lang, während der Durchmesser zwischen 13 und 50 μm liegt [SCHÖNEFELD 1955]. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass die Primärfasern dicker und länger sind als die Sekundärfasern und dass sie stärker miteinander verkittet sind. Die Sekundärfasern hingegen zeigen eine Neigung zu verholzen.

Die technische Hanffaser, wie sie aus dem Hanfstängel gewonnen werden kann, besteht aus einem Verbund von einzelnen Faserzellen, die miteinander verkittet sind und somit

verknüpft. Das Parenchymgewebe ist sehr großlumig¹ und dünnwandig und kann daher seine Form reversibel ändern. Es bildet die Matrix für die hier eingebetteten Primär- und Sekundärfaserbündel (Abb. 3.2) [DRIELING 1999].

Heutige Hanfsorten erreichen einen Faseranteil von bis zu 35 Masse-% (bezogen auf die Trockenmasse) der Pflanze [BÓCSA et al. 2000]. Am äußeren Rand des Bastes, also direkt unter der Epidermis, befindet sich ein Ring von Primärfasern und am inneren Rand ein Ring aus Sekundärfasern.

Diese Kombination aus Bastfasern und Parenchymgewebe verleiht der Hanfpflanze ihre bemerkenswerte Biegefestigkeit bei Wuchshöhen von bis zu 4 m. Die Fasern zeichnen sich durch ihre hohe Zugfestigkeit aus und die elastischen Parenchymzellen sorgen für die notwendige Biegefestigkeit im Verbund. Die primären Bastfasern sind von vornherein in der Pflanze angelegt, wodurch sie in allen Stängelabschnitten vorhanden sind, wenn auch in unterschiedlicher Größe und Dicke. Sie sind in geordneten Gruppen und Bündeln angelegt. Während des weiteren Wachstums der Pflanze werden die Sekundärfasern in einer zweiten Bastschicht angelegt, um eine zusätzliche Stabilität des

¹ Lumen: Hohlraum von Gefäßen

Faserbündel bilden. Die eigentliche Faser besteht hauptsächlich aus Zellulose, enthält aber weitere Stoffe, wie z.B. Pektine und Lignine.

Die absolute Festigkeit der Hanffasern ist sehr hoch, die spezifische Faserfestigkeit¹ bzw. Reißlänge erreicht die Werte von Glasfasern (Abb. 3.3).

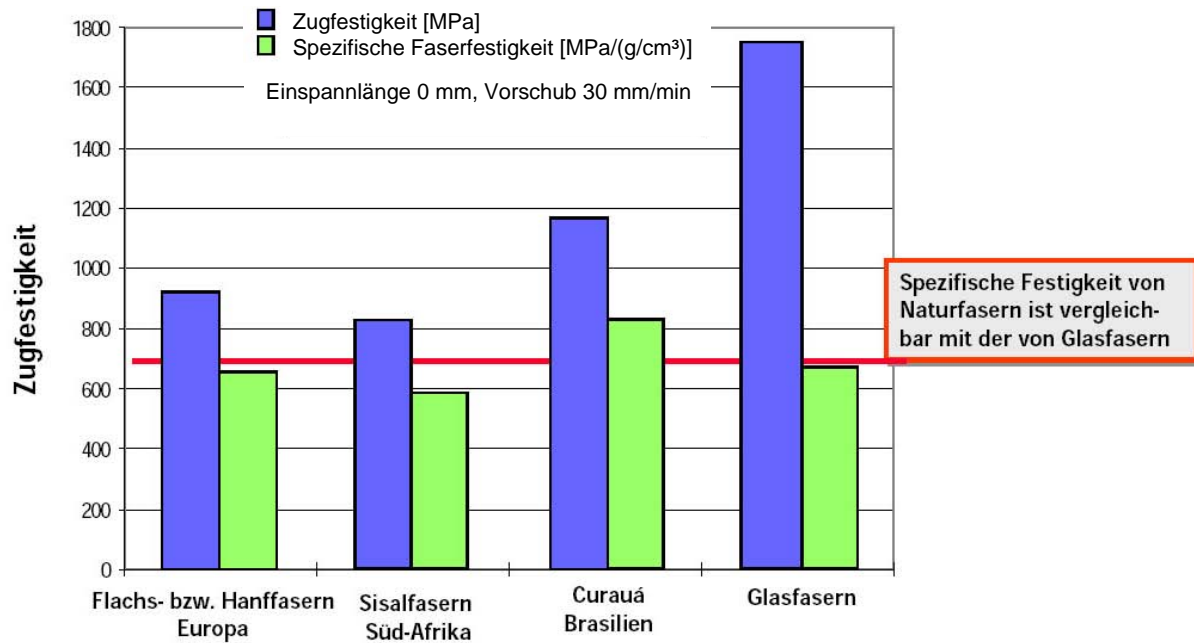


Abb. 3.3: Technische Faserkennwerte, gemessen an Faserbündeln [SCHLÖßLER 2000, verändert]

3.2 Anwendungsbereiche des Hanfes in Deutschland

Im Gegensatz zu anderen Ländern der Europäischen Union, wo die Hanffasern hauptsächlich zur Herstellung von Spezialzellstoffen verwendet werden [FNR 2000], finden in Deutschland, aufgrund des erst 1996 aufgehobenen Anbauverbotes für Hanfes, die Hanffasern vor allem in den Bereichen Geo- und Agrartextilien, Dämmstoffe und Verstärkungsfasern für naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) ihre Anwendung [FNR 2006, KARUS et al. 2006].

In fast allen Anwendungsbereichen wird die Hanffaser vor ihrer Weiterverarbeitung zum Endprodukt zu textilen Gebilden in Form von Vliesen und Filzen durch mechanische oder aerodynamische Verfahren zur Fasernanordnung verarbeitet [GASSAN 1997, KÖHLER et al. 2000, MÜSSIG 2001]. In Abhängigkeit vom Verfahren zur Vlies- bzw. Filzherstellung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Fasereigenschaften (Tab. 3.1). Je nach Anwendungsgebiet werden in den Vliesen und Filzen feine bis grobe Fasern verarbeitet (Tab. 3.2). Für Autoinnenverkleidungen sind zum Beispiel grobe bis mittelfeine Fasern geeignet.

¹ Als spezifische Faserfestigkeit wird die dichtebezogene Zugfestigkeit der Fasern bzw. Faserbündel bezeichnet.

Um möglichst hohe Festigkeitseigenschaften zu erzielen ist eine feinere Faser günstiger. Aber auch der Einsatz gröberer Fasern kann mitunter Vorteile bringen, da diese aufgrund ihrer Struktur besser tränkbar sind als Vliese aus feinen Fasern. Das zur Herstellung der Vliese verwendete Fasergemisch sollte dabei möglichst geringe Schäbenanteile besitzen und staubfrei sein, da Schäben und Staub in dem Verbund zu einer Herabsetzung der Festigkeit führen. Darüber hinaus bindet Staub ggf. eingesetzte Haftvermittler, wodurch sich die Aufwandmenge und demzufolge die Kosten erhöhen.

Während beim Einsatz von Hanffasern in Vliesen Faserlängen von 50 ... 160 mm Verwendung finden, werden Faserlängen unter 10 mm für den Einsatz zur Verstärkung von Kunststoff-Spritzgussteilen verwendet. Günstig ist hierbei vor allem eine möglichst hohe Faserfeinheit, sowie eine raue und verzweigte Faser, da die Haftung zwischen Faser und Matrix aufgrund der geringen Faserlänge entscheidend ist. Faserverstärkte Spritzgussteile werden vor allem als Ersatz für bisher unverstärkte Kunststoffe bei der Innenraumverkleidung von PKWs eingesetzt. Nach Angaben eines Herstellers ist dabei auch ein Schäbenanteil von bis zu 20 Masse-% zulässig, da die Schäben ein günstiges Füllmaterial darstellen.

Bereits in dieser kurzen Zusammenstellung wird deutlich, dass für die sehr verschiedenen Anwendungen der Fasern unterschiedliche Fasereigenschaften notwendig sind. Die entscheidende Anforderung an eine Naturfaser ist die Gleichmäßigkeit der Fasereigenschaften, um reproduzierbare Produkteigenschaften zu erhalten.

Table 3.1: Anforderungen an die Fasern, die aus der Herstellung von Vliesen oder Filzen resultieren (k.A. ... keine Angabe aus der Praxis bekannt)

	mechanische Ordnung der Fasern	aerodynamische Ordnung der Fasern
• Faserfeinheit	≤ 10 tex	≤ 15 tex
• Faserstruktur	raue, verzweigte Fasern günstig keine anhaftenden Schäben	
• Faserlänge	50 ... max. 500 mm verarbeitbar; Anteil überlanger Fasern klein	30 ...max. 500 mm verarbeitbar
• Zugfestigkeit der Faser	hohe Festigkeit günstig	k.A.
• Steifigkeit der Faser	k.A.	k.A.
• Röstgrad, Färbung, Pilzbefall	Pilzbefall möglichst gering	
• Schäbengehalt	bis ca. 5 Masse-%	bis ca. 10 Masse-%
• Staubgehalt	gering	
• Anordnung der Fasern	keine Nissen in den Faserflocken	

Table 3.2: Anforderungen an die Fasern, die aus dem gewünschtem Einsatzzweck resultieren (k.A. ... keine Angabe aus der Praxis bekannt)

	<i>Dämmung</i>	<i>Geotextilien</i>	<i>Faserverstärkung</i>
• Faserfeinheit	möglichst fein, ca. 5 tex	dicke Fasern, ≥ 10 tex	ca. 5 ... 10 tex
• Faserstruktur	verzweigt günstig	k.A.	rau, verzweigt günstig
• Faserlänge	k.A.	< 160 mm	< 10 mm
• Zugestigkeit der Faser	k.A.	hohe Festigkeit, ≥ 500 N/mm ²	hohe Festigkeit, ≥ 500 N/mm ²
• Steifigkeit der Faser	hohe Steifigkeit	k.A.	hohe Steifigkeit, ≥ 35 kN/mm ²
• Röstgrad, Färbung, Pilzbefall	geröstet und ungeröstet, hell, geringer Pilzbefall		
• Schäbengehalt	bis ca. 10 Masse-%		< 3 Masse-%
• Staubgehalt	gering		sehr gering
• Anordnung der Fasern	k.A.	k.A.	keine Nissen in den Faserflocken

3.3 Die mechanische Gewinnung von Hanffasern

Der Rohstoff für die Herstellung von Vliesen und Filzen, aus denen dann letztendlich die fertigen Produkte entstehen, ist die Hanffaser. Es wird somit eine Verarbeitungstechnik benötigt, die eine kostengünstige Ernte der Faserpflanzen und ein anschließendes qualitätsbewahrendes Trennen der Fasern von den restlichen Pflanzenbestandteilen sicherstellt. Bei den in der Praxis üblichen traditionellen Verfahren (Trockenlinie) werden der Hanf und ähnliche Naturfaserpflanzen zum Erntezeitpunkt gemäht, auf dem Feld getrocknet und evtl. auch geröstet. Anschließend wird das Stroh zu Ballen gepresst und für die Weiterverarbeitung in die Faseraufschlussanlage transportiert. Fasern und Schäben können nach erfolgtem Aufschluss getrennt oder in Mischung zu Endprodukten verarbeitet werden. Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch die wichtigsten Schritte vom Hanf zum fertigen Produkt am Beispiel eines naturfaserverstärkten Formpressteils.

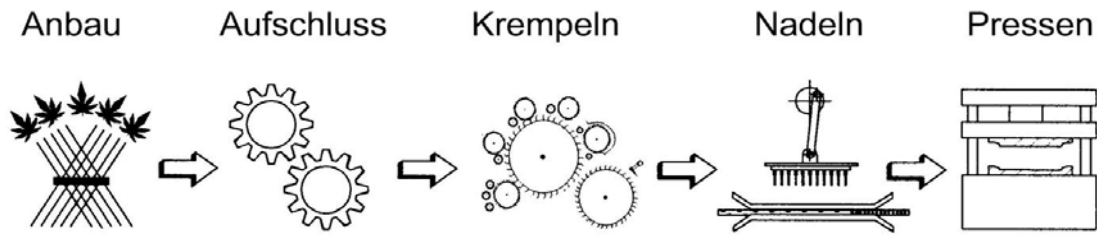


Abb. 3.4: Vom Hanf zum fertigen Produkt aus faserverstärktem Kunststoff
[MÜSSIG 1999]

Eine Alternative zu diesem Verfahren stellt die derzeit in der Entwicklung befindliche Konservatlinie (Feuchtlinie) dar. Hierfür erfolgt die Ernte der Faserpflanzen durch Häckseln aus dem Bestand und einer anschließenden Feuchtkonservierung des Häckselguts in Horizontalsilos, ähnlich wie z.B. bei der Futterernte von Mais. Danach wird durch das neue Verfahren aus dem Konservat direkt, unter Verwendung der gesamten Pflanzenmasse, das gewünschte Endprodukt hergestellt [ATB 1997]. In einer Erweiterung dieses Verfahrens können durch geeignete Siebprozesse aus dem Häckselgut hochwertige Fasern separiert und getrennt weiterverarbeitet werden [ATB 2003]. Die Vorteile dieser Verfahrenslinie bestehen in der Verminderung des Wetterrisikos zum Erntezeitpunkt September und in der Verarbeitung der gesamten Pflanzenmasse zu einem Endprodukt ohne Verluste.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit ordnet sich in die traditionelle Trockenlinie und hier speziell in die Kurzfasertechnologie ein. Die grundlegenden Prozessschritte in einer Anlage zur mechanischen Fasergewinnung sind in Abbildung 3.5 dargestellt.

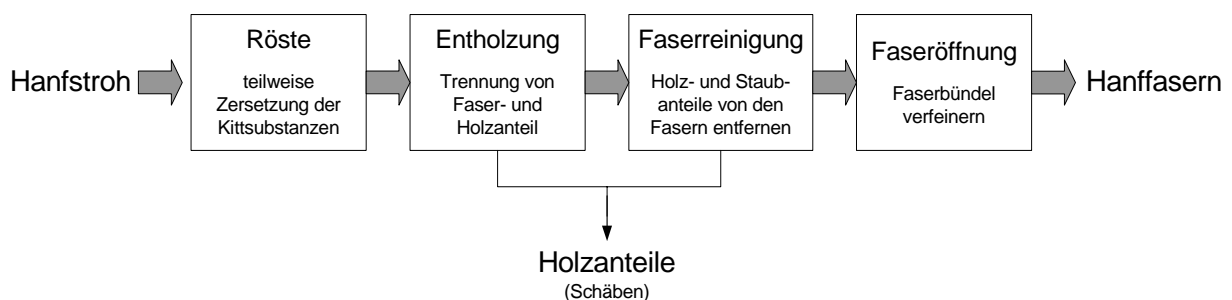


Abb. 3.5: Grundlegende Prozessschritte der mechanischen Hanffasergewinnung

Der Hanffaseraufschluss in einer modernen Anlage zur Kurzfasergewinnung läuft in den derzeitigen Praxisanlagen nach folgendem Schema und üblicherweise mit der in Abbildung 3.6 dargestellten Verfahrenstechnik ab:

- Auflösen der angelieferten Hanfstrohballen (Rund- und/oder Quaderballen) zu einem förder- und dosierfähigen Gutstrom aus Hanfstängeln,
- Entholzen des Hanfstrohs - dabei werden die Hanffasern vom Bast- und Holzanteil getrennt,
- Reinigen der Hanffasern - die noch verbleibenden Bast- und Holzanteile werden von den Fasern entfernt,
- Öffnen der Hanffasern - grobe Faserbündel werden mechanisch in feinere aufgespalten,
- Verpacken der Hanffasern (Pressen von Faserballen),
- Reinigen und Verpacken der Schäben (Abpacken in Säcke).

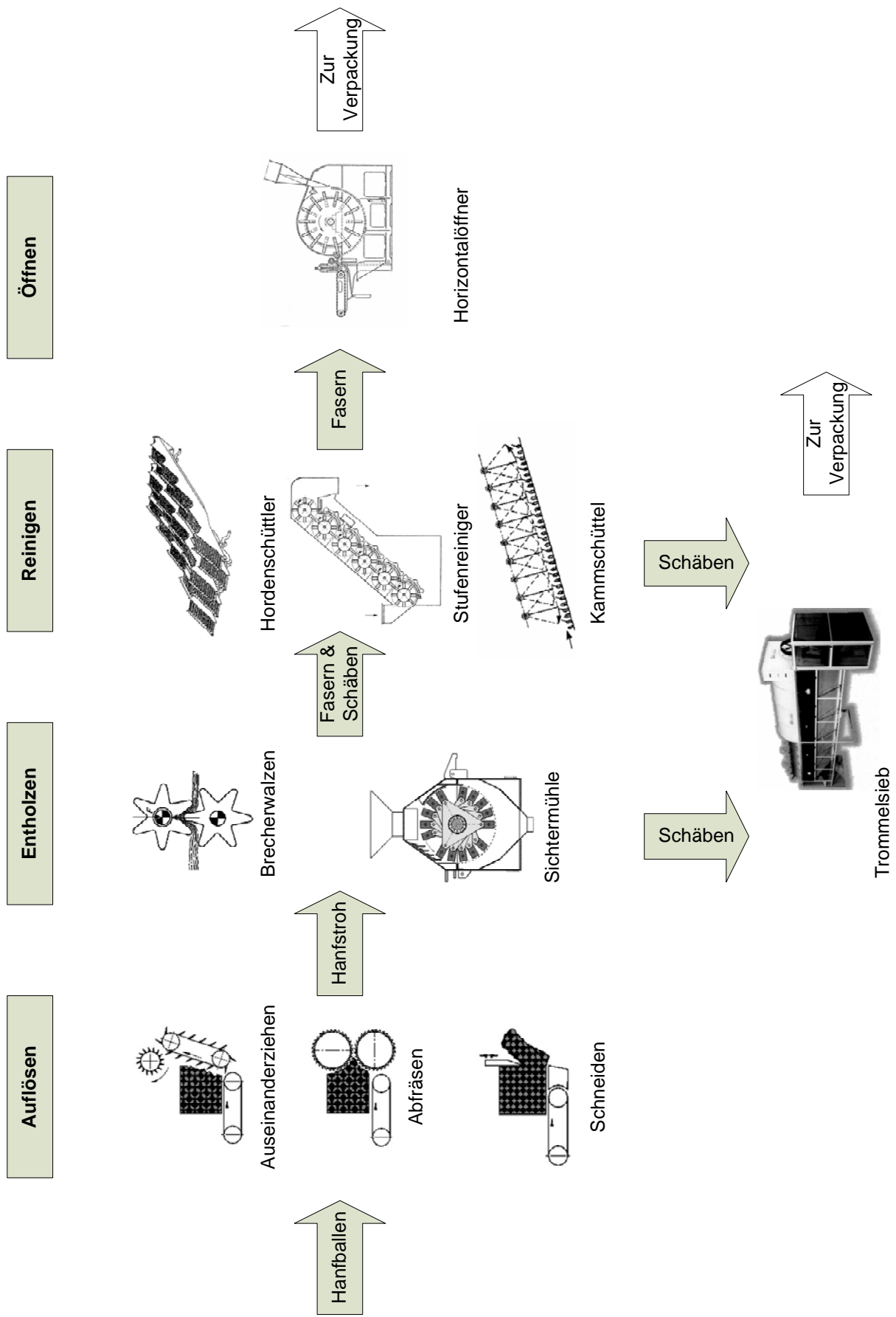


Abb. 3.6: Schema einer Aufschlussanlage zur Hanffasergewinnung

Dabei sind vor allem die Verfahrensschritte „Entholzen des Hanfstrohs“ und „Reinigen der Hanffasern“ von zentraler Bedeutung. Das Entholzen (Abb. 3.7) stellt die Grundlage der Fasergewinnung dar, hierbei werden die Fasern aus dem Stängelverbund herausgelöst. Der Bast wird in einzelne Faserstränge aufgebrochen, und die Holzanteile werden vom Bast getrennt. Dabei nutzt man aus, dass die Hanffasern wesentlich fester und biegsamer als die Holzanteile sind. Dadurch lässt sich unter einer mechanischen Belastung des Hanfstrohs der Bast von den Holzanteilen trennen lässt.

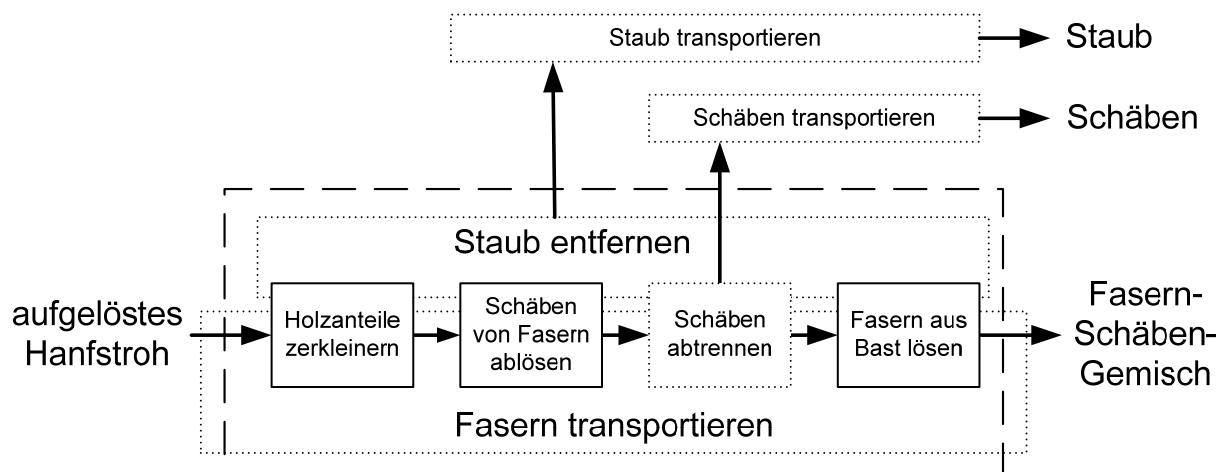
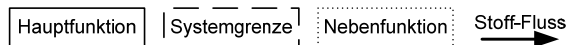


Abb. 3.7: Funktionsstruktur des Entholzens von Hanfstroh (nach [BEITZ et al. 1997])



Das entstehende Faser-Schäben-Gemisch wird dann im nächsten Verfahrensschritt gereinigt (siehe Abb. 3.5 und 3.6). Hierbei werden die noch vorhandenen Bast- und Holzanteile von der Faser entfernt. Um alle Schäben aus dem Materialstrom entfernen zu können, muss der Zusammenhalt der Fasern aufgelöst werden. Der Materialstrom besteht unabhängig von der Entholzungsmethode aus Faserflocken¹ verschiedener Größe, dabei befinden sich viele der Schäben im Innern der Faserflocken.

¹ Der Begriff Faserflocken ist in der Textiltechnik üblich. Dabei handelt es sich in der Regel um Flocken spinnfähiger Fasern, wie z.B. Baumwollfasern. Die Flocken beim Hanffaseraufschluss sind jedoch wesentlich größer und bestehen aus gröberen Fasern.

3.4 Grundlegende Anforderungen an wettbewerbsfähige Aufschlussanlagen

Wie in der Einleitung bereits dargestellt, sind hochwertige Hanf- und Flachsfasern für eine Vielzahl von Produkten wie z.B. für die Bau- und die Automobilindustrie ein gefragter Rohstoff. Doch nur wenn die bestehenden Aufschlussanlagen technisch zuverlässig und wirtschaftlich arbeiten, kann sich die einheimische Faserindustrie langfristig als leistungsfähiger Lieferant von Faserrohstoffen und Halbzeugen etablieren. Grundbedingung für den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb ist, dass zunächst die drängenden verfahrenstechnischen Probleme in den Faseraufschlussanlagen zufriedenstellend gelöst werden [FÜRLI et al. 2007]. Um die für die notwendigen Modernisierungen ökonomisch wirksamsten Einflussparameter zu identifizieren, wurden von verschiedenen Autoren bereits Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen mechanischer Faseraufschlussanlagen durchgeführt [FNR 1997, MUNDER 2002, PECENKA 2004]. Bestätigt durch die Praxiserfahrungen der letzten 10 Jahre lassen sich die grundlegenden Anforderungen an langfristig wettbewerbsfähige Aufschlussanlagen für Hanf wie folgt zusammenfassen:

- Der verarbeitbare Massestrom übersteigt 2 t/h TM Hanfstroh.
- Eine Anlagenverfügbarkeit von mindestens 80% wird im Zwei-Schichtbetrieb erreicht.
- Die Anlagen weisen einen hohen Automatisierungsgrad auf, d.h. der Bedarf an technischem Personal für den Anlagenbetrieb liegt bei ≤ 3 Mitarbeitern.
- Die Anlagen können sowohl geröstetes als auch ungeröstetes Hanfstroh aufschließen.
- Es wird mindestens eine Faserausbeute von 25 % und eine Schäbenausbeute von 55 % erzielt. Die Endprodukte sind von gleich bleibender, reproduzierbarer Qualität.
- Der Gehalt an Schäben in den Fasern liegt nach der Reinigung bei weniger als 2 Masse-%.
- Die Höhe der notwendigen Investitionen für die maschinentechnische Ausstattung liegt bei weniger als 750.000 €t verarbeitbarem Massestrom Hanfstroh. D.h., für eine Anlage mit einem Massestrom von 2,5 t/h TM Hanfstroh sind Investitionen für die Aufschlusslinie von ca. 1,5 Millionen € erforderlich.

3.4.1 Kostenstruktur bestehender Anlagen

Die Modernisierung einer Aufschlussanlage erfordert Investitionen in geeignete Technologien. Da die Höhe der Investitionen für eine Aufschlussanlage ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage ist, soll hier in Anlehnung an [VDI 2235] untersucht werden, welche Anlagenteile die größten Kosten verursachen. Auf diese Anlagenteile muss bei der Überarbeitung von Anlagenkomponenten besonderes Augenmerk gerichtet werden. Als Grundlage dient dazu die Maschinenkostenanalyse einer Temafa-Anlage, wie sie auf der Basis der Daten aus [MORGNER 1999] erstellt werden kann. Die hier dargestellte Anlage kann als eine marktübliche mechanische Aufschlussanlage mit branchenüblicher Ausstattung bezeichnet werden. Um einen grundlegenden Überblick zu ermöglichen, wurden die erforderlichen Investitionen für die einzelnen Maschinen und Ausrüstungen den grundsätzlichen Funktionen des Aufschlussprozesses zugeordnet (Abb. 3.8). Die dargestellten Preisangaben basieren auf dem Preisniveau von 1999. Auf eine Berücksichtigung von jährlichen Teuerungsraten kann hier verzichtet werden, da das Ziel dieser Anlagenkostenanalyse im Vergleich der relativen Kosten der einzelnen Komponenten liegt und Aussagen über den aktuellen Endpreis der Anlage hierfür nicht erforderlich sind. Ebenso haben sich die Art und die Zusammenstellung der eingesetzten Komponenten in den Anlagen, welche seitdem in Europa errichtet wurden, nur geringfügig und damit ohne signifikanten Einfluss auf die Kostenstruktur geändert.

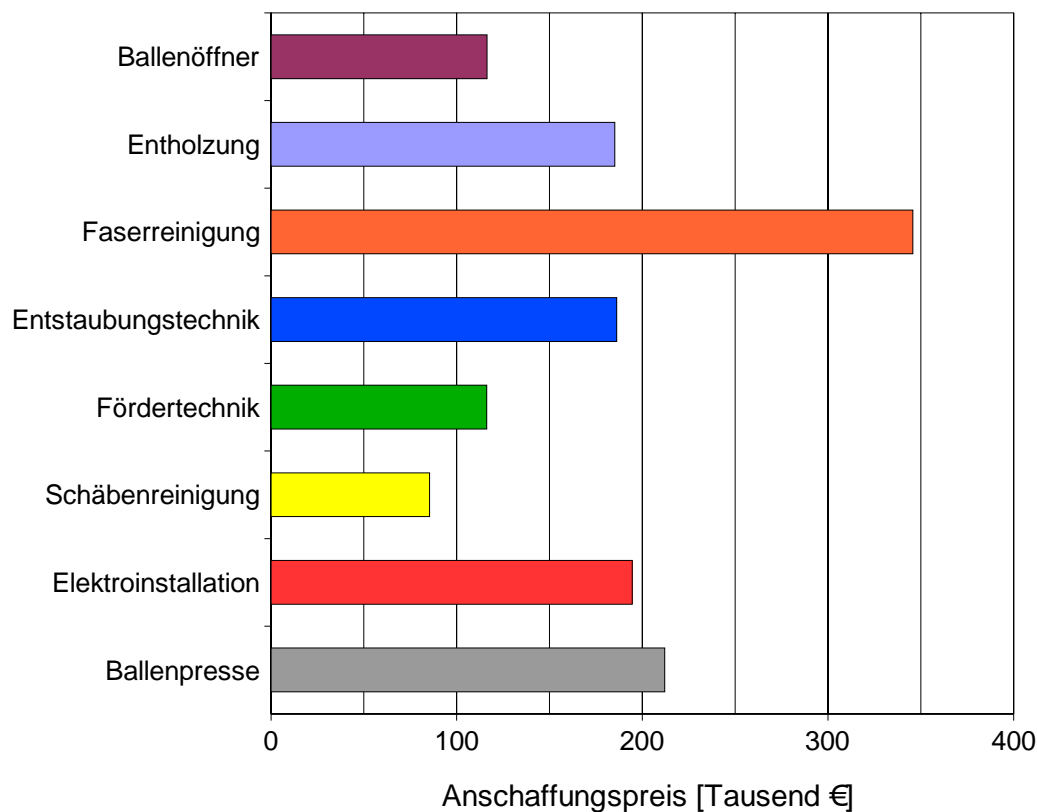


Abb. 3.8: Kostenstruktur der Temafa-Anlage nach Funktionen geordnet

In der untersuchten Aufschlussanlage verursacht die Reinigung die höchsten Kosten, gefolgt von der Ballenpresse und der Elektroinstallation. Auch die Lufttechnik für die notwendige Entstaubung sowie die Entholzungseinrichtung verursachen erhebliche Kosten. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Kosten der verschiedenen Funktionsbereiche auf unterschiedliche Art und Weise zustande kommen. So werden die Kosten für Ballenöffnung und Verpackung (Ballenpresse) durch jeweils nur eine, die Kosten der Entholzung durch nur zwei teure Einzelmaschinen hervorgerufen. Demgegenüber beruhen die hohen Kosten der Faserreinigung auf einer Anzahl von 11 (preiswerteren) Maschinen (Abb. 3.9). Dabei sind Pedalschüttel¹, Kammschüttel und LIN-Reiniger (Firmenbezeichnung für eine Schwingturbine) jeweils dreimal vorhanden. Die teuersten Einzelposten stellen die beiden Öffner dar, die teuerste Maschinengruppe stellen die LIN-Reiniger.

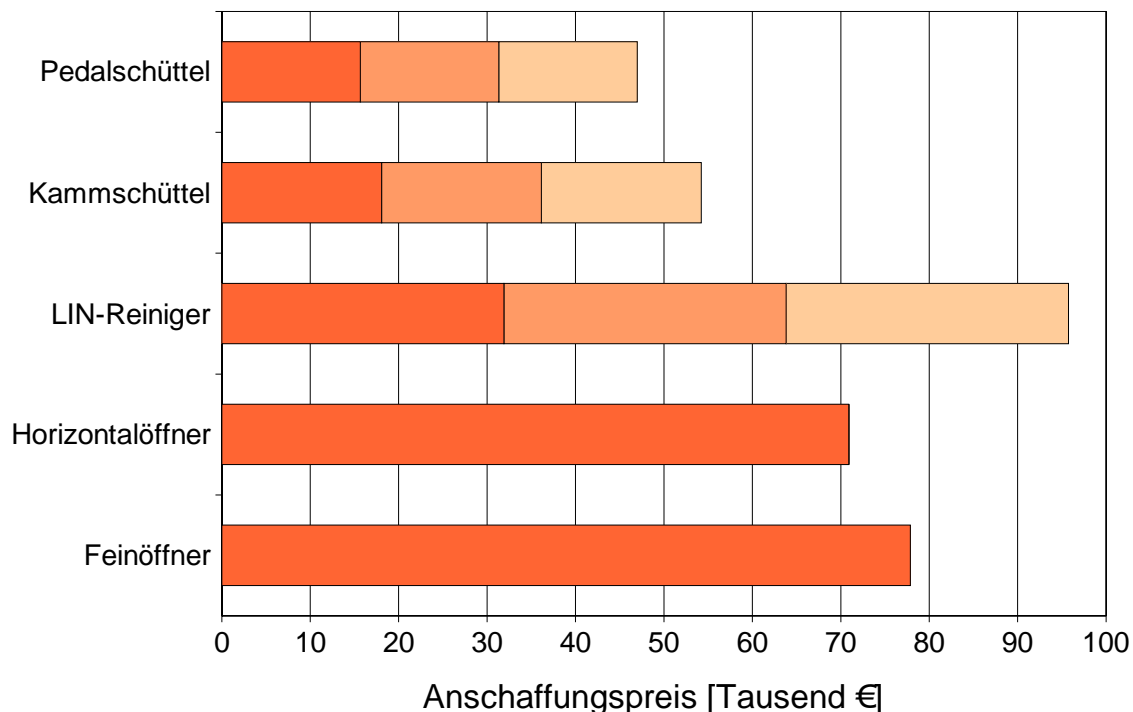


Abb. 3.9: *Kostenstruktur der Reinigung der Temafa-Anlage
(eine Unterteilung der Balken bedeutet, dass die Maschinen mehrfach
vorhanden sind)*

Aufgrund der Kostenstruktur kann man schließen, dass die Suche nach einem neuen Anlagenkonzept vor allem auf eine Effektivierung der Reinigung abzielen sollte, um so Investitionskosten einzusparen. Hier scheint es angeraten, Verfahren einzusetzen oder zu entwickeln, in denen die Funktionalität der Einzelmaschinen oder die geeignetere Zusammenstellung mehrerer Maschinen eine höhere Effektivität erlauben. Somit könnte die Anlage mit weniger Einzelmaschinen auskommen. Für die anderen Funktionen ist es dagegen vor allem wichtig, die Kosten der eingesetzten Maschinen gering zu halten.

¹ üblicherweise sind dies modifizierte Hordenschüttler aus Mähreschern

3.4.3 Ökonomische Zielstellungen für effiziente Aufschlussanlagen

Auf der Basis der ausgewerteten Praxiserfahrungen sowie der Analyse ökonomischer Anforderungen und bestehender Kostenstrukturen können für die Modernisierung mechanischer Aufschlussanlagen für die Gewinnung von technischen Kurzfasern folgende Zielstellungen aufgestellt werden:

- Die Anlage muss für den Aufschluss von geröstetem und ungeröstetem Hanf-, Flachs- und Ölleinstroh geeignet sein. Der Eingangsmassestrom muss mehr als 2,5 t TM Faserstroh pro Stunde bei einer Anlagenverfügbarkeit von mindestens 80 % betragen.
- Durch eine klar strukturierte Anlagenkonzeption auf der Grundlage möglichst einfacher Komponenten wird eine hohe Anlagenverfügbarkeit garantiert. Hierfür müssen weniger Maschinen präzise getrennte Funktionen mit reproduzierbarer Qualität erfüllen. Das Anlagenkonzept ermöglicht einen hohen Automatisierungsgrad bei minimalen Personalkosten.
- Die modernisierte Reinigungslinie muss aus nur zwei Reinigungsstufen bestehen, um eine hohe Anlagenwirtschaftlichkeit zu garantieren. Hierdurch werden sowohl der Anschaffungspreis als auch die Anzahl der Störquellen erheblich gesenkt. Die Faserreinigung ist von entscheidendem Einfluss auf die Produktqualität (Preis der Endprodukte), die Ausbeute, die Zuverlässigkeit des Anlagenbetriebs und den verarbeitbaren Massestrom der Gesamtanlage. Daher muss sie durch wenige Wirkprinzipien und eine klare Funktionsstruktur gekennzeichnet sein, die eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit garantieren.
- Das eingesetzte Aufschlussverfahren muss sich für die störungsfreie Verarbeitung unterschiedlicher Faserstrohrohstoffe und –qualitäten eignen. Der Aufschluss muss in diesem Verfahrensabschnitt weitgehend vollständig erfolgen, um die sich anschließende Reinigung zu entlasten.

4 Die Faserreinigung

4.1 Aufgabe und Funktionsstruktur der Faserreinigung

Nach dem Entholzen¹ des Faserstrohs (Abb. 3.6 und 3.7) liegt ein Gemisch aus Fasern, Schäben und Staub vor, dessen Anteile je nach Entholzungsmethode variieren können. Die Faserreinigung hat die Aufgabe, die in der Entholzung von den Fasern getrennten Schäben aus dem Materialstrom zu entfernen. Diesen Prozess als Faserreinigung zu bezeichnen ist üblich und wird beibehalten, obwohl er scheinbar eine Trennung der Fasern vom „Abfall“ beschreibt. Da die Schäben jedoch ein für die Anlage ebenso wichtiges Endprodukt wie die Fasern darstellen, wäre der Begriff „Separieren“ nicht nur aus verfahrenstechnischer Sicht korrekter.

Das Öffnen der Fasern² wird oft mit unter diesem Punkt zusammengefasst. Dies erklärt sich daraus, dass in den realen Maschinen eine gewisse Überschneidung der Funktionen vorliegt - die Reinigungsmaschinen bewirken auch ein Öffnen der Fasern, die Öffner führen auch noch eine Reinigung durch. Auch die eingesetzten Wirkungsprinzipien gleichen sich zum Teil. Da die Kernaufgabe jedoch jeweils eine andere ist, wird das Öffnen der Fasern hier nicht detailliert behandelt.

Je nach Art und Güte der Entholzung sind die Schäben mehr oder weniger vollständig von den Fasern abgetrennt. Viele der Schäben befinden sich im Innern der Faserflocken. Versucht man die Schäben per Hand auszuschütteln, stellt man fest, dass diese Schäben ohne ein „Auseinanderzupfen“ nicht zu entfernen sind. An den Fasern haftende Schäben lassen sich nur durch „Abkämmen“ oder „Abziehen“ von den Fasern trennen. Um die Fasern und die Schäben zu separieren, müssen also zuerst die noch an den Fasern anhaftenden Schäben abgetrennt werden. Um alle Schäben aus den Faserflocken entfernen zu können, muss der Zusammenhalt der Fasern aufgelöst werden. Auch für die Beseitigung des enthaltenen Staubes ist die Auflockerung des Materials vorteilhaft.

Es ergibt sich hieraus folgende **Funktionsstruktur** [BEITZ et al. 1997] für die **Faserreinigung** (Abb. 4.1):

Hauptfunktionen:

- Schäben von Fasern abtrennen;
- Zusammenhalt der Faserflocken auflösen durch
 - auflockern,

¹ Häufig wird dieser Prozessschritt alleine auch als Aufschluss bezeichnet.

² Korrekterweise müsste auch hier von Faserbündeln gesprochen werden (vgl. Kap. 3.1). Da man üblicherweise in der Praxis vereinfachend von Fasern spricht, wird dies hier beibehalten.

- umschichten,
- auseinanderziehen;
- Schäben und Fasern separieren.

Nebenfunktionen:

- Material transportieren,
- Staub entfernen.

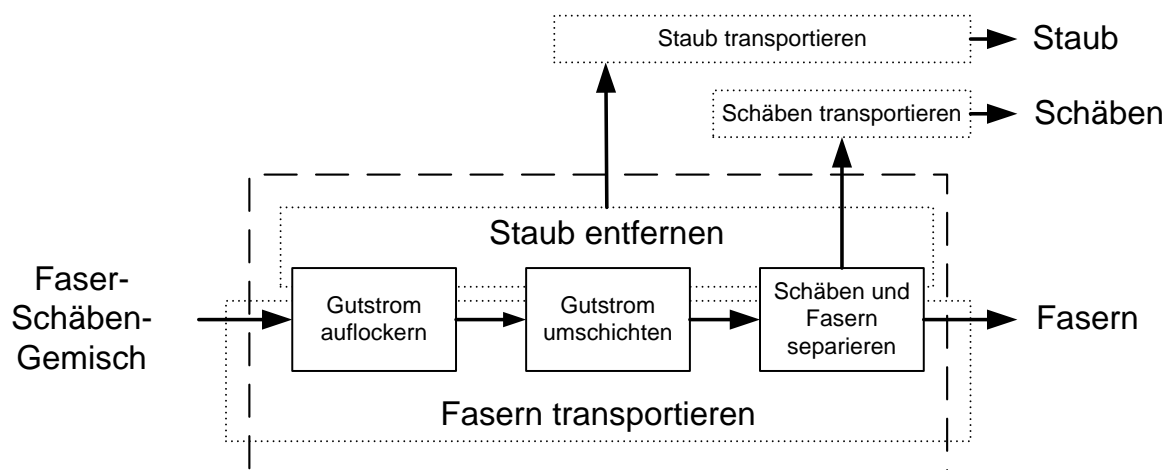
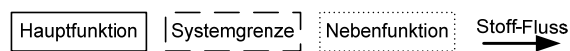


Abb. 4.1: Funktionsstruktur des Reinigens von Hanffasern



4.2 Eigenschaften des Eingangsmaterials

Die konkrete Zusammensetzung des nach der Entholzung vorliegenden Faser-Schäben-Gemischs hängt von einer Vielzahl von Einflussparametern ab [BÓCSA 2000, GUSOVIUS 2002]. Die wesentlichsten sind:

- das Entholzungsverfahren,
- der Röstgrad,
- die Hanfsorte,
- das Ernteverfahren und die Lagerbedingungen sowie
- der Feuchtegehalt des Hanfstrohs bei der Verarbeitung.

Für die spätere Modellierung der Reinigung von Hanffaser-Schäben-Gemischen war zu klären, welche Bedeutung die Materialparameter Faserfeinheit, Röstgrad, Faser- und Schäbenlängenverteilung als Eingangsgröße für die Modellierung haben. Diese Materialparameter unterliegen erheblichen naturgemäßen Schwankungen. Da ihre Bestimmung mit

einem hohen Analyseaufwand verbunden ist [DRIELING 1999, MCALISTER 2001, VOLLHEIM et al. 2001, WILKERSON et al. 2001], muss es das Ziel sein, ein Modell mit möglichst wenigen grundlegenden Parametern zu entwickeln. Der Schwerpunkt der folgenden Darstellungen liegt daher zunächst auf einer grundlegenden Zusammenstellung der üblichen Mittelwerte relevanter Materialparameter.

Bei den üblichen Entholzungsverfahren mit Brecherwalzen, Hammermühlen und Siehtmühlen wird in der Regel ein Teil der Schäben bereits bei der Entholzung entfernt. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde mit der am ATB entwickelten Maschine zum Prallaufschluss, einer Art Siehtmühle, entholztes Hanfstroh verwendet (Abb. 4.2). Ein wesentlicher Vorteil dieser Aufschlussmaschine ist, dass bis zu 50 Masse-% der Schäben sowie große Anteile an Staub und Verunreinigungen bereits bei der Entholzung abgeschieden werden [Munder et al. 2003]. Darüber hinaus ist die Entholzung in der Aufschlussmaschine so intensiv, dass die Fasern als nahezu vollständig entholzt angesehen werden können. Hierdurch vereinfacht sich die nachfolgende Reinigung erheblich, da nur noch im eigentlichen Sinne gereinigt (separiert) und nicht mehr „nachentholzt“ werden muss.

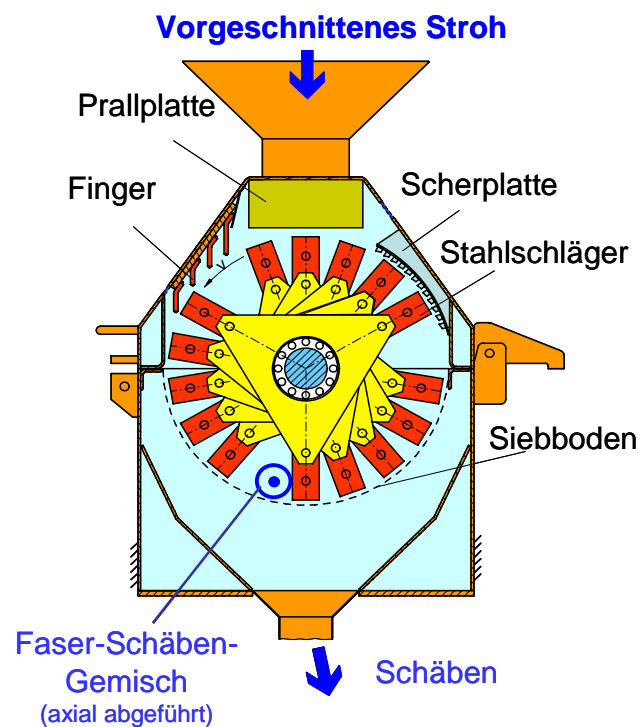


Abb. 4.2: ATB-Aufschlussmaschine

Nach der Aufschlussmaschine liegen die Fasern in Form von Flocken vor. Die Fasern befinden sich in den Flocken in Wirrlage und sind locker miteinander verknäuel. Die Schäben werden in den Hohlräumen der Flocken eingebettet und bilden ein Faser-Schäben-Gemisch (Abb. 4.3). Abhängig von den Vorsystemen haben die Fasern eine unterschiedliche Länge. Wurde das Hanfstroh bei der Ballenauflösung nicht stark eingekürzt, haben die

Faserbündel nach der Reinigung eine mittlere Länge von 4 bis 15 cm [FÜRLI et al. 2007]. Der Materialstrom, welcher der Reinigung zugeführt wird, besteht unabhängig von der Entholzungsmethode nicht aus einem kontinuierlichen Band, sondern aus Faserflocken unterschiedlicher Größe.

Typische Materialparameter der für die hier vorgestellten Untersuchungen eingesetzten Faser-Schäben-Gemische sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die textiltechnischen Faserkennwerte Länge und Feinheit wurden nach den in [DRIELING 1999, MÜSSIG 2001, DIN EN ISO 1973] und [DIN EN ISO 5079] beschriebenen branchenüblichen Methoden ermittelt. Die massegewichteten Mittelwerte der Faserlängen der untersuchten Rohstoffe lagen im Bereich von 70 bis 120 mm bei einer Faserfeinheit von 14 bis 19 tex. Die breitengewichteten Mittelwerte der Schäbendurchmesser lagen bei 2 bis 3 mm bei einer mittleren Schäbenlänge von 5 bis 15 mm. Wie aus Tabelle 4.1 ersichtlich, liegen die Werte der Faserlängen und -feinheiten der hier untersuchten Faser-Schäben-Gemische meist im oberen Wertebereich handelsüblicher Fasern. Da das Material unmittelbar nach dem Aufschluss entnommen wird, sind die Fasern in diesem Prozessabschnitt häufig noch etwas länger und von geringerer Faserfeinheit. Erst nach der abschließenden mechanischen Feinreinigung, z.B. in einem Horizontalöffner, werden die Werte handelsüblicher Fasern erzielt. Zum Vergleich wurden deshalb im Anhang ausgewählte Ergebnisse der Faserfeinheitsmessung (Abb. A4.3) von Fasern dargestellt, die nach der Reinigung auf einer Kammschüttel mit einem Horizontalöffner zu handelsüblicher Qualität verfeinert wurden.



Abb. 4.3: Hanffaser-Schäben-Gemisch

Weitere Daten zu den in diesen Gemischen enthaltenen Fasern und Schäben sind in den Tabellen 4.2 und 4.4 zusammengefasst. Da das Sieb in einer Reinigungsmaschine je nach Siebmaterial und –struktur dem Stoffstrom über den Siebboden erheblich beeinflussen kann, wurden auch die Reibwerte der hier verwendeten Siebtypen in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.1: *Materialparameter der eingesetzten Faser-Schäben-Gemische aus aufgeschlossenem Hanfstroh*

Parameter	typischer Wertebereich	Anmerkungen / Messmethode
Schäbengehalt	40 ... 60 Masse-%	gravimetrisch nach manuellem Sortieren
Schüttdichte	45 ... 65 kg/m ³	gravimetrisch
Mittlere Faserlänge:		Material der Versuche ¹ C 2 ... F 1
längengewichtet	40 ... 59 mm	manuell ermittelt
massegewichtet	70 ... 120 mm	
Variationskoeffizient	94 ... 129 %	
Mittlere Faserfeinheit	14 ... 19 tex	gravimetrisch ²
Standardabweichung	3,1 ... 10,7 tex	
Mittlerer Schäbendurchmesser		Material der Versuche C 2 ... F 1
breitengewichtet	2 ... 3 mm	Größen- und Längenverteilung, manuell ermittelt, Analysesieb und Fibreshape ³
massegewichtet	4 ... 6 mm	
Variationskoeffizient	55 ... 74 %	
Mittlere Schäbenlänge	5 ... 15 mm	
Standardabweichung	2,2 ... 4,7 mm	
Schäbendichte	245 ... 265 kg/m ³	gravimetrisch
Feuchtegehalt	12 – 18 %	Trocknungsversuch, Sorptionsisotherme
Röstgrad	leicht ... mittel	Erfahrungswert

¹ siehe Versuchsplan Tabelle 5.2 (Kapitel 5.5.1)

² Messmethode gemäß [DRIELING 1999] und [MÜSSIG 2001]

³ Bildanalyzesystem der Fa. IST, Vilters (Schweiz), Programmversion Fibreshape 4.5 [Schmid 2006]

Tabelle 4.2: Materialparameter der Fasern aus den Faser-Schäben-Gemischen aus aufgeschlossenem Hanfstroh

Parameter	typischer Wertebereich	Anmerkungen / Messmethode
Faserdichte ¹	1200 ... 1400 kg/m ³	Messen des verdrängten Flüssigkeitsvolumens
Faserflockendichte nach der Reinigung	6 ... 12 kg/m ³	manuelle Volumen- und Gewichtsbestimmung
Flockenauflösekraft	15 ... 18 N	Zugversuch
Zugfestigkeit	400 ... 700 N/mm ² resp. 30 ... 50 cN/tex	[DIN EN ISO 5079]
Schwebegeschwindigkeit		Sedimentationsversuch
Faserlänge 10 .. 200 mm	0,79 ... 0,83 m/s	
Faserlänge 200 .. 400 mm	0,7 ... 0,75 m/s	
Schwebegeschwindigkeit		Sedimentationsversuch
Faserflocke (5 ... 15 g)	2,55 ... 2,65 m/s	

Tabelle 4.3: Reibwerte von Fasern aus den Hanffaser-Schäben-Gemischen aus aufgeschlossenem Hanfstroh

Werkstoffpaarung	Reibwert (Gleitreibung)	Anmerkungen / Messmethode
<i>glatte Oberflächen</i>		
Hanffaser - Aluminium	0,38 ... 0,55	Ringschergerät
Hanffaser - Kupfer	0,43 ... 0,54	Ringschergerät
Hanffaser - Stahl	0,39 ... 0,48	Ringschergerät
Faserflocke ² - Stahl	0,48 ... 0,57	geneigte Ebene
<i>Siebstrukturen</i>		
Faserflocke -Kupferrost	0,5 ... 0,55	geneigte Ebene
Faserflocke - Lackierter Winkelrost	0,65 ... 0,75	geneigte Ebene
Faserflocke – Quadratlochblech Qg 25-30 (Stahl)	0,89 ... 1,09	geneigte Ebene
Faserflocke – Rundlochblech Rv 20-28 (Stahl)	0,74 ... 0,83	geneigte Ebene
Faserflocke –Wellengitter Wg 3/30-30 (Stahl)	1,39 ... 1,63	geneigte Ebene

¹ Vereinfacht wird hier, wie in der Praxis üblich, die an Faserbündeln ermittelte Dichte als Faserdichte bezeichnet.

² Die hohen Gleitreibungswerte für Faserflocken beruhen darauf, dass die im Versuch auf der geneigten Ebene ermittelbaren Werte durch Formschluss bzw. Deformationsarbeit der Flocken mit der Oberflächenstruktur stark überlagert werden.

Tabelle 4.4: Materialparameter der Schäben aus den Faser-Schäben-Gemischen aus aufgeschlossenem Hanfstroh

Parameter	typischer Wertebereich	Anmerkungen / Messmethode
Schwebegeschwindigkeit		Sedimentationsversuch
Schäbendurchmesser 0 ... 1 mm	1,1 ... 1,8 m/s	
Schäbendurchmesser 1 ... 2,8 mm	1,9 ... 2,4 m/s	
Schäbendurchmesser 2,8 ... 8 mm	2,5 ... 3,0 m/s	
Schäbendichte	250 ... 330 kg/m ³	lufttrocken
Schüttdichte	110 ... 170 kg/m ³	lufttrocken, stark abhängig von der Schäbengröße

Abbildung 4.4 zeigt eine für die hier verwendeten Rohstoffe typische massebezogene Faserlängenverteilung mit einer mittleren Faserlänge von ca. 9 cm. Die massengewichtete Darstellungsweise wurde gewählt, da für die spätere Modellierung die Bezugsgröße Masse sich als besonders geeignet erwiesen hat. Eine weitere Faserprobe wurde in der für die Partikelanalyse typischen Darstellung der Verteilung der Faserlängen im Wahrscheinlichkeitsnetz anzahlgewichtet (Abb. A4.1) und massengewichtet (Abb. A4.2) im Anhang aufgeführt. Der anzahlgewichtete Mittelwert der Faserlänge liegt hier bei 4 cm, der massengewichtete Mittelwert bei 9 cm.

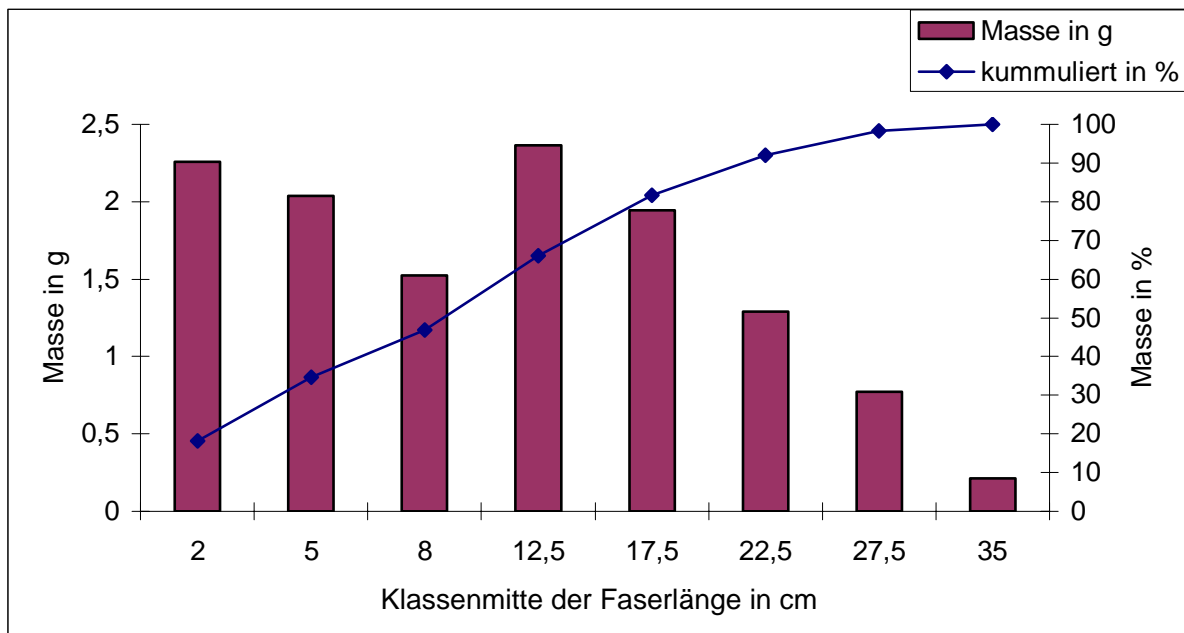


Abb. 4.4: Faserlängeverteilung von gerösteten Hanffasern (Faserprobe aus Versuch¹ C 2)

¹ siehe Versuchsplan Tabelle 5.2 (Kapitel 5.5.1)

In Abbildung 4.5 sind die massebezogenen Verteilungen der Schäbendurchmesser verschiedener untersuchter Faser-Schäben-Gemische dargestellt, wie sie mittels Siebanalyse ermittelt wurden. Auch hier wurde eine für die spätere Modellierung geeignete massebezogene Darstellung gewählt. Eine Darstellung einer manuell weiter untergliederten Verteilung der Schäbendurchmesser im Wahrscheinlichkeitsnetz ist als Abbildung A4.4 im Anhang exemplarisch aufgeführt. Bei allen Schäbenproben handelt es sich um geröstetes Material, das unter ähnlichen Aufschlussbedingungen erzeugt wurde. Wie aus Abbildung 4.5 ersichtlich, unterliegt die Verteilung der Schäbendurchmesser insbesondere in den Partikelgrößenklassen großer Durchmesser (> 4 mm) erheblichen natürlichen Schwankungen (Variationskoeffizient 24 bis 49 %).

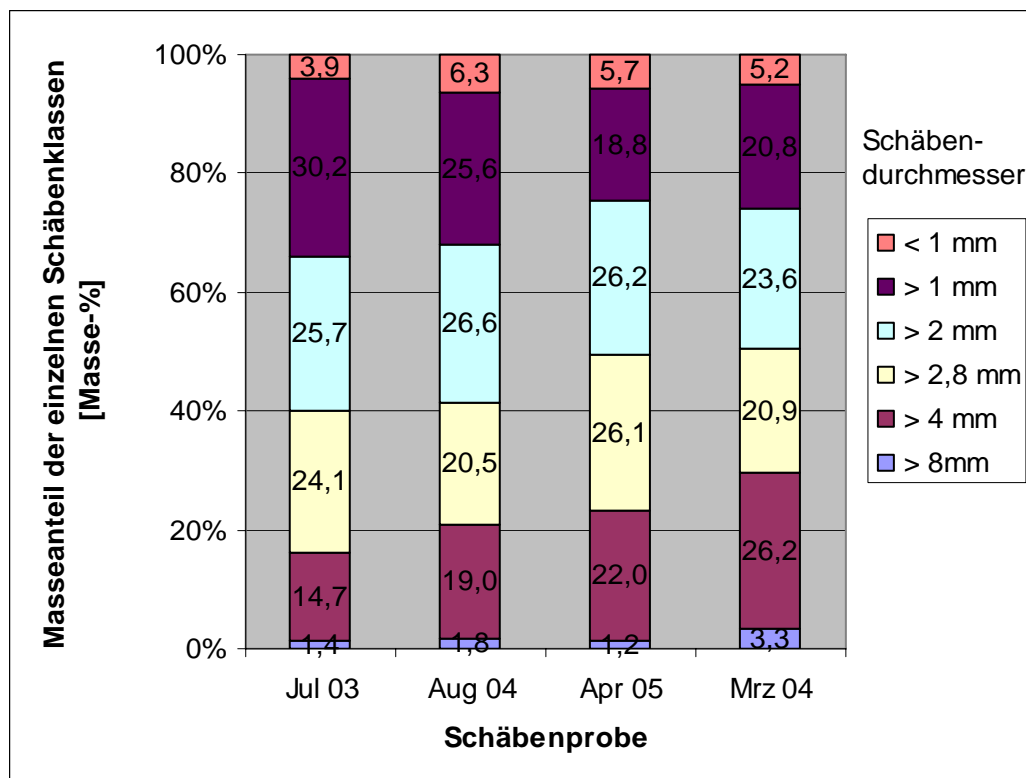


Abb. 4.5: Einteilung der Schäbenproben in Durchmesserklassen
(Proben aus den Versuchen¹ C 2 ... F 1)

¹ siehe Versuchsplan Tabelle 5.2 (Kapitel 5.5.1)

4.3 Stand der Technik in der Faserreinigung

4.3.1 Aufbau typischer Aufschlussanlagen und Reinigungslinien

In den gegenwärtig in Deutschland betriebenen Praxisanlagen der Hersteller AKE-Innotech, Bahmer, Demaitere, Van Dommele, Laroche und Temafa kommen bis zu elfstufige Reinigungslinien zu Einsatz (Abb. 4.6 bis 4.8). Diese sehr kostenintensiven Reinigungslinien sind meist Kombinationen aus Hordenschüttlern, Schwingturbinen, Kammschütteln, Stufenreinigern und Feinöffnern. Die Linien sind aufgrund ihrer Komplexität und der eingesetzten Technologien auf einen Massedurchsatz von ca. 1 t Faser-Schäben-Gemisch begrenzt.

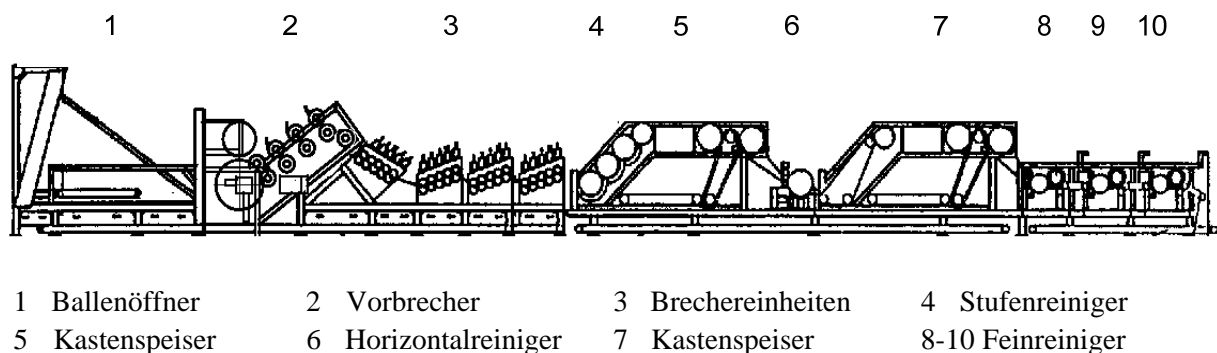


Abb. 4.6: Anlagenkonzept der Fa. Bahmer [Löwe 1998]

Üblicherweise werden in den Praxisanlagen zur Gewinnung von Kurzfasern für technische Anwendungen die aus der Langfaserindustrie stammenden Brecherwalzensysteme zur Entholzung eingesetzt. Diese Maschinen arbeiten nur mit optimal geröstetem und getrocknetem Hanfstroh mit Feuchtegehalten von unter 15 %¹ [LÖWE 1998] weitgehend störungsfrei. Da selbst mit mehrstufigen Brecherwalzensystemen keine vollständige Entholzung erreicht wird, muss diese Funktion in dementsprechend aufwändigeren Reinigungslinien fortgesetzt werden. Bei der in Gardelegen aufgebauten Anlage der Fa. Laroche (Abb. 4.7) werden deshalb nach einer achtstufigen Brecherlinie mehrfach Kombinationen aus Stufenreiniger und Öffner, wie sie aus der Baumwollreinigung bekannt sind, eingesetzt. Eine klassische Reinigungslinie, wie sie aus der Langfasergewinnung von z.B. Flachs bekannt ist, wird in der Anlage der Fa. Temafa in Prenzlau zur Faserreinigung eingesetzt. Hier wechseln sich Schwingturbinen zur Nachentholzung (Abb. 4.8, Verfahrensstufe 7, 9 und 11) mit Kammschütteln zur Grobreinigung ab (Abb. 4.8, Verfahrensstufe 8, 10 und 12).

¹ bezogen auf die Trockenmasse

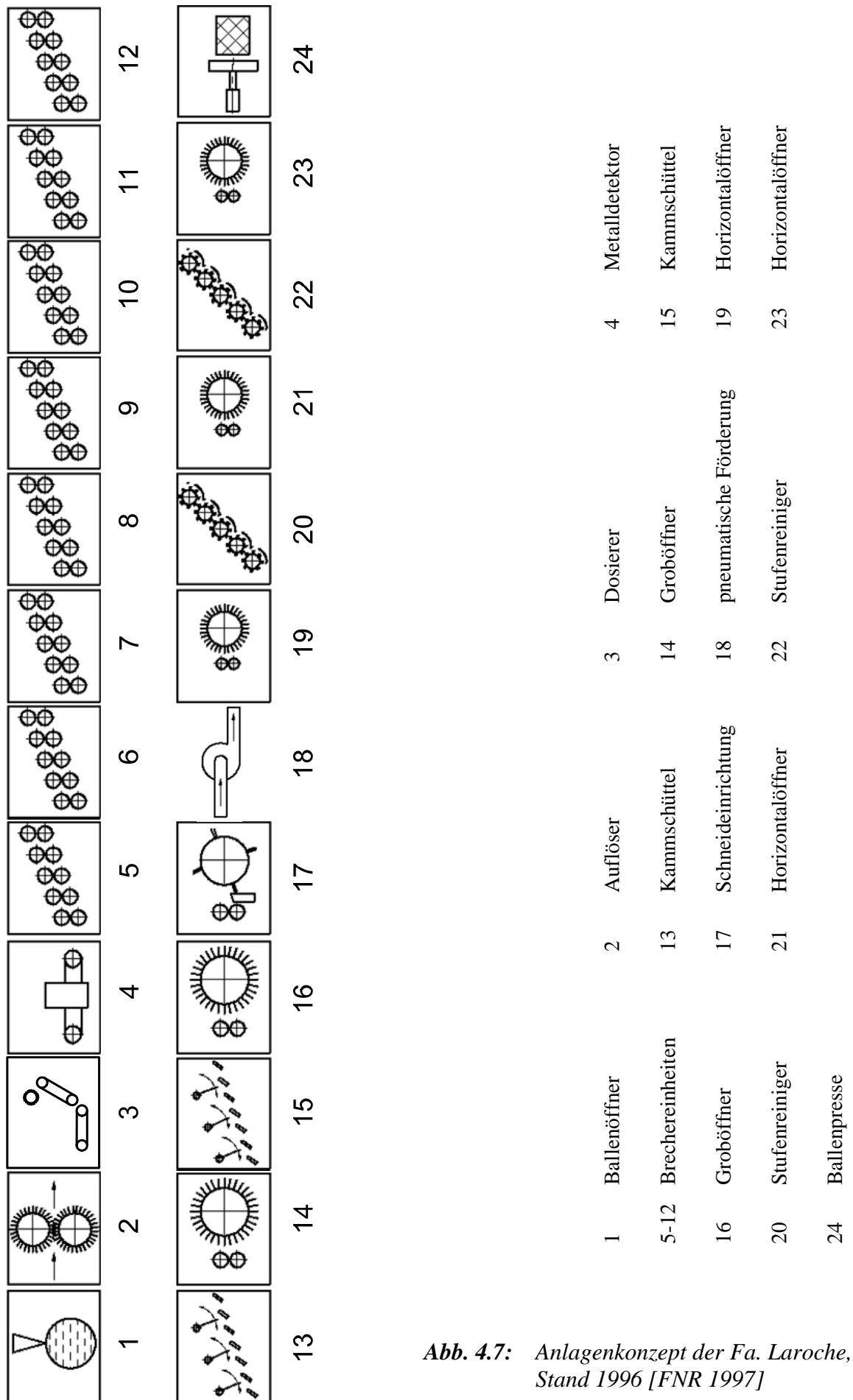


Abb. 4.7: Anlagenkonzept der Fa. Laroche, Stand 1996 [FNR 1997]

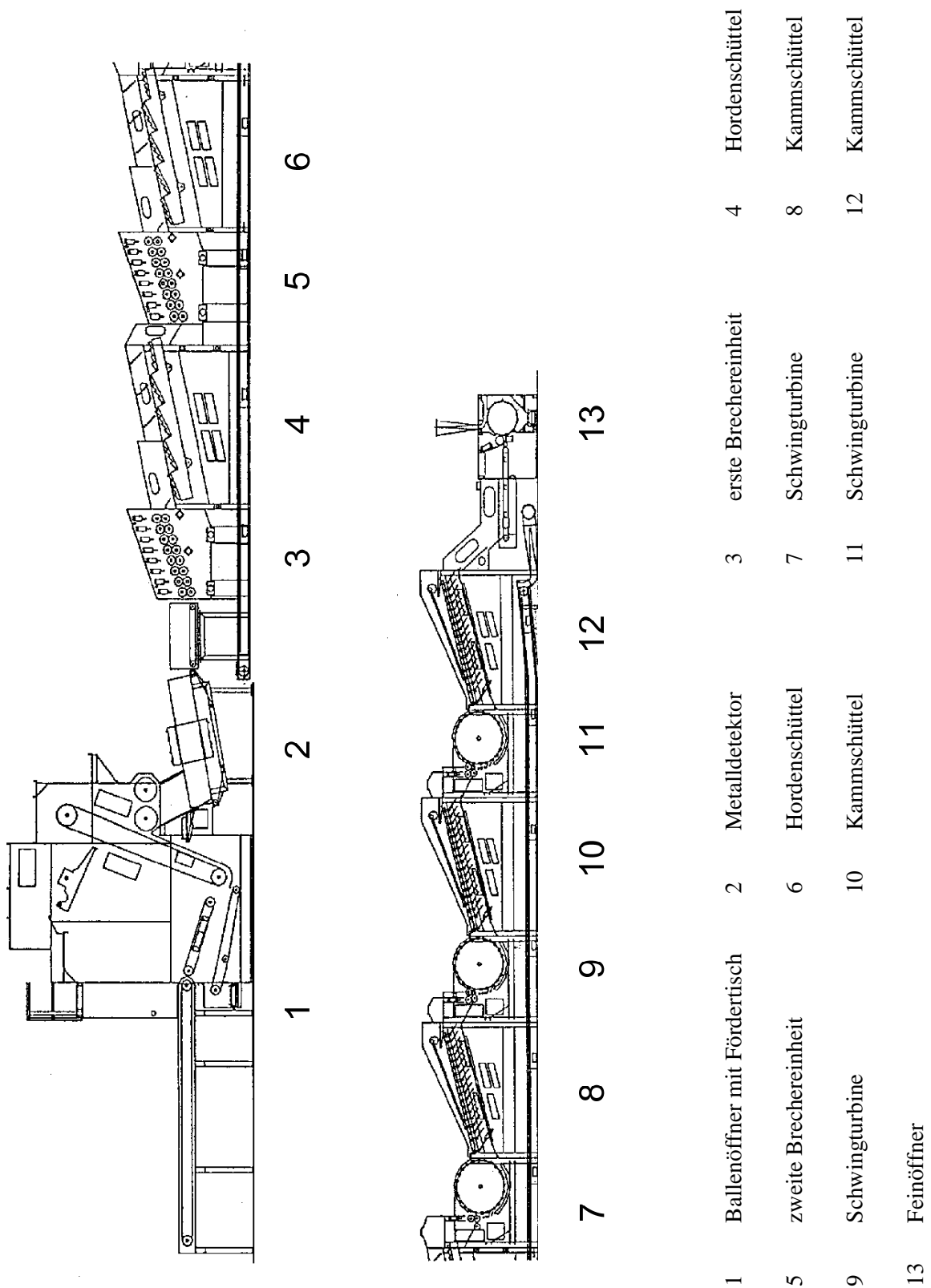


Abb. 4.8: Anlagenkonzept der Fa. Temafa, Stand 1999 [MORGNER 1999]

Hammermühlen zur Entholzung werden vorrangig nur in Anlagen zur Fasergewinnung für die Zellstoffindustrie eingesetzt, da hier ein hoher Massedurchsatz im Vordergrund steht. Die Faserqualität ist für diesen Einsatzbereich zweitrangig, Restschäbengehalte von bis zu 30 Masse-% werden toleriert. Eine Hammermühle, die sowohl einen hohen Durchsatz als auch eine gute Faserqualität gewährleistet, wurde am ATB entwickelt und zum Patent angemeldet [ATB 1999]. Die Vorteile dieser Maschine wurden eingangs bereits dargestellt. Um dieses System in einer Anlage zur Kurzfasergewinnung einsetzen zu können, muss jedoch die vor- und nachgelagerte Maschinenteknik angepasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Zielstellung verfolgt, die erste Reinigungsstufe einer insgesamt nur zwei- bis dreistufigen Reinigungslinie zu entwickeln, die die Vorteile der Entholzung mit der ATB-Hammermühle optimal nutzt.

4.3.2 Textiltechnische Verfahren der Faserreinigung

Wie in den Abbildungen 4.6 bis 4.8 dargestellt, kommen zur Reinigung von Bastfasern vorwiegend textiltechnische Verfahren zum Einsatz. Die Faserreinigung ist in der Textiltechnik ein alltäglicher Vorgang [KOCH et al. 1966, TECHGZ 1988, HOLT et al. 2002]. Aufgrund der Struktur des zu bearbeitenden Materials bestehen jedoch wesentliche Unterschiede zum Aufschluss von Hanffasern. Die Hanffasern sind deutlich gröber und länger, die Faserflocken deutlich größer und von stärkerem Zusammenhalt als in der Textiltechnik allgemein üblich [CHARLE et al. 1997, BÓCSA et al. 2000]. Auch sind die abzuscheidenden Schäben größer und ihr prozentualer Anteil im Material ist wesentlich höher als bei den sonst zu reinigenden Faserstoffen.

Nach [NÖTZOLD 1969] lassen sich die textiltechnischen Verfahren für die Auflösung und Reinigung von Fasern wie folgt systematisieren:

- Auflösen und Schlagen im freien Zustand,
- Auflösen und Schlagen im geklemmten Zustand,
- Auflösen und Schlagen im Faser-Luft-Gemisch und
- Reinigen durch Roste, Siebe oder Abscheider.

Auflösen und Schlagen im freien Zustand

Beim Auflösen und Schlagen im freien Zustand greifen Elemente wie Nadeln, Stifte oder Schlagschienen in das Material ein und teilen ihm eine Bewegung mit. Infolge der Trägheit des Materials, der wirkenden Reibungskräfte und des Zusammenwirkens verschiedener Arbeitsorgane setzt das Material dieser Bewegung Widerstand entgegen. Dadurch wird eine Auflösung des Materials bewirkt. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 4.9 durch das Zusammenwirken eines Nadelbandes mit einer Rückstreichwalze veranschaulicht. Durch das Zuführband (2) wird das Material dem Nadelband (3) aus dem Speisekasten (1) zugeführt. Das Nadelband zieht einzelne Materialpartien mit sich. Durch die Rückstreichwalze (4) wird überschüssiges Material wieder in den Speisekasten zurückgeworfen. Die Roste (6) dienen der Abscheidung von kurzen Fasern oder nicht faserigen Verunreinigungen, die Abstreifwalze (5) nimmt die Fasern vom Nadeltuch ab.

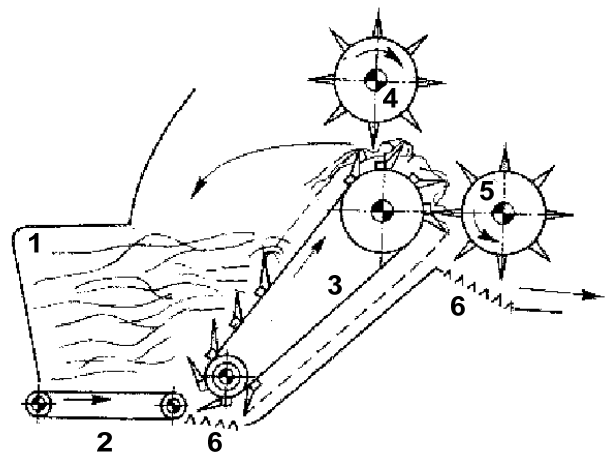


Abb. 4.9: Nadelband mit Rückstreichwalze [NÖTZOLD 1969]

1 Speisekasten, 2 Zuführband,
3 Nadelband, 4 Rückstreichwalze,
5 Abstreifwalze, 6 Rost

Auflösen und Schlagen im geklemmten Zustand

Beim Auflösen und Schlagen im geklemmten Zustand wird das Material entgegen der Einwirkung der Arbeitsorgane gehalten, um größere Kräfte ausüben zu können. Dies geschieht entweder durch eine feste Einspannung wie bei der Hechel, durch Bänder wie bei der Schwinge (siehe Abb. 4.10) oder durch Einzugswalzen wie bei der Schwingturbine und dem Horizontalreiniger (siehe Abb. 4.11 u. 4.12). Das Material wird dann durch Nadeln, Zähne oder Schlagleisten, die auf Walzen oder Bändern angeordnet sind, bearbeitet.

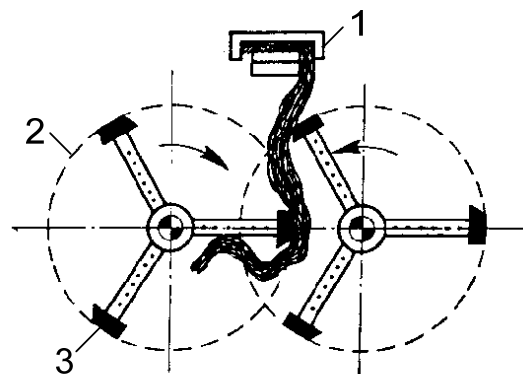


Abb. 4.10: Schwinge [NÖTZOLD 1969]

1 Förderband, 2 Schlagkreis
3 Schlagleiste

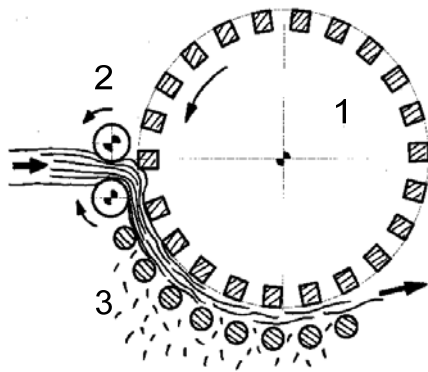


Abb. 4.11: Schwingturbine

- 1 Tambour
- 2 Einzugswalzen
- 3 Rost

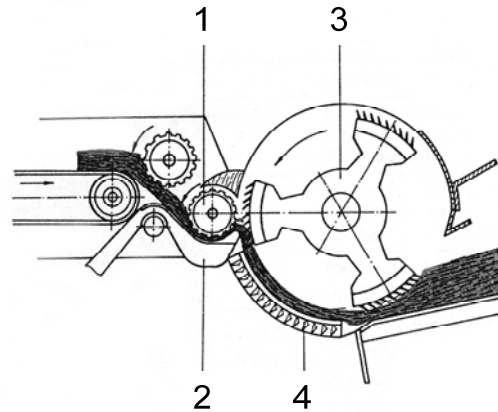


Abb. 4.12: Horizontalreiniger
[TECHGZ 1988]

- 1 obere Klemmwalze, 2 Speisemulde
- 3 Schlagorgan mit Nadelleisten,
- 4 Rost

Auflösen im Faser-Luft-Gemisch

Beim Auflösen im Faser-Luft-Gemisch wird die Trägheit des Materials ausgenutzt. Die Arbeitsorgane haben hohe Geschwindigkeiten. Obwohl das Material in diesem Fall nicht gehalten wird, erfolgt eine Auflösung durch die Übertragung eines Impulses durch die Schlagelemente. Seine Anwendung findet dieses Prinzip in Kegelöffnern (Abb. 4.13) und Stufenreinigern (Abb. 4.14). In einigen nach diesem Wirkprinzip arbeitenden Anlagen wird der Materialtransport zusätzlich durch eine gezielte Luftführung unterstützt.

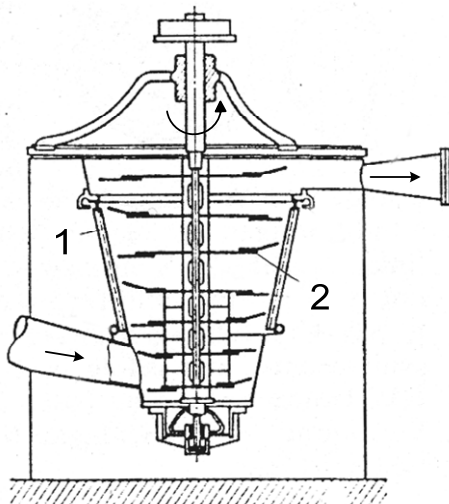


Abb. 4.13: Kegelöffner
[KOCH et al. 1966]

- 1 Rost, 2 Schlagorgan

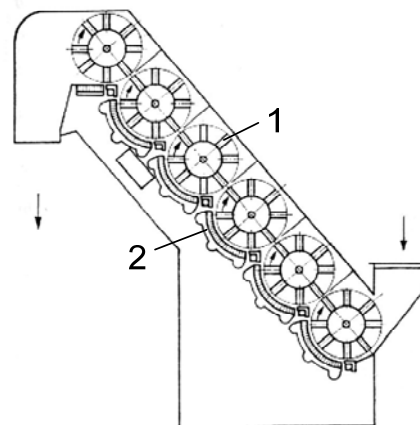


Abb. 4.14: Stufenreiniger
[KOCH et al. 1966]

- 1 Schlagwalze, 2 Rost

Die dargestellten Maschinen werden gewöhnlich in Vorbereitungslinien spinne-reitechnischer Anlagen und in der Bast-faserindustrie eingesetzt. Diese Verar-beitungslinien haben üblicherweise Masse-durchsätze von 400 bis 1000 kg Faser/h. Doch auch im Bereich der Aufbereitung von Rohbaumwolle in den sog. Gins finden sich sehr leistungsfähige, nach diesem Wirkprinzip arbeitende Reinigungsma-schinen. In diesen Aufbereitungslinien werden z.T. mehr als 2,5 t Rohbaumwolle/h gereinigt [HOLT et al. 2002, COTTON 2005]. Hierfür eingesetzt so genannte Cylinder-cleaner und Trashmaster haben große Ähn-lichkeit mit Stufenreinigern bei jedoch deutlich größeren Arbeitsbreiten [BAKER et al. 1973]. Ebenso finden sich hier Reini-gungsmaschinen, in denen anstatt von Siebrosten mit Sägezahn-garnituren versehene Walzen verwendet werden (Abb. 4.15, Impact Cleaner).

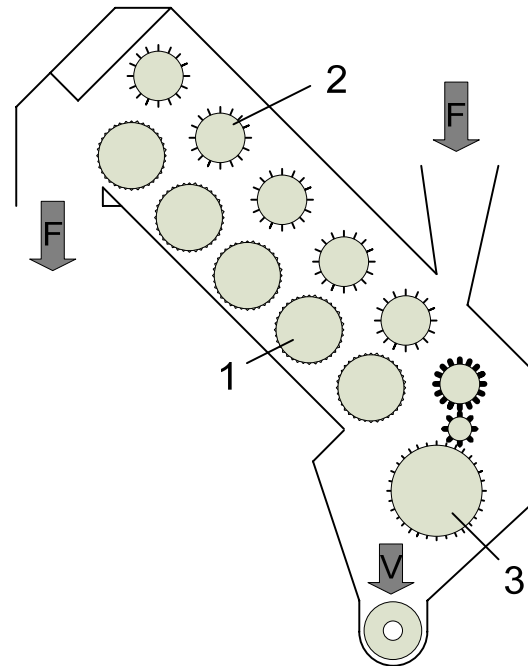


Abb. 4.15: *Impact Cleaner zur Reinigung von Rohbaumwolle* [ANTHONY 2002, verändert]

1 Sägezahnwalze, 2 Schlagorgan,
3 Rückgewinnung fehlausegetragener
Fasern
F Faserstrom, V Verunreinigungen

Reinigung durch Roste

Die Reinigung durch Roste ist normaler-weise in die nach den ersten drei Prinzipien arbeitenden Maschinen integriert. Die Fasern laufen über Roste oder werden direkt über den Rosten bearbeitet. Rost-oder Trommelsiebe dienen der Abschei-dung von losen Verunreinigungen, die nach der Auflösung noch im Material vorliegen. Abbildung 4.16 veranschaulicht dies am Beispiel einer Kammschüttel. Diese Reini-gungsmaschine kann ebenso in die Kategorie Auflösen und Schlagen im freien Zustand eingeordnet werden.

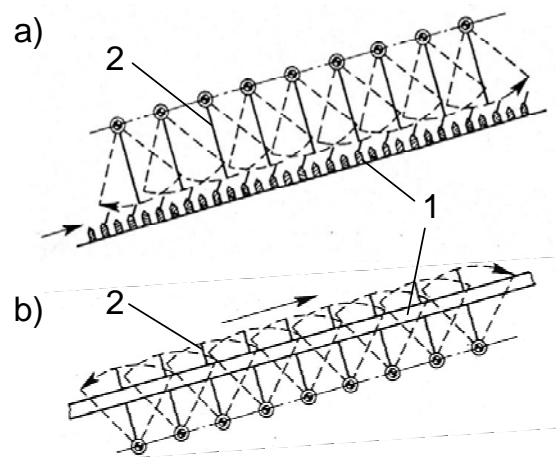


Abb. 4.16: a) ober-schlägige und b) unter-schlägige Kammschüttel [HERZOG 1927]

1 Rost, 2 Schlagorgan

4.3.3 Reinigungsverfahren der Landtechnik für die Fasergewinnung

In den bestehenden Praxisanlagen werden teilweise auch Reinigungsverfahren eingesetzt, die aus landtechnischen Maschinen entnommen wurden. Hierbei handelt es sich vorzugsweise um Reinigungs- und Trenneinrichtungen aus Mähdreschern, da diese für die Verarbeitung größerer Masseströme fasriger Güter am besten geeignet sind (Abb. 4.17) [GLASER 1976, FREYE 1980, BECK 1992, BÖTTINGER 1997, MASTEL et al. 2002,]. So werden z.B. in der Anlage der Fa. Temafa und der Fa. Lehmann Maschinenbau [LEHMANN 2002] modifizierte Hordenschüttler eingesetzt (vgl. Abb. 4.8).

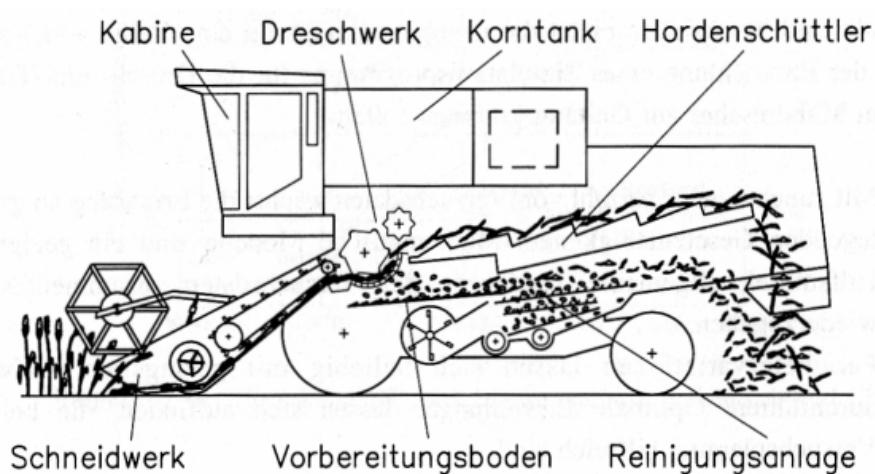


Abb. 4.17: Mähdrescher mit Hordenschüttler zur Trennung von Korn und Stroh [BECK 1999]

4.3.4 Verfahrenstechnik zum Klassieren und Separieren

In der mechanischen Verfahrenstechnik findet sich eine große Anzahl von Verfahren zum Klassieren und Separieren (Trennen) von Stoffgemischen [HÖFFL 1985, SCHUBERT 1990]. Da diese Verfahren in der Regel für die Verarbeitung von Schüttgütern optimiert sind, die nicht durch die für Bastfaserstroh dominierenden fasertypischen Eigenschaften gekennzeichnet sind, werden diese Verfahren im Bereich der Fasergewinnung vorzugsweise nur zum Aufbereiten von Schäben und Reststoffen eingesetzt. Ein Überblick über diese Verfahren ist in Abbildung 4.18 dargestellt.

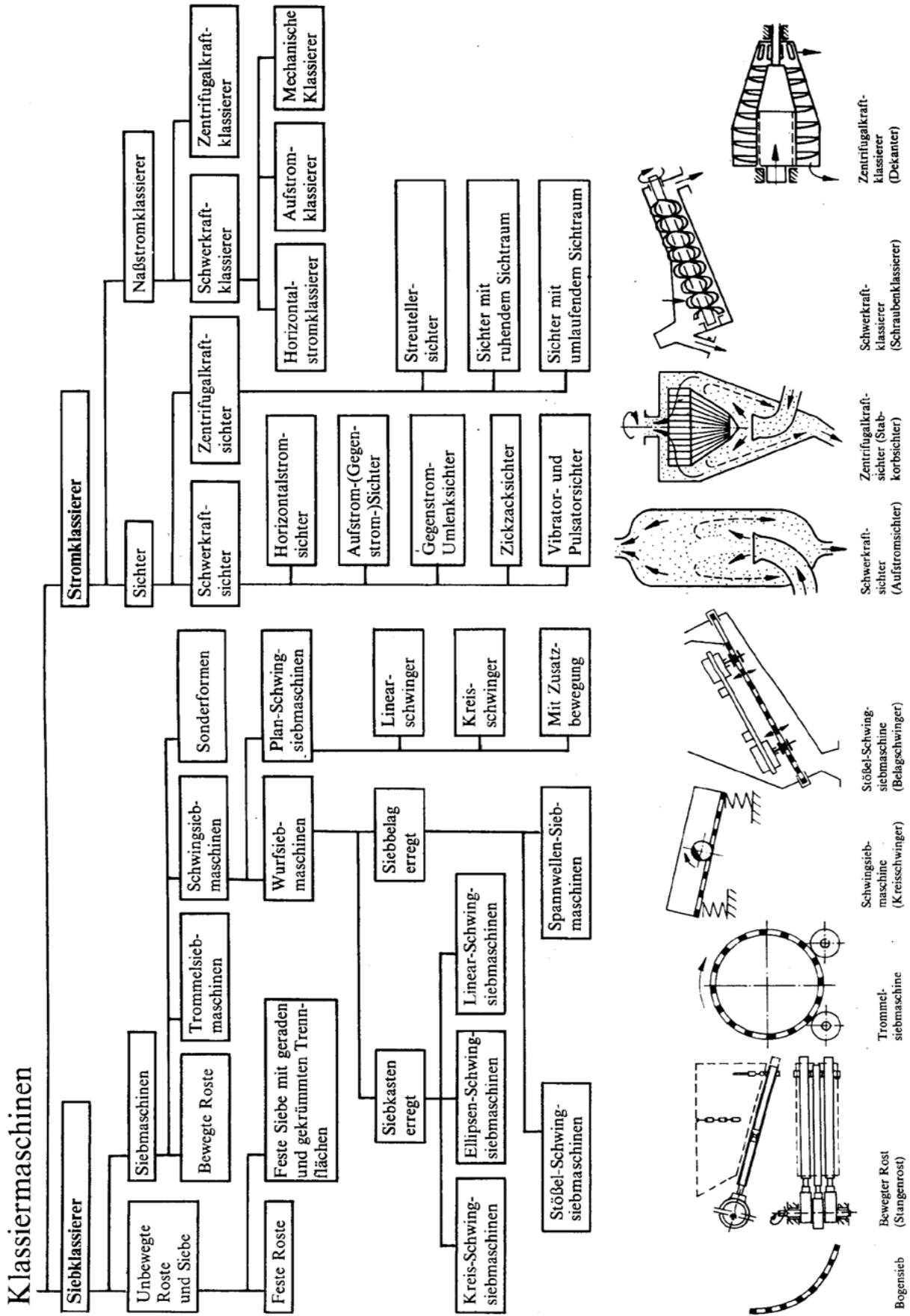


Abb. 4.18: Systematik der Klassiermaschinen [HÖFFL 1985]

4.3.5 Systematik der Verfahren zur Faserreinigung

Aufbauend auf den vorangegangenen Kapiteln erscheint es sinnvoll, in Anlehnung an die Systematik zu den Klassiermaschinen von [HÖFFL 1985] eine eigene übersichtliche Darstellung der Verfahren zur Faserreinigung zu entwickeln. In Anlehnung an die grundlegende Verfahrenseinteilung von [NÖTZOLD 1969] wird hierfür unterschieden in:

1. Verfahren, bei denen die Fasern geklemmt oder durch relativ zu den Arbeitsorganen bewegte Elemente gehalten werden. Diese Verfahren werden unter „Kämmen“ zusammengefasst,
2. Verfahren, bei denen die Fasern im freien Zustand über Roste bewegt werden. Diese Verfahren werden unter „Sieben“ zusammengefasst.
3. Verfahren, in denen die Trennung durch unterschiedliches Verhalten in einem Luftstrom geschieht. Diese Verfahren werden unter „Sichten“ zusammengefasst.

Es zeigt sich jedoch, dass eine Einordnung von Reinigungsmaschinen nicht immer völlig eindeutig möglich ist, da teilweise eine Kombination der Wirkungsweisen vorliegt. Bei der Einordnung solcher Maschinen muss abgewogen werden, welches das für die Reinigung maßgebende Wirkprinzip ist. Zur Veranschaulichung der Systematik wurden deshalb in Abbildung 4.19 jeweils Beispiele für Klassiermaschinen angeführt, die nach den entsprechenden Prinzipien arbeiten.

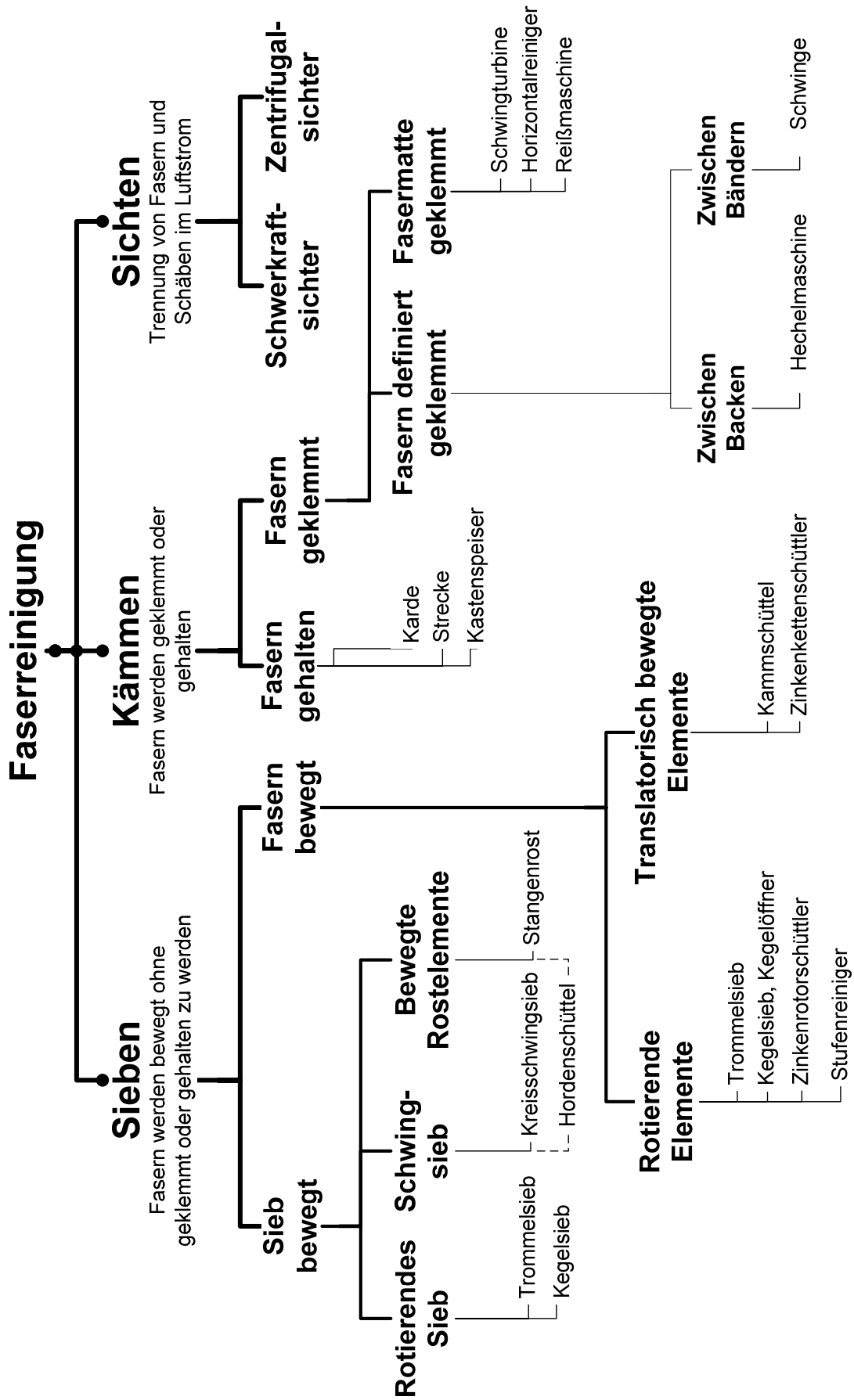


Abb. 4.19: Systematik der Reinigungsverfahren für Hanffasern

4.4 Anforderungen an die Faserreinigung

4.4.1 Anforderungsliste

Überprüft man den gegenwärtigen Stand der Technik in der Faserreinigung mit den ökonomischen Anforderungen für die Fasergewinnung aus Hanfstroh, so ergeben sich sowohl für den Anlagendurchsatz, die Verfügbarkeit und die Produktqualität deutlich gesteigerte Anforderungen für einen langfristig wirtschaftlichen Anlagenbetrieb. Da diese nur im Zusammenhang mit den Stoffströmen einer Gesamtanlage zur Fasergewinnung betrachtet werden können, wurden diese in Abbildung 4.20 für eine Anlage mit einem Massestrom von 2,5 t/h TM Hanfstroh dargestellt. Dieser Massestrom wurde im Kapitel 3.4.3 als Basis für den ökonomischen Anlagenbetrieb bestimmt.

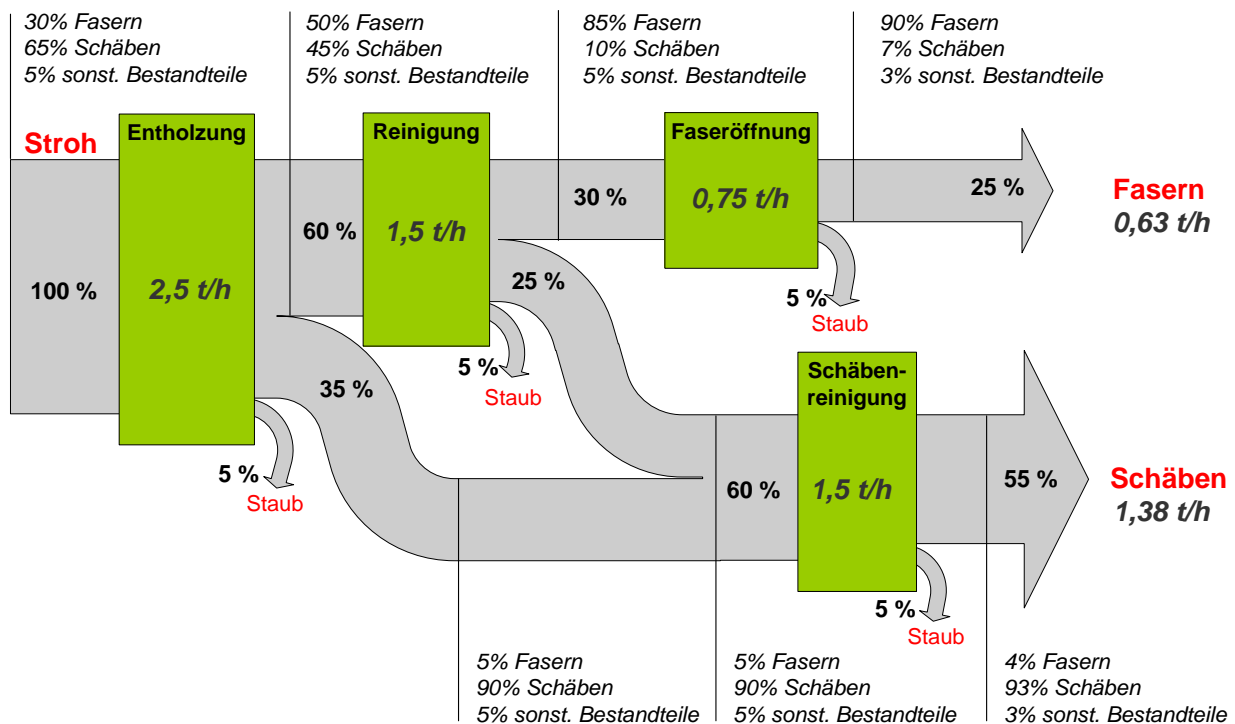


Abb. 4.20: Stoffströme in einer Hanffaseraufschlussanlage mit einer Entholzung mittels ATB-Aufschlussmaschine [PECENKA et al. 2002]

Wie in Abbildung 4.20 dargestellt, können die Reinigungslinien in zwei Prozessstufen unterteilt werden: die Faserreinigung und die Faseröffnung. Für die Faserreinigung wurde die in Tabelle 4.5 zusammengefasste Anforderungsliste erstellt. Die wichtigste Forderung an die Reinigung ist dabei ein möglichst weitgehendes Separieren der Schäben (Restschäbengehalt < 7 Masse-%). Dabei sollte nur ein geringer Faserfehlaustrag in den Schäbenstrom gelangen, der hauptsächlich die Kurzfasernanteile enthält. Weitere besonders wichtige Forderungen sind

die möglichst schonende Behandlung der Fasern während der Reinigung, eine hohe Verfügbarkeit von mindestens 90 % sowie einem Massestrom von mindestens 1,5 t/h.

Table 4.5: Anforderungsliste für die Faserreinigung
(erste Reinigungsstufe bzw. Grobreinigung)

Merkmal		Ausprägung	Forderung/ Wunsch
Ökonomie	Preis	1) < 75.000 EUR 1a) < 50.000 EUR	F W
	Verfügbarkeit	2) 90% 2a) > 90%	F W
Geometrie		3) kompakt	W
Energie	Massenstrom	4) 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch 4a) > 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch	F W
	Leistung	5) < 25 kW 5a) < 15 kW	F W
Stoffe	Eingang	6) entholzter Hanf aus geröstetem und ungeröstetem Hanfstroh mit vollständig von Fasern abgelösten Schäben	F
		7) mittlere Faserlänge bis 20 cm	F
		8) Material in Wirrlage	F
		9) an Materialeigenschaften leicht anzupassen	F
Ausgang	Faserstrom	10) Schäbenanteil < 7 Masse-%	F
		10a) Schäbenanteil < 5 Masse-%	W
11) keine Nissen im Faserstrom		F	
12) geringe mechanische Belastung der Fasern		F W	
	Schäbenstrom	13) gute Auflockerung des Faserstromes zur Entstaubung	
14) Faseranteil im Schäbenstrom < 10 % 14a) Faseranteil im Schäbenstrom < 5 %		F W	
Betrieb	Betriebssicherheit	15) Wicklungen an rotierenden Teilen gut zu entfernen	F
		15a) keine Wicklungen an rotierenden Teilen	W
	Wartungsarbeiten	16) ≤ 1 x täglich	F
		17) geringe Anzahl bzw. preiswerte Verschleißteile	F F W
	18) einfacher Austausch von Verschleißteilen 18a) mit wenig Verschleiß behaftet bzw. keine Funktionsminderung durch Verschleiß		
Reinigung		19) ≤ 1 x täglich	F

Abkürzungen: F Forderung, W Wunsch

4.4.2 Erfüllung der Anforderungen

Die konstruktions- und verfahrenstechnische Analyse bestehender Aufschlussanlagen und deren Reinigungslinien hat ergeben, dass für die Entwicklung einer leistungsfähigen Gesamtanlage nicht notwendigerweise völlig neue Wirkprinzipien für die Faserreinigung gefragt sind. Die bereits in der Praxis eingesetzten Maschinen haben sich bewährt, jedoch ist für den Einsatz in einer Anlage mit einem Massestrom von mehr als 2,5 t/h TM Hanfstroh eine Überarbeitung der Konstruktion sinnvoll. Dies ist empfehlenswert, da diese Maschinen für die Verarbeitung von Baumwolle oder aber auch Langfasern optimiert sind und die Konstruktionen vieler dieser eingesetzten Maschinen mehr als 20 Jahre alt sind und eine Optimierung eine deutliche Leistungssteigerung ermöglicht. Das beste Anpassungs- und Optimierungspotenzial bieten Kammschüttel, wie aus der Analyse der Erfüllung der Anforderungsliste in Tabelle 4.6 hervorgeht. Die Erfüllung der aufgestellten Forderungen und *Wünsche* (in Tab. 4.6 kursiv dargestellt) wurde hier für ausgewählte Verfahren der Faserreinigung gegenübergestellt. Ergänzend wurden vorhandene Optimierungspotenziale für den Einsatz der Reinigungsmaschinen in einer nach dem ATB-Aufschlussprinzip arbeitenden Anlage eingeschätzt. In den Rubriken 1) Kosten, 2) Verfügbarkeit und 4) Durchsatz schneiden hier die Kammschüttel und der Hordenschüttler in Summe am besten ab. Vergleicht man jedoch die Rubrik 10) Schäben in Fasern und damit die Reinigungsleistung dieser beiden Maschinen, so ist die Kammschüttel die geeigneter Maschine. Dies kommt auch in der Summe der Bewertungen unter Berücksichtigung der vorhandenen Optimierungspotenziale zum Ausdruck (Kammschüttel 47 Punkte, Hordenschüttler nur 41 Punkte). Folglich steht die Optimierung dieser Maschine für den Einsatz in der neuartigen ATB-Aufschlussanlage [MUNDER et al. 2003, PECENKA et al. 2004] im Vordergrund der weiteren Untersuchungen.

Tabelle 4.6: Erfüllung der Anforderungsliste für ausgewählte Verfahren der Faserreinigung

Anforderung Forderung <i>Wunsch</i>	Verfahren / Reinigungssystem							
	Kammschüttel		Stufenreiniger		Horizontal- öffner		Horden- schüttler	
	Erfüllung	mit Optimie- rung	Erfüllung	mit Optimie- rung	Erfüllung	mit Optimie- rung	Erfüllung	mit Optimie- rung
1) Kosten < 75.000 € < 50.000 €	2 <i>1</i>	3 <i>2</i>	1 <i>1</i>		0 <i>0</i>		4 <i>3</i>	
2) Verfügbarkeit 90% > 90 %	3 <i>2</i>		3 <i>2</i>		2 <i>1</i>		3 <i>2</i>	
3) <i>Geometrie kompakt</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>2</i>		<i>1</i>		<i>2</i>	
4) Massestrom 1,5 t/h > 1,5 t/h	1 <i>0</i>	3 <i>2</i>	1 <i>0</i>	2 <i>1</i>	0 <i>0</i>	0 <i>0</i>	3 <i>2</i>	
5) Leistung < 25 kW < 15 kW	3 <i>2</i>	4 <i>4</i>	3 <i>2</i>		1 <i>0</i>		3 <i>2</i>	
6) entholzter Hanf geröstet und ungeröstet	3		3		2		3	
7) mittl. Faserlängen bis 20 cm	2		1		1		3	
8) Material in Wirrlage	2		2		2		3	
9) Anpassung an Materialeigenschaften	3		3		2		2	
10) Schäben in Fasern < 7 Masse-% < 5 Masse-%	2 <i>1</i>	3 <i>2</i>	3 <i>1</i>		3 <i>2</i>		0 <i>0</i>	0 <i>0</i>
11) keine Nissen	2		2		3		2	
12) mechanische Faserbelastung gering	3		3		1		3	
13) <i>gute Auflockerung</i>	<i>3</i>		<i>3</i>		<i>3</i>		<i>0</i>	<i>1</i>
14) Faserfehlaustrag < 10 % < 5 %	1 <i>0</i>	3 <i>2</i>	2 <i>1</i>		1 <i>0</i>		1 <i>0</i>	
15) Wicklungen gut zu entfernen <i>keine Wicklungen</i>	4 ¹ <i>4</i>		3 ² <i>2</i>		4 ² <i>4</i>		3 ³ <i>2</i>	
16) Wartung 1x täglich	2		2		1		2	
17) wenige bzw. preis- werte Verschleißteile	2	3	3		1		2	
18) einfacher Austausch von Verschleißteilen <i>wenig Verschleiß</i>	2 <i>3</i>		2 <i>2</i>		1 <i>1</i>		2 <i>1</i>	
19) Reinigung 1 x täglich	2		2		1		2	
Anzahl nicht erfüllter Forderungen	0	0	0	0	2	2	1	1
Summe der Bewertungen	39 <i>17</i>	47 <i>24</i>	39 <i>16</i>	40 <i>17</i>	26 <i>12</i>	26 <i>12</i>	41 <i>14</i>	41 <i>15</i>

Bewertung:

(0) unbefriedigende Lösung, Forderung nicht erfüllt

(3) gute Lösung

(1) Lösung gerade tragbar

(4) sehr gute Lösung

(2) Lösung ausreichend

Eine höhere Zahl in der Summe der Bewertungen kennzeichnet die vorzüglichere Lösung.

¹ keine rotierenden Teile im Faserstrom² keine Wicklungen durch Fliehkraft bei genügend eingekürzten Fasern³ rotierende Teile nur im Bereich fehlausgetragener Fasern

5 Kammschüttel zur Faserreinigung

5.1 Stand der Technik

Kammschüttel wurden bereits Anfang des letzten Jahrhunderts im großen Umfang zur Faserreinigung in der Bastfaserindustrie eingesetzt. Als Schüttelmaschinen sind die ersten derartigen Reinigungssysteme in den Patenten von Paul und C. Oswald Liebscher aus den Jahren 1902 und 1908 (Abb. 5.1 und 5.2) dokumentiert. Als weitere Bezeichnungen für diese Maschinen sind Schrägschüttel, Kammschüttelmaschine bzw. Kammschüttel und Wergschüttelmaschine bekannt [HERZOG 1927, SIEBENEICHER 1956, NÖTZOLD 1969].

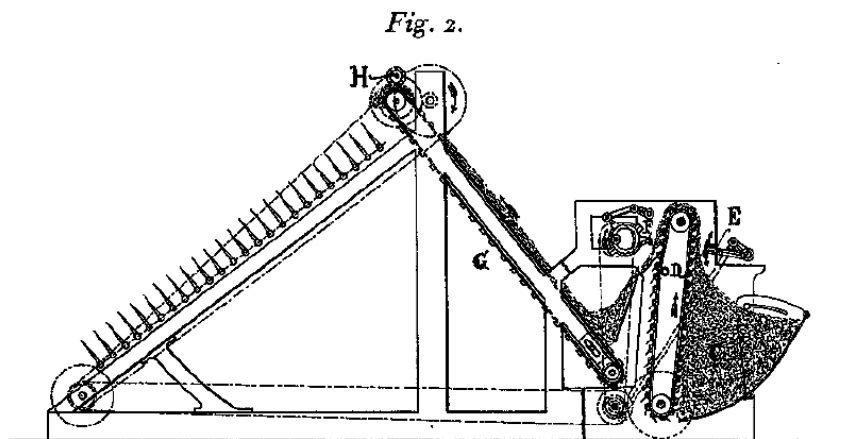


Abb. 5.1: Schüttelmaschine für Flachs und Hanf von Paul Liebscher [PATENT 1902]

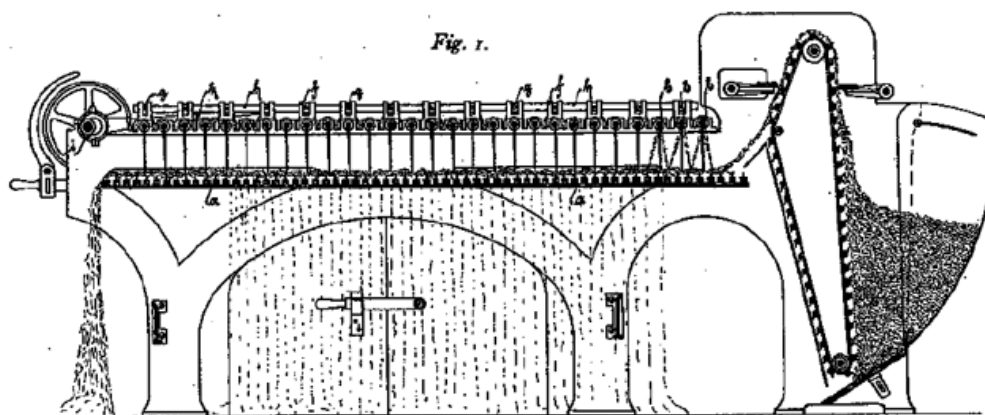


Abb. 5.2: Schüttelmaschine mit Schüttelnadeln zum Reinigen von Faserabfällen von C. Oswald Liebscher [PATENT 1908]

Ursprünglich wurden diese Maschinen vorrangig zur Aufbereitung des Wergs aus den Langfaserlinien zur Gewinnung von Textilfasern aus Hanf und Flachs eingesetzt. Heute findet man sie meist als erste Reinigungsstufe zur Grobreinigung in den Aufschlusslinien zur Herstellung von Kurzfasern für technische Faseranwendungen. Hier haben sie sich bewährt, da in dieser ersten Reinigungsstufe sehr große Mengen an Schäben - häufig liegt ihr Mengenanteil über 50 Masse-% - aus den Fasern abgeschieden werden müssen. Über den fast 100-jährigen Entwicklungszeitraum dieser Reinigungsmaschinen haben sich sehr unterschiedliche Maschinenausführungen entwickelt, die jedoch alle das in Abb. 5.3 dargestellte Wirkprinzip umsetzen.

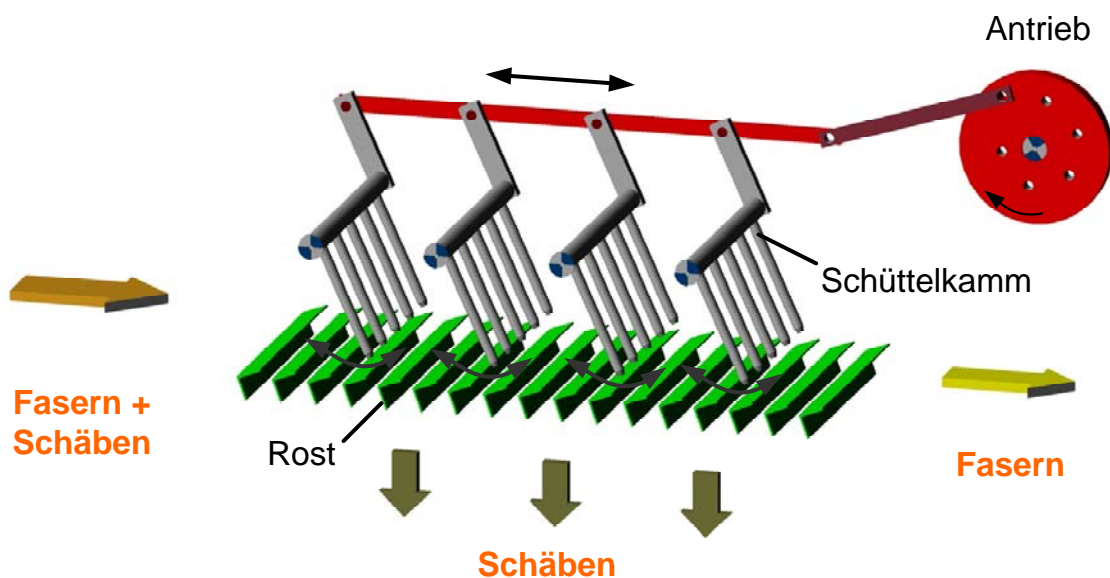


Abb. 5.3: Wirkprinzip einer überschlägigen Kammschüttel

Bei einer Kammschüttel überträgt ein Antriebsmotor seine Drehbewegung auf einen Kurbeltrieb, der die rotatorische Antriebsbewegung über ein Pleuel in eine translatorische Bewegung einer Koppel und der daran befestigten Kämme umsetzt. Die Kämme befinden sich quer zum Faserstrom und greifen mit ihren Nadeln in die Faserflocken hinein und versetzen diese in schwingende Bewegungen. Die Kämme bewegen sich dabei meist so, dass die Fasern in der Vorwärtsbewegung einen größeren Weg zurücklegen als in der Rückwärtsbewegung, wodurch ein kontinuierlicher Faserstrom durch das Schüttelsystem über einen Rost hinweg erreicht wird. Durch die Hin- und Herbewegung der Faserflocken werden diese aufgelockert und die von den Fasern abgelösten Schäben können durch den Rost

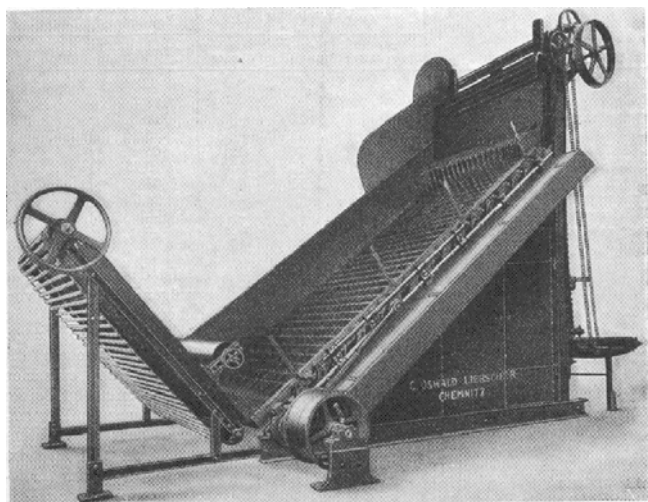


Abb. 5.4: Geneigte Werg-Schüttelmaschine Anfang des 20. Jh. [HERZOG 1927]

fallen. Grundsätzlich unterscheiden sich die Systeme nach überschlägigen und unterschlägigen Bauarten (vgl. Abb. 4.16), entsprechend der Anordnung der Schüttelnadeln ober- bzw. unterhalb des Rostes oder Siebbodens. Da unterschlägige Kammschüttel stärker zum Verstopfen der Siebe neigen, werden meist nur noch überschlägige

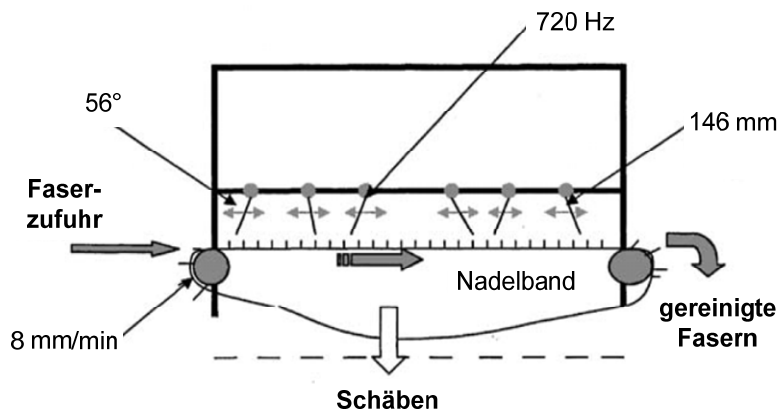


Abb. 5.5: Kammschüttel mit Siebkette
[AKIN et al. 2005]

Maschinen eingesetzt. In einigen dieser Systeme wird der Fasertransport durch einen zusätzlich überlagerten Luftstrom oder durch eine abschüssige Neigung des Gesamtsystems in Faserstromrichtung unterstützt (Abb. 5.4). In anderen Systemen wird zum definierten Fasertransport das Sieb durch eine bewegte Siebkette ersetzt, auf der das Material durch den Schüttelkanal gefördert wird (Abb. 5.5).

In den üblichen Praxisanlagen in Europa werden Kammschüttel meist in Kombination mit Schwingturbinen oder Groböffnern (Horizontalöffnern) in bis zu dreimaliger Wiederholung als Reinigungslinie eingesetzt (Abb. 4.7 und 4.8). Ursache hierfür ist, dass in diesen Anlagen das System zur Entholzung die Verbindung zwischen Fasern und Schäben nicht im gesamten der Reinigungslinie zugeführten Faser-Schäben-Gemisch vollständig gelöst hat. Somit muss der Entholzungsprozess in der Reinigungslinie mittels Schwingturbine und Groböffner fortgesetzt werden.

Bekannte Probleme von Kammschütteln in Praxisanlagen

In Gesprächen mit Anlagenbetreibern und -herstellern sowie aus Versuchen in Praxisanlagen wurden folgende Probleme mit Kammschüttelsystemen bekannt:

- Die praxisüblichen Entholzungsmaschinen erfordern bis zu neunstufige Reinigungslinien, bestehend aus Kammschütteln, Öffnern und weiteren Systemen zur Nachentholzung. Hierdurch werden u.a. hohe Faserverluste, Maschinenkosten, Stillstandszeiten und Wartungskosten verursacht.
- Der Kurbeltrieb der Kammschüttel verfügt üblicherweise über keinen Masseausgleich. Die hierdurch verursachten Maschinenschwingungen unterstützen zwar den Reinigungsprozess, führen aber gleichzeitig zu einem drastisch erhöhten Verschleiß des Antriebsstrangs bei erhöhtem Antriebsenergiebedarf.

- Kammschüttel, bei denen der Fasertransport durch einen überlagerten Luftstrom unterstützt wird, sind nur begrenzt regelbar.
- Verunreinigungen der Siebe, verbunden mit erhöhten Reibwerten auf der Sieboberfläche können eine Störung des Materialstroms bis hin zur Verdichtung von Faserflocken verursachen.
- Im Zusammenhang mit der Siebneigung erfolgt der Transport der Faserflocken nur bei bestimmten Schüttelfrequenzen störungsfrei.
- Die Konstruktion der meisten Maschinen ist älter als 20 Jahre und beinhaltet aus gegenwärtiger maschinenbaulicher Sicht ein großes ungenutztes Optimierungspotenzial.

Für die Grobreinigung von Hanffasern sind nur wenige Maschinen geeignet. Vergleicht man Kammschütteln mit den anderen bekannten Maschinen, stellen sich wesentliche Vorteile heraus. Diese Vorteile wurden bereits in der Analyse im Kap. 4.4.2 (Erfüllung der Anforderungen in der Faserreinigung, vgl. Tab. 4.6) deutlich.

Vorteile von Kammschütteln als erste Reinigungsstufe

Als wesentliche Vorteile können genannt werden:

- die einfache, kostengünstige Gesamtkonstruktion,
- die einfache Siebgestaltung, die sowohl verstellbare als auch auswechselbare Siebe ermöglicht,
- ein hoher Durchsatz bei vergleichsweise geringem Antriebsenergiebedarf und
- die störungsfreie Arbeitsweise auch bei großen und sehr großen Faserlängen (> 50 cm), da sich keine rotierenden Maschinenteile im Siebraum befinden.

5.2 Erweiterte Anforderungen an Kammschüttel

Die grundlegenden Anforderungen an Kammschüttel entsprechen den in Kap. 4.4 erarbeiteten Anforderungen an die Faserreinigung. Vor dem Hintergrund der bekannten Probleme von Kammschütteln in Praxisanlagen stellen sich für die Modernisierung dieses Maschinensystems für den Einsatz in leistungsfähigen Kurzfasernlinien folgende erweiterte Anforderungen:

- Kammschüttel müssen so effizient arbeiten, dass die gesamte Reinigungslinie auf maximal drei Reinigungsstufen reduziert werden kann. Nur so können die ökonomischen Anforderungen an die Gesamtanlage erfüllt werden. Kammschüttel übernehmen in diesen Linien die Grobreinigung der Fasern.
- Bei einer Arbeitsbreite von maximal zwei Metern muss ein Massedurchsatz von 1,5 bis 2 t/h TM Faser-Schäben-Gemisch realisiert werden.

5.3 Präzisierte Aufgabenstellung und Neuheitswert einer optimierten Kammschüttel

Die Analyse der Fachliteratur zu Ergebnissen der Forschung zum Reinigen von Faser-Schäben-Gemischen und zum industriellen Einsatz von Kammschütteln in der Kurzfaserindustrie hat gezeigt, dass nur das Wirkprinzip einer Kammschüttel und wenige spezielle Konstruktions- und Betriebsparameter dokumentiert sind. Den besten Einblick in das Maschinensystem liefern die Patentschriften und Darstellungen aus den Jahren 1900 bis 1930 [PATENT 1902, PATENT 1908 und HERZOG 1927]. Durch eine Überarbeitung der Konstruktion und die Wahl geeigneter Betriebsparameter können Kammschüttel die gegenwärtigen Anforderungen der Kurzfaserindustrie an die Faserreinigung nach dem Prallaufschluss von Hanf am besten erfüllen (vgl. Tab. 4.6). Mit geeigneten Simulationsrechnungen auf Basis von Modellen für den Massestrom und das Sieben von Faser-Schäben-Gemischen in einer Kammschüttel können die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Konstruktions-, Betriebs- und Materialparametern analysiert und die konstruktionstechnische Überarbeitung besonders effizient erfolgen. Faser-Schäben-Gemische unterscheiden sich jedoch erheblich in ihrer Zusammensetzung und ihrem Siebverhalten von anderen in der mechanischen Verfahrenstechnik betrachteten Siebgütern. Wie die Untersuchungen zu geeigneten Massestrom- und Siebmodellen in den folgenden Kapitel 6 und 7 zeigen werden, müssen für die angestrebten Simulationsrechnungen neuartige Modelle entwickelt werden. Für die Optimierung der Reinigung von Hanffasern auf Kammschütteln sind daher folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Entwickeln einer Versuchskammschüttel für die grundlegende Analyse des Einflusses allgemeiner Konstruktions- und Betriebsparameter auf den verarbeitbaren Massestrom und das Siebverhalten prallaufgeschlossener Faser-Schäben-Gemische aus Hanf,
- Entwickeln eines verbesserten Antriebskonzeptes und materialflussgerechte Gestaltung des Siebraums zur Reduzierung von Störungen und Verschleiß sowie zur Verlängerung der Wartungsintervalle,
- Überarbeiten des Maschinenkonzeptes auf der Grundlage der Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb mit dem Ziel, einen Massedurchsatz von mindestens 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch bei einem Restschäbengehalt unter 7 Masse-% und minimalen Faserverlusten von weniger als 5 Masse-% der der Reinigung zugeführten Fasern zu erreichen,
- Analyse und Modellierung des Massestroms und des Siebverhaltens von Fasern-Schäben-Gemischen in einer Kammschüttel sowie Verknüpfung der Modelle zu einem Gesamtmodell und
- Anwenden und Bewerten des Gesamtmodells für Simulationsrechnungen zum Erstellen eines Prototyps einer Kammschüttel für die Praxiserprobung in einer Faseraufschlussanlage.

5.4 Maschinenkonzeption einer Kammschüttel

Um die dargestellten Anforderungen für den Einsatz einer Kammschüttel als erste Reinigungsstufe erfüllen zu können, müssen die aufgezeigten Potenziale zur Optimierung der Konstruktion einer solchen Reinigungsmaschine genutzt werden. Auf der Grundlage der Untersuchungen zu dem zu verarbeitenden Faser-Schäben-Gemisch wurde die in Abbildung 5.6 dargestellte Maschinenkonzeption für den Bau einer Versuchsmaschine erarbeitet.

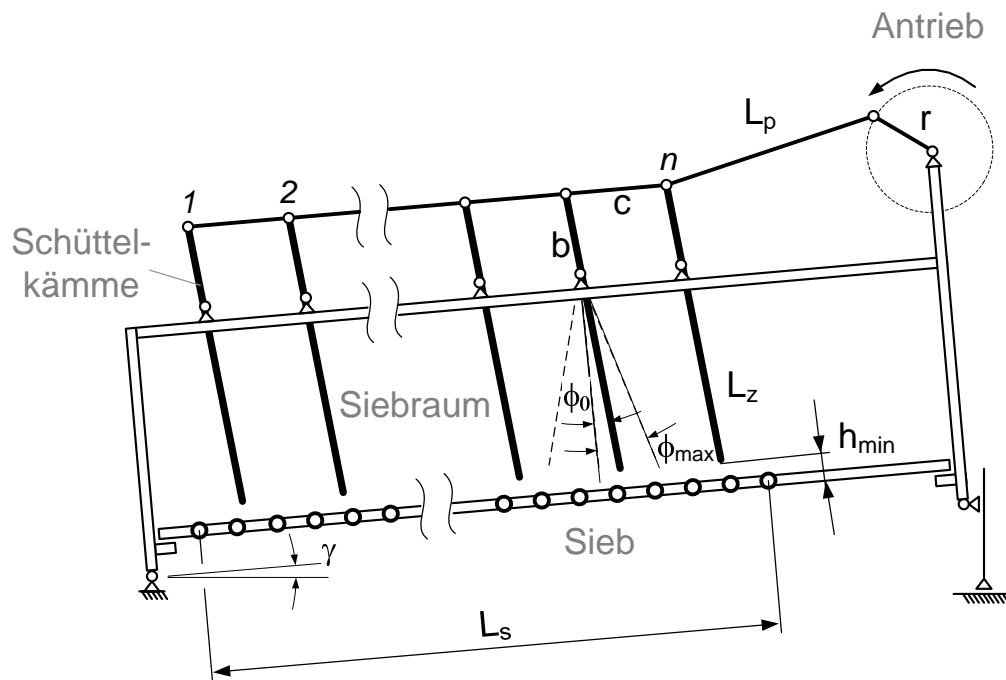


Abb. 5.6: Maschinenkonzept der ATB-Kammschüttel

Parameter	Bemerkung
b	Kurbellänge verstellbar 190 ... 250 mm
c	Kammabstand variabel 148 mm
h_{\min}	Abstand Kamm-Rost verstellbar 0 ... 100 mm
L_p	Pleuellänge verstellbar 660 ... 690 mm
n	Anzahl der Käme variabel max. 15
r	Kurbelscheibenradius verstellbar 45 ... 80 mm
L_s	Länge des Siebraums variabel 500 ... 2500 mm
L_z	Zinkenlänge fest 400 mm
ϕ_0	Schüttelwinkel (Phasenverschiebung) verstellbar $-6 \dots 6^\circ$
ϕ_{\max}	Schüttelamplitude verstellbar $24 \dots 35^\circ$
γ	Neigung der Kammschüttel verstellbar $-10 \dots 20^\circ$

Sonstige Parameter und Maschineneigenschaften

f	Antriebsfrequenz (Schüttelfrequenz) verstellbar 10 ... 55 Hz (0,6 ... 3,5 Hz)
Rostgeometrie	variabel, Rost auswechselbar

In Verwirklichung dieser Vorgaben wurde am ATB eine Versuchsmaschine entwickelt, konstruiert und gefertigt, die in Abbildung 5.7 dargestellt ist. Bei dieser Versuchsanlage handelt es sich um eine überschlägige Kammschüttel. Der Materialtransport erfolgt ausschließlich durch die Wurfbewegung der Schüttelzinken, um eine von der Luftabsaugung unabhängige Materialförderung zu gewährleisten. Hierdurch soll ein eindeutiges Regelverhalten für den Massestrom erzielt werden. Die Maschine wurde für einen Massestrom von 1 bis 2 t/h TM Faser-Schäben-Gemisch projiziert und ist mit einer Abmessung von Länge x Breite x Höhe von 350 x 240 x 380 cm (Siebfläche 250 x 200 cm) kleiner als die bekannten industriell eingesetzten Maschinen.



Abb. 5.7: Versuchskammschüttel des ATB

5.5 Kammschüttel-Versuchsstand

5.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Abbildung 5.8 gibt einen Überblick über den grundlegenden Aufbau der Versuche zur Optimierung der Kammschüttel sowie zur Ermittlung der Reinigungsleistung. Als Reinigungsleistung wird die erzielte Faserqualität nach einem Durchlauf durch die Reinigungsmaschine bei einem bestimmten Durchsatz verstanden. Sie wird vorrangig durch den verarbeiteten Massestrom, den Schäbenanteil in den Faserflocken nach der Siebung in einer Kammschüttel - dem so genannten Restschäbengehalt - und der Qualität bzw. den Auflockerungsgrad der Faserflocken in Gegenüberstellung zum Faserfehlaustrag bestimmt.

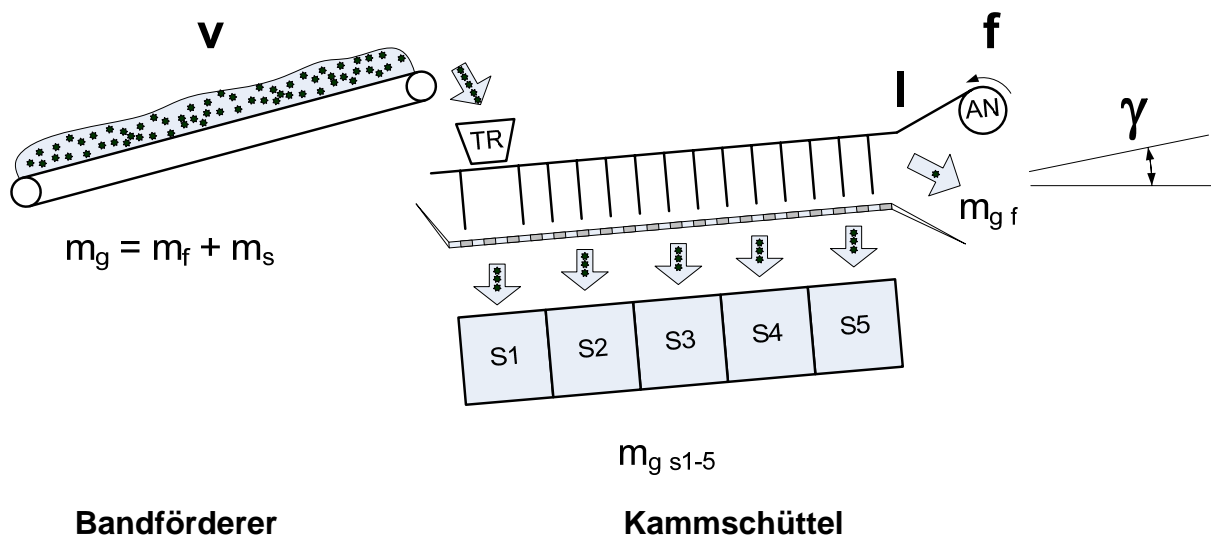


Abb. 5.8: Versuchsaufbau schematisch

v	Zuführungsgeschwindigkeit des Bandförderers	f	Antriebs-/ Schüttelfrequenz
l	Pleuellänge	γ	Neigung der Kammschüttel
S 1-5	Sammelkästen für Schäben und fehlausgetragene Fasern	TR	Aufgabetrichter
		AN	Antrieb
m_g	Gesamtmasse des Aufgabeguts (Faser-Schäben-Gemisch)		
m_s	Masse der im Aufgabegut enthaltenen Schäben	m_f	Masse der im Aufgabegut enthaltenen Fasern
$m_{g \text{ s1-5}}$	Gesamtmasse des Siebdurchgangs (Schäben + fehlausgetragene Fasern)	$m_{g \text{ f}}$	Gesamtmasse des über das Sieb ausgetragenen Faserstroms (Fasern + Restschäben)

Versuchsablauf

Das Versuchsmaterial (ungeröstetes und geröstetes Hanfstroh) wurde in der ATB-Hammermühle unter Standardbedingungen prallaufgeschlossen. Anschließend wurde eine definierte Masse des Faser-Schäben-Gemischs der Kammschüttel in einem kontrollierten Massestrom über einen Bandförderer zugeführt (Abb. 5.9). Für unterschiedliche Maschinen- und Betriebsparameter wurden für die gereinigten Fasern Masse und Restschäbengehalt sowie für die ausgesiebten Schäben Masse und Faserfehlaustrag erfasst. Zur Bestimmung des Massestroms wurde ebenfalls die Verweilzeit des Versuchsmaterials in der Kammschüttel bestimmt. Die Materialparameter der eingesetzten Faser-Schäben-Gemische wurden bereits im Kapitel 4.2 beschrieben. Aus Gründen der zeitlich versetzten Abfolge von Faseraufschluss in der Hammermühle und späterer Reinigung der Faser-Schäben-Gemische wurden die Materialeigenschaften der Faserrohstoffe auch durch eine notwendige Zwischenlagerung verändert. Daher mussten die Rohstoffe zusätzlich noch in drei Kategorien (A-C) weiter unterteilt werden, wie im Folgenden anhand der Versuchsergebnisse noch genauer erläutert wird.

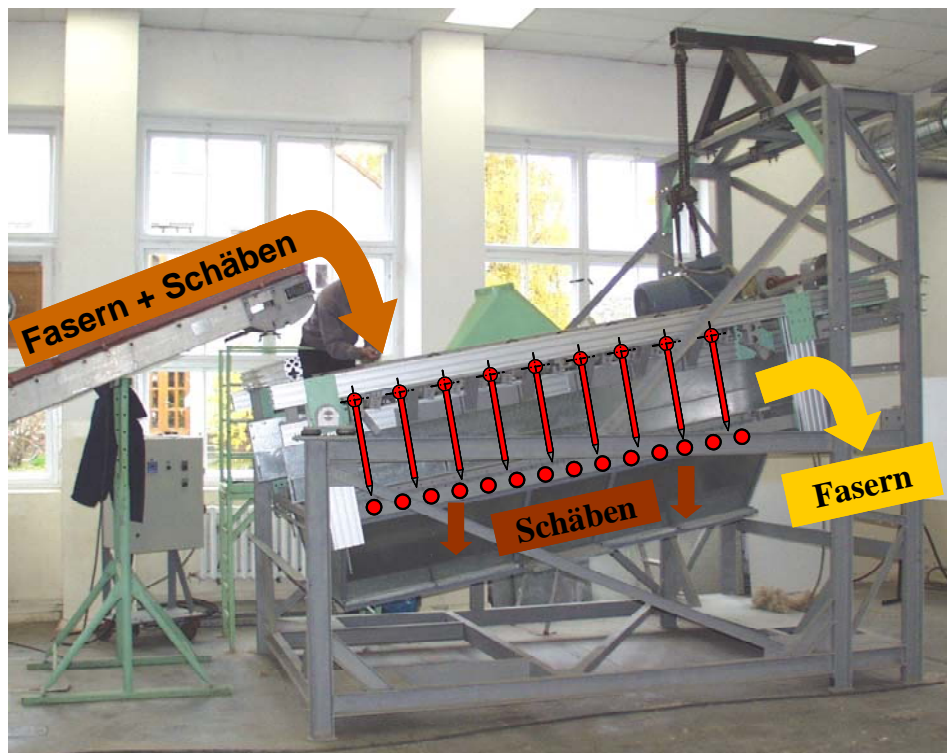


Abb. 5.9: Versuchsaufbau in der Versuchshalle

Mess- und Regeltechnik

Die Zuführgeschwindigkeit des Bandförderers und die Schüttelfrequenz der Zinken können stufenlos über Frequenzumrichter eingestellt werden. Verschiedene weitere Maschinen- und Betriebsparameter können vor Versuchsbeginn kontinuierlich bzw. auf diskrete Werte

voreingestellt werden. Eine Liste der einstellbaren Parameter und der eingesetzten Messsysteme zeigt Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: *Verwendete Messtechnik*

Messgröße	Messsystem / Messverfahren
<i>Konstruktionsparameter</i>	
Schüttelwinkel der Zinken ¹	manuell, Toleranz ± 1 mm
Neigung der Kammschüttel	konstruktiv in 5° Schritten vorgegeben
Sieböffnung und Siebart	manuell, Toleranz $\pm 0,5$ mm
<i>Materialparameter</i>	
Faserfeinheit	manuell und Fibreshape Version 4.5 mit Flachbettscanner
Faserlänge	manuell gemessen
Schäbengehalt	manuell ausgezählt und gewogen, ggf. nach Aufbereitung mit Laborsiebmaschine
Schäbenklassen und -form	Laborsieb und Fibreshape Version 4.5 mit Flachbettscanner
<i>Betriebsparameter</i>	
Schüttelfrequenz, Spannung, Strom- und Leistungsaufnahme der Kammschüttel	Mess-PC mit Steuersoftware Hitachi Drive Manager Suite V 2.0
Masse an Schäben, Fasern sowie Faser-Schäben-Gemischen	Laborwaage (Auflösung 0,01g)
Durchlaufzeit des Faserstroms durch den Siebraum	Stoppuhr (Auflösung 0,1 s)

Probennahme und -analyse

Die Probennahme erfolgte nach [DIN 53 803 Teil 2], unter Berücksichtigung der [DIN 53 803 Teil 1, 3 und 4], durch eine einstufige Auswahl einer kleinen Stichprobe. Nach dieser Methodik wurden repräsentative Proben aus dem Ausgangsmaterial, den gereinigten Fasern und den ausgesiebten Schäben entnommen. Die Stichprobenmenge lag bei den Schäben bei 60 bis 90 g, bei den Fasern und dem Ausgangsmaterial zwischen 20 und 40 g. Die Proben sind nach [DIN 53 803 Teil 2] Zufallsproben, weil die Einheiten der zu prüfenden Grundgesamtheit in zufälliger Anordnung vorlagen. Die Auswahl der Proben erfolgte systematisch, jeweils aus der Mitte des zu beprobenden Haufwerks. Die Probenanalyse und -auswertung erfolgte ebenfalls in Anlehnung an [DIN 53 803 Teil 1 bis 4] sowie nach den in [DRIELING 1999, DRIELING et al. 1999, MÜSSIG 2001] beschriebenen Methoden der Bastfasermessung.

Selbst bei dem angewendeten Verfahren der vereinfachten Entnahme nur kleiner Stichproben ohne aufwändigere mehrstufige Mischprobenherstellung mussten allein für eine Versuchsreihe (ein Schüttelwinkel bei 5 verschiedenen Frequenzen) mindestens 43 Proben entnommen und analysiert werden. Eine umfangreichere Beprobung war mit der vorgegebenen

¹ Der Schüttelwinkel ist proportional zur Pleuellänge und wird über diese eingestellt.

Ausstattung nicht möglich. Für die angestrebte grundlegende Analyse einer Kammschüttel bei gleichzeitiger Optimierung des Maschinenkonzeptes mussten umfangreiche Parametervariationen erprobt werden. Bereits für die hier vorgestellten Untersuchungen wurden mehr als 6000 Proben weitgehend manuell ausgewertet. Als grundlegendes Problem stellten sich bei diesen Analysen immer wieder die stark schwankenden Rohstoffqualitäten heraus. Daher geben die dargestellten Zusammenhänge aufgrund der kleinen Stichprobenumfänge für konkrete Versuchseinstellungen vorrangig die grundlegenden Tendenzen des Reinigungsverhaltens einer Kammschüttel wieder.

Versuchsplan

Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über ausgewählte Versuche zur Optimierung der Versuchseinrichtung und zur Modellierung einer Kammschüttel. Im Vorfeld zu den hier aufgeführten Untersuchungen wurde eine Vielzahl weiterer Versuche zur grundlegenden Auswahl geeigneter Konstruktions- und Betriebsparameter durchgeführt, auf denen die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Versuche aufbauen.

Tabelle 5.2: Versuchsplan

Versuch Nr.	BP ¹	Konstruktionsparameter							Material			Messgrößen			
	Schüttelfrequenz	Schüttelwinkel	Maschinenneigung	Nadelleisten	Zinkenart *	Federspeicher	Siebform	Sieblänge	Materialkategorie	Materialnummer	Röstgrad **	Massestrom	Restschäbengehalt	Analyse des Siebdurchgangs	Leistungsaufnahme
Formelzeichen	f	ϕ_0	γ					L_s				\dot{m}			P
Einheit	Hz	°	°					m				\dot{m}	%		kW
A 1	2,3 – 3,5	1 – 8	0	x	S & K	-	Wr & Ro	2,5	A	02/02	ug	x	x	x	x
B 1	1,8 – 3,5	4	0	-	K	- & x									x
C 1	2,3 – 3,5	4	10	x	K	-	Ro	5	B	11/02	g	x	x		
C 2	2,3 – 3,5	4	20	x	K	-	Ro	5	A	03/03	g	x	x		
D 1	2,3 – 3,5	4	0	x	K	x	Ro	2,5	A	04/05	g	x	x	x	

(Fortsetzung nächste Seite)

¹ BP: Betriebsparameter

Tabelle 5.2: Versuchsplan (Fortsetzung)

Versuch Nr.	BP		Konstruktionsparameter						Material			Messgrößen			
	Schüttelfrequenz	Schüttelwinkel	Maschinenneigung	Nadelleisten	Zinkenart *	Federspeicher	Siebform	Sieblänge	Materialkategorie	Materialnummer	Röstgrad **	Massestrom	Restschäbengehalt	Analyse des Siebdurchgangs	Leistungsaufnahme
Formelzeichen	f	ϕ_0	γ					L_s				\dot{m}			P
Einheit	Hz	°	°					m				\dot{m}	%		kW
D 2	2,3 – 3,5	1 – 8	0	x	K	x	Ro	2,5	B	04/05	g	x	x	x	
D 3	1,3 – 3,6	1 – 8	10	x	K	x	Ro	2,5	B	04/05	g	x	x	x	
D 4	2,3 – 3,5	1 – 8	20	x	K	x	Ro	2,5	B	04/05	g	x	x	x	
E 1	2,3 – 3,5	1 – 8	0 – 20	-	K	x	Ro	2,5	B	04/05	g	x	x	x	
F 1	2,3 – 3,5	4	0	x	K	x	Ro Wg Rv Qg	2,5	C	04/05	g	x	x	x	
G 1	2,3 – 3,5	1 – 8	10	-	K	-	Ro	2,5	B	11/02	g	x	x	x	
H 1	2,3 – 3,5	1 – 8	0	x	K	- & x	Rv	2,5	B	05/05	lg	x	x	x	
H 2	2,3 – 3,5	4	20	x	K	- & x	Rv	2,5	B	05/05	lg	x	x	x	

* Zinkenart: K ... konisch auslaufender Konstruktalzinken, S ... zylindrischer Stahlzinken (siehe Abb. 5.18 und 5.19)

** Röstgrad: ug ... ungeröstet, lg ... leicht geröstet, g ... geröstet

5.5.2 Grundlegende Versuchsergebnisse

Erwartungsgemäß zeigt sich bei der Reinigung von Faser-Schäben-Gemischen das für die Klassierung in kontinuierlich arbeitenden Siebklassierern dargestellte typische Bild der Abnahme des Unterkornanteils (hier konkret als Schäben bezeichnet) im Siebgut über die Sieblänge (Abb. 5.10).

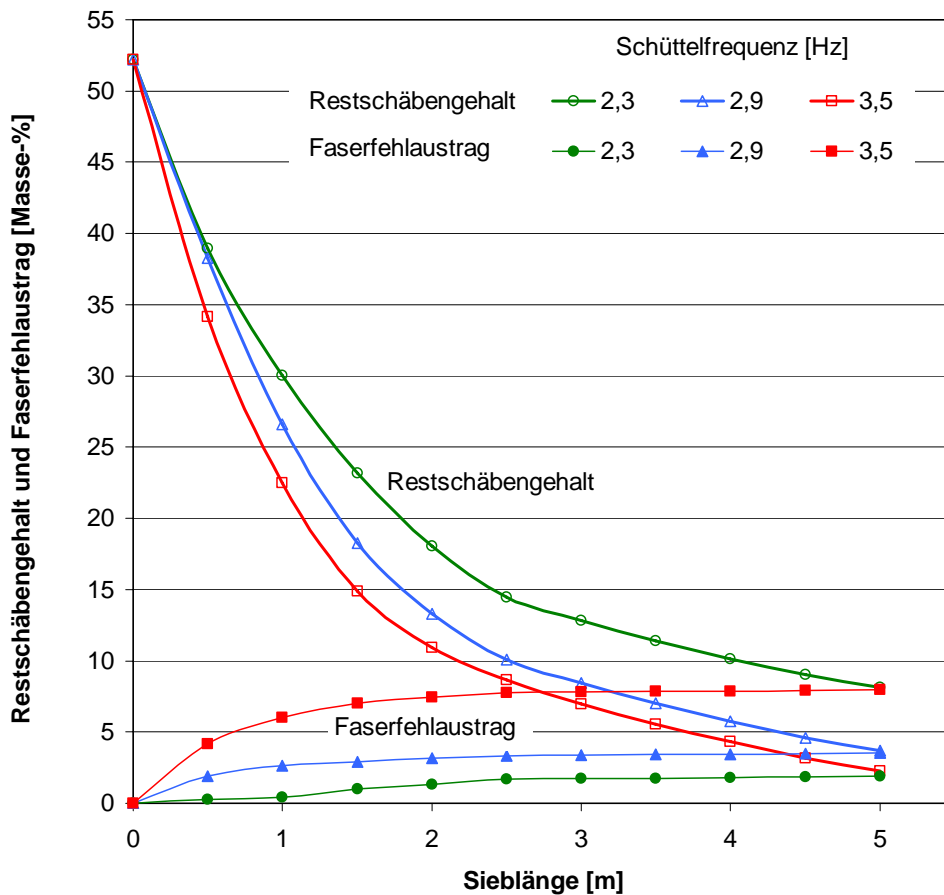


Abb. 5.10: Restschäbengehalt in Abhängigkeit von Sieblänge und Schüttelfrequenz (Versuch C 2, $\gamma = 20^\circ$, $\phi_0 = 4^\circ$, Materialkategorie A geröstet)

Der Restschäbengehalt sinkt kontinuierlich mit der Sieblänge, die Reinheit der Fasern nimmt zu. Wie aus der Faserreinigungspraxis [CHARLE et al. 1997, MCALISTER 2001] bekannt, muss eine höhere Faserreinheit über die Sieblänge auch hier mit einem zunehmenden Anteil an durch den Siebboden fehlausgetragenen Fasern erkauft werden. Hierbei handelt es sich vor allem um sehr kurze Fasern mit Längen unter 20 mm, die aufgrund ihrer Geometrie nur über geringe Bindekräfte in Form von Verschlingungen oder Verhakungen zu anderen längeren Fasern einer Flocke verfügen, so dass sie leicht herausgelöst werden können und den Siebboden passieren. Darüber hinaus wird sichtbar, dass mit zunehmender Schüttelfrequenz der Restschäbengehalt sinkt. Mit der Schüttelfrequenz steigen die auf die Faserflocke und die Schäben einwirkenden Kräfte und Beschleunigungen. Die Flocken werden intensiver aufgelöst, so dass mehr Schäben den Siebboden passieren können.

Spezielle Fehlerquellen der Probennahme und Versuchsdurchführung

Abbildung 5.11 zeigt noch einmal die in Abbildung 5.10 dargestellte Abnahme des Restschäbengehalts über die Sieblänge, jedoch unter Angabe der Standardabweichung für eine für die Versuche typische aus sechs Einzelmessungen bestehende Messreihe. Bei höheren Restschäbengehalten streuen die Messwerte stärker. Bei Restschäbengehalten unter 15 Masse-% gibt es jedoch keine Überschneidungen der Standardabweichungen mehr. Im Bereich der gemäß Anforderungsliste notwendigen Restschäbengehalte unter 7 Masse-% sind die erzielten Messergebnisse signifikant.

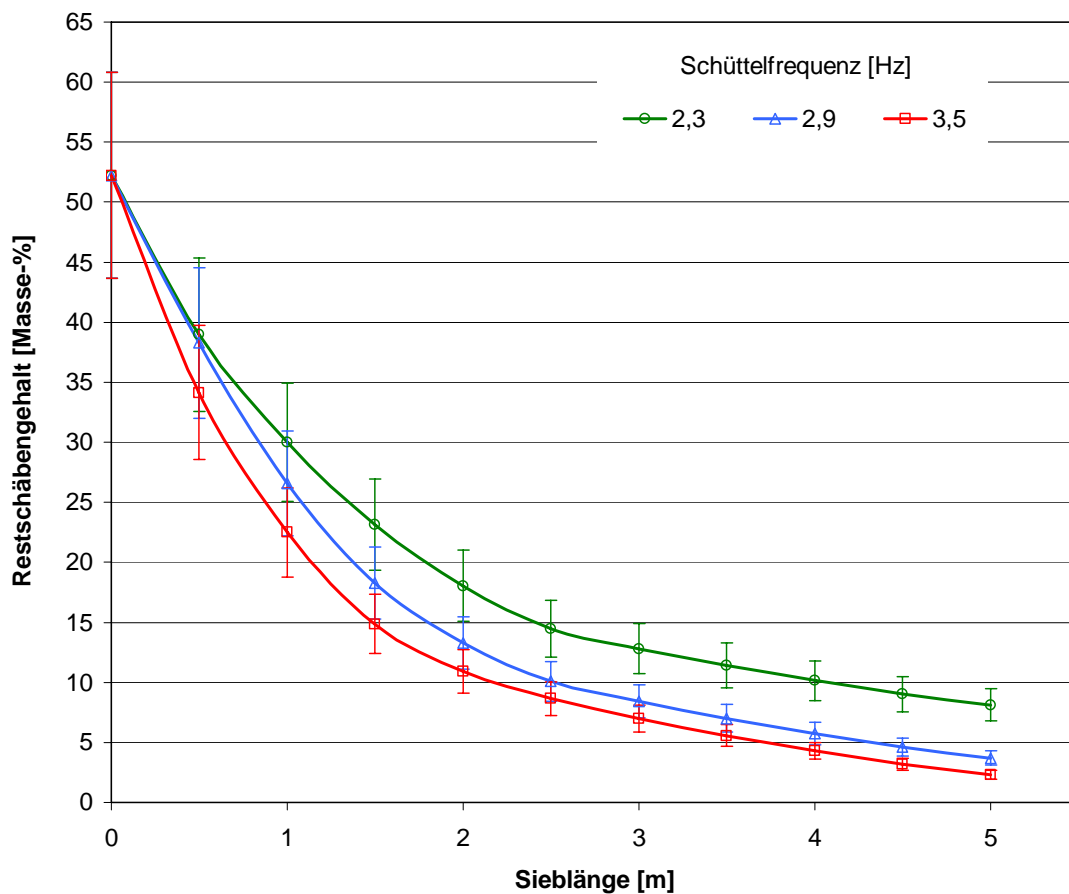


Abb. 5.11: Restschäbengehalt in Abhängigkeit von der Sieblänge unter Angabe der Standardabweichung der Schäbengehaltsbestimmung
(Versuch C 2, $\gamma = 20^\circ$, $\phi_0 = 4^\circ$, Materialkategorie A geröstet)

Da die Probennahme bei hohen Schäbengehalten stärker fehlerbehaftet ist als bei niedrigeren und damit die Messdaten stärker streuen, hat folgende Ursachen: Das Material ist deutlich inhomogener als gereinigtes Material. Die Schäben neigen dazu, durch vorhandene Hohlräume zu rieseln. Sie bilden mit dem Auge nicht eindeutig erkennbare „Schäbennester“ oder rieseln gänzlich aus den Flocken heraus. Ein weiterer Fehler wird durch notwendiges Zwischenlagern des Faser-Schäben-Gemischs in Big-Bags vor der weiteren Verarbeitung verursacht. Ein Zwischenlagern war deshalb häufig notwendig, da die Versuchseinrichtung

nicht unmittelbar in eine kontinuierlich arbeitende Faseraufschlusslinie eingebunden werden konnte. Durch die Lagerung kommt es zum partiellen Entmischen, Verfilzen und Verdichten des Faser-Schäben-Gemisches. Direkt aus der Entholzung entnommene und dadurch aufgelockerte Rohstoffe können jedoch wesentlich besser gereinigt werden als vorverdichtete und teilweise verfilzte Chargen. Daher wurden die Rohstoffe in drei Grundkategorien eingeteilt:

- A) direkt entnommen und unverdichtet verarbeitet,
- B) über wenige Monate zwischengelagert und verdichtet, Flocken nur geringfügig entmischt und verfilzt,
- C) langfristig zwischengelagert und stärker verdichtet, Flocken sichtbar entmischt und häufig verfilzt.

Qualitativ zeigen alle untersuchten Hanffaser-Schäben-Gemische das gleiche Reinigungsverhalten, der Restschäbengehalt nimmt über die Sieblänge ab (Abb. 5.12). Jedoch weisen stärker verdichtete und verfilzte Gemische (Kategorie B und C) nach dem Passieren der Kammschüttel immer einen deutlich höheren Restschäbengehalt auf als Gemische der Kategorie A (direkt der Entholzung entnommen und unverdichtet). Ferner wirkt sich die Konsistenz der Faserrohstoffe auch auf die Streuung der Versuchsergebnisse aus. Erwartungsgemäß streuen die Ergebnisse für inhomogene verfilzte Faser-Schäben-Gemische (Kategorie B und C) stärker als die direkt verarbeiteter homogener Gemische (Kategorie A).

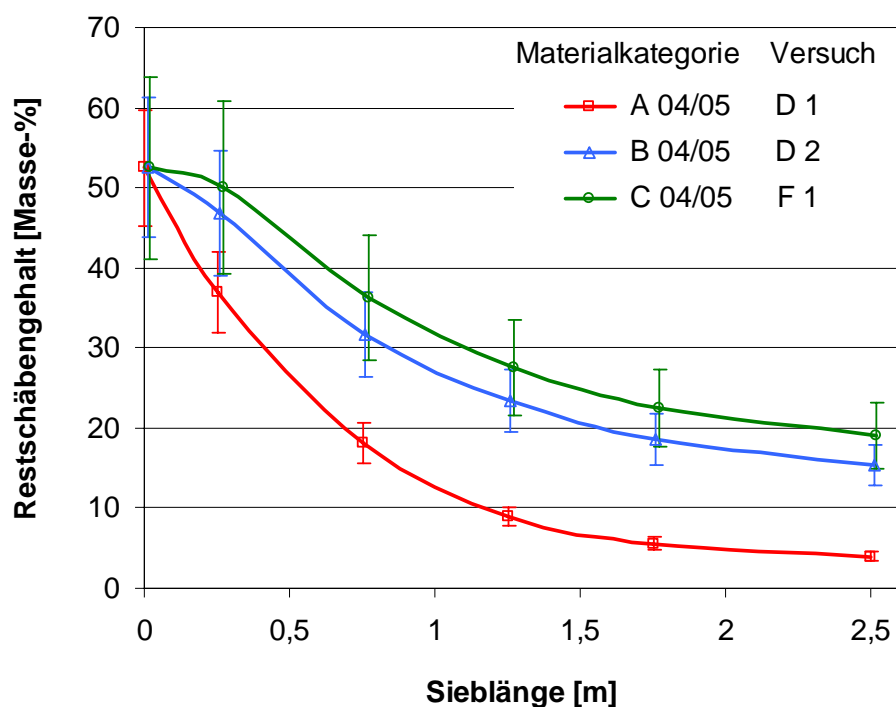


Abb. 5.12: Restschäbengehalt in Abhängigkeit von der Rohstoffqualität ($\gamma = 0^\circ$, $\phi_0 = 4^\circ$, Materialkategorie A-C geröstet)

5.6 Optimieren der Siebfläche und des Materialtransports

Im Rahmen einer ersten konstruktionstechnischen Optimierung der Kammschüttel wurden entsprechend dem dargestellten Versuchsaufbau weitere grundlegende Versuche für die Beurteilung der Einflüsse der Siebraumgestaltung und der Zusammenhänge zwischen Maschinen- und Betriebsparametern mit dem Massestrom und der Reinigungsleistung der Versuchskammschüttel durchgeführt.

Da der Massestrom bei einer Kammschüttel – wie bei den meisten Reinigungsmaschinen der Textiltechnik – proportional zur Arbeitsbreite der Maschine ist, wurden die Ergebnisse als spezifischer Massestrom dargestellt. Als spezifischer Massestrom wird die Masse verarbeiteten Eingangsmaterial pro Meter Arbeitsbreite und Stunde definiert.

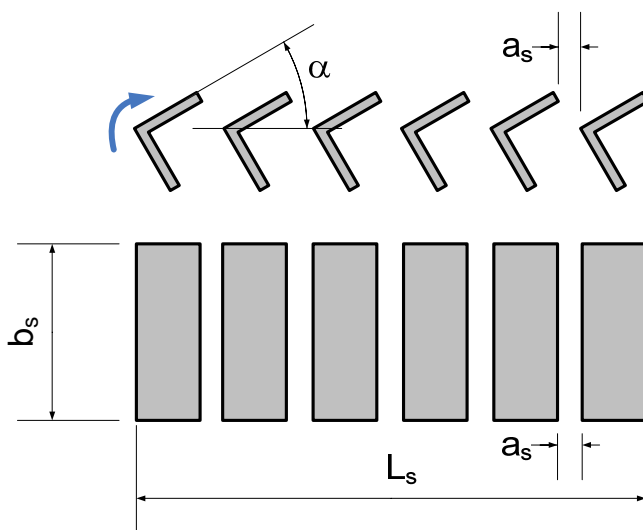
Die Versuche haben gezeigt, dass die Reibungsverhältnisse im Siebraum sowie die Sieb- und die Zinkengeometrie von entscheidendem Einfluss auf den Materialtransport über das Sieb und die Auflösung der Faserflocken sind. In diesem Kapitel stehen deshalb die baulichen Rahmenbedingungen im Siebraum einer Kammschüttel im Vordergrund. Die optimale Gestaltung dieser Parameter für den Materialtransport und die Schäbenabscheidung ist die Voraussetzung für die anschließende Untersuchung der Betriebsparameter wie z. B. Schüttelfrequenz und Kammschüttelneigung.

5.6.1 Varianten der Siebflächegestaltung

Die Gestaltung der Siebfläche steht nicht nur in engem Zusammenhang mit den Reibungsverhältnissen zwischen Faserflocke und Sieb (vgl. Tab. 4.3) sondern bestimmt über die Siebfreifläche ebenso das Abscheideverhalten und die Trennung in Grobkorn und Siebdurchgang [SCHUBERT 1975, REGGE 1980, MEINEL 1999, MEINEL 2001]. Eine Analyse der hiermit verbundenen Wahrscheinlichkeiten für das Passieren des Siebes in Abhängigkeit von der Korngröße erfolgt in Kapitel 7 im Rahmen der Modellierung des Trennverhaltens von Fasern und Schäben. Hier soll zunächst nur ein Überblick über die unterschiedlichen eingesetzten Siebformen gegeben werden (Tab. 5.3 und Abb. 5.13 bis 5.16).

Table 5.3: Siebfreiflächen der in der Versuchsmaschine eingesetzter Siebe

Siebtyp	Siebfreifläche A	Bemerkung
verstellbarer Winkelrost Wr	0 ... 30 %	Abb. 5.13
Stabrost Ro	Stababstand 5 – 25 mm A = 25 – 62,5 %	Abb. 5.14
Wellengitter Wg 30-30	A= 81 % Maschenweite 27x27 mm Drahtdurchmesser 3 mm	Abb. 5.15
Siebblech mit Rund- und Quadratlochung Rv 20-28 und Qg 25-30	Rundloch A= 46,3 % Lochdurchmesser 20 mm, Lochmitten- abstand 28 mm Quadratloch A= 69,4 % Lochweite 25 mm Lochmittenabstand 30 mm	Abb. 5.16

**Abb. 5.13:** Winkelrost mit in Abhängigkeit vom Neigungswinkel α einstellbarem Rostabstand a_s

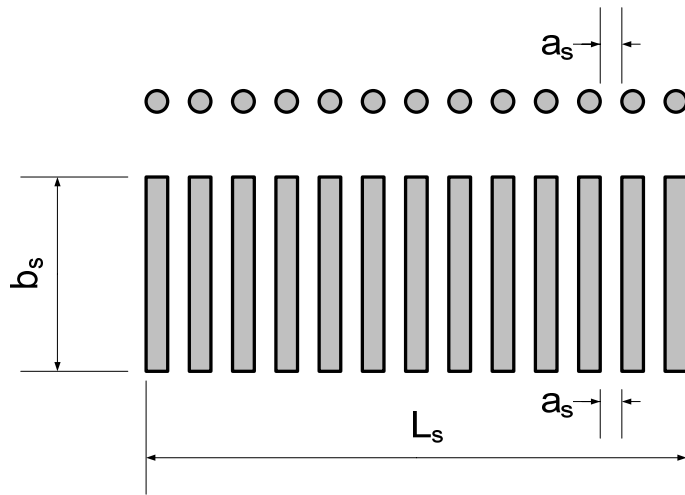


Abb. 5.14: Stabrost

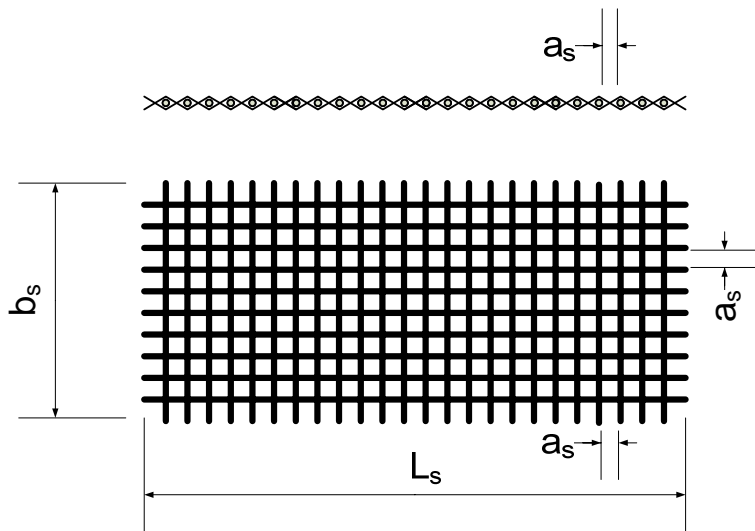


Abb. 5.15: Wellengitter

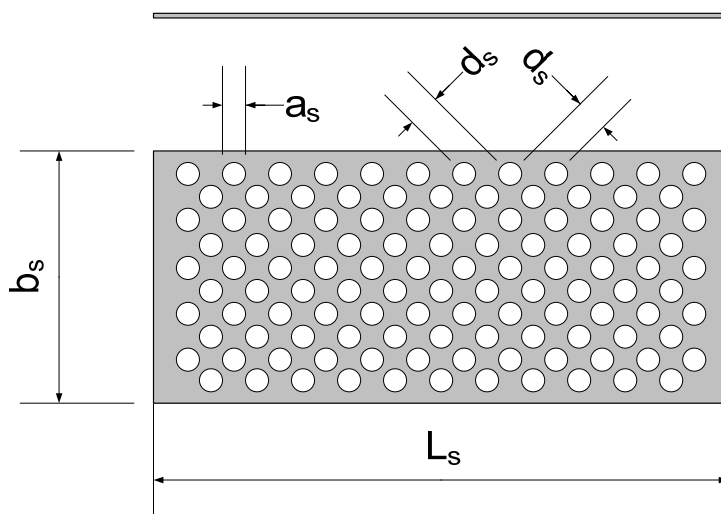


Abb. 5.16: Siebblech

5.6.2 Einflussparameter des Materialtransports

In Tastversuchen wurde der Einfluss der Zinkenform und -oberfläche auf den Materialtransport untersucht. Hierfür wurden nicht polierte, zylindrische Stahlzinken und polierte, konisch auslaufende Zinken aus Konstruktal¹ eingesetzt. Diese Versuche haben ergeben, dass polierte Oberflächen eine grundlegende Voraussetzung für einen stabilen Materialtransport durch die Kammschüttel darstellen. Die grundlegenden geometrischen Rahmenbedingungen im Siebraum einer Kammschüttel wurden bereits in Abbildung 5.6 dargestellt. Einen Überblick über die Wurfwinkel und die Reibungsverhältnisse gibt Abbildung 5.17.

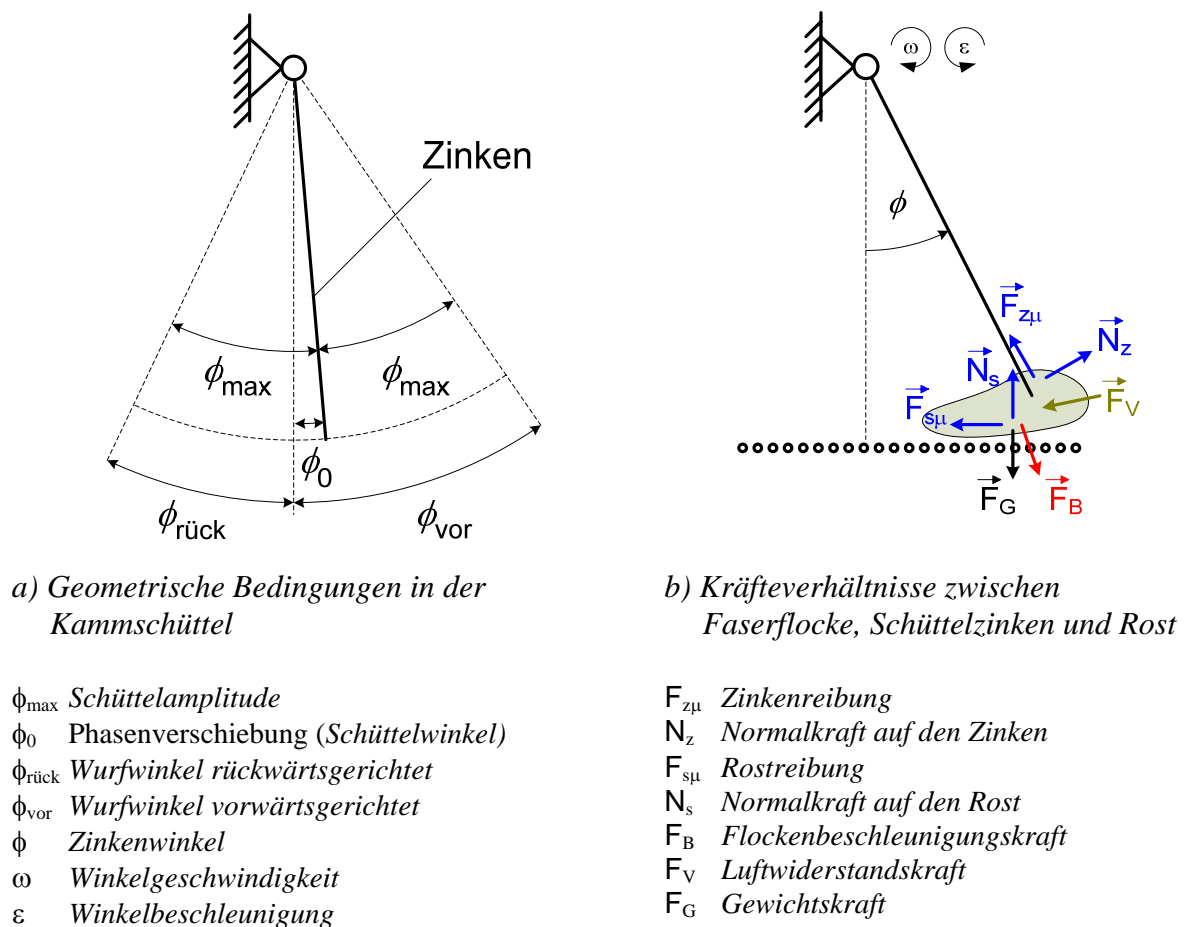


Abb. 5.17: Winkel- und Kräfteverhältnisse an den Zinken

Ein anfangs untersuchter verstellbarer Winkelrost (Abb. 5.13) mit lackierter Oberfläche hat sich nicht bewährt. Die Flocken neigen aufgrund der geometrischen Verhältnisse auf der Rostoberfläche und der erhöhten Reibwerte zum Abrollen und Agglomerieren. Ebenso haben sich zylindrische Stahlzinken mit einem Durchmesser von 12 mm (Abb. 5.18) nicht bewährt, da aufgrund der Form dieser Zinken häufiger Flocken an den Zinken verhaken und nicht mehr abgeworfen werden. Diese Zinken wurden durch polierte Zinken aus Konstruktal mit einem Durchmesser von 20 mm und einer zum unteren Ende konisch auslaufenden Spitze ersetzt

¹ eine hochfeste sehr leichte Aluminiumlegierung (AlZnMgCu1,5)

(Abb. 5.19). Hierdurch konnte der beschriebene den Massestrom behindernde Effekt vollständig unterbunden werden.



Abb. 5.18: Kammschüttel mit Winkelrost und zylindrischen Stahlzinken



Abb. 5.19: Kammschüttel mit Kupfer-Stabrost und mit Spitzen versehenen Konstruktalzinken

5.6.3 Einflussparameter der Flockenauflösung

Neben der Geometrie von Rost und Zinken ist ebenfalls die geometrische Anordnung der Zinken im Siebraum von Einfluss auf den Flockentransport und die Flockenauflösung. Nach einer Versuchsserie mit veränderter Zinkenordnung wurde die in Abb. 5.20 dargestellte Zinkenverteilung für alle weiteren Untersuchungen festgelegt und unverändert beibehalten.

Diese Anordnung hat sich für die typische Auswahl an Hanffaser-Schäben-Gemischen als am günstigsten herausgestellt.

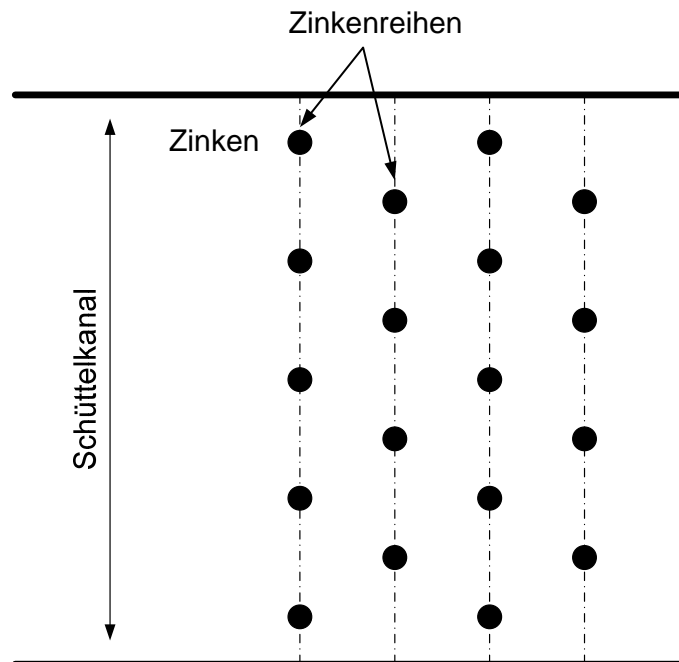


Abb. 5.20: Zinkenordnung auf Lücke zur nachfolgenden Zinkenreihe

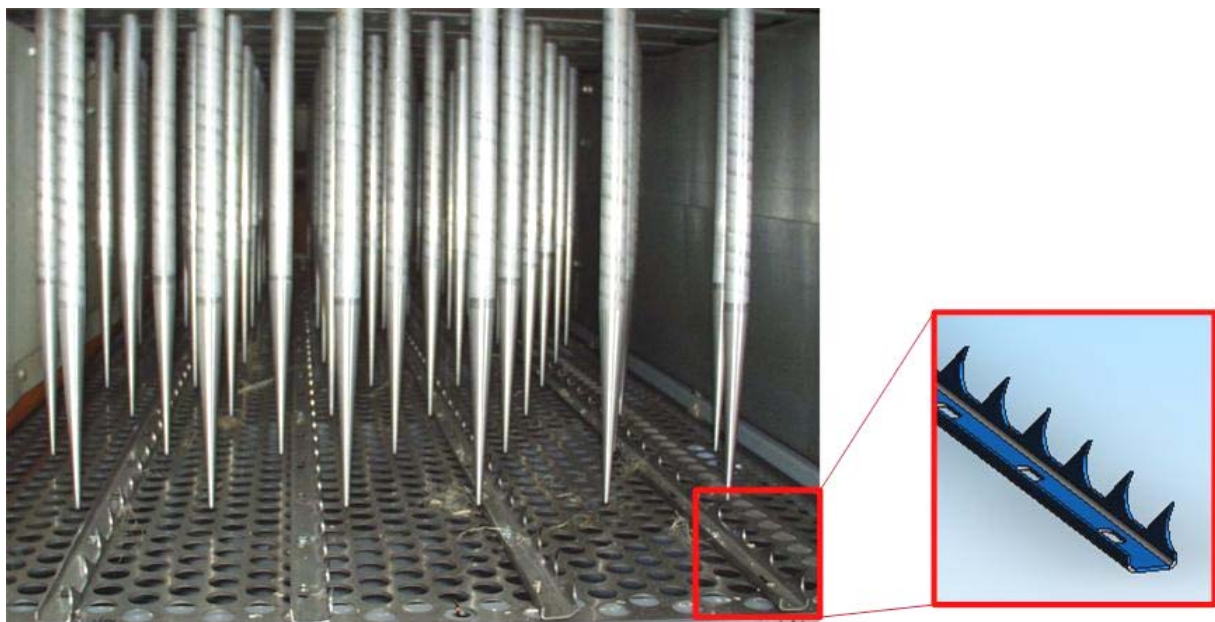


Abb. 5.21: Zinkenleiste

5.5.4 Versuchsergebnisse zur Siebraumgestaltung

In den Abbildungen 5.22 bis 5.25 sind die Versuchsergebnisse zum Einfluss der Siebraumgestaltung auf die Reinigungsqualität, den Faserfehlaustrag und den Massestrom durch die Kammschüttel dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Massestrom als

spezifischer Massestrom – definiert als der verarbeitete Massestrom pro Meter Arbeitsbreite der Reinigungseinrichtung – dargestellt. Aus den zu diesen Zusammenhängen durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Der Restschäbengehalt nimmt bei allen vier Siebformen mit steigender Schüttelfrequenz ab (Abb. 5.22).
- Betrachtet man die ebenen Siebbleche (Rv und Qg) und die leicht dreidimensional ausgeprägten Siebe (Wg und Ro) getrennt voneinander, kann man feststellen, dass mit zunehmender Siebfreifläche der Restschäbengehalt sinkt (Abb. 5.22).
- Der Faserfehlaustrag nimmt mit steigender Schüttelfrequenz, mit größeren bzw. ausgeprägteren Rostunebenheiten und mit größerer Siebfreifläche zu (Abb. 5.23).
- Der Massestrom durch die Kammschüttel ist bei ebenen Sieben höher als bei dreidimensional strukturierten Sieboberflächen (Abb. 5.24).
- Die eingebauten Zinkenleisten erhöhen den Massestrom durch die Kammschüttel bereits bei niedrigeren Schüttelfrequenzen. Durch den Einbau dieser Leisten wird insbesondere beim Betrieb der Anlage mit ansteigendem Schüttelkanal und geringem Schüttelwinkel der Zinken (ϕ_0) in Transportrichtung (vgl. Abb. 5.17) ein kontinuierlicher Transport der Fasern durch den Schüttelkanal und folglich ein höherer Massestrom gewährleistet (Abb. 5.25).

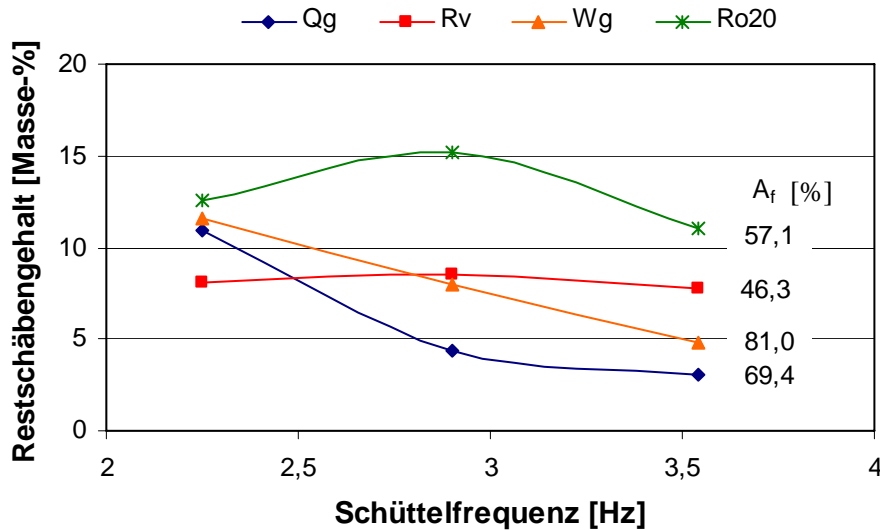


Abb. 5.22: Restschäbengehalt in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz für verschiedene Siebformen
(Versuch F 1, $\gamma = 0^\circ$, $\phi_0 = 4^\circ$, mit Zinkenleisten¹, Materialkategorie C geröstet)

Siebformen:	Siebfreifläche A_f :
Qg ... Quadratlochung 25-30,	69,4 %
Rv ... Rundlochung 20-28	46,3 %
Wg ... Wellengitter 30-30	81,0 %
Ro20... Stabrost, Sieböffnung $a_s=20$ mm	57,1 %

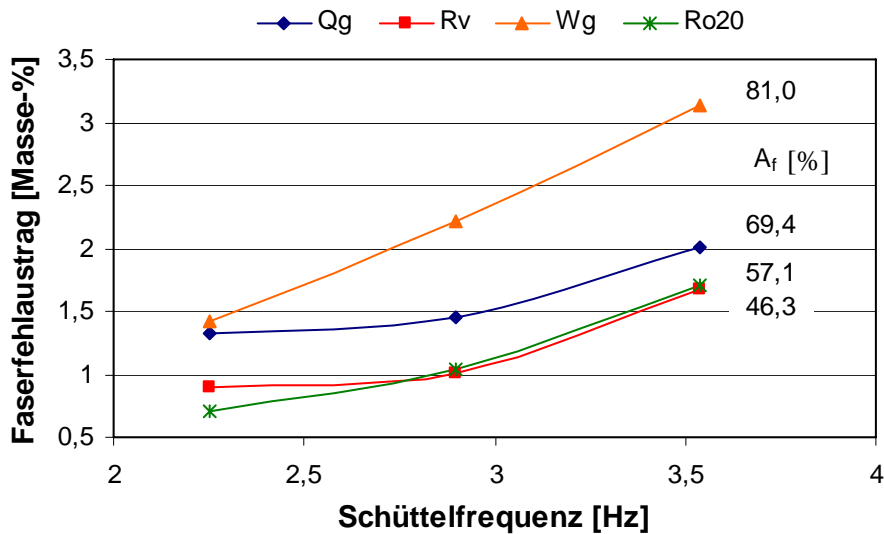


Abb. 5.23: Faserfehlaustrag² in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz für verschiedene Siebformen
(Versuch F 1, $\gamma = 0^\circ$, $\phi_0 = 4^\circ$, mit Zinkenleisten, Materialkategorie C geröstet)

Siebformen:	Siebfreifläche A_f :
Qg ... Quadratlochung 25-30,	69,4 %
Rv ... Rundlochung 20-28	46,3 %
Wg ... Wellengitter 30-30	81,0 %
Ro20... Stabrost, Sieböffnung $a_s=20$ mm	57,1 %

¹ siehe Abb. 5.21

² bezogen auf die gesamte der Reinigungsmaschine zugeführten Masse

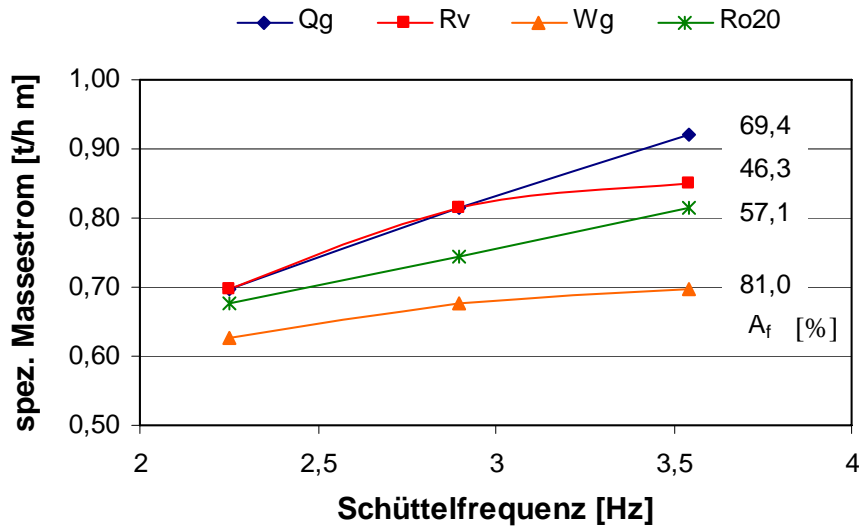


Abb. 5.24: Spezifischer Massestrom in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz für verschiedene Siebformen (Versuch F 1, $\gamma = 0^\circ$, $\phi_0 = 4^\circ$, ohne Zinkenleisten, Materialkategorie C geröstet)

Siebformen:	Siebfreifläche A_f :
Qg ... Quadratlochung 25-30,	69,4 %
Rv ... Rundlochung 20-28	46,3 %
Wg ... Wellengitter 30-30, d=3mm	81,0 %
Ro20... Stabrost, Sieböffnung $a_s=20$ mm	57,1 %

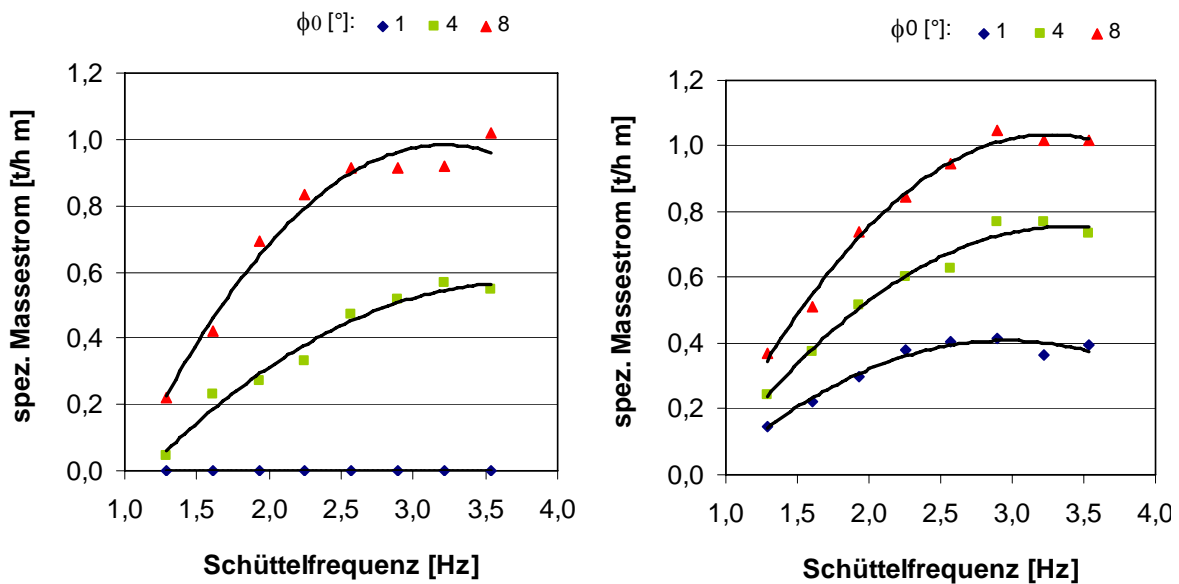


Abb. 5.25: Spezifischer Massestrom in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz ohne (links) und mit (rechts) Zinkenleisten im Siebraum bei verschiedenen Schüttelwinkeln¹ ϕ_0 (Versuch E 1(links) und D 4(rechts), $\gamma = 20^\circ$, Materialkategorie B geröstet)

¹ siehe Abb. 5.17 a)

5.6.5 Versuchsergebnisse zum Einfluss grundlegender Betriebsparameter

Des Weiteren sollten allgemeine Zusammenhänge zwischen grundlegenden Betriebsparametern, Massestrom und Reinigungsergebnis ermittelt werden (Abb. 5.23 – 5.27). Hierfür wurden folgende Maschineneinstellungen variiert (vgl. Abb. 5.6):

- die Antriebsfrequenz (Schüttelfrequenz f),
- die Schüttelwinkel der Zinken (ϕ_0),
- der Neigungswinkel des Schüttelkanals (γ),
- der Kurbelscheibenradius (r) und
- die Kurbellänge (b).

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen konnten erste allgemeine Zusammenhänge zwischen Maschineneinstellung, Massestrom und Restschäbengehalt (Qualität der Faserreinigung) ermittelt werden (Abb. 5.23 – 5.28). Ein Überblick über die Ergebnisse dieser Optimierungsversuche ist in Tabelle 5.4 zusammengestellt.

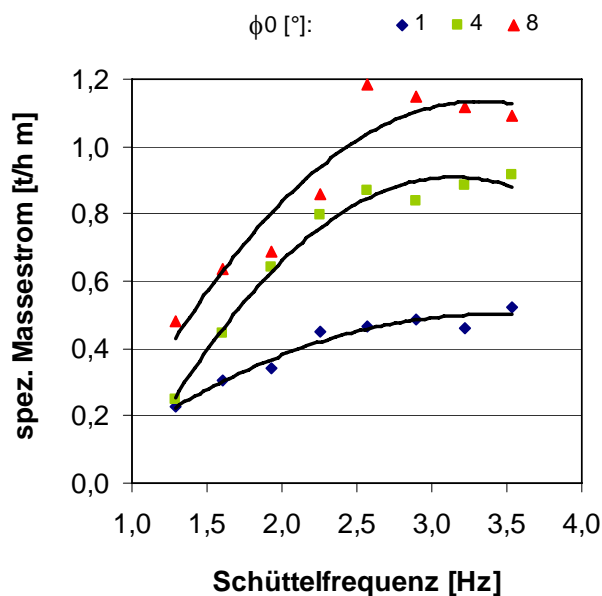


Abb. 5.26: Zusammenhang Schüttelwinkel, Frequenz und Massestrom (Versuch D 2, Materialkategorie B geröstet)

ϕ_0 : 1, 4 und 8° , $\gamma = 0^\circ$,
mit Zinkenleisten

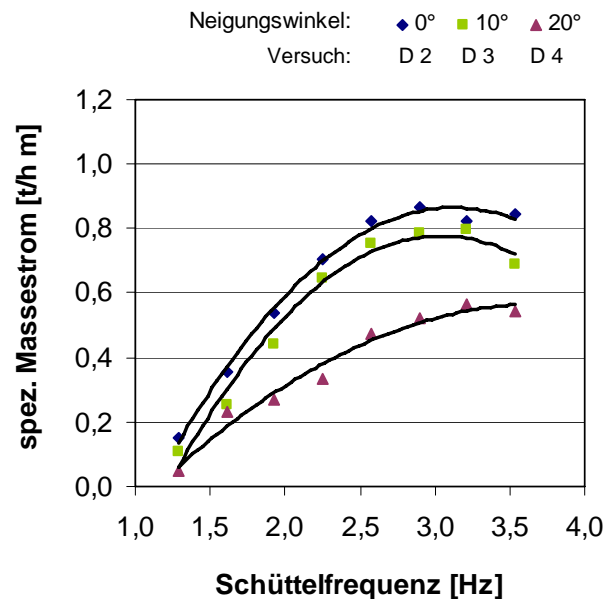


Abb. 5.27: Zusammenhang Neigungswinkel, Frequenz und Massestrom (Versuch D 2 bis D 4, Materialkategorie B geröstet)

γ : 0, 10 und 20° , $\phi_0 = 4^\circ$,
mit Zinkenleisten

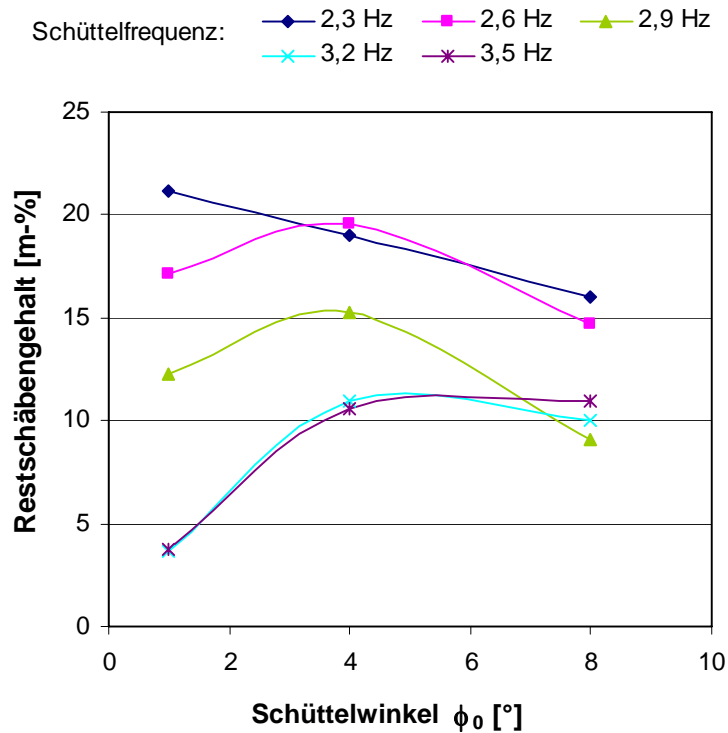


Abb. 5.28: Zusammenhang Schüttelwinkel, Frequenz und Restschäbengehalt (Versuch C 1, $\gamma = 10^\circ$, Materialkategorie B geröstet)

Schüttelfrequenz f: 2,3 bis 3,5 Hz

Tabelle 5.4: Grundzusammenhänge zwischen Maschineneinstellungen, Massestrom und Reinigungsleistung

Einfluss auf Parameter	Amplitude ϕ_{max}	Vorwärtswurf ϕ_v	Rückwärtswurf ϕ_r	Massestrom	Restschäbengehalt
Erhöhung des Schüttelwinkels ϕ_0	/	>	<	>>	-
Erhöhung der Frequenz f	/	/	/	>	<<
Erhöhung des Neigungswinkels γ des Schüttelkanals	/	/	/	<	<
<i>weitere Konstruktionsparameter¹</i>					
Verkleinerung des Kurbelscheibenradius r	<	<	<	<	<
Verkleinerung der Kurbellänge b	>	>	>	-	>

/ konstruktionsbedingt ohne Einfluss - geringer oder kein Einfluss
 < verkleinert << stark verkleinert
 > vergrößert >> stark vergrößert

¹ Die hier aufgeführten Parameter wurden nur bei ersten Tests variiert und dann in allen weiteren Versuchen in ihrem Optimum beibehalten.

Schlussfolgerungen

Für Einsatz einer Kammschüttel in der Kurzfasergewinnung sind der verarbeitbare Massestrom und die Qualität der Reinigung, d.h. der Restschäbengehalt in den gereinigten Fasern im Verhältnis zu dem Anteil fehlausgetragener Fasern, die wesentlichen Kenngrößen für die Leistungsfähigkeit dieser Reinigungsmaschine. Die grundlegenden Untersuchungen zur Optimierung der Maschinenkonstruktion haben gezeigt, dass die Schüttelfrequenz, der Schüttelwinkel und die Siebform sowie der Einsatz von Zinkenleisten den größten Einfluss auf die genannten Parameter haben.

Für die Konstruktion der Maschine ist darüber hinaus die Neigung des Schüttelkanals von Bedeutung. Maschinen mit leicht ansteigendem Kanal lassen sich aufgrund der größeren Übergabehöhe zur nachfolgenden Maschine günstiger in die gesamte Reinigungslinie integrieren. Außerdem kann hierdurch eine größere Siebfläche bei gleicher Grundfläche der Maschine realisiert werden.

Bezüglich der Siebform konnte festgestellt werden, dass der Einsatz von Sieben, die einen stärkeren Widerstand für den Faserstrom durch den Schüttelkanal darstellen (Wellengitter und Siebblech mit Quadratlochung), einen geringeren Restschäbengehalt zur Folge haben. Gleichzeitig steigt jedoch der Anteil der fehlausgetragenen Fasern. Welche Siebform die Richtige ist, muss vor allem unter ökonomischen Gesichtspunkten entschieden werden. Ferner muss untersucht werden, ob nicht ein längeres Sieb mit einem geringeren Faserfehlaustrag (Stabrost oder Rundlochsieb) zu ähnlich gut gereinigten Fasern führt, bei einem jedoch wirtschaftlich günstigeren Anlagenbetrieb. Hierauf wird in den folgenden Kapiteln 7 - 9 noch genauer eingegangen.

5.7 Optimieren des Antriebs

Wie bereits dargestellt, verfügen die in der Praxis eingesetzten Kammschüttelsysteme üblicherweise über keinen Masseausgleich. Die durch den Kurbeltrieb verursachten Maschinenschwingungen führen jedoch zu einem drastisch erhöhten Verschleiß des Antriebsstrangs bei gleichzeitig erhöhtem Antriebsenergiebedarf. Um die Forderungen nach einer hohen Zuverlässigkeit der Reinigungsmaschine bei geringem Wartungsaufwand und niedrigen Betriebskosten zu erfüllen, musste zunächst das Antriebskonzept überarbeitet werden. Ziel dieser Überarbeitung ist die Entlastung des Antriebsstranges durch den Einbau eines Masseausgleichs oder eines Schwingungsdämpfers (z. B. in Form eines Federspeichers).

Die hierfür notwendige Analyse des Antriebes erfolgt nach [VDI 2729] und der in [DUBBEL 1997, S. 159 bis 161] dargestellten Modul-Methode. Auch wenn dieses Vorgehen zur Analyse eines Gelenkgetriebes an sich keine Neuheit darstellt, so trägt es doch wesentlich zum Verständnis der Kinematik einer Kammschüttel bei. Praxiserfahrungen mit Kammschütteln haben gezeigt, dass die durch das Gelenkgetriebe ausgelösten Maschinenschwingungen eine wesentliche Ursache für Ausfälle dieses ansonsten sehr robusten Systems sind. Die Ausrüstung einer Kammschüttel mit einem Masseausgleich oder einem Schwingungsdämpfer ist daher für die Erfüllung der in Kapitel 4.4.1 aufgestellten Anforderungen notwendig und besitzt darüber hinaus Neuheitswert. Daher sollen die hierzu durchgeführten Arbeiten auch im Folgenden zusammenfassend kurz dargestellt werden.

5.7.1 Funktionsanalyse des Kurbeltriebs

Die konstruktionstechnische Analyse des Antriebsstranges hat gezeigt, dass sich ein Federspeicher sehr kostengünstig an der Kammschüttel zur Schwingungsdämpfung und gleichzeitig zur Energiespeicherung integrieren lässt. Um ein solches System zu entwickeln, muss eine mechanische Analyse der Funktion des Kurbeltriebs durchgeführt werden. Die im Antrieb wirkenden Trägheitskräfte und –momente können auf der Grundlage dieser Analyse gezielt mit einem geeigneten Federspeicher reduziert und bestenfalls kompensiert werden. Hierfür sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

- a) Aufstellen eines mechanischen Ersatzmodells,
- b) kinematische Analyse zur Ermittlung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen im Antriebsstrang,
- c) Gelenkkraftanalyse auf der Grundlage der ermittelten Kinematik,
- d) Erweiterung des Gelenkkraftmodells durch Integration eines Schwingungsdämpfers an einem geeigneten Gelenk zur Kräftenminimierung im Antriebsstrang.

Aufstellen eines mechanischen Ersatzmodells

Zum Erstellen eines mechanischen Ersatzmodells wird der Antrieb der Schüttelkämme auf jene wesentlichen Bauteile reduziert, die für eine Betrachtung des Kurbeltriebs notwendig sind:

- die Kurbelscheibe ①,
- das Pleuel ②,
- die Pleuel Pleuel ③,
- die Schüttelzinken ④ sowie
- die Gelenke P_0 bis P_3 und die Zinkenspitze P_4 .

Die Abbildungen 5.29 und 5.30 zeigen das reduzierte Antriebsmodell (3D-Modell aus Solidworks2004) und das mechanische Ersatzmodell.

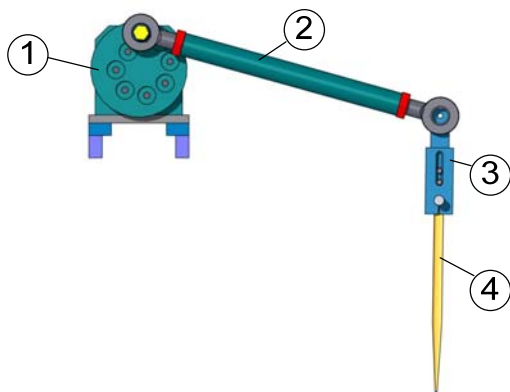


Abb. 5.29: Reduziertes Antriebsmodell eines Schüttelkammes

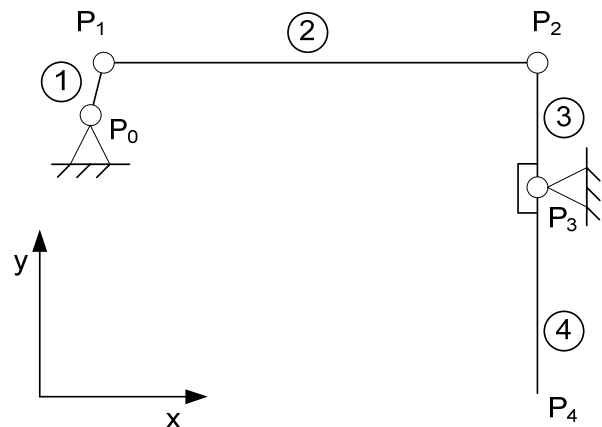


Abb. 5.30: Mechanisches Ersatzmodell
 P_0 und P_3 : drehbar gelagerte Gelenke
 P_1 und P_2 : frei bewegliche Gelenke

Kinematische Analyse des Ersatzmodells und Gelenkkraftanalyse

Auf der Grundlage des mechanischen Ersatzmodells ist es möglich, mit Hilfe der Modul-Methode (VDI – Richtlinie 2729) eine kinematische Analyse durchzuführen. Das erstellte Ersatzmodell entspricht einem viergliedrigen Drehgelenkgetriebe. Da hierfür die Modul-Methode exakt in der im [DUBBEL 1997, S. 159 bis 161] detailliert beschriebenen Abfolge durchgeführt werden kann, wird hier auf eine genaue Darstellung verzichtet. Als Ergebnis erhält man die Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramme für die einzelnen Gelenkpunkte, welche im Anhang 5 (Abb. A5.1 – A5.14) zusammengefasst sind. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können die an den Gelenken auftretenden Kräfte und Momente ermittelt werden, welche maßgeblich für die Auslegung des Dämpfungssystems sind. Mit dem in [TU CHEMNITZ 2003] detailliert dargestellten Berechnungsablauf für die Gelenkkraftanalyse können für das vorliegende Getriebesystem eingeprägte Kräfte, Reaktionskräfte bzw. Gelenkkräfte sowie Trägheitskräfte ermittelt werden. Die Kräfte- und Momentenverhält-

nisse am erstellten mechanischen Ersatzmodell sind in Abbildung 5.31 dargestellt und werden durch das lineare Gleichungssystem A5.1 (Anhang 5) beschrieben. Die Lösung dieses Gleichungssystem ergibt die im Anhang 5 in den Abbildungen A5.15 bis A5.19 dargestellten Kraft- und Momentenverläufe in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel w .

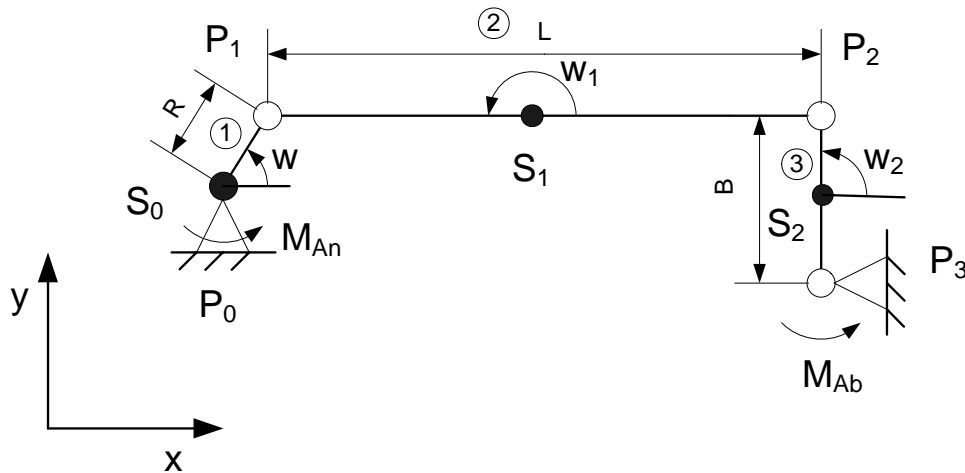


Abb. 5.31: Ersatzmodell Kurbeltrieb - Gelenkkraftanalyse

Für die Gelenke ergeben sich folgende Belastungen:

- Gelenk 0:
 - in x-Richtung ca. -8500 ... 3500 N,
 - in y-Richtung ca. -600 ... 1900 N,
- Gelenk 1:
 - in x-Richtung ca. -8500 ... 3500 N,
 - in y-Richtung ca. -750 ... 1700 N,
- Gelenk 2:
 - in x-Richtung ca. -8000 ... 3500 N,
 - in y-Richtung ca. -700 ... 1300 N,
- Gelenk 3:
 - in x-Richtung ca. -5500 ... 2800 N,
 - in y-Richtung ca. -1250 ... 1000 N.

Die stärkste Belastung erfolgt in negativer x-Richtung bei ca. 350° Kurbelscheibenwinkel. Aufgrund dieser wechselnden Belastungen kommt es am Antriebsstrang zu den beobachteten Verschleißerscheinungen. Ursache der wechselnden Belastungen ist die oszillierende Bewegung der Schubstangen (Koppel), Kurbeln, Kämme und Zinken, da die Massenverteilung der oszillierenden Bauteile nicht ausgeglichen ist.

Durch das ständige Beschleunigen und Abbremsen der unausgeglichene Massen, wird außerdem mehr Antriebsleistung benötigt, als dies bei einem ausgeglichenen System der Fall wäre. Das Maximum der benötigten Antriebsleistung P_{max} lässt sich mit dem Antriebsmoment M_{An} (Anhang 5, Abb. A5.19), wie folgt berechnen:

$$P_{max} = \max(M_{An}) \cdot \dot{\omega} \quad (5.1)$$

$$P_{max} = 2,64 \text{ kW.}$$

5.7.2 Konstruktion eines Schwingungsdämpfers

Der Schwingungsdämpfer soll vor allem die ungleichmäßigen Belastungen des Antriebsstranges dämpfen. Diese sind, wie in Kapitel 5.7.1 festgestellt, in x-Richtung am größten. Daher muss das Dämpfungssystem so ausgelegt werden, dass es sowohl in positiver wie auch in negativer x-Richtung wirken kann (Abb. 5.32). Das Dämpfungssystem besteht aus einem starren, mit dem Rahmen der Kammschüttel verbundenem Element und einem beweglichem, welches dem Pleuel des Kurbeltriebs verbunden wird. Beide Elemente sind über zwei Druckfedern miteinander verbunden. Unter Berücksichtigung des Dämpfungssystems ergibt sich das in Abbildung 5.33 dargestellte Ersatzmodell, welches durch das lineare Gleichungssystem A5.2 (Anhang 5) beschrieben wird. Durch Lösung dieses Gleichungssystem erhält man die Kraft- und Momentenverläufe in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel ω , welche im Anhang 5 in den Abbildungen A5.20 bis A5.24 dargestellt sind.

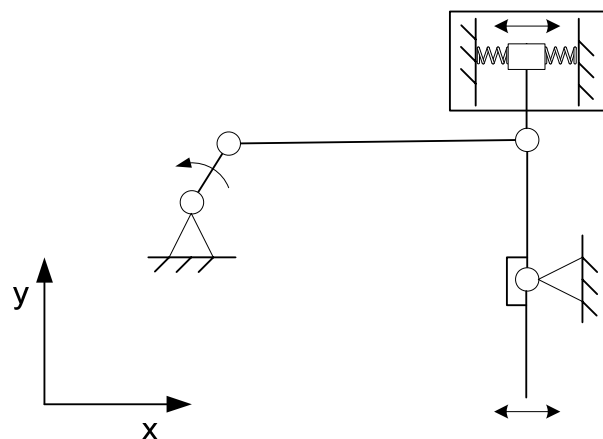


Abb. 5.32: Kurbeltrieb mit Schwingungsdämpfer

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Ergebnis:

Das maximale Antriebsmoment sinkt beim Kurbeltrieb von 140 Nm ohne Dämpfungssystem auf 88 Nm mit Dämpfungssystem ab. Damit sinkt auch der nach Gleichung 5.1 ermittelte Bedarf der Antriebsleistung des Kurbeltriebs von vorher 2,64 kW auf 1,66 kW (bei einer mittleren Antriebsfrequenz von 45 Hz). Dies entspricht einerseits einer rechnerischen Leistungseinsparung von etwa 37%, andererseits repräsentiert der reduzierte theoretische Antriebsenergiebedarf auch die angestrebte erhebliche Entlastung des Antriebsstranges zur Minderung des hohen Verschleißes.

Der Federspeicher wurde entsprechend der vorangegangenen Berechnungen zur Dimensionierung konstruiert und an der Versuchsmaschine angebaut und getestet (Abb. 5.34 und 5.35).

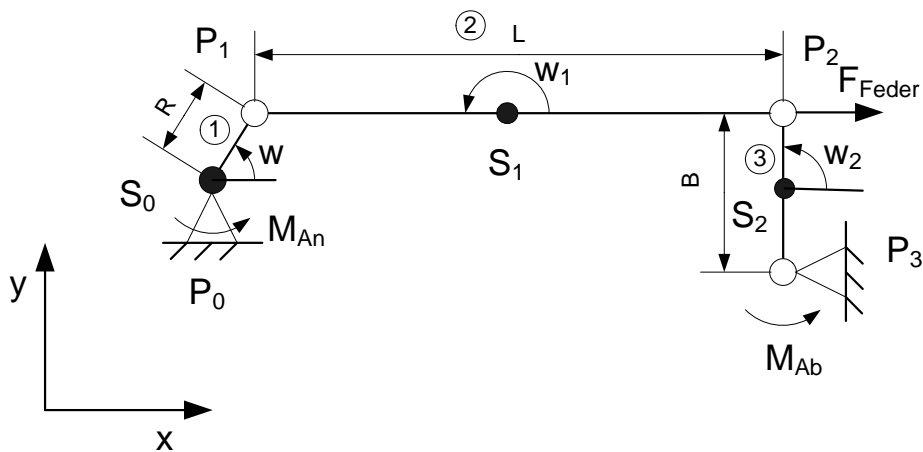


Abb. 5.33: Ersatzmodell des Kurbeltriebs mit Dämpfungssystem



Abb. 5.34: Kammschüttel mit Federspeicher **Abb. 5.35:** Federspeicher

5.7.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchskammschüttel wurde zur Beurteilung der Leistung des Dämpfungssystems vergleichend mit und ohne Federspeicher über einen Frequenzbereich von 28 bis 55 Hz Antriebsfrequenz bzw. 1,8 bis 3,5 Hz Schüttelfrequenz vermessen. Hierfür wurde mit einem Frequenzumrichter die Leistungsaufnahme des Gesamtsystems (Abb. 5.36) und des Antriebsstranges ohne Kurbeltrieb aufgenommen. Aus Differenz der Leistungsaufnahmen des Gesamtsystems und der des Antriebstranges kann die Nettuleistungsaufnahme des Kurbeltriebes berechnet werden (Abb. 5.37), welche eine unverfälschte Auskunft über die Wirkung des Federspeichers gibt.

Da die Kammschüttel mit einem Motor mit einer Nennleistung bei 50 Hz von 11 kW ausgerüstet ist, gibt die Messung der Gesamtleistung der Kammschüttel aufgrund des Betriebs des Antriebsstranges in einem sehr ungünstigen Wirkungsgradbereich für den Antriebsmotor nur begrenzt Auskunft über die realen Verhältnisse.

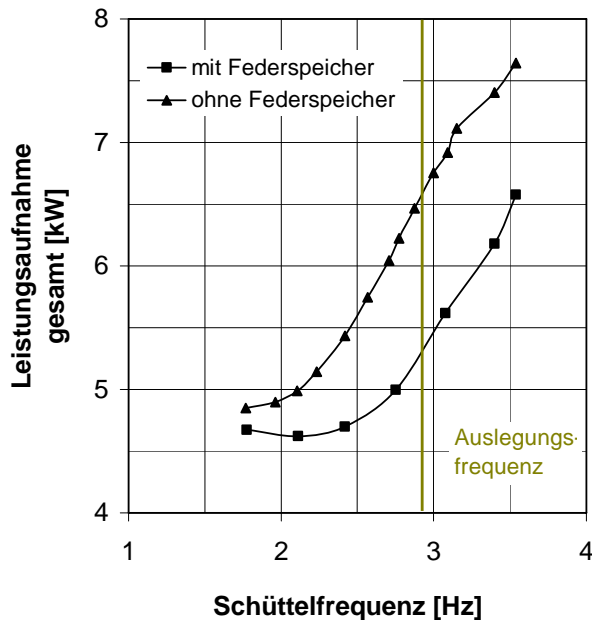


Abb. 5.36: Leistungsaufnahme der Kammschüttel gesamt (Versuch B 1)

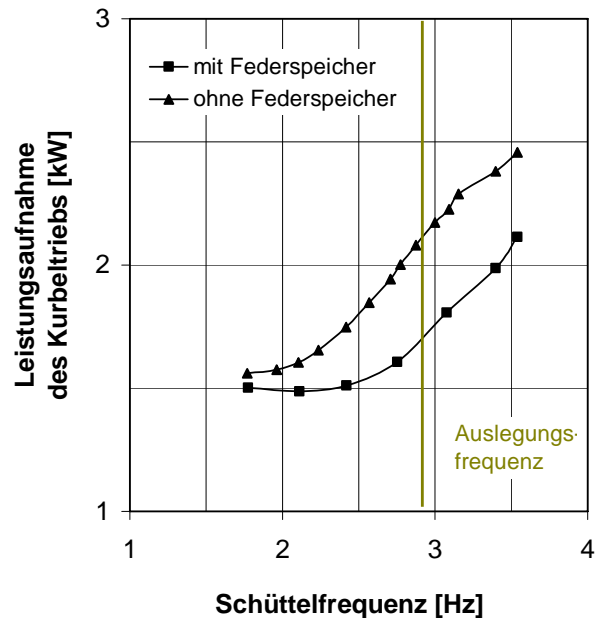


Abb. 5.37: Leistungsaufnahme des Kurbeltriebs der Kammschüttel (Versuch B 1)

Fazit

Durch den Einsatz des Federspeichers konnten die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors um ca. 30 % und proportional die Belastungen des Antriebs reduziert werden. Wesentlich an dieser Modifizierung ist weniger die Energieeinsparung als die hiermit erzielte Entlastung des Antriebs. Hierdurch können Stillstandszeiten der Maschine für notwendige Wartungsarbeiten am Antrieb der Kammschüttel reduziert werden. Inwieweit sich das neue Antriebskonzept im Dauerbetrieb bewährt, muss an einem nach den hier erarbeiteten Vorgaben ausgelegten Prototypen untersucht werden.

5.8 Schlussfolgerungen für die Modellierung

Mit den bisher dargestellten Versuchen zur Optimierung der Kammschüttel konnte ein Grundverständnis der Transport- und Trennvorgänge von Hanffaser-Schäben-Gemischen in einer Kammschüttel erarbeitet werden. Ziel der weiteren Arbeit ist es nun, ein Modell für den Materialtransport und das Trennen der Schäben von den Fasern zu entwickeln. Mit Hilfe dieses Modells sollen anschließend anhand geeigneter Parameter Simulationsrechnungen zur weiteren Maschinenoptimierung durchgeführt werden. Wie die Vorversuche gezeigt haben, zählen neben grundlegenden Materialparametern wie Schäbengehalt und Faserflockendichte zu Beginn des Reinigungs- bzw. Siebvorgangs die Konstruktionsparameter Neigungswinkel und Schüttelwinkel sowie der Betriebsparameter Schüttelfrequenz zu den einflussreichsten Parametern (vgl. Tab. 5.4). Diese Parameter beeinflussen maßgeblich sowohl den Massestrom als auch das Reinigungsergebnis bzw. den Restschäbengehalt nach dem Passieren des Schüttelkanals einer Kammschüttel. Die Vorversuche haben jedoch gezeigt, dass zwischen diesen Parametern komplexe Zusammenhänge bestehen und diese den Massestrom und den Restschäbengehalt zum Teil gegenläufig beeinflussen. So wird durch ein Erhöhen des Neigungswinkels des Schüttelkanals der Massestrom bei gleichem Schüttelwinkel und gleicher Schüttelfrequenz reduziert, da das Faser-Schäben-Gemisch stärker bergauf über den Siebboden transportiert werden muss. Das Herauslösen der Schäben aus den Faserflocken hängt vorrangig von der Intensität des Schüttelvorganges und somit von der Schüttelfrequenz ab. Ein geringerer Massestrom führt jedoch zu einer höheren Verweilzeit der einzelnen Faserflocken im Schüttelkanal. Dadurch wird die Anzahl der Siebereignisse im Schüttelkanal für das Faser-Schäben-Gemisch erhöht, womit folglich der Restschäbengehalt sinkt.

Das Modell soll für die Unterstützung der optimierenden Konstruktion einer Kammschüttel auf der Grundlage der Modellparameter folgende Frage beantworten: Welche Werte müssen für die Konstruktionsparameter Neigungswinkel, Schüttelwinkel und Sieblänge und für den Betriebsparameter Schüttelfrequenz gewählt werden, damit bei einem geforderten Massestrom von mindestens 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch ein Restschäbengehalt von weniger als 5 Masse-% nach einmaligem Durchlauf durch eine Kammschüttel erzielt werden kann.

Aufgrund der vorhandenen Zusammenhänge zwischen den Modellparametern wurde zur Lösung der Fragestellung folgender zweistufiger Modellansatz gewählt (Abb. 5.38):

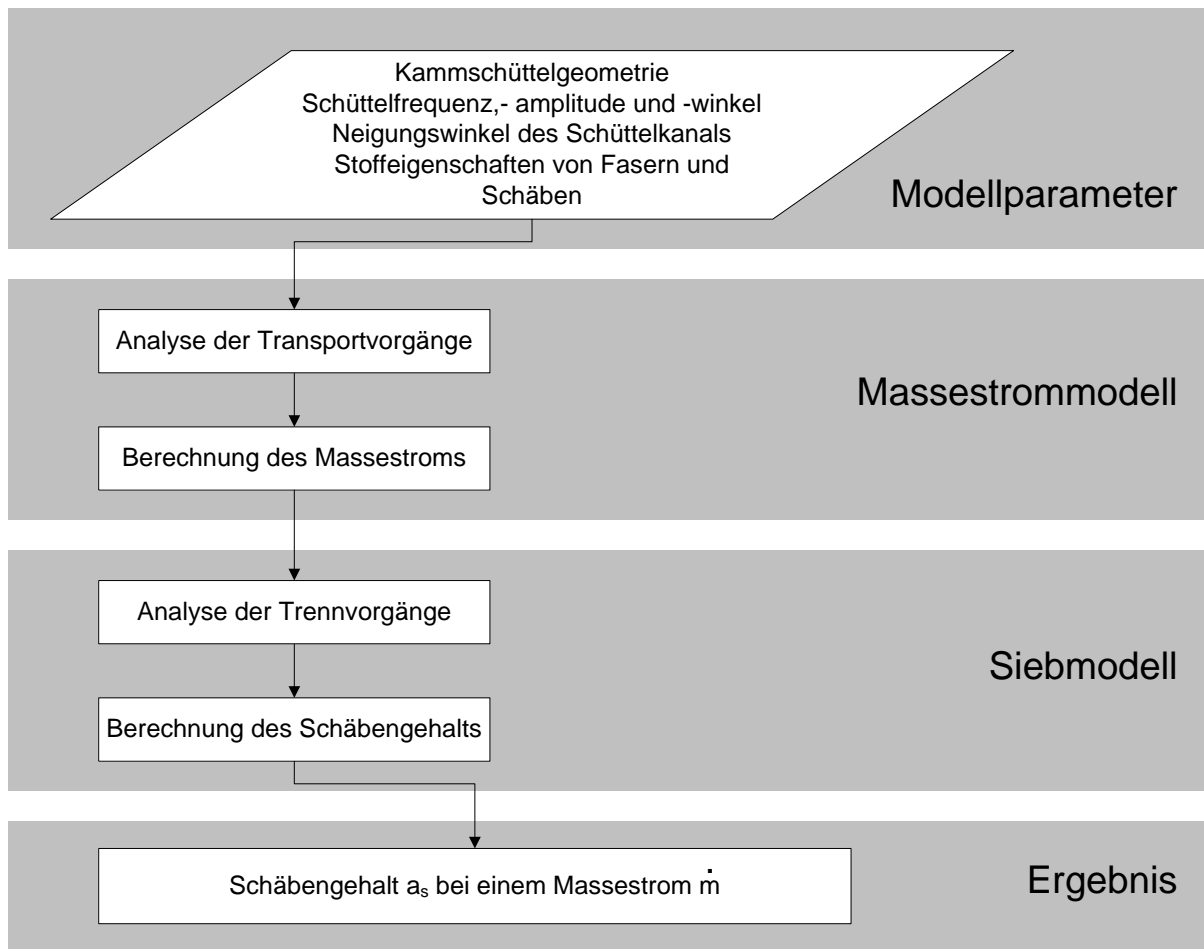


Abb. 5.38: Gesamtmodell für den Massestrom und die Schäbenabsiebung in einer Kammschüttel

6 Modellentwicklung für den Massestrom in einer Kammschüttel

Mit der Modellierung des Massestroms in einer Kammschüttel werden in der vorliegenden Arbeit vorrangig folgende zwei Ziele verfolgt:

- a) ein grundlegendes Verständnis über die Transportvorgänge in einer Kammschüttel zu erlangen und
- b) einen grundlegenden Baustein für die Modellierung des Trennverhaltens von Fasern und Schäben in der Kammschüttel bereitzustellen, da das Trennverhalten nur im Zusammenhang mit dem Massestrom betrachtet werden kann.

Hierfür soll zunächst ein kurzer Überblick über bekannte relevante Ansätze der Modellierung von Masseströmen in Siebmaschinen gegeben werden. Auf dieser Grundlage wird ein eigenes Modell für das verarbeitete Faser-Schäben-Gemisch erarbeitet werden. Dies erwies sich als notwendig, da das vorliegende Siebgut im Vergleich zu den üblicherweise behandelten Stoffen wie z.B. Korn-Stroh-Gemischen oder Schüttgütern, bestehend aus sphärischen Partikeln unterschiedlichen Durchmessers, deutlich andere Eigenschaften aufweist.

6.1 Modellierung von Masseströmen in Siebmaschinen

In [WESSEL 1967a, HÖFFL 1985, Schubert 1990] und [STIEß 1995] werden die Grundlagen zur Einzelkornballistik und den Transportvorgängen in Siebmaschinen dargestellt. Betrachtet werden hier jedoch ausschließlich Maschinen, bei denen der Materialtransport durch die Bewegung und Neigung des Siebbodens verursacht wird. Typische Beispiele der Aufbereitungspraxis von Schüttgütern sind hierfür Trommelsiebe, Kreisschwingsiebe und Schrägwurfsiebe [MEINEL 1974]. Aus der Landwirtschaft sind als Anwendungen vor allem die Trenn- und Reinigungseinrichtungen in Mähreschern bekannt [BECK et al. 1995]. Die hier eingesetzten Hordenschüttler sind ebenfalls Schrägwurfsiebe. Der Materialtransport über die Siebflächen wird durch die Schwingbewegung und die Oberflächengestalt der Horden sichergestellt [BAADER 1960, BAADER 1969, SONNENBERG 1970, GROBLER 1987, BECK 1999]. Die für die Simulation der Transportvorgänge auf Hordenschüttlern eingesetzten Modelle basieren auf den besagten Grundlagen der Einzelkornballistik. Untersuchungen zu den den Trennprozess von Stroh und Korn unterstützenden Schüttlerhilfen in Form von Zinkenkettenschüttlern und Zinkenrotorschüttlern wurden von [BUDACH 1996] und [CLAUß 1992] durchgeführt, sowie ihr Einfluss auf die Gutbewegung anhand der zusätzlich eingeleiteten Transportkräfte dargestellt.

In schüttlerlosen Mähreschern mit rotierenden Trenneinrichtungen kommen Trommelsiebe mit feststehenden Trommeln zum Einsatz [REGGE 1974, MÖLLER 1996, HÜBNER et al.

1998]. Der Materialtransport über das Sieb wird hier durch an einer rotierenden Welle befestigte Förderzinken, Paddeln oder Schneckenwendeln realisiert. Modelle für den Materialtransport durch diese Siebmaschinen sind nicht bekannt. Auch in den aus der Textiltechnik bekannten Horizontalöffnern, Stufenreinigern und Kegelöffnern werden nach dem gleichen Wirkprinzip arbeitende Siebsysteme eingesetzt (vgl. Abb. 4.11 bis 4.15). Ansätze zur Modellierung des Materialtransports durch diese Maschinen sind jedoch nicht bekannt. Im Bereich der Textiltechnik stellt [RIETSEMA 1967] ein mathematisches Modell zur Analyse des Faseraustauschs in einer Karde vor. Im Vordergrund stehen hier jedoch der Fasertransport und insbesondere der Faserübergang über die rotierenden Kämmeinrichtungen der Karde.

Auf der Grundlage des in der Fachliteratur dokumentierten Stands der Technik wird deutlich, dass sich die Transportmechanismen, welche in den üblicherweise in der Aufbereitungs- und Verfahrenstechnik sowie der Land- und Textiltechnik eingesetzten Sieb- und Reinigungsmaschinen wirken, deutlich von denen in einer Kammschüttel unterscheiden. Kammschüttel sind Sondermaschinen, speziell für die Reinigung von Faser-Schäben-Gemischen konstruiert. Die Stoffeigenschaften dieser Gemische unterscheiden sich erheblich von den sonst in der mechanischen Verfahrenstechnik betrachteten Siebgütern. Die bekannten Ansätze zur Modellierung des Massestroms lassen sich daher nur sehr begrenzt nutzen. Im Folgenden soll deshalb der Versuch unternommen werden, ein geeignetes Modell für den Massestrom von in modernen Kurzfasern erzeugten Fasern-Schäben-Gemischen zu entwickeln. Im Vordergrund steht hierbei jedoch, dass dieses Modell möglichst einfach sein soll und die Transportvorgänge nur soweit wie nötig abbilden muss. Das Massestrommodell stellt letztendlich nur einen Baustein der Modellierung der Faserreinigung in einer Kammschüttel dar (vgl. Abb. 5.38), da die Reinigung auf dem Siebboden in der Maschine nicht unabhängig vom Stofffluss betrachtet werden kann.

6.2 Modellierung des Massestroms in einer Kammschüttel

6.2.1 Kinematik und Kinetik des Faserflockentransports

Die Arbeiten zur grundlegenden Optimierung der Kammschüttel für den Einsatz in der Kurzfasernindustrie haben gezeigt, dass das Transport- und Trennverhalten von Faser-Schäben-Gemischen in Siebraum der Reinigungsmaschine vor allem von den folgenden Einflussfaktoren abhängig ist:

- den Reibungsverhältnissen im Siebraum,
- der Schüttelfrequenz der Kämme,
- der Schüttelamplitude und dem Schüttelwinkel in Gutstromrichtung,

- der Neigung des Schüttelkanals,
- der Geometrie und der Oberflächenstruktur von Kämmen und Siebraumeinbauten sowie
- den Eigenschaften des Hanffaser-Schäben-Gemischs.

Die geometrischen Rahmenbedingungen im Kammschüttel sind in den Abbildung 6.1 dargestellt. Die unter diesen Rahmenbedingungen auf die Faserflocken einwirkenden Kräfte wurden bereits in Abbildung 5.17 veranschaulicht.

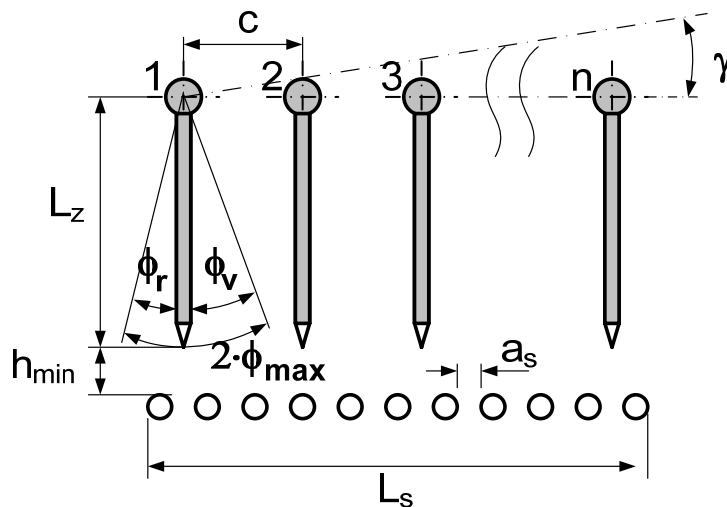
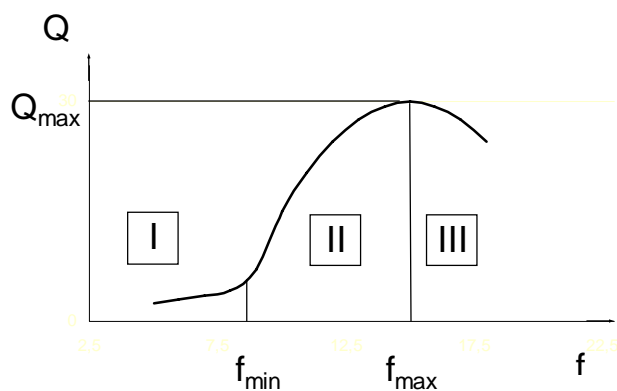


Abb. 6.1: Geometrische Bedingungen im Kammschüttel

Die an der Kammschüttel durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass sich der in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz verarbeitbare Fasermassestrom qualitativ in drei Abschnitte unterteilen lässt (Abb. 6.2).



- I** Massestrom vernachlässigbar gering, da die Transportkräfte im Verhältnis zu Reibung und Luftwiderstand zu gering sind,
- II** Massestrom nimmt mit der Frequenz zu,
- III** Massestrom nimmt ab, da die Faserflocken verstärkt ohne Transport zwischen den Zinken hin- und her geworfen werden.

Abb. 6.2: Massestrom im Versuchskammschüttel in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz

Treibende Kraft des Transports des Faser-Schäben-Gemischs durch den Schüttelkanal ist die Wurfbewegung der Zinken der einzelnen Schüttelkämme (Abb. 6.3). Die Faserflocken werden von den Schüttelkämmen erfasst, durch die Zinkenbewegung beschleunigt und in Abhängigkeit von den aktuellen Kräfteverhältnissen an der Flocke zur benachbarten Zinkenreihe geworfen, wo sich der dargestellte Wurfprozess wiederholt.

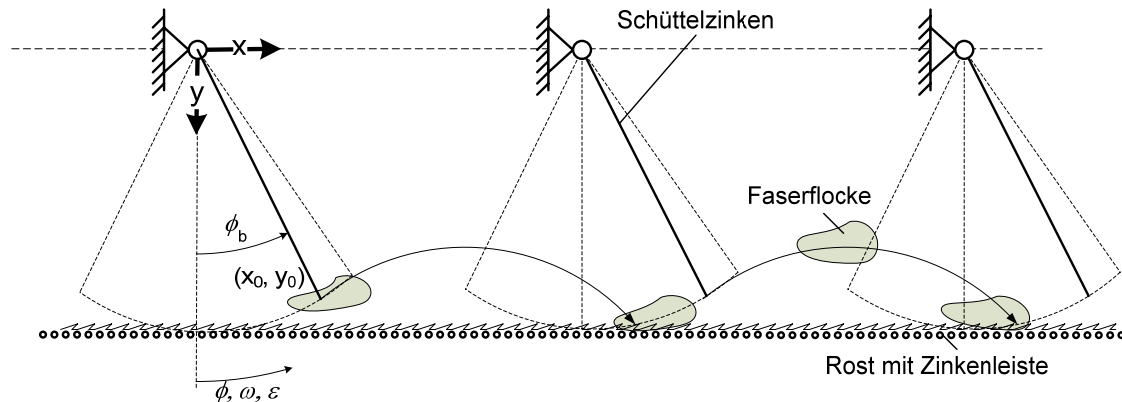


Abb. 6.3: Wurfvorgang im Schüttelkanal

Der Transport der Faserflocken basiert folglich auf einer durch die Zinkenbewegung verursachten Abfolge von Wurfereignissen (schräger Wurf) im Siebraum. Für die bilanzfähige Modellierung des schrägen Wurfs in der Maschine werden zunächst folgende Randbedingungen und Vereinfachungen vorausgesetzt:

- Die Flocken sind zum Zeitpunkt des Abwurfs vom Zinken bereits vollständig von der Sieboberfläche abgehoben. Reibungseinflüsse zwischen Sieb und Flocke können für den Transport vernachlässigt werden.
- Aufgrund der auf dem Sieb zur verbesserten Flockenauflösung und Verstetigung des Materialtransports montierten Zinkenleisten (siehe Abb. 5.21) werden die Flocken nur mit der Vorwärtsbewegung der Zinken transportiert. Bei der Rückwärtsbewegung werden die Flocken von den Zinkenleisten vollständig erfasst, so dass kein Rückwärtswurf erfolgt. Die Flocken werden in diesem Bewegungsabschnitt ausschließlich aufgelöst.
- Die Flocken behindern sich nicht gegenseitig während der Wurfvorgänge, d.h. alle Flocken bewegen sich synchron.

Damit ergeben sich die in Abbildung 6.4 dargestellten Kräfteverhältnisse während des Schüttelvorgangs. Da die Masse einer Faserflocke sehr gering ist, kann die auf sie wirkende Gewichtskraft im Verhältnis zu den anderen wirkenden Kräften, wie in Abbildung 6.5 für den Abwurf einer Flocke vom Zinken dargestellt, vernachlässigt werden.

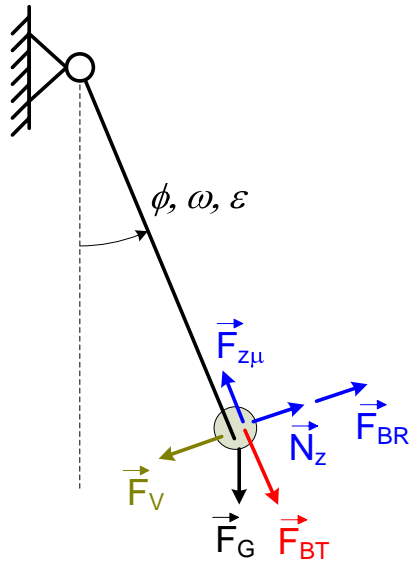


Abb. 6.4: Kräfteverhältnisse an der Faserflocke während des Schüttelvorganges

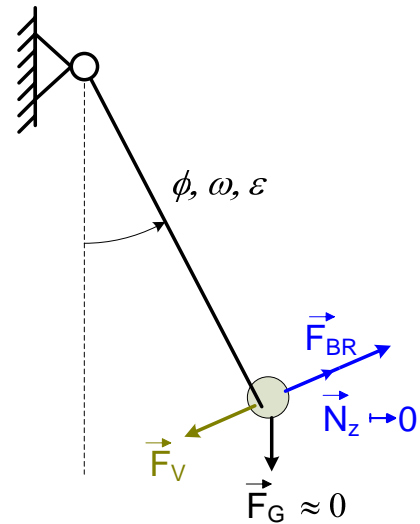


Abb. 6.5: Kräfteverhältnisse an der Faserflocke beim Abwurf

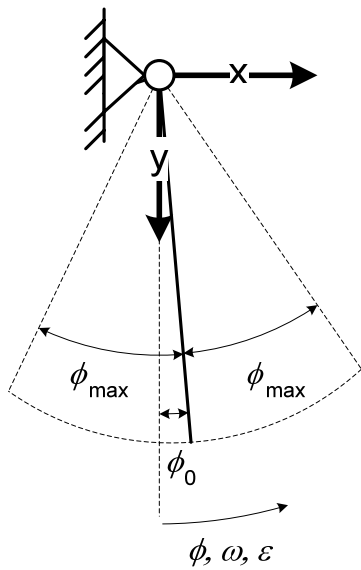


Abb. 6.6: Winkel- und Ortsdefinitionen am Schüttelzinken

Für die Zinkenkinematik gelten die in Abbildung 6.6 dargestellten Verhältnisse, die durch die Gleichungen 6.1 bis 6.3 beschrieben werden.

$$\phi(t) = \phi_o + \phi_{\max} \sin(\Omega t) \quad (6.1)$$

$$\omega(t) = \phi_{\max} \Omega \cos(\Omega t) \quad (6.2)$$

$$\varepsilon(t) = -\phi_{\max} \Omega^2 \sin(\Omega t) \quad (6.3)$$

Da im Schwebezustand der Flocken die durch die Luftreibung verursachte Kraft F_v mit der Gewichtskraft der Flocken im Gleichgewicht steht und die Schwebebeschwindigkeit der Flocken weitgehend von der Flockenform und -größe unabhängig ist, kann nach [RADOSAVLJEVIC 2002] unter Berücksichtigung eines materialspezifischen Faktors q für F_v vereinfachend geschrieben werden:

$$F_v = m \cdot q \cdot v^2 \quad \text{mit } q = 2,5 \text{ m}^{-1} \quad (6.4)$$

Zum Zeitpunkt des Abwurfs der Flocken gilt das in Abbildung 6.5 dargestellte Kräftegleichgewicht, das durch Gleichung 6.5 beschrieben wird. Vereinfachend wurde hier

aufgrund des geringen Gewichtes der Flocken im Verhältnis zu den auf diese durch die Zinkenbewegung einwirkenden Kräfte die Gewichtskraft vernachlässigt.

$$N_z = -F_{BR} - F_v \quad (6.5)$$

Die Bedingung für den Abwurf der Flocke vom Zinken lautet $N_z = 0$, womit folgt:

$$-F_{BR} = F_v \quad (6.6)$$

$$-m \cdot L_z \cdot \varepsilon_b = q \cdot m \cdot L_z^2 \cdot \omega_b^2 \quad (6.7)$$

Unter Berücksichtigung der Zinkenkinematik (ε und ω) ergibt sich:

$$L_z \phi_{\max} \Omega^2 \sin(\Omega t)_b = q L_z^2 \phi_{\max}^2 \Omega^2 \cos^2(\Omega t)_b \quad (6.8)$$

Gleichung 6.8 hat für $(\Omega t)_b$ eine rationale und eine irrationale Lösung. Die praxisrelevante rationale Lösung für $(\Omega t)_b$ lautet:

$$(\Omega t)_b = \arcsin \frac{-\frac{1}{q L_z \phi_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{1}{q L_z \phi_{\max}}\right)^2 + 4}}{2} \quad (6.9)$$

Für den Abwurfwinkel, die Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung gelten:

$$\phi_b = \pm \phi_0 + \phi_{\max} \sin(\Omega t)_b \quad (6.10)$$

$$\omega_b = \phi_{\max} \Omega \cos(\Omega t)_b \quad (6.11)$$

$$v_b = L_z \phi_{\max} \Omega \cos(\Omega t)_b \quad (6.12)$$

Für den Zeitpunkt des Abwurfs der Flocke vom Zinken gilt:

$$t_b = \arcsin \left(\frac{\phi_b - \phi_0}{\phi_{\max}} \right) \cdot \frac{1}{\Omega} \quad (6.13)$$

Die Koordinaten x_0 und y_0 der Flocke bzw. an der Zinkenspitze zum Zeitpunkt des Abwurfs sind folgende:

$$x_0 = L_z \cdot \sin \varphi_b \quad (6.14)$$

$$y_0 = L_z \cdot \cos \varphi_b \quad (6.15)$$

Zum Zeitpunkt des Abwurfs hat die Flocke die Geschwindigkeiten v_{x0} und v_{y0} im x-y-Koordinatensystem:

$$v_{x0} = v_b \cdot \cos \varphi_b \quad (6.16)$$

$$v_{y0} = v_b \cdot \sin \varphi_b \quad (6.17)$$

¹ Das Minuszeichen gilt nur für den Fall des Wurfes entgegen der Zinkenleistenrichtung. Dieser Fall wurde jedoch bei der Definition der Randbedingungen ausgeschlossen.

6.2.2 Schräger Wurf der Faserflocken

Mit den Gleichungen 6.14 bis 6.17 sind die Geschwindigkeitsvektoren und Ortskoordinaten eines Körpers zum Zeitpunkt des Abwurfs (siehe Abb. 6.7) bekannt. Hieraus kann auch seine Wurfbahn berechnet werden. In vorliegendem Anwendungsfall sind folgende aus der Wurfbahn berechenbare Parameter von Interesse:

- Wurfweite und -zeit bis zum Rostaufprall (Abb. 6.8),
- Wurfweite und -zeit bis zur Kollision der Flocken mit der nächsten Zinkenreihe (Abb. 6.9).

Die Wurfbahn eines schrägen Wurfs wird beschrieben durch:

$$x = \frac{g \sin \gamma_b}{2} t^2 + v_{x0} t + x_o \quad (6.18)$$

$$y = \frac{g \cos \gamma_b}{2} t^2 + v_{y0} t + y_o \quad (6.19)$$

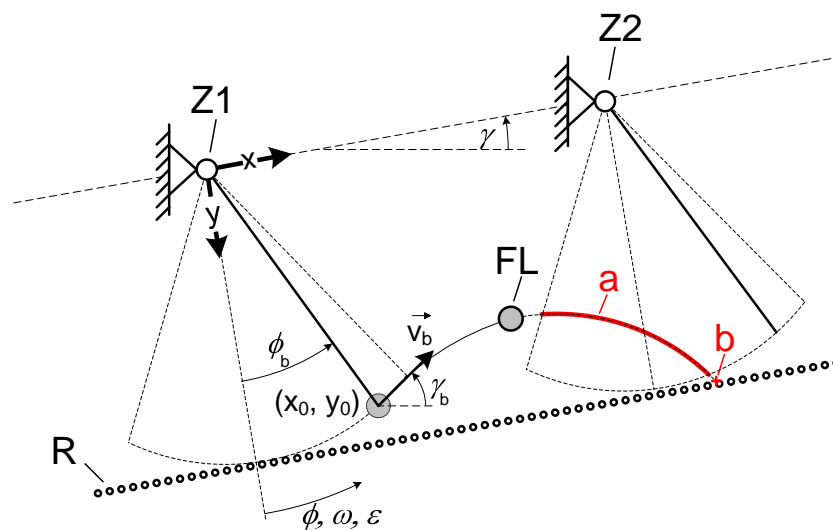


Abb. 6.7: Wurfvorgang im Siebraum der Kammschüttel

Z1	abwerfender Zinken
Z2	nächster Zinken mit Kollisionspotenzial
FL	geworfene Faserflocke
R	Rost
a	Wurfbahn mit Kollisionsgefahr mit dem nachfolgenden Zinken
b	Aufprallpunkt auf dem Rost
ϕ_b	Abwurfwinkel
γ_b	Wurfwinkel
x, y	Bezugssystem für Zinken-, Flocken- und Rostkoordinaten
x_0, y_0	Ortskoordinaten des Abwurfpunktes
$\phi, \omega, \varepsilon$	Zinkenwinkel, -winkelgeschwindigkeit und -winkelbeschleunigung

In Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der Wurfbewegung der Flocke und der Zinkenbewegung ergibt sich die Wurfweite, die im Falle eines kollisionsfreien Wurfes der Wurfweite bis zum Rostaufprall (Abb. 6.8) bzw. bei Kollision mit der nächsten Zinkenreihe (Abb. 6.9) der x-Koordinate der Flocke zum Zeitpunkt der Kollision entspricht. Um zu ermitteln, welches wurfweitenbestimmende Ereignis zuerst eintritt, müssen der Rostverlauf und die Zinkenbewegung bekannt sein (Gl. 6.20 bis 6.23).

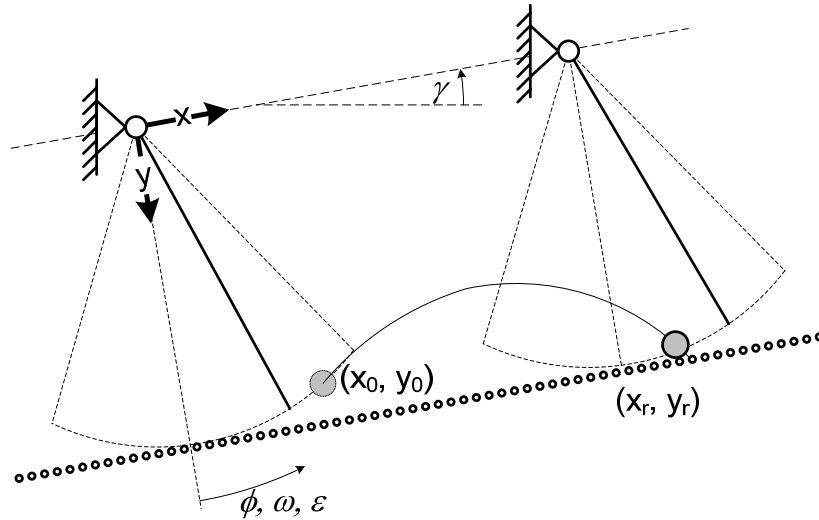


Abb. 6.8: Wurfvorgang mit Kollision zwischen Flocke und Rost

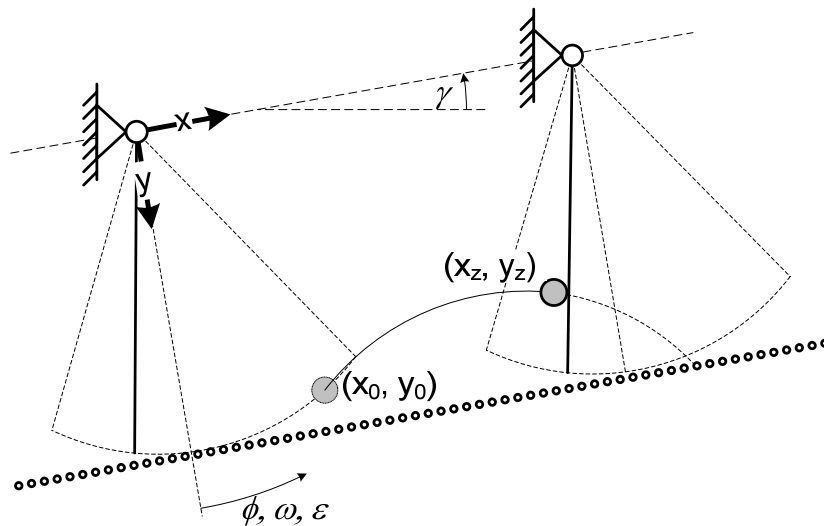


Abb. 6.9: Wurfvorgang mit Kollision zwischen Flocke und Zinken

Rostverlauf:

$$y_{Rost} = x \cdot \tan \gamma + L_z + h_{\min} \quad (6.20)$$

Zinkenbewegung des für eine Kollision relevanten nächsten Kammes (Z2):

$$x_{z2} = L_z \cdot \sin \varphi + c \quad (6.21)$$

$$y_{z2} = L_z \cdot \cos \varphi \quad (6.22)$$

$$\text{mit: } \varphi = \pm \phi_0 + \phi_{\max} \sin(\Omega t) \quad (6.23)$$

Die Wurfvorgänge wurden auf der Basis der Gleichungen 6.9 bis 6.23 in Abhängigkeit von Frequenz und der Pleuellänge analysiert und sind in den Abbildungen 6.10 und 6.11 exemplarisch für einen Neigungswinkel $\gamma = 10^\circ$ bei einer Schüttelfrequenz von 2,9 Hz dargestellt. Die Wurfweiten und -zeiten wurden numerisch bestimmt und in eine Ergebnismatrix zur Berechnung der zugehörigen Masseströme eingetragen. Im Falle eines nicht durch andere Zinken behinderten Wurfvorgangs ist der Wurf einer Flocke mit der Kollision mit dem um 10° geneigten Rost (in Abbildung 6.10 blau dargestellt) abgeschlossen. Mit zunehmender Mittelpunktsverstellung ϕ_0 ergeben sich größere Wurfweiten. Die Flocken werden folglich schneller über den Rost transportiert und der Massestrom steigt.

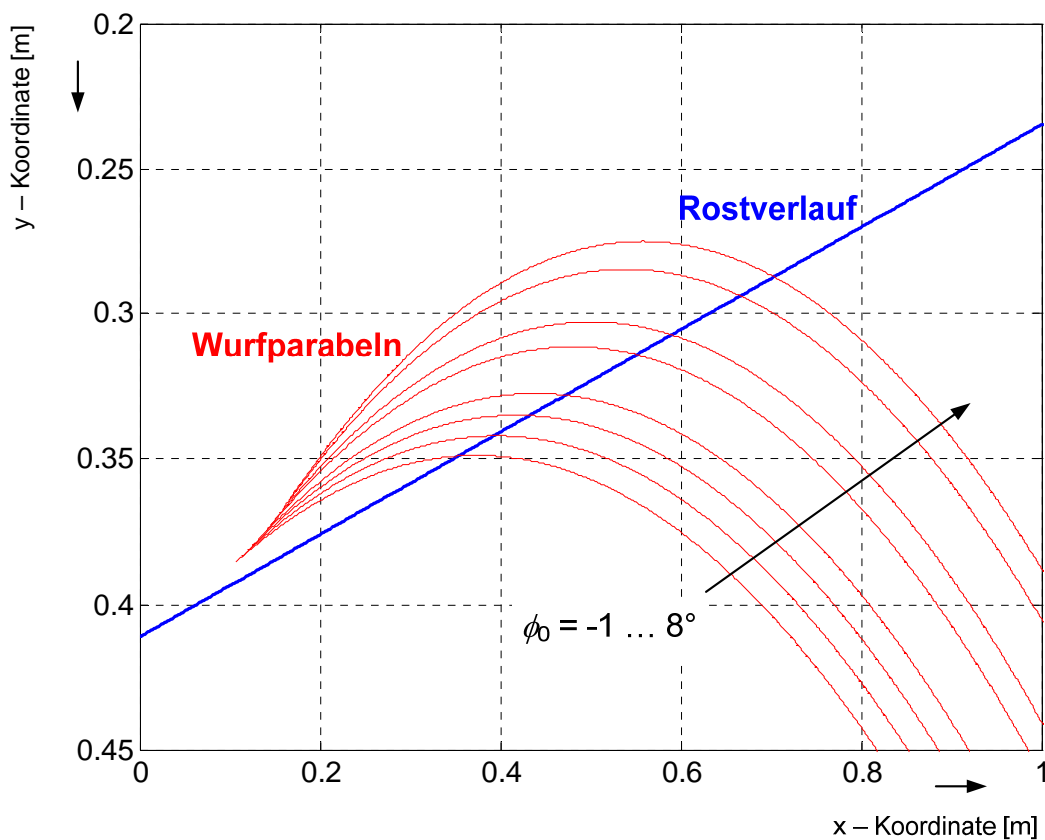


Abb. 6.10: Wurfvorgang mit Kollision zwischen Flocke und Rost

Wird die in x-Richtung gleichförmige Flugbewegung der Flocke jedoch durch eine Kollision mit einem folgenden Zinken vorzeitig abgebrochen, ergibt eine reduzierte Wurfweite. Die x-Koordinate zum Kollisionszeitpunkt entspricht dem Schnittpunkt von Flockenbewegung (in Abb. 6.11 blau dargestellt) und der Bewegung des folgenden Zinkens (rot).

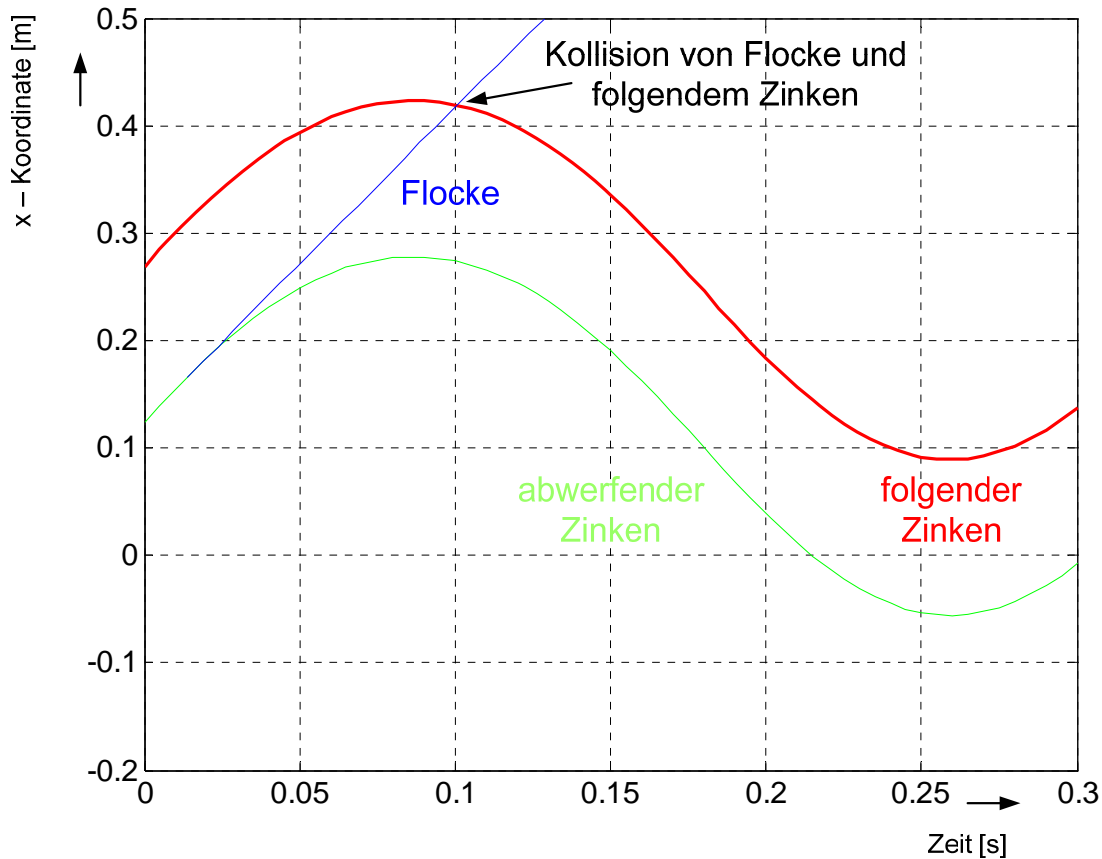


Abb. 6.11: Wurfvorgang mit Kollision zwischen Flocke und folgendem Zinken

6.2.3 Berechnung des Massestroms

Für die Transportgeschwindigkeit der Faserflocken v_{Faser} durch die Kammschüttel gilt auf Basis der berechneten realisierten Wurfweite pro Zinkenbewegung:

$$v_{Faser} = x_{Wurf} \cdot f \quad (6.24)$$

Unter Berücksichtigung der Maschinengeometrie und der Eigenschaften des verarbeiteten Faser-Schäben-Gemischs (Tab. 4.1 bis 4.3) ergibt sich hieraus für den theoretisch verarbeitbaren Eingangsmassestrom \dot{m}_g :

$$\dot{m}_g = v_{Faser} \cdot c_1 \cdot h_{FSG} \cdot b_s \cdot \rho_{FSG} \quad (6.25)$$

Der Faktor c_1 wurde in die Massestromformel eingeführt, um bisher unberücksichtigte frequenz- und schüttelwinkelabhängige Reibungsverluste sowie Interaktionen zwischen den

Flocken einfließen zu lassen. Für diese Verluste hat sich folgende lineare Gleichung in der Versuchsauswertung bewährt:

$$c_1 = m \cdot (\varphi_{\max} + \varphi_0 + 2) + n \quad (6.26)$$

mit den experimentell ermittelten Faktoren $m = 0,07$ und $n = 0,45$.

Hiermit ergibt sich für den pro Meter Arbeitsbreite der Kammschüttel verarbeitbaren spezifischen Massestrom in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz der Zinken und dem Winkel φ_0 das in Abbildung 6.12 dargestellte Ergebnis. Das Ergebnis zeigt, dass trotz der mit dem Winkel φ_0 zunehmenden Kollisionen von Faserflocken mit anderen Zinken der modellierte spezifische Massestrom steigt.

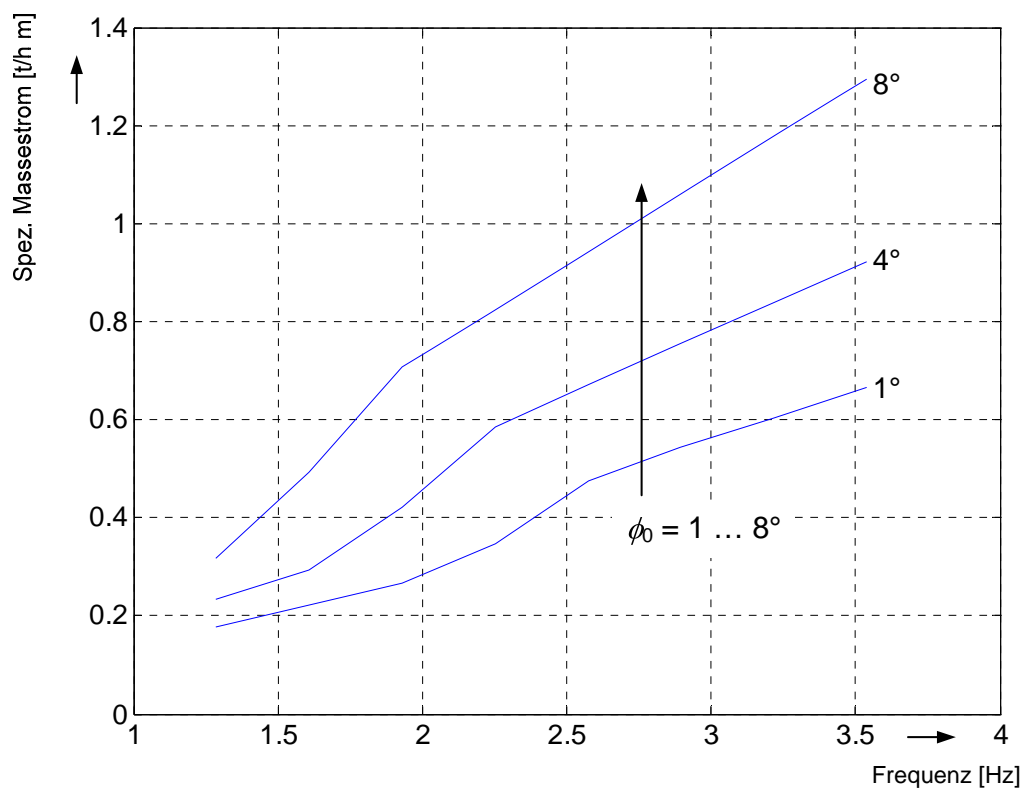


Abb. 6.12: Theoretischer spezifischer Massestrom bei 10° Neigung des Schüttelkanals

6.3 Bewertung des Massestrommodells

6.3.1 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Zur Bewertung des Massestrommodells können die Versuchsdaten herangezogen werden, die im Rahmen der in Kapitel 5.6 dargestellten Versuche zur Optimierung der Kammschüttel erzielt wurden. Der Versuchsaufbau wurde in den Abbildungen 5.6 und 5.8 dargestellt. Für die gegenübergestellten Ergebnisse wurden die folgenden Maschineneinstellungen verwendet:

Maschinenneigung: $\gamma = 10^\circ$

Schüttelwinkel: $\phi_0 = 1^\circ / 4^\circ / 8^\circ$

(Vorwärtswurfwinkel $\phi_v = 27^\circ / 30^\circ / 34^\circ$ bei $\phi_{max} = 26^\circ$)

Schüttelfrequenz: $f = 1,3$ bis $3,6$ Hz

Siebraumgestaltung: Zinkenleisten und Kupferrohrrost gemäß Abb. 5.19 und 5.21

Für den auf eine theoretische Arbeitsbreite von einem Meter bezogenen spezifischen Massestrom wurden mit den aufgeführten Versuchseinstellungen die in Abbildung 6.13 dargestellten Masseströme realisiert.

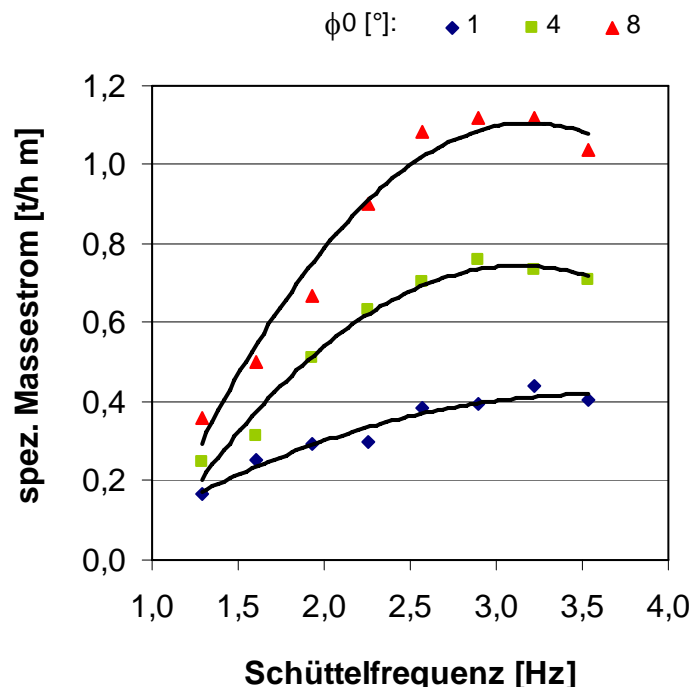


Abb. 6.13: Spezifischer Massestrom bei einer Neigung des Schüttelkanals von $\gamma = 10^\circ$ für verschiedene Schüttelwinkel ϕ_0 (Versuch D 3, Materialkategorie B geröstet)

6.3.2 Modellvalidierung

Bei den Versuchen haben sich die im Abschnitt Modellierung benannten Abhängigkeiten des Siebgutverhaltens in einer Kammschüttel bestätigt. Der Einfluss ungünstiger Überlagerungen von Flockenwurf und Zinkenbewegung sowie der Reibungsverhältnisse im Schüttelkanal auf den Gutstrom ist insbesondere bei höheren Schüttelfrequenzen stärker als vom Modell erfasst (Abb. 6.14, weitere Modellvergleiche siehe Anhang 6). Die Modellierung ergab nahezu lineare Verläufe für die Massestromzunahme mit der Schüttelfrequenz, wogegen die Versuche das bereits in Abbildung 6.2 beschriebene Optimum aufweisen. Diese Abweichungen müssen jedoch vor dem Hintergrund der Vielzahl möglicher Einflussfaktoren auf das Transportverhalten der Faser-Schäben-Gemische im Schüttelkanal der Kammschüttel beurteilt werden. Insbesondere die durch die Rohstoffqualität festgelegten Faktoren lassen sich in der Verarbeitungspraxis nur begrenzt erfassen und ebenso wenig konstant halten. Für den angestrebten Einsatzzweck dieses Modells, als eine Komponente für die Beurteilung des grundlegenden Arbeitsverhaltens einer Kammschüttel und der Entwicklung eines Reinigungsmodells konnte jedoch festgestellt werden, dass das entwickelte Modell den Zusammenhang zwischen Massestrom, Schüttelfrequenz und Schüttelwinkel qualitativ ausreichend gut abbildet.

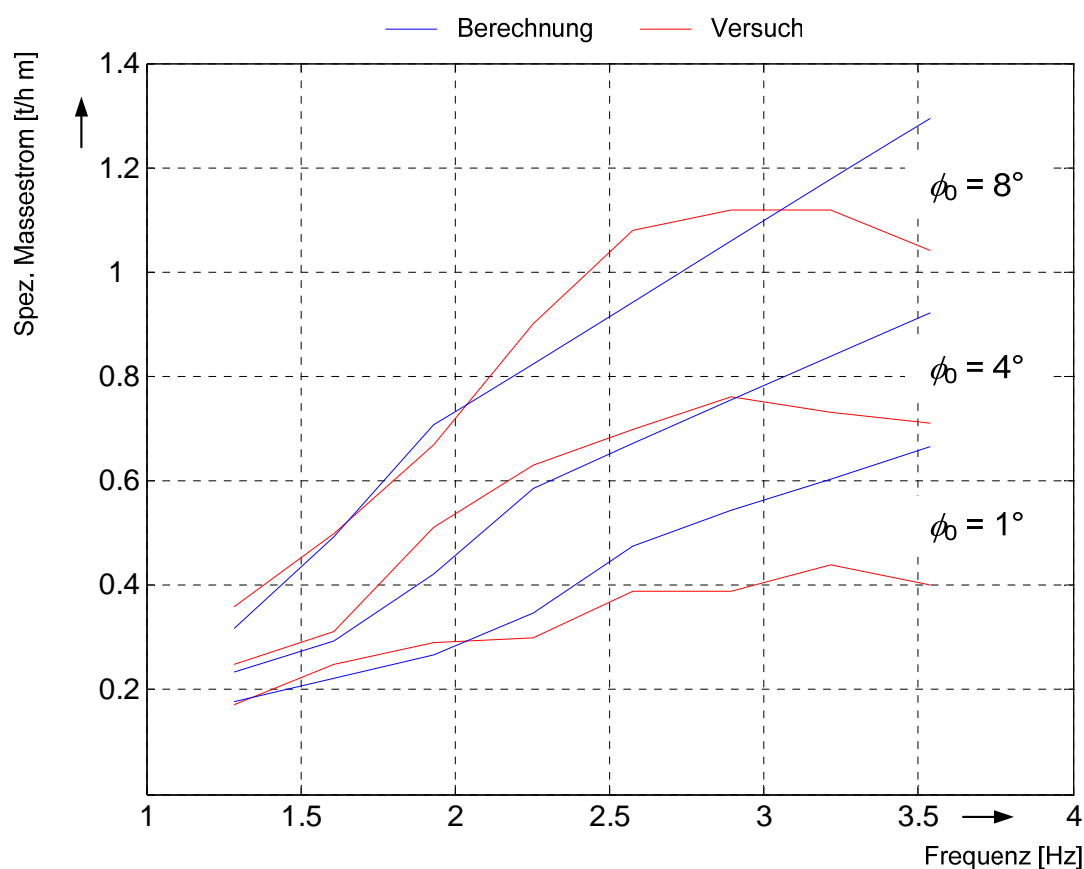


Abb. 6.14: Gegenüberstellung von berechnetem und gemessenem Massestrom im Kammschüttel in Abhängigkeit von Schüttelwinkel und Schüttelfrequenz (Versuch D 3, $\gamma = 10^\circ$, Materialkategorie B geröstet)

7 Modellentwicklung für das Trennverhalten von Fasern und Schäben

7.1 Modelle zur Beschreibung von Trennprozessen

In [WESSEL 1967a-c, CHROLIKOW 1973, BERNHARDT 1989, SCHUBERT 1990] und [STIEß 1995] werden die Grundlagen zum Trennen eines Körnerkollektivs und von Gemischen körniger Güter durch Separieren auf einem Siebboden beschrieben. Die Trennung der einzelnen Fraktionen erfolgt aufgrund der Geometrie von Partikeln und Sieb. Partikel, die das Sieb zu durchdringen vermögen, werden von Partikeln getrennt, die die Sieböffnungen nicht passieren können. In den bekannten Theorien werden die Partikel in der Regel als Kugeln betrachtet, Sieböffnungen sind in erster Näherung meist quadratisch. Die Partikel stellen Einzelmassen dar, zwischen denen keine Bindungskräfte bestehen, so dass diese zueinander frei beweglich sind. Auf diesen Grundlagen bauen sowohl die bekannten statistischen Modelle als auch die mechanischen Modelle auf. Bei den statistischen Modellen wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kornklasse den Siebboden passiert, in Abhängigkeit von der Siebfreifläche und der relativen Größe des Kornes zur Sieböffnungsweite analysiert [SCHUBERT 1990]. Mechanische Modelle beziehen dagegen die Wurfbewegung auf dem Sieb [SCHUBERT 1990], die Ablenkung des Kornes an den Siebbodenelementen und die Transportvorgänge über den Siebboden ein [SOLDINGER 2002].

Darüber hinaus gibt es Erweiterungen dieser Modelle, bei denen ebenfalls die Einflüsse auf den Siebdurchgang und die Interaktion zwischen Partikeln berücksichtigt werden [Li et al. 2003]. Hierzu zählen insbesondere Adhäsionskräfte und Flüssigkeitsbrücken sowie Klemmkräfte zwischen Partikeln aber auch zwischen Partikeln und Sieb [MEINEL 1999]. [DEGHANI 2002] stellt ein Modell für nicht kugelförmige Partikel vor. [BAADER 1969] entwickelte ein Modell für die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes, welches die von der Kugelform stark abweichenden Geometrien von Getreidekörnern und Stroh berücksichtigt. Die Siebklassierung bei größeren Schichthöhen in Verbindung mit Segregationsprozessen wurde von [SOLDINGER 1999 und SOLDINGER 2000] bereits genauer untersucht.

Auf der Grundlage der in Kapitel 4.2 dargestellten Stoffeigenschaften der hier betrachteten Faser-Schäben-Gemische muss jedoch festgestellt werden, dass sich die aus der Literatur bekannten Modelle nicht auf die Trennprozesse in einer Kammschüttel anwenden lassen. Die hier zu trennenden Fraktionen, Fasern und Schäben, weisen zwar starke geometrische Unterschiede auf, sind aber dennoch schwer zu separieren. Die Schäben haben eine stäbchenförmige Gestalt mit einem weiten Größenspektrum und rauen Bruchkanten, die das Verhaken der Schäben in den Fasern fördern. Die Fasern dagegen sind feine, fadenförmige Gebilde mit sehr unterschiedlichen Längen und Durchmessern. Genauer betrachtet bestehen diese Fasern

jedoch aus Faserbündeln, die gewöhnlich durch die im Verarbeitungsprozess verursachten Aufspaltungen viele feine Verzweigungen aufweisen [MÜSSIG 2001]. Hierdurch neigen die Fasern einerseits untereinander zum Verhaken und bilden die bekannten Faserflocken. Andererseits weisen Fasern eine Geometrie auf, die ebenso das Einbetten von Schäben durch Verhaken dieser in den Flocken fördert. Die Faserflocken stellen letztendlich selber eine Art Maschenwerk dar, welches die Form eines dreidimensional ausgeprägten Siebes hat. Daher soll im Folgenden der Versuch unternommen werden, ein für diese Geometrien geeignetes neuartiges Modell aufzustellen.

7.2 Modellierung des Trennverhaltens von Fasern und Schäben

7.2.1 Grundlagen

Im Gegensatz zu den üblicherweise betrachteten Siebgütern weist das hier untersuchte Faser-Schäben-Gemisch (Abb. 7.1) folgende für den Trennprozess besondere und für die Modellierung ungünstige Eigenschaften auf:

- ein weiter Größenbereich der Partikelgrößen sowie eine sehr große Formenvielfalt (siehe Abb. 7.2 und 7.3),
- stark irreguläre Form der zu trennenden Partikel, mit ausgefaserten Enden bei den Fasern und gezackten Bruchkanten an den Schäbenenden und
- nicht erfassbare Interaktion zwischen den Partikeln wie Verhaken, Verklemmen und Verfilzen.



Abb. 7.1: Ausschnitt einer geöffneten Faserflocke mit Schäben
(Scanneraufnahme 300 dpi)

Aufgrund dieser speziellen Stoffeigenschaften wäre für die Beschreibung der physikalischen Vorgänge bei der Interaktion zwischen Fasern und Schäben in Anlehnung an die in Kapitel

7.1 aufgeführten bekannten Modellierungen nur ein stark simplifiziertes Modell erreichbar, welches trotzdem bereits eine hohe Komplexität besäße. Trotz des hohen Aufwands für ein solches Modell wäre wahrscheinlich nur ein sehr begrenzter Erkenntnisgewinn zu erwarten. Deshalb wird hier auf die Modellierung der physikalischen Vorgänge im Faser-Schäben-Gemisch weitgehend verzichtet. Stattdessen soll der Versuch einer geometrisch-statistischen Modellierung unternommen werden, die jedoch die physikalischen Vorgänge durch wenige, experimentell bestimmbare Parameter berücksichtigt. Diese Parameter werden so gewählt, dass sie im Rahmen der aufgestellten Theorie physikalisch sinnvolle Beziehungen darstellen. Als Beispiel soll hier der später verwendete Korrekturfaktor K_{f2} für die mittlere Siebmaschenweite genannt werden. Während des Siebvorganges in der Kammschüttel werden durch die Kambewegung die Faserflocken zyklisch gestaucht und gestreckt. Folglich fallen die Schäben besser durch die Maschen einer in ständiger Verformung befindlichen Flocke als durch die Maschen einer modellfähigen statischen Flocke. Diesem Effekt wird durch die Korrektur der rechnerisch ermittelten Siebmaschenweite mit dem experimentell ermittelten Faktor K_{f2} Rechnung getragen.

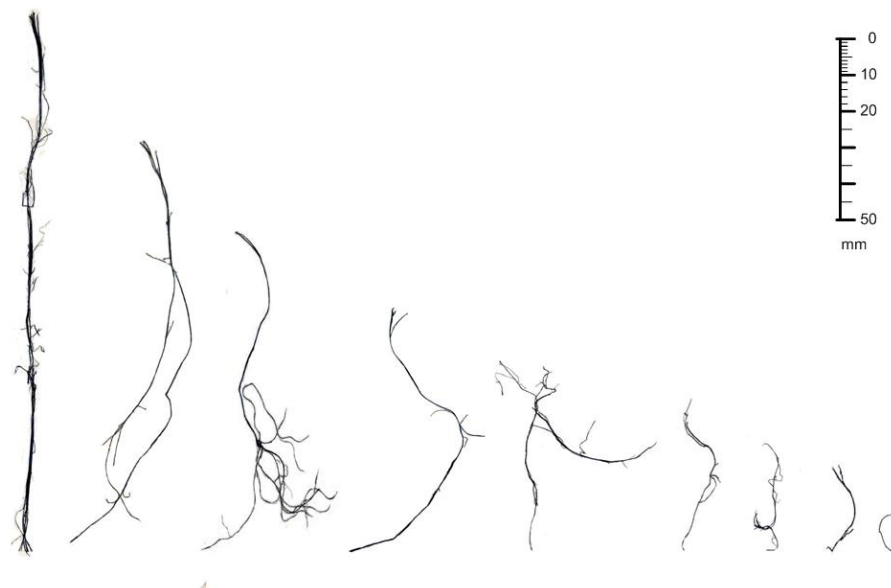


Abb. 7.2: Formen von Hanffasern (Scanneraufnahme 300 dpi)



Abb. 7.3: Formen von Hanfschäben (Scanneraufnahme 300 dpi)

7.2.2 Grundidee für ein Modell der Faser-Schäben-Trennung

Um dem Leser das Ziel der weiteren Ausführungen zur Modellierung verständlicher zu machen, soll hier vorab die Grundidee des nachfolgend entwickelten Modells erläutert werden.

- Die Fasern einer Faserflocke bilden ein dreidimensionales, idealisiert betrachtet beispielsweise rechtwinkliges Netzwerk, das eine Art dreidimensionales Sieb darstellt (Abb. 7.4).
- Das Netzwerk besteht aus verschieden großen Maschen in welche verschieden große Schäben eingelagert sind.

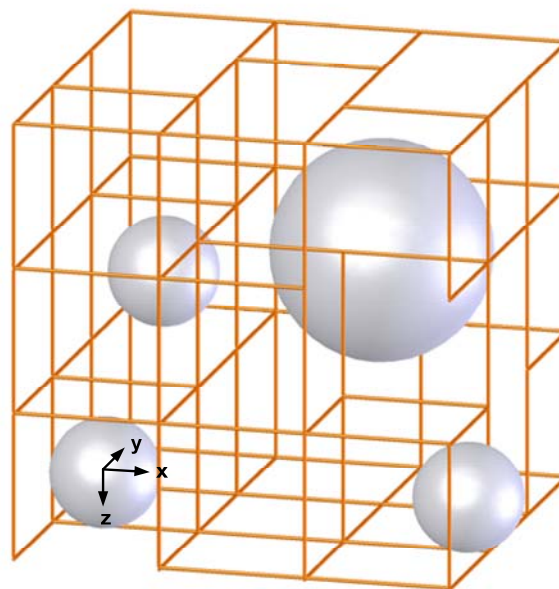


Abb. 7.4: Vereinfachtes orthogonales Modell einer Faserflocke mit eingelagerten Schäben

- Maschengröße und Schäbengrößen lassen sich beispielsweise über eine Normalverteilung abbilden und in Klassen einteilen.
- Faserflockendichte und Faserdurchmesser lassen sich experimentell ermitteln und somit ein Netzwerk modellieren.
- Die Schäben können sich in allen drei Raumrichtungen x , y und z in Abhängigkeit von Schäben- und Maschengröße durch das Netzwerk bewegen.
- Das Durchdringen einer Masche stellt einen Siebvorgang dar, für dessen Modellierung bereits in der Literatur geeignete Modelle beschrieben wurden.
- Die Hin- und Herbewegung der Schüttelkämme bei jeder Kurbelumdrehung der Kammschüttel verursacht mindestens zwei Siebvorgänge.

- Die Wahrscheinlichkeit mit der eine Schäbe definierten Durchmessers auf eine für sie passierbare Masche innerhalb eines solchen Siebvorganges trifft, lässt sich auf der Grundlage von Verteilungsfunktionen ermitteln. Damit kann berechnet werden, wie viele Schäben pro Schüttelbewegung im Netzwerk nach unten fallen bzw. nach dem Passieren der untersten Netzwerkebene ausgesiebt werden.
- Auf der Grundlage der Verweilzeit der Faserflocken im Schüttelkanal kann die Gesamtzahl der Siebereignisse bis zum Austritt aus der Siebmaschine berechnet werden. Hiermit kann die Anzahl der pro Schäbenklasse ausgesiebten Schäben ermittelt werden.
- Der Einfluss des Siebbodens auf das Absieben der Schäben aus den Faserflocken über die Sieblänge ist vernachlässigbar, solange die Siebfreifläche groß genug ist, um ein "Verstopfen" der unteren Siebebenen der Fasermatte zu verhindern. Dies ist bei üblich gestalteten Sieben immer gegeben, da hier die Durchtrittsgeschwindigkeit der Schäben durch die Faserflocken wesentlich geringer ist als die Durchtrittsgeschwindigkeit durch den Siebboden.

Auf der Grundlage dieser Annahmen lässt sich ein Modell erstellen, für das bei bekannter Geometrie von Faserflocken und Schäben die statistische Wahrscheinlichkeit berechnet werden kann, mit der Schäben aus dem Faser-Schäben-Gemisch in einer Kammschüttel ausgesiebt werden. Ein solches Modell wird im Folgenden als geometrisch-statistisches Modell bezeichnet.

7.2.3 Entwicklung eines geometrisch-statistischen Modells

Allgemeine und geometrische Grundlagen

Anders als in [BAADER 1969], wo die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes unter der Bedingung betrachtet wird, dass zwischen den Aggregaten keine Bindekräfte wirken, muss bei dem hier untersuchten Stoffgemisch aufgrund der Struktur der Fasern von starken Bindekräften zwischen diesen ausgegangen werden. Eigene Untersuchungen hierzu haben gezeigt, dass zum vollständigen Teilen einer lockeren Faserflocke Kräfte von bis zu 30 N erforderlich sind. Deshalb wird der hier vorliegende Trennprozess als ein Siebprozess betrachtet, in dem die Fasern das Sieb und die Schäben das zu separierende Korngemisch darstellen. Hierfür werden folgende grundlegende Annahmen vereinbart:

- eine Faserflocke ist ein dreidimensionales Sieb, bestehend aus übereinander liegenden (virtuellen) Siebebenen und nebeneinander stehenden (virtuellen) Siebwänden, die die Bewegung der Schäben vertikal und horizontal behindern,
- eine Faserflocken ist homogen, Siebwände und –ebenen sind identisch aufgebaut,

- für die Schäben einer jeden Schäbenklasse vom Durchmesser d_j^1 gibt es einen bestimmten Abstand h zwischen den Siebebenen/-wänden mit $h_j > d_j$, bei dem jede Schäbe dieser Klasse die Masche passieren kann:
 - eine Schäbe, die sich nicht um mindestens h bewegt, gilt als ruhend (Amplitude = 0),
 - eine Schäbe, die sich nicht mindestens um h in vertikaler Richtung bewegt hat, gilt als nicht durch die Siebenebene getreten,
 - Grenzkorn wird aus der Betrachtung ausgeschlossen durch die Festlegung von $h = 1,25 \cdot d$.

Ferner werden folgende Begriffsdefinitionen für die Modellgeometrie getroffen:

Sieböffnungen sind die Öffnungen in den (virtuellen) Siebebenen, die durch die Poren in der Faserflocke gebildet werden.

Poren sind würfelförmige Hohlräume, mit gleicher Ausdehnung in allen Raumrichtungen und rechtwinklig aufeinander stehenden Siebebenen und –wänden².

Siebzellen werden durch die Poren im Material gebildet. Mehrere Poren können eine Siebzelle bilden, eine Pore kann zu mehreren Siebzellen beitragen. Eine Siebzelle ist der Raum, in dem sich eine Schäbe in Folge des Schüttelns der Faserflocke bewegen kann. Folglich entspricht die Länge einer Siebzelle der Schäbenamplitude während des Schüttelvorganges. Die Amplitude, der das Material durch die Schüttelbewegung unterworfen wird, ist wesentlich größer als die Siebzellenlänge.

Auf der Grundlage dieser geometrischen Definitionen wird vereinbart:

- Eine Faserflocke wird aus Poren verschiedener Größe gebildet. Die Abbildung der Poren in Form von Sieböffnungen und Siebzellen ist für jede Schäbenklasse spezifisch.
- Die Sieböffnungen werden unterteilt in „offen“ für $w_i^3 > h_j$ und „geschlossen“ für $w_i < h_j$.
- Sowohl Poren, als auch Schäben sind innerhalb der Faserflocke zufällig aber gleichmäßig verteilt.
- Schäben werden im Modell als kugelförmig mit einem „äquivalenten“ Durchmesser angenommen, welcher so gewählt wird, dass sich ein möglichst ähnliches Durchtrittsverhalten wie bei der realen Schäbe ergibt:

¹ Die Schäben werden in m Schäbenklassen mit dem äquivalenten Durchmesser d_j mit $j = 1 \dots m$ eingeteilt.

² In einem planaren Netzwerk aus zufälligen Linien ist die hauptsächliche Anzahl von Seiten je Polygon 4 [CORTE et al. 1965, CORTE 1982]. Vereinfacht werden deshalb hier ausschließlich quadratische Öffnungen bzw. würfelförmige Poren angenommen.

³ Es gibt Poren der Größe w_i mit $i = 1 \dots n$. Die dreidimensionalen Poren der Größe w_i bilden zweidimensionale Löcher der Größe w_i .

- Mit den äquivalenten Durchmessern einer Kugel gleichen Volumens oder gleicher Oberfläche oder statistischen Durchmessern (z.B. Feret-Durchmesser) [WESSEL 1967a, LÖFFLER et al. 1992] lässt sich eine Absiebung der verschiedenen Schäbenklassen nicht modellieren.
- Die Definition der Partikelgröße über die Maschenweite des feinsten Siebes, durch das die Partikel gerade noch durchfallen [LÖFFLER 1992], liefert gute Ergebnisse.
- Bei der Betrachtung von Dicke, Breite und Länge der durch Siebung klassierten Schäben stellte sich heraus, dass die Länge kaum Einfluss auf die Einordnung in eine Klasse ist. Entscheidend ist der größere Wert der Dicke bzw. Breite.

In Abbildung 7.5 ist das Grundmodell exemplarisch für fünf Siebebenen mit nur zwei Schäben- und zwei Lochklassen dargestellt. Hierbei:

- sind die senkrechten Fasern zur besseren Übersicht weggelassen.
- sind für kleine Schäben (grün) alle fünf Siebebenen und damit alle Öffnungen passierbar. Kleine Schäben fallen nur dann nicht durch, wenn sie direkt auf einer Faser liegen.
- werden die Siebwände durch senkrechte Fasern gebildet (nicht dargestellt).
- sind für große Schäben nur drei Siebebenen (rot) und nur große Öffnungen passierbar. Die waagerechten Fasern der Zwischenebenen (grau) bilden für große Schäben zusammen mit senkrechten Fasern weitere Siebwände.

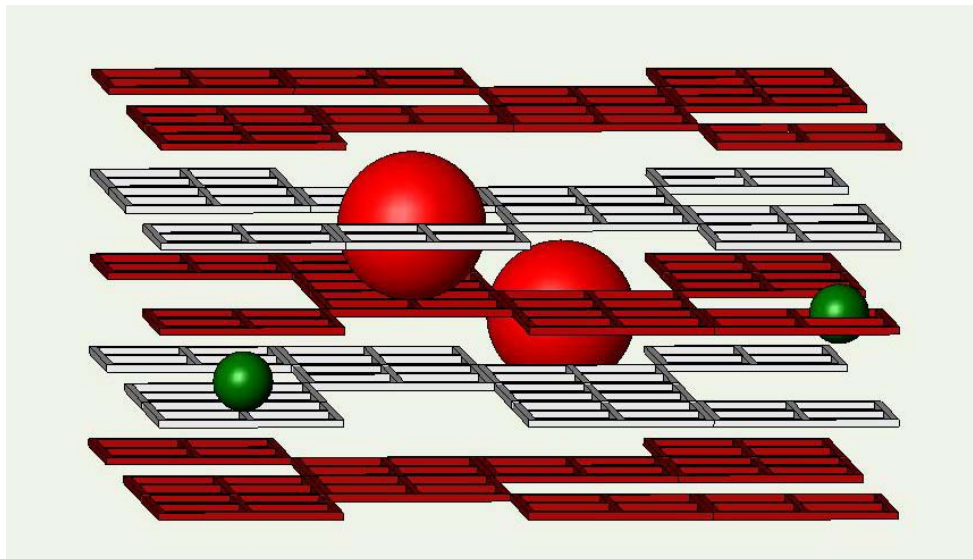


Abb. 7.5: *Beispiel der Modellierung von Siebebenen und Schäben eines Faserflockenbereiches bei nur zwei Schäben- und zwei Lochklassen*

Die geometrische Grundstruktur des Modells für den Aufbau einer Faserflocke und einer bestimmten Schäbenklasse des Durchmessers d ist gemäß den vorangestellten Grundlagen in Abbildung 7.6 im vertikalen Schnitt dargestellt. Als Sieböffnungen in Siebebenen und -wänden treten nur die Öffnungen auf, für die $w > h$ gilt, alle anderen Bereiche werden als für

diese Schäbenklasse geschlossene "Wand" betrachtet. Ergänzend zur Abbildung 7.6 muss hinzugefügt werden, dass die dargestellten Siebzellen, die keine Schäben enthalten, mit Fasern gefüllt sein müssen und somit für kleinere Schäben Siebzellen bilden können. Ebenso entspricht die gezeichnete Faseranzahl nicht der Realität, sondern soll nur schematisch die Grundstruktur wiedergeben.

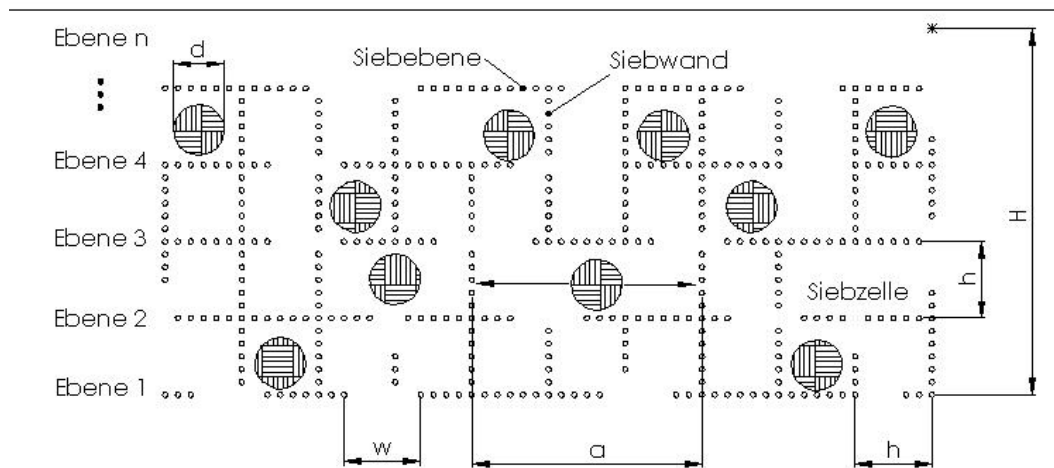


Abb. 7.6: *Abbildung eines Faserflockenbereiches auf Siebebenen und Siebwände für eine Schäbenklasse mit Durchmesser d*

Physikalische Grundannahmen

Eine genaue Betrachtung der physikalischen Bewegungsabläufe von Fasergut und Schäben und der Deformation der gesamten Fasermatte ist für die Aufstellung eines geometrisch-statistischen Modells der Schäbenabsiebung nicht notwendig. Folgende Grundannahmen genügen:

- Die Amplitude, die dem Faser-Schäben-Gemisch durch die Zinken auferlegt wird, ist wesentlich größer als die Bewegungsfreiheit der Schäben¹.
- Während einer Zinkenschwingung bewegt sich eine Schäbe in ihrer Siebzelle einmal vor und zurück.
- Durch die Bewegung der Fasern in der Kammschüttel werden die Fasern ständig gegeneinander verschoben, d.h. die Anordnung der Maschen/Poren in der Faserflocke ist nach jeder Schüttelbewegung verändert. Der Anteil der einzelnen Porenklassen am Gesamtvolumen in einem Siebabschnitt bleibt jedoch gewahrt.
- Durch die ständige Bewegung der Fasern, verbunden mit der permanenten Umformung von Siebzellen, verstopfen die „Siebe“ nicht.

¹ Amplitude der Versuchskammschüttel: $a = 100 \dots 250$ mm,
Schäbenamplitude im Modell $a < 50$ mm für 98 % aller Schäben

- Die Fasermatte wird während der Bewegung durch die Kammschüttel insgesamt aufgelockert - gekennzeichnet durch die geringere Dichte am Ende des Prozesses. Für die Modellierung wird vereinfachend eine stetige Dichtereduzierung in Gutstromrichtung angenommen.
- Der Volumenanteil der Schäben am Gesamtvolumen des Faser-Schäben-Gemisches ist klein, d.h. die Schäben interagieren nicht miteinander.

7.2.4 Aufbau des geometrisch-statistischen Modells

Zur Umsetzung der bisher in Kapitel 7 entwickelten Modellstruktur in ein praktikables Berechnungsmodell für die Schäbenabsiebung in einer Kammschüttel müssen die für den Siebprozess maßgebenden Maschinen- und Stoffdaten berücksichtigt werden (Tabelle 7.1). Zusätzlich sind in Tabelle 7.1 noch weitere Modellparameter aufgeführt. Diese sind wie z. B. die Anzahl der Berechnungsabschnitte, in welche der Schüttelkanal unterteilt wird, von wesentlichem Einfluss auf die Genauigkeit der Modellierung. Abbildung 7.7 gibt einen Überblick über den Berechnungsablauf des auf den vorangegangenen Überlegungen basierenden geometrisch-statistischen Modells für die Schäbenabsiebung aus einem aus Fasern aufgebauten dreidimensionalen Sieb.

Tabelle 7.1: Berücksichtigte Maschinen- und Stoffdaten für die Modellierung der Schäbenabsiebung in einer Kammschüttel

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Bemerkung
Maschinendaten			
Sieblänge	l	m	
Schüttelfrequenz	f	Hz	
spezifischer Massestrom	\dot{m}_s	kg/m h	experimentell bestimmt und modelliert
Höhe des Materialstroms durch die Kammschüttel	h_{FS}	m	experimentell bestimmt
Stoffdaten			
Schäbendichte	ρ_s	kg/m ³	experimentell bestimmt
Gewichtsanteile der einzelnen Schäbenklassen	m_{SKi}		experimentell bestimmt
Faserflockendichte vor der Reinigung	ρ_{fa}	kg/m ³	Dichte der Faserflocke ohne Schäben, experimentell bestimmt
Faserdichte	ρ_f	kg/m ³	experimentell bestimmt
Faserbreite	b_f	mm	experimentell bestimmt
Schäbenanteil im Faser-Schäben-Gemisch	a_s	kg/m ³	experimentell bestimmt
Faserflockendichte nach der Reinigung	ρ_{fe}	kg/m ³	Dichte der Faserflocke ohne Schäben, experimentell bestimmt
sonstige Modellparameter			
Anzahl der Kammschüttelbereiche	n		Vorgabe mit Einfluss auf die Rechengenauigkeit
Korrekturfaktor 1	K_{f1}		Anpassung des theoretischen Schäbendurchmessers
Korrekturfaktor 2	K_{f2}		Anpassung der statischen Siebmaschenweite
Korrekturfaktor 3	K_{f3}		Berücksichtigung der Segregation

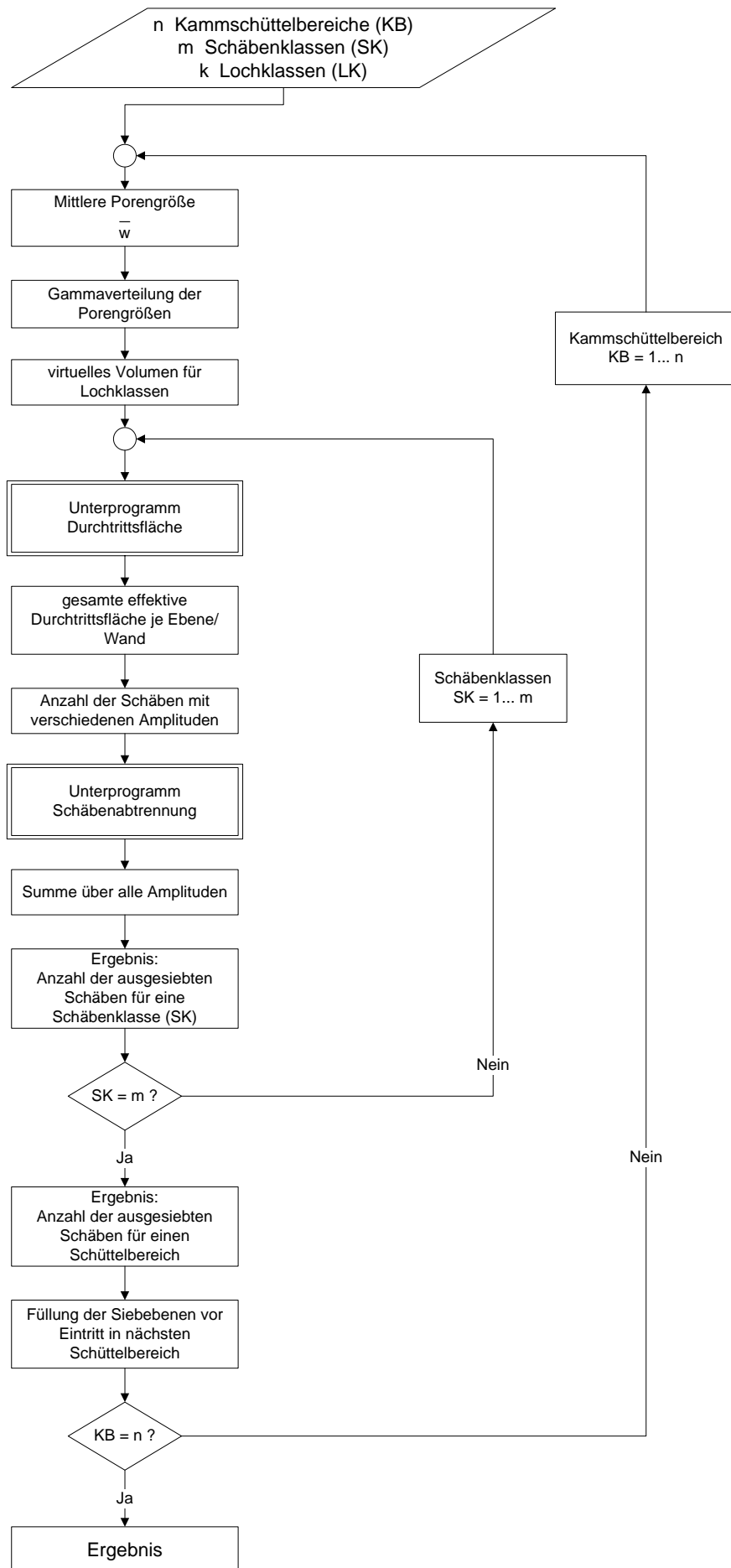
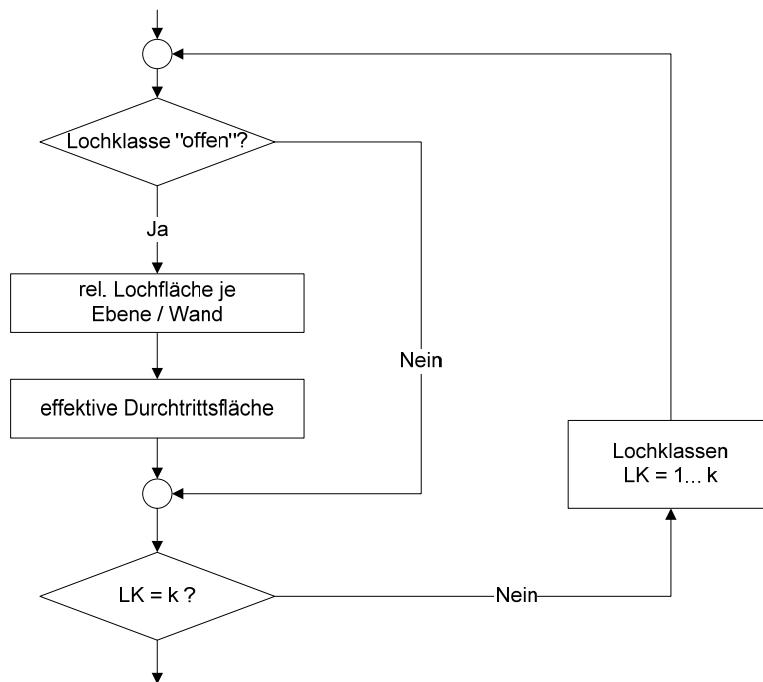


Abb. 7.7: Schema des Berechnungsablaufs für die Modellierung

Unterprogramm Durchtrittsfläche:



Unterprogramm Schäbenabtrennung:

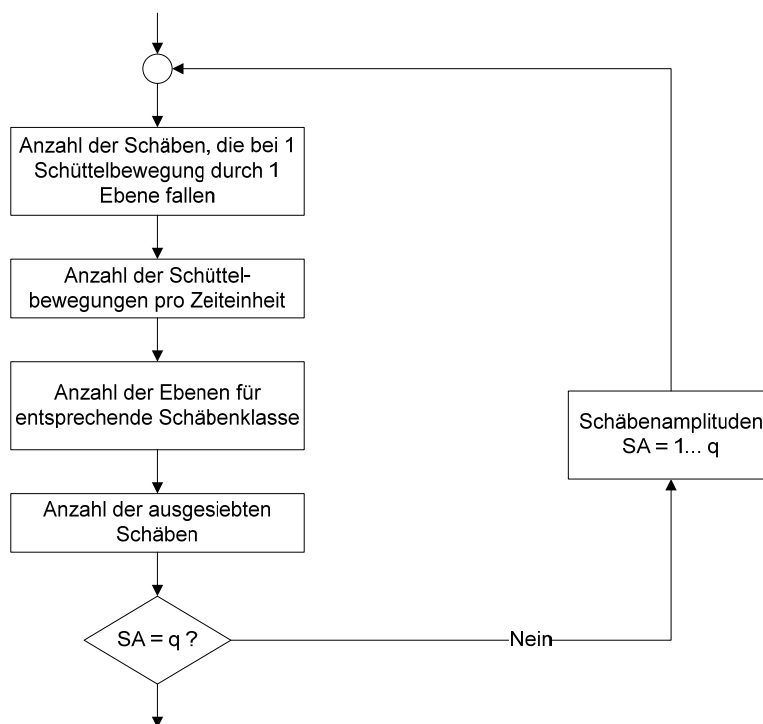


Abb. 7.7: Schema des Berechnungsablaufs für die Modellierung (Fortsetzung)

Zur Umsetzung des dargestellten Berechnungsablaufes sind auf der Grundlage der in Tab. 7.1 zusammengefassten Maschinen- und Stoffdaten folgende Berechnungen und Teilmodellierungen durchzuführen:

- a) die Bestimmung der Porengröße und -verteilung,
- b) die Bestimmung der Flächenanteile und der Anzahl der Löcher einer Lochklasse für jede Siebebene und Siebwand,
- c) die Bestimmung der im modellierten Fasernetzwerk realisierbaren Schäbenamplitude,
- d) die Modellierung des Durchtritts von Schäben einer gegebenen Amplitude durch die Siebebenen und
- e) die Modellierung der Aussiebung der verschiedenen Schäbenfraktionen.

a) Bestimmung der Porengröße und -verteilung

Die mittlere Porengröße und die Porengrößenverteilung lassen sich auf der Grundlage der Stoffdaten des Faser-Schäben-Gemisches ermitteln.

Porengröße:

Zur Bestimmung der mittleren Porengröße genügt zunächst ein vereinfachtes Modell für eine Faserflocke, das diese in würfelförmige, gleich große Poren aufteilt (Abb. 7.8)

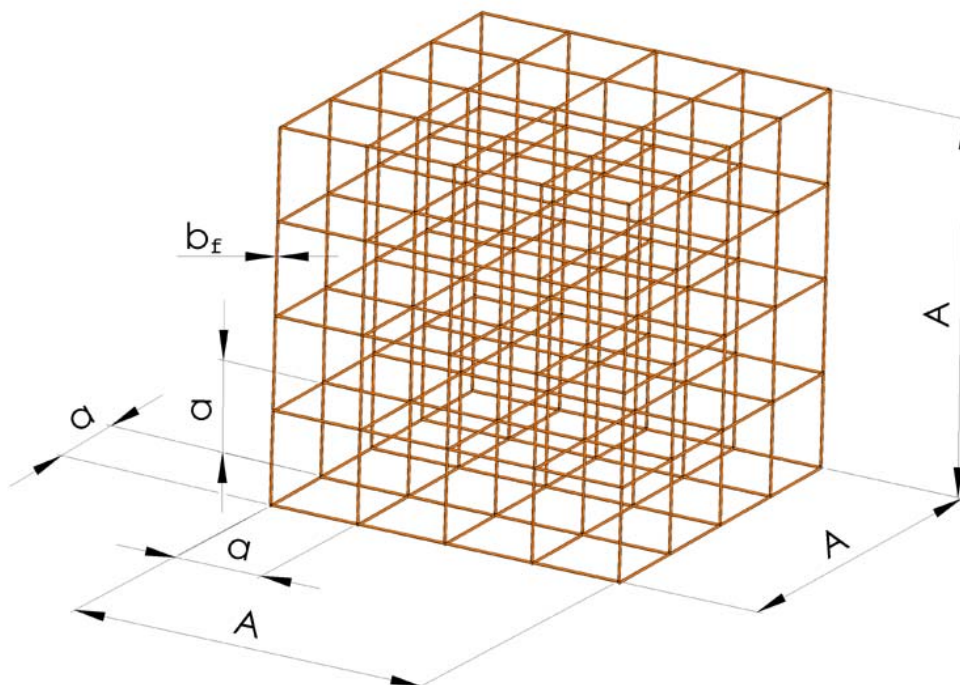


Abb. 7.8: Schematische Aufteilung einer Faserflocke in Poren

Mit der Dichte der Faserflocken, der mittlerer Faserdichte und der mittleren Faserdicke kann nach Gleichung 7.1 die mittlere Porengröße \bar{w} bestimmt werden.

$$\bar{w} = \sqrt{3 \frac{\frac{\pi}{4} \cdot \rho_f \cdot b_f^2}{\rho_{fe}}} \quad (7.1)$$

Dieser Wert wird auf Grundlage der Daten einer ruhenden Faserflocke ermittelt. Da während des Schüttelprozesses die Faserflocken durch die Kammzinken regelmäßig gestaucht und wieder auseinander gezogen werden, entspricht dieser Wert jedoch nicht der im Siebprozess wirksamen Porengröße. Die Passage der Schäben durch die Fasern geschieht wesentlich schneller als dies für ein im Ruhezustand bestimmtes \bar{w} zu erwarten wäre. Deshalb wird die Porengröße mit dem Korrekturfaktor K_{f2} gemäß folgender Gleichung angepasst:

$$\bar{w} = K_{f2} \cdot \bar{w}_{Ruhe} \quad (7.2)$$

Dieser Korrekturfaktor für \bar{w} ist jeweils experimentell zu bestimmen und stellt einen Faktor dar, der schwer bestimmbare, reale physikalische Materialeigenschaften vereinfachend für das Modell zusammenfasst.

Die Lochklassen werden entsprechend der experimentell ermittelten oder vorgegebenen Schäbenklassen mit $d = 0,8 \cdot w$ gewählt. D. h., die Lochklassen werden so festgelegt, dass die Schäben der jeweiligen Schäbenklasse immer durchfallen, die Schäben der nächst höheren Schäbenklasse jedoch die von Fasern gebildete Siebfläche nicht passieren können. Die Betrachtung von Grenzkorn [Schubert 1990, S. 156] wird somit für diese Theorie vereinfacht:

- Für den oberen Rand der Lochklasse ist keine Grenzkornbetrachtung für den Durchtritt nötig, da die Schäbengröße unterhalb der Grenzkorngröße liegt.
- Grenzkorn wird an den unteren Rand der nächst höheren Lochklasse verschoben. Annahme: Aufgrund der Schäbenform fällt Grenzkorn nie durch.

Porengrößenverteilung:

Mit der Porenvolumenverteilung wird der Anteil des Volumens, das in der Faserflocke insgesamt von den Poren eines bestimmten Porendurchmessers eingenommen wird, bestimmt. Die Porengrößenverteilungen in stochastischen Fasernetzwerken folgen oft einer logarithmische Normalverteilung oder Gammaverteilung. Dabei tritt die logarithmische Normalverteilung für ideal zufällige, die Gammaverteilung für reale, immer etwas "klumpige" Netzwerke auf [DODSON 1997, DODSON et al. 1996]. Dem folgend wird hier eine Gammaverteilung gewählt.

Gamma-Summenhäufigkeitsverteilung:

$$p = F(x | a, b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^x t^{a-1} e^{-\frac{t}{b}} dt \quad (7.3)$$

Der Erwartungswert der Gamma-Verteilung entspricht der mittleren Porengröße \bar{w} .

$$EW = a \cdot b = \bar{w} \quad (7.4)$$

Die untersuchten Fasern sind sehr unregelmäßig geformt und es existieren große Unterschiede zwischen einzelnen Versuchschargen. Die Bestimmung der genauen Gammaverteilung wäre nur mit einem nicht vertretbaren hohen Analyseaufwand zu erfassen. Hierfür wäre die Bestimmung der genauen dreidimensionalen Struktur z.B. mittels NMR-Mikroskopie nötig [BUTZ 1999]. Der Versuch auf der Grundlage von mit einem hochauflösenden Scanner erstellten zweidimensionalen Abbildern der Flocken auf deren dreidimensionale Aufteilung zu schließen war nicht erfolgreich (Abb. 7.9). Daher wurde hier eine Anpassung der Faktoren der Gammaverteilung indirekt über die Abbildung der Versuchsergebnisse gewählt. Für die untersuchten Fasern ergibt sich eine gute Abbildung der Versuchsergebnisse mit einem Formfaktor der Gammaverteilung von $a = 6$. Der Größenfaktor b ergibt sich nach Gleichung 7.4 aus der mittleren Porengröße \bar{w} .



Abb. 7.9: Unterste Schicht einer Faserflocke (hochauflösende Scanneaufnahme 8x9,5 cm)

b) Bestimmung von Flächenanteil und Anzahl der Löcher einer Lochklasse pro Siebebene und Siebwand

Zur Bestimmung des Flächenanteils und der Anzahl der Löcher einer Lochklasse am Gesamtvolumen der Faserflocke wird diese Flocke für die Modellierung als Würfel mit der Kantenlänge L vereinfacht betrachtet (Abb. 7.10). Das Gesamtvolumen der Poren mit dem Porendurchmesser w_i hat die Größe eines Quaders der Höhe L und mit einer Kantenlänge l_{w_i} . Der in Abbildung 7.10 dargestellte Würfel der Größe $L \times L \times L$ stellt einen normierten Ausschnitt aus der Faserschicht dar, der eine Volumeneinheit repräsentiert (z.B. 1 dm^3).

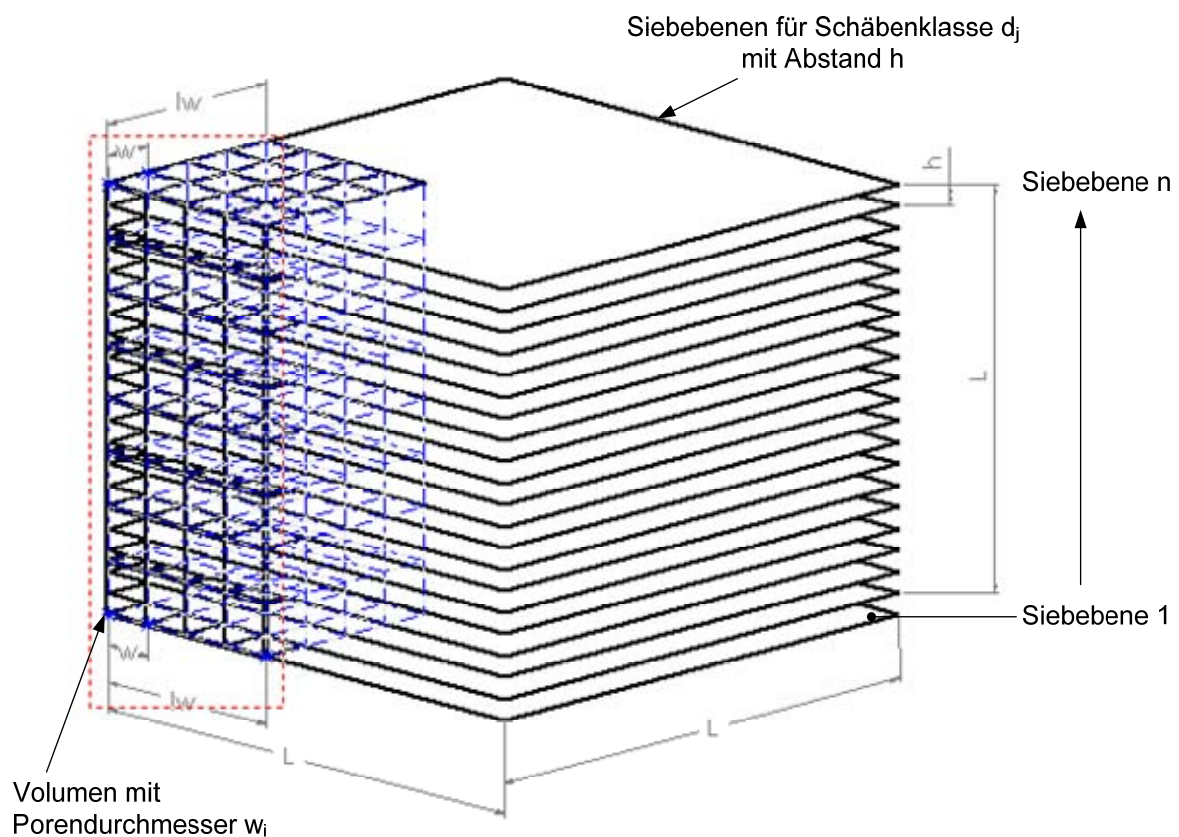


Abb. 7.10: Modell zur Bestimmung des Flächenanteils der von einer bestimmten Porengröße w_i gebildeten Löcher an einer Siebebene

Die relative Lochfläche pro Siebebene, die durch das Volumen mit dem Porendurchmesser w_i eingenommen wird berechnet sich wie folgt:

$$A_{rel\ w_i} = \frac{A_{w_i}}{A_{ges}} = \frac{l_{w_i}^2}{L^2} \quad (7.5)$$

mit $V_{w_i} = l_{w_i}^2 \cdot L$ und $V_{ges} = L^3$ (7.6)

folgt
$$A_{rel w_i} = \frac{V_{w_i}}{V_{ges}} \quad (7.7)$$

D. h., der Anteil der Fläche an der Siebebene die durch Sieböffnungen mit der Größe w eingenommen werden, entspricht dem Volumenanteil der Poren mit Porendurchmesser w am Gesamtvolumen.

c) Bestimmung der Schäbenamplitude

Da die Faserflocken eine dreidimensionale Siebstruktur aufweisen, wird für die Schäbenbewegung in den Flocken davon ausgegangen, dass die Öffnungen in Siebwänden gleiche Hindernisse für die Schäben darstellen und geometrisch vergleichbar mit denen in den Siebebenen sind. Eine Schäbe tritt durch eine Siebwand, wenn bei der Schüttelbewegung die Sieböffnung so getroffen wird, dass Schäbe nicht an den die Öffnung bildenden Fasern hängen bleibt. Die effektive Durchtrittsfläche ist nach [SCHUBERT 1990] und [DEHGHANI et al. 2002] die Fläche, durch die ein Partikel bei Auftreffen auf ein Sieb dieses passieren kann (siehe Abb. 7.11). Eine mathematische Formulierung dieser Fläche A_{effw} gibt Gleichung 7.8.

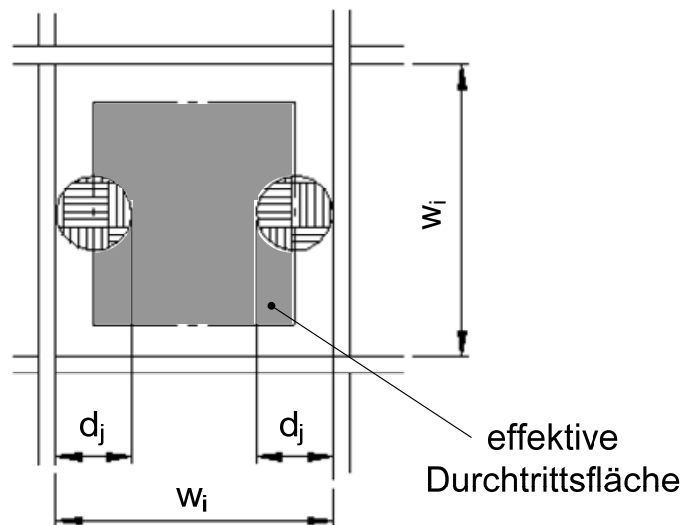


Abb. 7.11: Effektive Durchtrittsfläche

Effektive Durchtrittsfläche [nach SCHUBERT 1990 und DEHGHANI et al. 2002]:

$$A_{eff w_i} = \frac{A_{Durch}}{A_{Loch}} = \frac{(w_i - d_j)^2}{(w_i + s)^2} = \left(\frac{w_i}{w_i + s} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{d_j}{w_i} \right)^2 \quad (7.8)$$

Entsprechend ist die relative effektive Durchtrittsfläche je Siebwand, ausgehend vom Anteil der Fläche an der Siebebene, die durch Sieböffnungen mit der Größe w_i eingenommen werden, wie folgt definiert:

$$A_{rel\,eff\,w_{ij}} = A_{rel\,w_i} \cdot \frac{(w_i - d_j)^2}{(w_i + s)^2} \quad (7.9)$$

Für die Wahrscheinlichkeit für den Durchtritt einer Schäbe durch eine Siebwand gilt:

$$W_{Durch\,1\,w_{ij}} = A_{rel\,eff\,w_{ij}} \quad (7.10)$$

Die Schäbenamplitude a_k (mit $k = 1 \dots o$) beträgt bei k durchgetretenen Siebwänden:

$$a_{kj} = k \cdot h_j \quad (7.11)$$

mit

k - Anzahl der durchgetretenen Siebwände

h - Abstand zwischen den Siebwänden für die Schäbenklasse des Durchmessers d_j

Für die Wahrscheinlichkeit für den Durchtritt einer Schäbe durch k Siebwände gilt:

$$W_{Durch\,k\,w_{ij}} = (W_{Durch\,1\,w_{ij}})^k \quad (7.12)$$

Für die Anzahl von Schäben aus einer Gesamtzahl von s , welche die Amplitude a_k für n durchgetretene Siebwände besitzen, gilt:

$$s_{a_{kij}} = s \cdot W_{Durch\,k\,w_{ij}} \quad (7.13)$$

Das so aufgebaute Modell berücksichtigt nicht, dass eine Schäbe auch beim direkten Auftreffen auf die Fasern das Sieb unter günstigen Bedingungen passieren kann. Aufgrund der unregelmäßigen Formen von Schäben und Fasern und der großen Unterschiede zwischen einzelnen Chargen sind diese Siebereignisse theoretisch kaum abzubilden. Deshalb wird hierfür ein Korrekturfaktor K_{fl} eingeführt. K_{fl} stellt einen für das entsprechende Material entsprechend der Versuchsergebnisse anzupassenden Faktor zur Korrektur des äquivalenten Durchmessers der Schäben dar (siehe Gl. 7.14).

$$d_{korr\,j} = d_j \cdot K_{fl} \quad (7.14)$$

d) Durchtritt von Schäben mit gegebener Amplitude durch Siebebenen

Eine Schäbe mit gegebener Amplitude a kann eine Öffnung mit der Weite w passieren, wenn sie sich auf einem Punkt der - durch die Amplitude vergrößerten - virtuellen Durchtrittsfläche $A_{Durch\,a}$ befindet (Abb. 7.12):

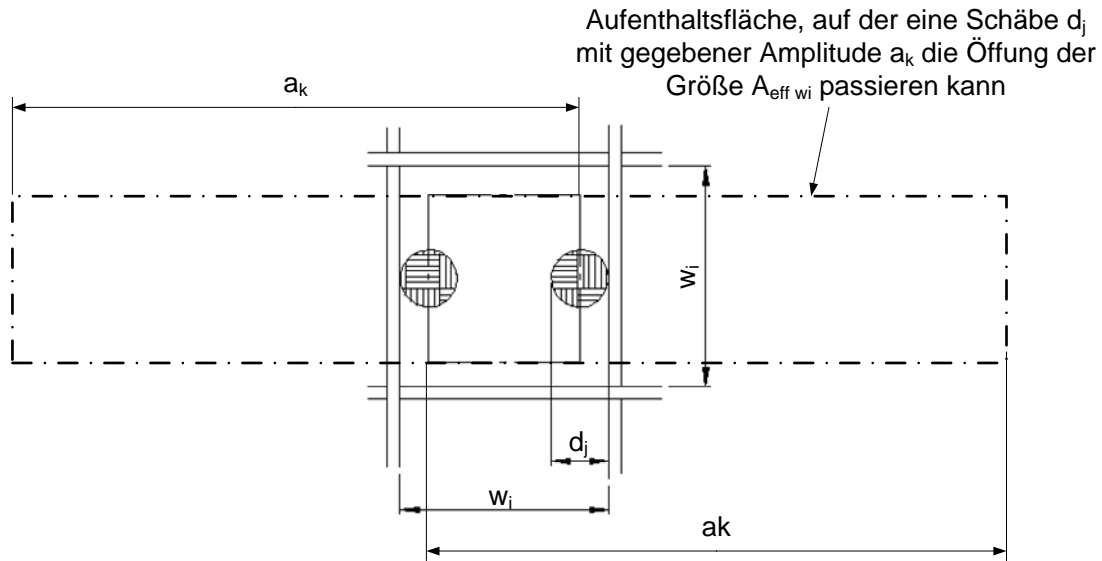


Abb. 7.12: Aufenthaltsfläche von Schäben, die bei einer Amplitude a_k die Öffnung w_j passieren können

Damit ergibt sich für die virtuelle Durchtrittsfläche:

$$A_{Durch\ a_{ijk}} = (w_i - d_j) \cdot (2a_k w_i + d_j) \quad (7.15)$$

mit dem Flächenverhältnis t_{aijk}

$$t_{aijk} = \frac{A_{Durch\ a_{ijk}}}{A_{Durch\ ij}} \quad (7.16)$$

folgt für die gesamte relative virtuelle Durchtrittsfläche

$$A_{Durch\ rel\ virt_{ijk}} = A_{eff} \cdot t_{aijk} \quad (7.17)$$

Für die Wahrscheinlichkeit für den Durchtritt einer Schäbe durch eine Siebebene gilt:

$$W_{Durch\ a_{ijk}} = A_{Durch\ rel\ virt_{ijk}} \quad (7.18)$$

Für die Anzahl s_{durch} von Schäben aus einer Menge s mit gegebener Amplitude a_k , die durch eine Siebebene fallen, gilt:

$$s_{Durch\ a_{ijk}} = s \cdot W_{Durch\ a_{ijk}} \quad (7.19)$$

Nicht jede Schäbe passiert sofort die Siebebene, wenn sie theoretisch die Möglichkeit¹ dazu hat. Eine weitere Korrektur für diese Ereignisse erwies sich jedoch als unnötig, da mit den bereits eingeführten zwei Korrekturfaktoren eine ausreichende Anpassbarkeit des Modells an das reale Siebgeschehen gegeben ist.

¹ Dieses Ereignis tritt nur dann immer ein, wenn die Schäben nicht gleichzeitig eine horizontale Relativbewegung zur Sieböffnung ausführt.

e) Ausiebung der definierten Schäbenfraktionen

Im Verlauf des Schüttelprozesses treten aus den unteren Siebebenen Schäben aus. Für die unterste Siebebene entspricht die Anzahl s_r der aus dieser Ebene aus der Fasermatte austretenden Schäben, der Anzahl an Schäben, die im Siebprozess eine Ebene tiefer gelangen.

$$s_{r\ E1_{ij}} = s_{Durch\ a_{ij}} \quad (7.20)$$

Schäben in höher liegenden Siebebenen müssen jedoch, um aus der Fasermatte auszutreten, weitere Siebebenen passieren. Die Durchfallweite für die einzelnen Schäbenklassen ergibt sich analog zur Modellierung der „Schäbenamplitude“ (S. 107, Pkt. c) und Gl. 7.12).

Für die Wahrscheinlichkeit für den Durchtritt einer Schäbe durch weitere n Siebebenen gilt somit:

$$W_{Durch\ n\ e_{ij}} = \left(W_{Durch\ 1\ e_{ij}} \right)^n \quad (7.21)$$

Für die Anzahl s_{b_k} von Schäben aus einer Gesamtzahl von s , die die Durchfallweite b_k für weitere n durchtretene Siebebenen besitzen, gilt entsprechend:

$$s_{b_{kij}} = s \cdot W_{Durch\ n\ e_{ij}} \quad (7.22)$$

Schäben, die durch die n -te Siebebene hindurchfallen, treten nur dann aus der Fasermatte aus, wenn sie mindestens eine Anzahl von $(n-1)$ weiteren Siebebenen zu durchqueren in der Lage sind. D. h. die Gesamtzahl von Schäben $s_{r\ En}$, die aus der n -ten Siebebene aus der Fasermatte herausfallen beträgt:

$$s_{r\ En_{ij}} = s_{Durch\ a_{ij}} \cdot \sum_{t=(n-1)}^z W_{Durch\ 1\ t\ e_{ij}} \quad \text{mit} \quad z_i = \frac{h_{FS}}{h_i} \quad (7.23 \text{ und } 7.24)$$

Die Summe der austretenden Schäben über die Gesamtzahl der Ebenen ergibt die Anzahl an Schäben einer Schäbenklasse, die während einer Schüttelbewegung aus der Fasermatte austreten.

$$s_{r\ SK} = \sum_{t=1}^z s_{r\ E\ t} \quad (7.25)$$

Die in den einzelnen Siebebenen entstandenen Leerräume werden bis zu einem gewissen Maß durch Schäben aus den darüberliegenden Siebebenen aufgefüllt. Somit ergibt sich in der Fasermatte für jede Schäbenfraktion eine eigene Verteilungsfunktion über die Höhe des Faserstromes durch die Kammschüttel. Da die Durchfallweiten für alle Schäben bestimmt werden können, ist eine genaue Berechnung der Verteilungsfunktion möglich. Um die Komplexität des Modells so niedrig wie möglich zu halten, wurde darauf jedoch verzichtet, da der zusätzliche Erkenntnisgewinn gering wäre. Stattdessen wurde von der Annahme ausgegangen, dass aufgrund der Homogenität der Faserflocken die Schäben gleichmäßig in diesen verteilt sind.

7.3 Ergebnisse und Modellvalidierung

Das entwickelte Modell erlaubt Voraussagen sowohl über den über alle Schäbenklassen summierten Restschäbengehalt im Faserstrom in jedem modellierten Teilabschnitt über die gesamte Länge des Schüttelkanals einer Kammschüttel als auch über die Verteilung der einzelnen Schäbenfraktionen in den Teilabschnitten während des Schüttelprozesses. In den Abbildungen 7.13 und 7.14 sind exemplarisch diese Ergebnisse für die Reinigung eines typischen in der ATB-Hammermühle mittels Prallbeanspruchung aufgeschlossenen Faser-Schäben-Gemisches mit einem Anfangsschäbengehalt von ca. 58 Masse-% dargestellt. Zur Modellierung wurden die in Tabelle 7.2 aufgeführten Stoff- und Maschinendaten berücksichtigt.

Tabelle 7.2: Gewählte Maschineneinstellungen, gemessene Stoffdaten (Versuch H 1) und Parameter für die Modellierung der Schäbenabsiebung in einer Kammschüttel

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert
Maschinendaten			
Sieblänge	l	m	2,5
Schüttelfrequenz	f	Hz	2,25
Schüttelwinkel	ϕ_0	°	4
Maschinenneigung	γ	°	0
spezifischer Massestrom	\dot{m}_s	kg/m h	0,7
Höhe des Materialstroms auf dem Sieb	h_{FS}	m	0,1
Siebtyp			Lochblech Rv 20-28
Stoffdaten			
Materialklasse und Röstgrad			Klasse B, leicht geröstet
Schäbendichte	ρ_s	kg/m ³	0,23
Gewichtsanteile der einzelnen Schäbenklassen	m_{SKi}	d %	0,5/1,5/2,4/3,4/6/>8 6 / 26/ 27/ 21/18/2
Faserflockendichte vor der Reinigung (ohne Schäben)	ρ_{fa}	kg/m ³	0,014
Faserdichte	ρ_f	kg/m ³	1,3
Faserbreite	b_f	mm	0,2
Schäbenanteil im Faser-Schäben-Gemisch	a_s	Masse - %	58
Faserflockendichte nach der Reinigung	ρ_{fe}	kg/m ³	0,012
sonstige Modellparameter			
Kammschüttelbereiche	n		20
Korrekturfaktor 1 / 2 / 3	K_{f1-3}		0,68 / 2,9 / 2,0

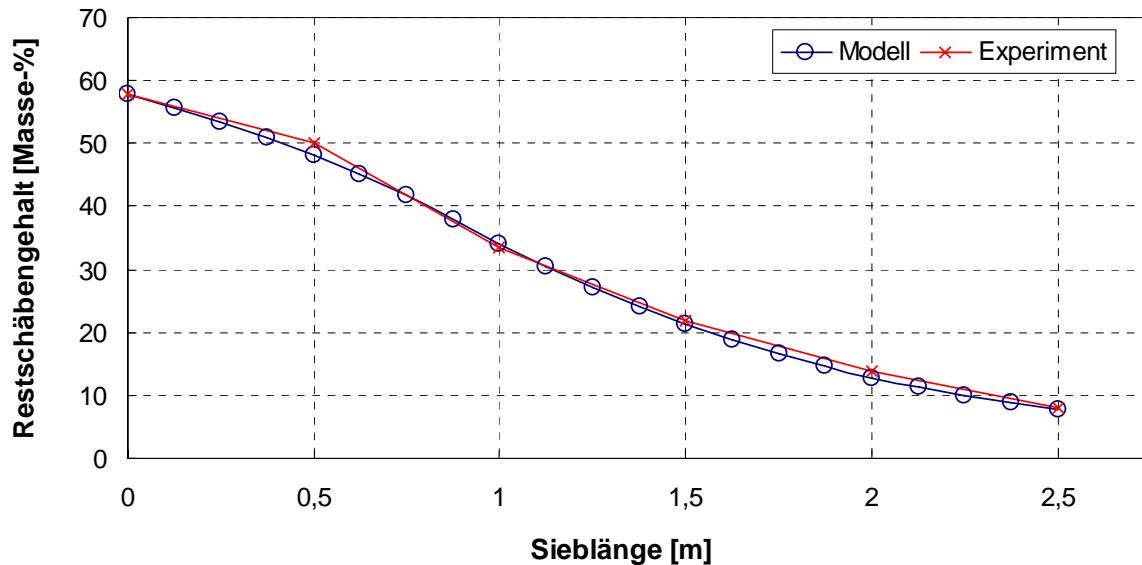


Abb. 7.13: Modellierter und experimentell ermittelter Abnahme des Restschäbengehalts (Sieblänge von 2,5 m unterteilt in 20 Berechnungsabschnitte: 1 Abschnitt entspricht 0,125 m, Versuch H 1, Materialkategorie B leicht geröstet)

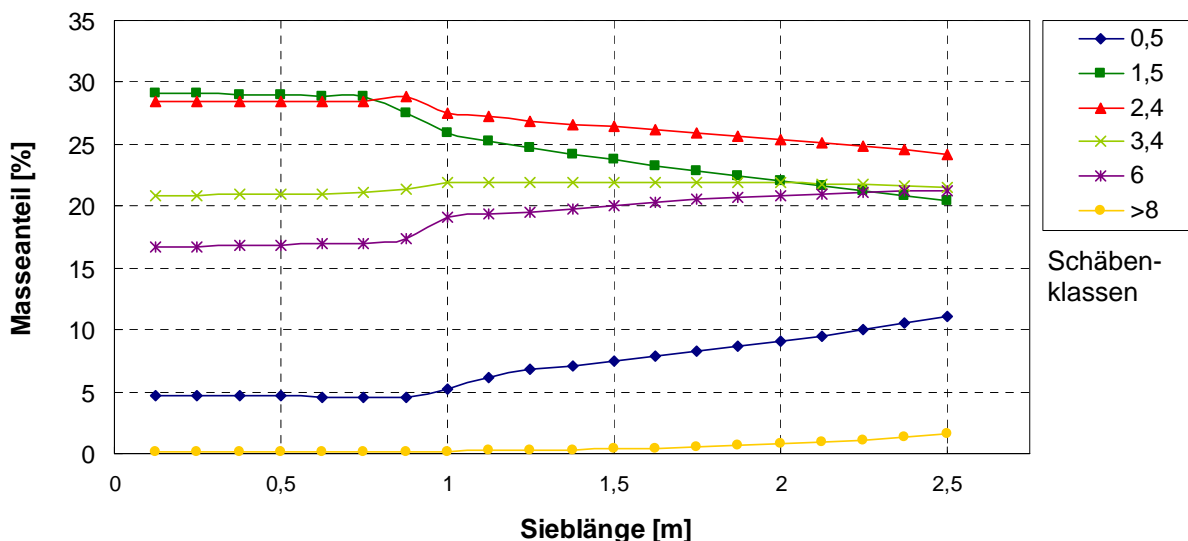


Abb. 7.14: Modellierter Masseanteile des in sechs Schäbenklassen unterteilten Schäbengehaltes (Sieblänge von 2,5 m unterteilt in 20 Berechnungsabschnitte: 1 Abschnitt entspricht 0,125 m Material B-05/05 leicht geröstet)

Vergleichend werden diesen Modellierungsergebnissen die Versuchsergebnisse der detaillierten Siebanalyse für die nur in fünf Messabschnitte unterteilte Versuchsschüttel in Abbildung 7.15 gegenübergestellt. Durch die für die Modellierung gewählten 20 Kammschüttelbereiche ergibt sich ein zu den Experimenten vergleichsweise feines Berechnungsraster mit einer Schrittweite von 0,125 m. Das Messraster der Experimente ist konstruktiv durch die fünf Schäbensammelkästen mit einem Abstand von 0,5 m vorgegebenen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Modellierung (Abb. 7.14) mit den experimentellen Ergebnissen (Abb.

7.15) wurden die Modellergebnisse in Abbildung 7.16 auf die Schrittweite der Experimente von 0,5 m zusammengefasst dargestellt.

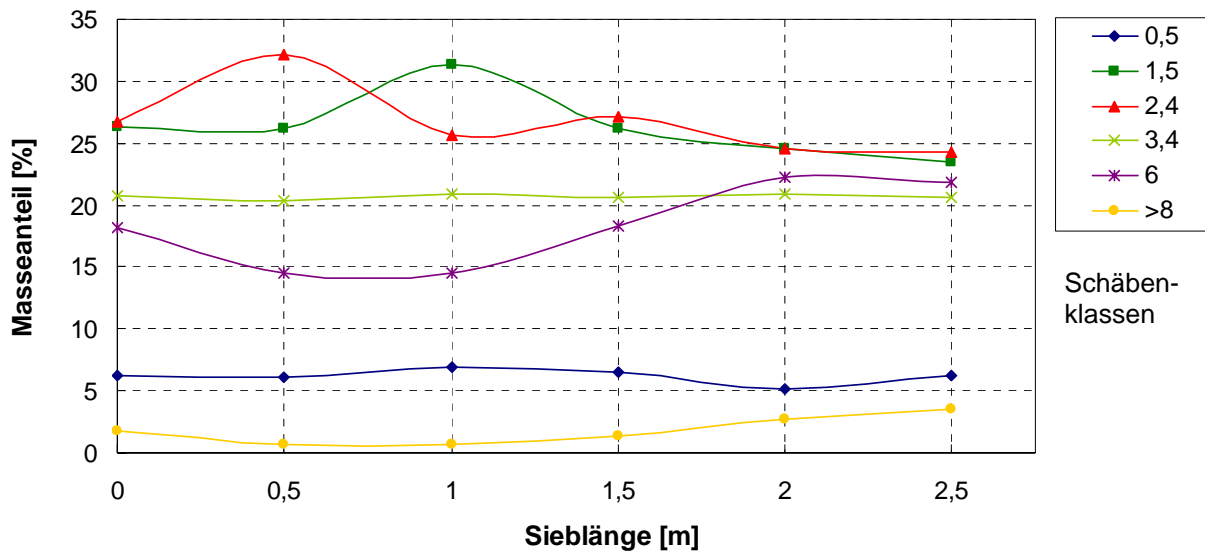


Abb. 7.15: Experimentell ermittelte Masseanteile des in sechs Schäbenklassen unterteilten Schäbengehaltes (Versuch H 1, Materialkategorie B leicht geröstet)

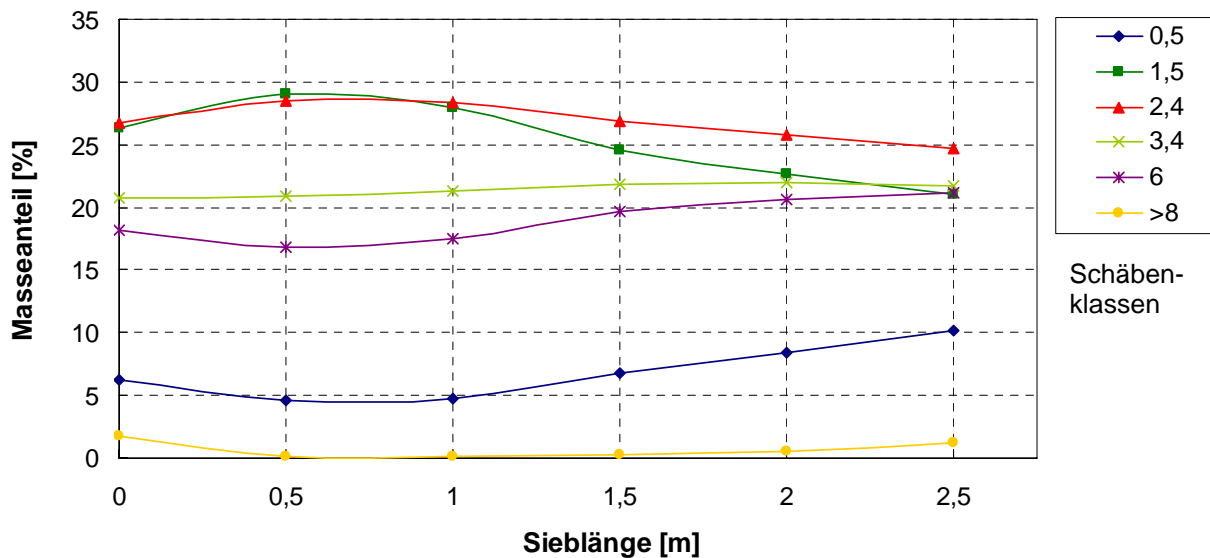


Abb. 7.16: Modellierte Masseanteile des in sechs Schäbenklassen unterteilten Schäbengehaltes auf fünf Brechnungsabschnitte zusammengefasst (Wert bei Sieblänge $l = 0$ m entspricht dem experimentellen Messwert gemäß Abb. 7.15)

Auswertung

Vergleicht man die Endwerte und den Verlauf des modellierten Schäbengehaltes (Abb. 7.13) mit dem gemessenen Schäbengehalt über die Maschinenlänge kann folgendes festgestellt werden:

- Der modellierte Restschäbengehalt von 9 Masse-% nach dem Durchlauf durch den Schüttelkanal stimmt mit dem experimentell ermittelten Wert überein und
- auch der qualitative Verlauf der Abnahme des Schäbenanteils im Faserstrom über die Maschinenlänge wird vom Modell sehr gut abgebildet.

Der detaillierte Vergleich für die Absiebung der einzelnen Schäbenklassen (Modell: Abb. 7.14, Experiment: Abb. 7.15) zeigt, dass auch diese Modellergebnisse sowohl qualitativ als auch quantitativ gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen. Vorhandene Differenzen haben ihre Ursache vorrangig in nicht erfassten natürlichen Schwankungen der Rohstoffzusammensetzung und -qualität. Folgende weiteren Abweichungen und mögliche Ursachen werden sichtbar:

- Die modellierten Kurven für die Aussiebung der Schäben nach den einzelnen Schäbenklassen weisen nach ca. 0,9 m Sieblänge eine sichtbare Änderung in der Steigung auf. Zu diesem Zeitpunkt können erstmals die unteren Ebenen nicht mehr in dem Maße durch Schäben der darüber liegenden Ebenen nachgefüllt werden, wie Schäben aus diesen unteren Ebenen selbst den Siebboden passieren. Diese Steigungsänderung wird durch die experimentellen Daten nicht belegt. Allerdings ist hier das Messraster praxisbedingt deutlich grober. Werden die Modellierungsergebnisse auf die Schrittweite des Messrasters zusammengefasst, wird diese Steigungsänderung auch im Modell gemindert (Abb. 7.16).
- Die kleinste Schäbenklasse wird nach dem Modell zu gut abgesiebt. In der Praxis erfolgt dies wahrscheinlich aufgrund von nicht im Modell erfassten Haftkräften (Verhaken der Schäben, Einschluss in Verfilzungen) sichtbar vermindert.
- Die experimentell ermittelten Kurven der Schäbenabscheidung weisen für einige Schäbenklassen wellenförmige Schwankungen auf. Da diese Schwankungen bei allen Messreihen 12 Messreihen mit 3 Wiederholungen auftraten, können diese Schwankungen auf Fehler der Probennahme und der Partikelgrößenanalyse der Schäben mittels Siebklassierung zurückgeführt werden.

Fazit

Mit kleineren Abweichungen für die Verläufe Abscheidung der einzelnen Schäbenklassen über die Sieblänge wird der Restschäbengehalt als Summe der in den Fasern nach Passage der Reinigungseinrichtung verbliebenen Schäbenmasse über alle Schäbenklassen für die Reinigung der untersuchten Faser-Schäben-Gemische durch das entwickelte geometrisch-statistische Modell sehr gut abgebildet.

Alle weiteren Modelluntersuchungen werden daher im Zusammenhang mit dem erstellten Massestrommodell in Kapitel 8 fortgesetzt.

8 Simulationsergebnisse mit einem Kammschüttel-Gesamtmodell

Im Kapitel 5 „Kammschüttel zur Faserreinigung“ wurden umfangreiche Untersuchungen zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf die Reinigungsleistung einer Kammschüttel vorgestellt. Die wichtigsten dieser ermittelten Faktoren flossen anschließend in die Entwicklung der Modelle für die Simulation des Massestroms (Kap. 6, im Folgenden als Massestrommodell bezeichnet) und die Simulation des Trennprozesses von Fasern und Schäben (Kap. 7, im Folgenden als Siebmodell bezeichnet) ein. In den hierfür durchgeführten Untersuchungen erwiesen sich insbesondere folgende Maschinen- und Betriebsparameter für die Modellierung einer Kammschüttel mit dem Ziel der konstruktionstechnischen Weiterentwicklung als zweckmäßig und praxisrelevant:

- die Schüttelfrequenz und –amplitude sowie der Schüttelwinkel der Kämme,
- die Neigung des Schüttelkanals und
- die Sieblänge.

Als Datenbasis für die Modellierung müssen weiterhin die grundlegenden Stoffeigenschaften des Siebgutes (z.B. Dichte, Partikelgrößenverteilung) bekannt sein. Ferner müssen grundlegende Festlegungen zur Geometrie der Kammschüttel wie z.B. Höhe und Breite des Schüttelkanals getroffen werden. Eine Auflistung der notwendigen Modellvorgaben ist im Anhang (Tab. A8.1) zusammengestellt.

Bisher wurde die Leistung der untersuchten Versuchseinrichtung in getrennten Modellen erfasst. Im Folgenden werden das Massestrom- und das Siebmodell verknüpft. Damit ergibt sich der in Abb. 8.1 dargestellte Berechnungsablauf für das Gesamtmodell. Auf der Grundlage dieses Gesamtmodells können nun die Einflüsse der angegebenen relevanten Parameter auf den Massestrom und die Schäbenabtrennung (Reinigungsleistung) untersucht werden. Für den Praxiseinsatz sind Maschinen mit einem hohen Massestrom bei gleichzeitig guter Reinigungsleistung und minimalen Maschinenkosten gefragt. Vor diesem Hintergrund erwiesen sich insbesondere die Schüttelfrequenz und der Schüttelwinkel sowie die Maschinenneigung für ein gegebenes Faser-Schäben-Gemisch als die einflussreichsten Parameter. Mit der Schüttelfrequenz steigen der Massestrom und die Reinigungsleistung. Ein größerer Schüttelwinkel in Richtung des Gutstromes erhöht ebenso deutlich den Massestrom bei geringem Einfluss auf die Reinigungsleistung. Eine größere Neigung des Schüttelkanals senkt zwar den Massestrom, steigert jedoch die Reinigungsleistung bei gleicher Baugröße der Maschine. Gleichzeitig wirkt sich ein geneigter Schüttelkanal günstig auf die konstruktive Gestaltung und den Platzbedarf der Maschine aus und ist damit ggf. geeignet, die Kosten für das Reinigungssystem bei gleich hoher Leistung zu reduzieren. Daher sollen im Folgenden exemplarisch diese

drei Parameter eingehender betrachtet werden. Da bei Siebklassierern ähnlicher Bauart die Siebfläche bzw. die Sieblänge ebenso von entscheidendem Einfluss auf das Siebergebnis ist, werden auch die Modellergebnisse einer Kammschüttel mit einem 5 m langen Sieb im Vergleich zu durchgeführten Experimenten vorgestellt.

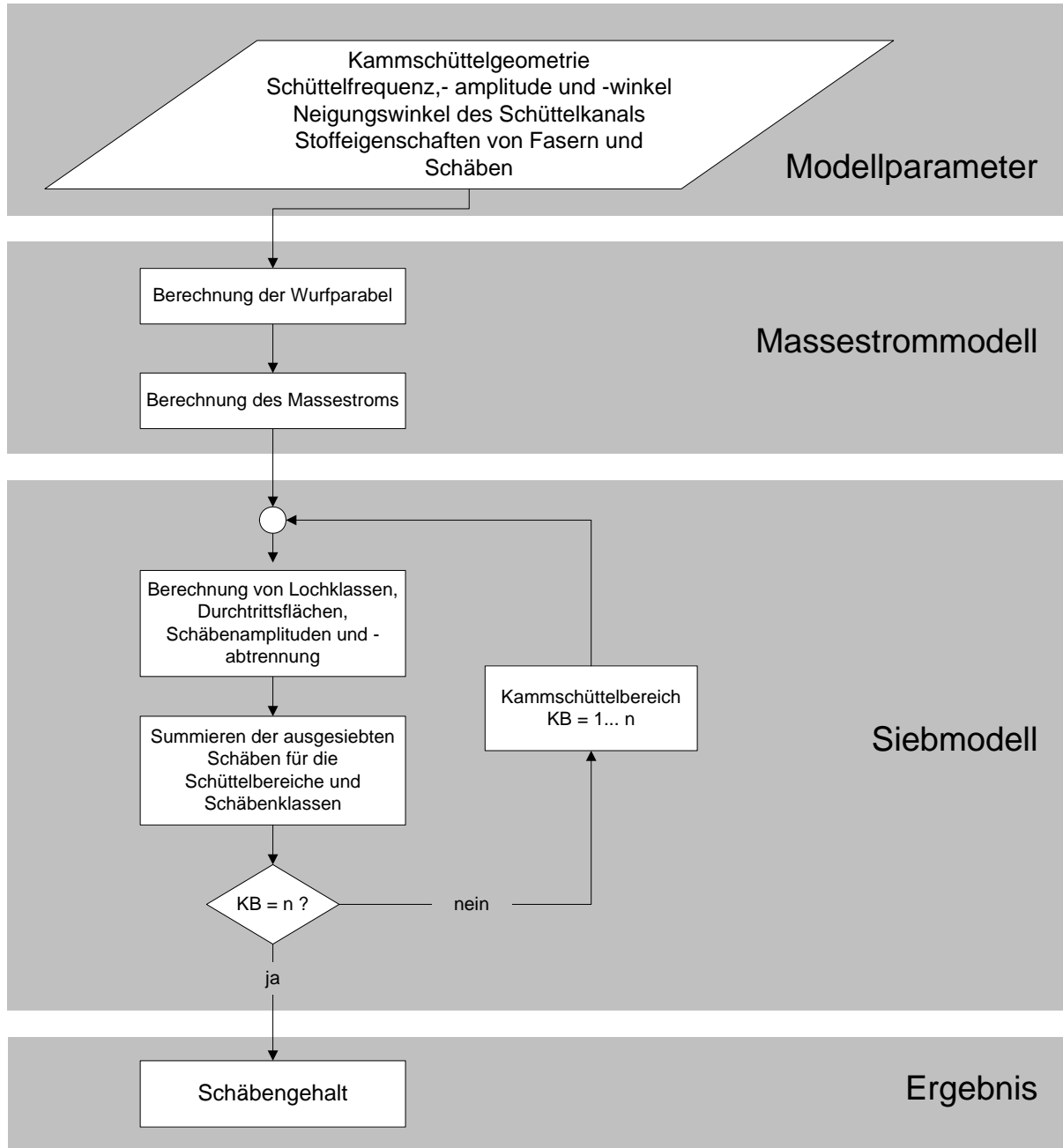


Abb. 8.1: Berechnungsablauf für das Gesamtmodell einer Kammschüttel

8.1 Einfluss von Schüttelfrequenz, Maschineneigung und Schüttelwinkel auf die Schäbenabscheidung

Abb. 8.2 zeigt den Einfluss der Schüttelfrequenz auf den Restschäbengehalt für eine Kammschüttel mit 2,5 m Sieblänge und einem horizontalen Schüttelkanal. Der modellierten Schäbenabscheidung wurden hier noch einmal die experimentell ermittelten Werte incl. ihrer Standardabweichung gegenübergestellt. Insbesondere bei niedrigen Schüttelfrequenzen sind die Abweichungen zwischen Modell und Experiment im vorderen Siebabschnitt höher. Dies lässt sich auf den inhomogenen Massestrom an der Materialaufgabe zurückführen.

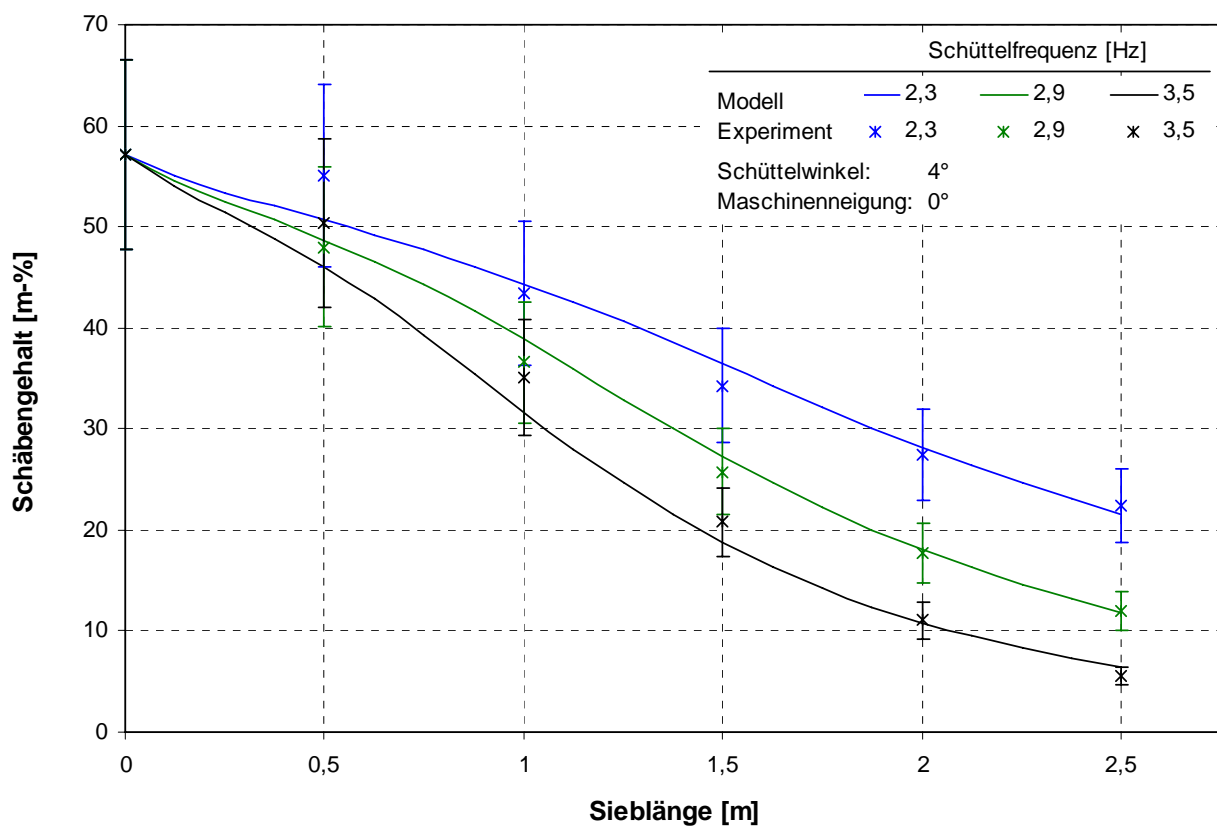


Abb. 8.2: Modellierter Schäbengehalt in einer Kammschüttel in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz (Versuch H 1, Materialkategorie B leicht geröstet)

Aus der in Abbildung 8.3 dargestellten Modellierung wird ersichtlich, dass die Maschineneigung nur von geringem Einfluss auf den Schäbengehalt nach der Reinigung für eine Kammschüttel mit der Sieblänge 2,5 m ist. Hervorzuheben ist hier jedoch, dass der Massestrom mit größerer Neigung leicht sinkt (Kap. 6). Abbildung 8.4 zeigt, dass mit zunehmendem Schüttelwinkel der Restschäbengehalt nach der Passage des 2,5 m langen Schüttelkanals deutlich ansteigt. Da der Massestrom durch eine Kammschüttel mit dem Schüttelwinkel zunimmt (vgl. Kap. 6), sinkt die für die Schäben verfügbare Zeit, um die Faserflocken und den Siebboden zu passieren.

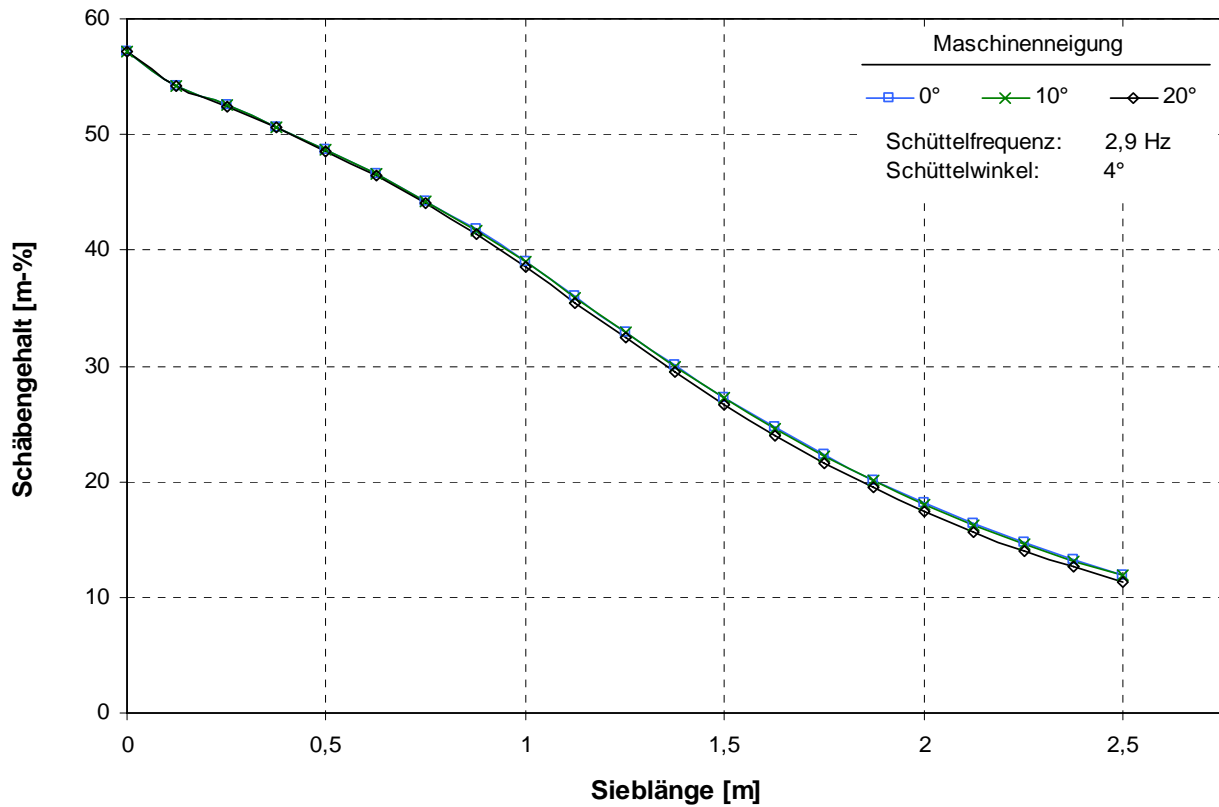


Abb. 8.3: Modellierter Schabengehalt in einer Kammschüttel in Abhängigkeit von der Maschineneigung

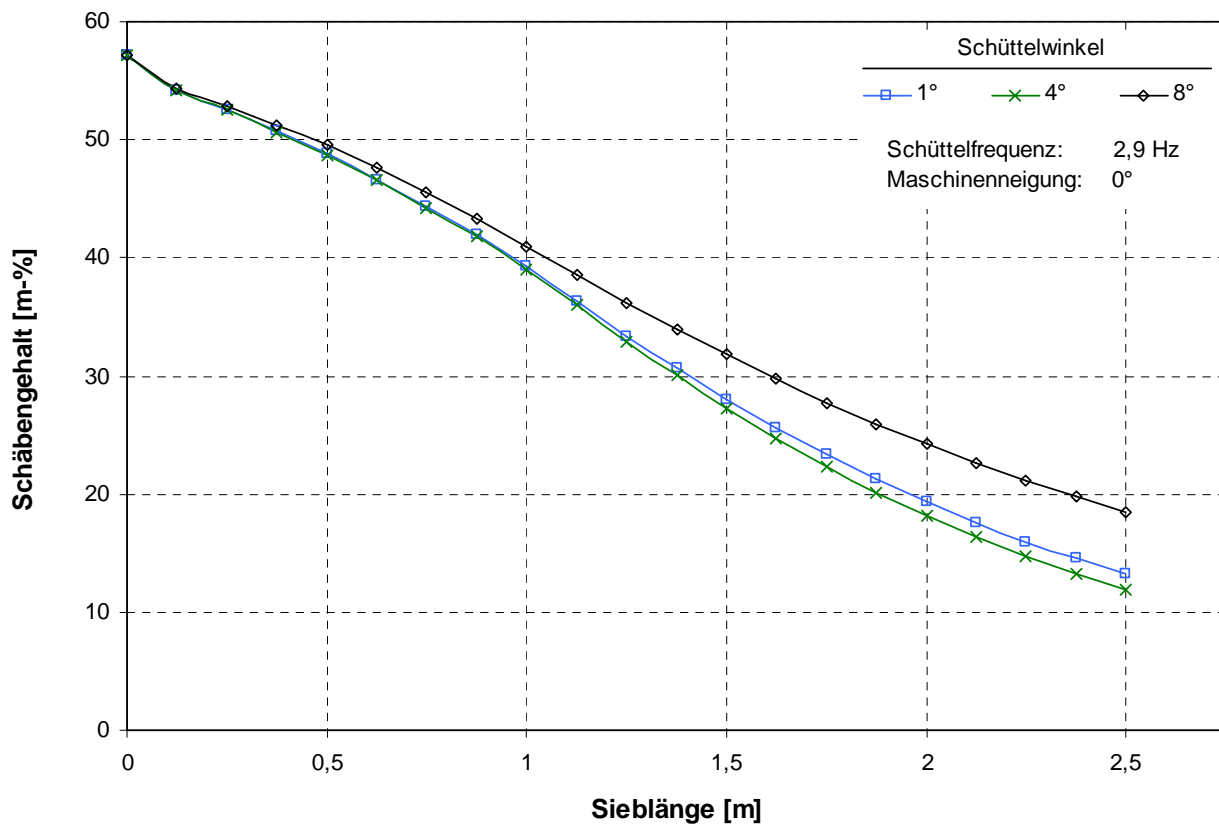


Abb. 8.4: Modellierter Schabengehalt in einer Kammschüttel in Abhängigkeit vom Schüttelwinkel

8.2 Einfluss der Sieblänge auf die Schäbenabscheidung

In der Praxis wird für eine Reinigungsstufe üblicherweise ein maximal zulässiger Restschäbengehalt bei einem bestimmten Massestrom eines Eingangsmaterials vorgegeben. Schlussfolgernd aus den Abbildungen 8.2 bis 8.4 ist daher die Schäbenabscheidung im Zusammenhang mit der Sieblänge von besonderem Interesse. Abbildung 8.5 stellt die modellierte Schäbenabscheidung den experimentell ermittelten Daten für eine Kammschüttel mit der Sieblänge 5 m gegenüber. Der modellierte Restschäbengehalt nach Passage des Siebes stimmt gut mit den experimentellen Ergebnissen überein, jedoch gibt es auch hier insbesondere bei niedrigeren Frequenzen im vorderen Siebabschnitt deutliche Abweichungen für die Menge der bereits abgeschiedenen Schäben. Dies ist zunächst auf Störungen durch die Materialaufgabe zurückzuführen. Darüber hinaus wurden weitere Fehler dadurch verursacht, dass für die experimentellen Untersuchungen die Sieblänge konstruktiv auf 2,5 m bei der Versuchsmaschine begrenzt war. Daher musste das Material nach dem Durchlauf aufgefangen und ein zweites Mal aufgegeben werden. Dennoch gibt Abb. 8.5 den Einfluss der Sieblänge auf den Restschäbengehalt praxisrelevant gut wieder.

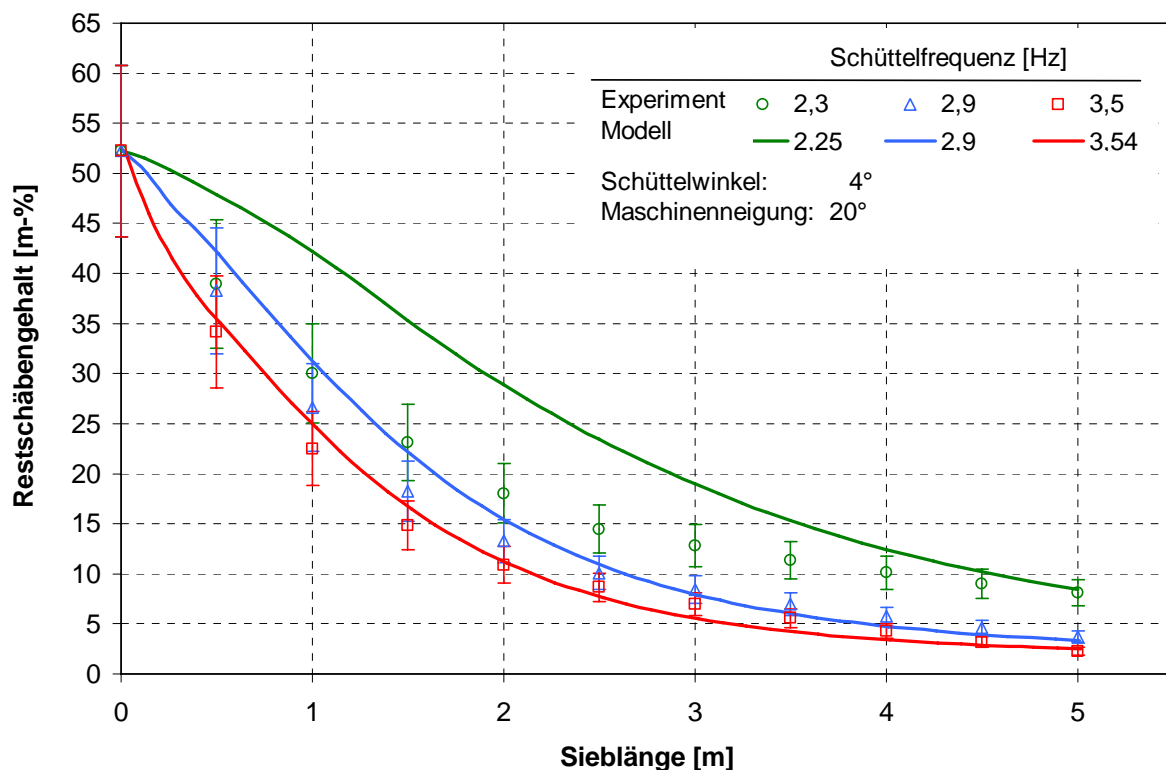


Abb. 8.5: *Modellierte und experimentell ermittelte Abnahme des Schäbengehalts in einer Kammschüttel mit einer Sieblänge von 5 m in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz (Versuch H 2, Materialkategorie B leicht geröstet)*

8.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dem Kammschüttel-Gesamtmodell stimmen für die durch das Modell abgebildeten Parametervariationen weitgehend mit den Versuchsergebnissen überein (vgl. Tabelle 5.3). In Tabelle 8.1 sind die mittels Modellierung ermittelten Einflüsse auf Massestrom und Restschäbengehalt zusammengestellt. Lediglich der Einfluss der Verlängerung des Pleuels – wodurch sich der Schüttelwinkels ϕ_0 erhöht - wird durch die Simulation deutlicher bewertet. In den Experimenten konnte nicht durchgehend für größere Schüttelwinkel ein erhöhter Restschäbengehalt ermittelt werden. Die Analyse der Transportzusammenhänge im Schüttelkanal zeigte jedoch, dass durch einen größeren Schüttelwinkel die Wurfweite der Flocken in Gutstromrichtung zunimmt und dadurch die Verweilzeit auf dem Sieb sinkt. Unter Ausschluss von Störeinflüssen liegt daher der Schluss nahe, dass hiermit – wie durch die Simulation prognostiziert – der Restschäbengehalt in den gereinigten Fasern zunimmt.

Tabelle 8.1: Grundzusammenhänge zwischen Maschineneinstellungen, Massestrom und Reinigungsleistung

Einfluss auf Parameter	Massestrom	Restschäbengehalt
Erhöhen des Schüttelwinkels ϕ_0	>>	>
Erhöhen der Schüttelfrequenz f	>	<<
Erhöhen des Neigungswinkels γ des Schüttelkanals	<	<
Verlängern des Siebkanals L_s	-	<<

- geringer oder kein Einfluss

< verkleinert << stark verkleinert

> vergrößert >> stark vergrößert

9 Einsatz des Kammschüttel-Gesamtmodells im Konstruktions- und Entwicklungsprozess

9.1 Konstruktionstechnische Überarbeitung der Kammschüttel

Das Kammschüttel-Gesamtmodell wurde als Werkzeug für die konstruktionstechnische Überarbeitung dieses Reinigungssystems entwickelt. Durch seinen Einsatz lassen sich auf der Grundlage von wenigen Tastversuchen die Auswirkungen der für die Reinigungsleistung wesentlichen Parameter Schüttelfrequenz und Amplitude sowie Maschinenneigung und Sieblänge simulieren. Durch diese den Konstruktionsprozess begleitenden Simulationsrechnungen können nicht nur die Entwicklungszeiten für neue Maschinen verkürzt, sondern auch die Entwicklungskosten reduziert werden.

Für den wirtschaftlichen Betrieb einer Kammschüttel in Kombination mit den anderen Komponenten einer Faseraufschlussanlage muss jede Kammschüttel für den im jeweiligen Anwendungsfall zu verarbeitenden Rohstoff unter Beachtung der erheblichen natürlichen Schwankungen der Struktur und der Zusammensetzung der Naturprodukte Fasern und Schäben, die von der Kammschüttel als Gemisch zu verarbeiten sind, ausgelegt werden. Im Entwicklungsprozess der Maschine müssen durch den Konstrukteur zentrale Maschinen- und Betriebsparameter sowie geeignete Stellbereiche festgelegt werden. Das entwickelte Kammschüttel-Gesamtmodell ermöglicht hierfür Simulationsrechnungen, die den Konstrukteur frühzeitig bei der Beurteilung der Auswirkungen der durch ihn gewählten Maschinen- und Betriebsparameter auf den Durchsatz und die Reinigungsleistung der Maschine unterstützen.

Für die Überarbeitung einer nach dem Prinzip einer überschlägigen Schüttel arbeitenden Kammschüttel (Abb. 4.16 und 5.6) müssen die Arbeitsschritte des Planens und Konstruierens einer Maschine, wie sie z.B. in den VDI-Richtlinien [VDI 2221 und VDI 2222] aufgeführt sind, nur noch teilweise abgearbeitet werden. Das Maschinenkonzept mit seiner Funktions-, Wirk-, Bau- und Systemstruktur hat sich bewährt und wird beibehalten. Aus der Praxis bekannte Schwachstellen sollen beseitigt und die Maschine gemäß den höheren Anforderungen insbesondere bzgl. Durchsatz und Reinigungsergebnis, wie sie sich in der modernen Kurzfaserverproduktion stellen, angepasst werden (vgl. Tab. 4.5).

9.2 Auslegung einer anforderungsgerechten Kammschüttel

Im Folgenden soll eine Kammschüttel für ein durchschnittliches prallaufgeschlossenes Faser-Schäben-Gemisch ausgelegt werden. Hierfür wird von den in Tabelle 7.2 aufgeführten

Stoffeigenschaften, wie sie für mit der ATB-Hammermühle prallaufgeschlossenes, leicht geröstetes Hanfstroh gelten, ausgegangen (Materialkategorie B¹).

Die Schwerpunkte der durchzuführenden Konstruktionsarbeiten liegen in der Überarbeitung der Gestaltung der Maschine, für die die in [BEITZ et al. 1997] aufgeführten Gestaltungsrichtlinien der Konstruktionslehre und die Kriterien der im Kapitel 4 erarbeiteten Anforderungen einen guten Leitfaden darstellen. Wie aus der in Tabelle 9.1 aufgelisteten erweiterten Anforderungsliste hervorgeht, erfüllt bereits die Versuchsmaschine weitgehend die gestellten Anforderungen. Zahlreiche Modifikationen konnten bereits während des Versuchsbetriebes getestet werden. Für die Umsetzung der in Tabelle 9.1 mit ★ gekennzeichneten Modifikationen in einer Kammschüttel für den industriellen Einsatz bedarf es nur noch einer konstruktionstechnischen Optimierung vorrangig unter den Gesichtspunkten der fertigungs-, montage-, instandhaltungs-, wartungs- und risikogerechten Ausführung. Bei den mit ➤ gekennzeichneten Modifikationen handelt es sich um notwendige Änderungen, die zur Erfüllung der Anforderungen für den Industrieinsatz noch ergänzt bzw. deren Parameter durch die im folgenden durchgeführten Simulationsrechnungen noch festgelegt werden müssen.

9.3 Bestimmung der Material- und Betriebsparameter für die Simulation

Für den Praxiseinsatz des Kammschüttel-Gesamtmodells müssen für jeden zu verarbeitenden Rohstoff folgende Materialparameter bekannt sein:

- die Faser-, Schäben- und Flockendichte sowie die Faserdicke,
- die Gewichtsanteile von Fasern und Schäben und
- die Partikelgrößenverteilung der Schäben (in 6 Grundklassen unterteilt).

Darüber hinaus müssen in mehreren Tastversuchen die materialspezifischen Korrekturfaktoren ermittelt werden. Für das hier untersuchte prallaufgeschlossene Faser-Schäben-Gemisch sind diese Werte bereits bekannt und wurden in Tabelle 7.2 zusammengefasst. Für Faser-Schäben-Gemische, welche sich beispielsweise aufgrund eines erheblich anderen Röstgrades oder einer anderen Aufschlusstechnologie deutlich von dem hier betrachteten Gemisch unterscheiden, lassen sich die erforderlichen Korrekturfaktoren durch folgende Tests ermitteln:

- Reinigungstest bei 3 verschiedenen Schüttelfrequenzen auf der Versuchschüttel und
- Analyse der Partikelgrößenverteilung der in den fünf Schäbensammelkästen S1 bis S5 aufgefangenen Schäben (siehe Abb. 5.8).

¹ Für dieses Material ist die Datenbasis am besten gesichert. Es kann davon ausgegangen werden, das Material höherer Güte (Materialkategorie A) bei der Reinigung mit dem hier entwickelten Prototypen noch bessere Ergebnisse liefert.

Merkmal	Ausprägung	Forderung / Wunsch	Erfüllung durch Versuchsmaschine	Modifikation
Ökonomie	Preis	F W	++ ++	★ vereinfachte Siebeinbauten ohne Verstellmöglichkeit
	Verfügbarkeit	F W	+ +	★ vereinfachte Siebeinbauten ★ Masseausgleich am Antrieb ➤ materialflussgerechte Formgebung zur Vermeidung von Ablagerungen
Geometrie	3) kompakt 3a) Länge x Breite x Höhe: max. 5500 x 2500 x 4000 mm	W W	+ +	★ geeigneter Schüttelkanal
Energie	4) 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch 4a) > 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch	F W	+ 0	➤ Arbeitsbreite 2 m ★ Transporthilfen auf Sieb ★ eindeutiger, rein mechanischer Materialtransport
	Leistung	F W	++ ++	★ Masseausgleich am Antrieb
Stoffe	6) entholzter Hanf aus geröstetem und unge-röstetem Hanfstroh mit vollständig von Fasern abgelösten Schäben	F	++	★ einfach austauschbare Siebeinbauten
	7) mittlere Faserlänge bis 20 cm	F	++	★ Länge der Schüttelzinken > 250 mm
	8) Material in Wirrlage 9) an Materialeigenschaften leicht anzupassen	F F F	++ ++ +	

Table 9.1: Anforderungsliste an eine Kammschüttel unter Berücksichtigung der Praxiserfahrungen mit der Versuchsmaschine

Bewertung: (-) unbefriedigende Lösung, Forderung nicht erfüllt (0) Lösung gerade tragbar
 (+) gute Lösung (++) sehr gute Lösung

Modifikation: (★) schon als Prototyp an der Versuchsmaschine erprobt
 (➤) noch grundlegend umzusetzende Modifikation

Merkmal		Ausprägung	Forderung / Wunsch	Erfüllung durch Versuchsmaschine	Modifikation
Stoffe	Ausgang	10) Schäbenanteil < 7 Masse-% 10a) Schäbenanteil < 5 Masse-% 11) keine Nissen im Faserstrom 12) geringe mechanische Belastung der Fasern 13) gute Auflockerung des Faserstromes zur Entstaubung	F W F F W	0 0 ++ ++ ++	➤ verlängerter Siebkanal ★ optimierte Schüttelfrequenz ★ optimierte Maschinenneigung ★ Zinkenleisten zur Unterstützung von Stofftransport und Flockenauflösung
	Faserstrom	14) Faseranteil im Schäbenstrom < 10 % 14a) Faseranteil im Schäbenstrom < 5 %	F W	++ ++	★ geeignete Siebform, Zinkenleisten und Schüttelfrequenz
Betrieb	Betriebssicherheit	15) Wicklungen an rotierenden Teilen gut zu entfernen 15a) keine Wicklungen an rotierenden Teilen 16) Einhaltung gültiger Arbeits-, Sicherheits- und Umweltvorschriften	F W F	++ ++ +	➤ Kapselung des Antriebs gegen Staub ➤ Staubabsaugung aus dem Schüttelkanal sowie an Übergabestellen
	Wartungsarbeiten	17) ≤ 1 x täglich 18) geringe Anzahl bzw. preiswerte Verschleißteile 19) einfacher Austausch von Verschleißteilen 19a) mit wenig Verschleiß behaftet bzw. keine Funktionsminderung durch Verschleiß	F F F W	++ ++ ++ ++	➤ materialflussgerechte Formgebung zur Vermeidung von Ablagerungen ★ einfach austauschbare Siebeinbauten
	Reinigung	20) ≤ 1 x täglich	F	++	➤ materialflussgerechte Formgebung zur Vermeidung von Ablagerungen

Table 9.1: Anforderungsliste an eine Kammschüttel unter Berücksichtigung der Praxiserfahrungen mit der Versuchsmaschine (Fortsetzung)

9.3.1 Simulationsergebnisse

Entsprechend der Vorgaben der Anforderungsliste mussten mit den Simulationsrechnungen geeignete Zusammenstellungen von Schüttelwinkel, -frequenz und Sieblänge ermittelt werden, bei denen der geforderte Massestrom von mehr als 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch verarbeitet werden kann und gleichzeitig ein Restschäbengehalt von weniger als 5 Masse-% bei einem Faserfehlaustrag von weniger als 5 % (bezogen auf den gesamten Faseranteil im Gemisch) erreicht wird. Die Rechnungen wurden für eine Maschinenneigung von 20° durchgeführt, da hierdurch die Übergabestellen für Materialzu- und -abfuhr besonders günstig gestaltet werden können und gleichzeitig die Stellfläche der Maschine reduziert wird. Abbildung 9.1 gibt die Ergebnisse der Simulation wieder.

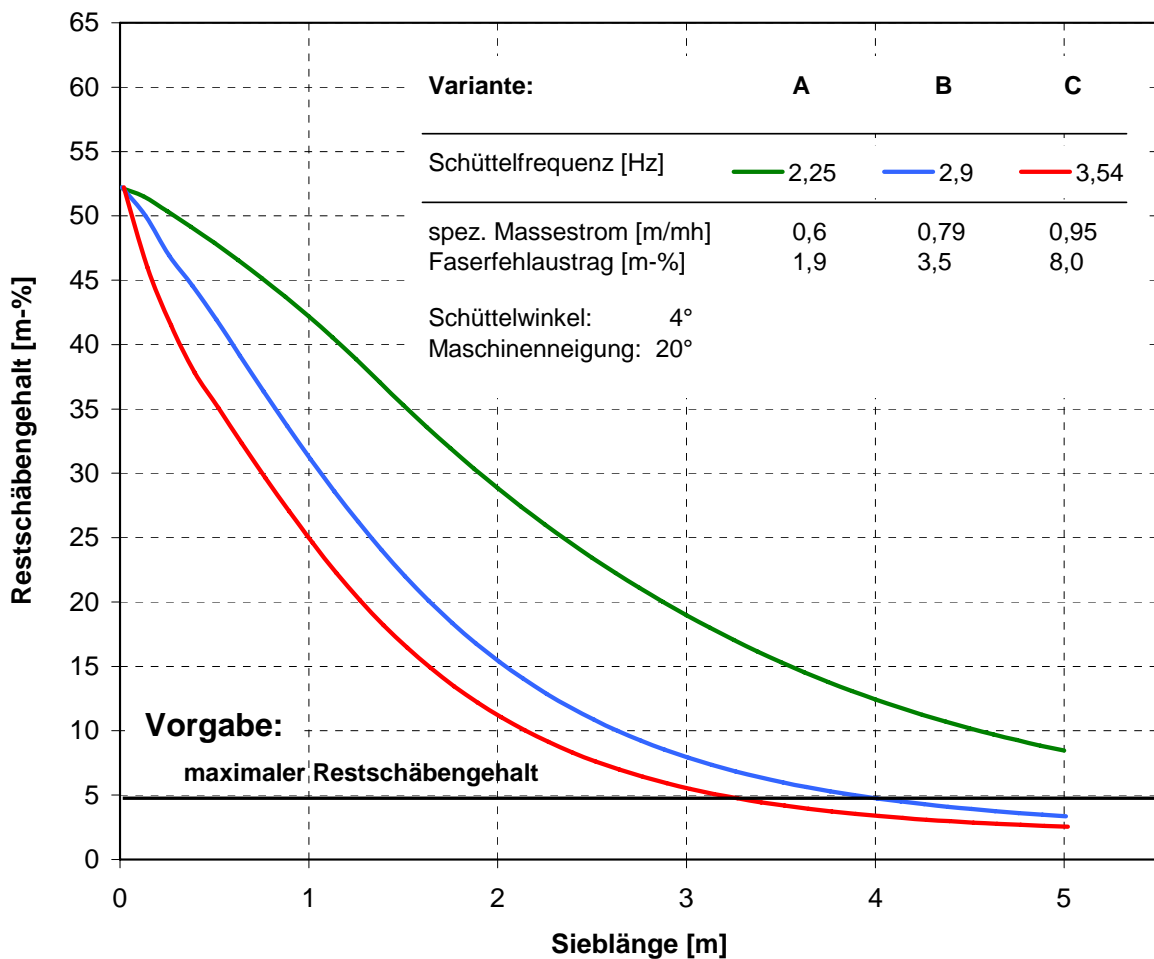


Abb. 9.1: Simulation der Abnahme des Restschäbengehaltes mit der Sieblänge in Abhängigkeit von der Schüttelfrequenz

Der Wunsch bezüglich eines Restschäbengehaltes kleiner 5 Masse-% wird nur von den Varianten B und C für ein System mit maximal 5 m Länge erfüllt. Variante C überschreitet

jedoch den zulässigen Faserfehlaustrag um ca. 3 Masse-%¹ deutlich. Folglich wird Variante B für die konstruktive Ausführung gewählt.

9.3.2 Weitere Konstruktionsvorgaben

Für viele der in Tabelle 9.1 aufgelisteten Modifikationen kann nicht auf die Simulationsrechnungen zurückgegriffen werden, da z.B. der Masseausgleich am Antrieb oder der Einbau von Zinkenleisten auf der Sieboberfläche nicht vom Modell erfasst werden. Dennoch stehen für diese Modifikationen eine Vielzahl von Praxiserfahrungen mit der Versuchsmaschine zur Verfügung. So konnten bereits ergänzend zu den hier vorgestellten Untersuchungen zahlreiche Modifikationen auf ihre Eignung erprobt werden. Beispielsweise konnten durch den im Kapitel 5 vorgestellten Masseausgleich am Antrieb nicht nur der Antriebsenergiebedarf um ca. 30 % gesenkt, sondern auch die Belastungen im Antriebsstrang reduziert werden. Der bauliche Aufwand für einen solchen Masseausgleich auf Basis eines Federspeichers kann als gering eingestuft werden. Daher sollte eine Kammschüttel grundsätzlich über einen solchen Ausgleich verfügen.

Aus Kostengründen wird für die hier vorgestellte Konstruktion auf einen kontinuierlich verstellbaren Siebboden verzichtet. Das Sieb muss lediglich so gestaltet sein, dass es:

- im Bedarfsfall leicht auswechselbar ist (z.B. gegen handelsübliche Siebbleche verschiedenster Lochung),
- die Sieböffnungen nur so groß sind, dass Schäben und nur sehr kurze Fasern diese passieren können bzw. der maximal zulässige Faserfehlaustrag nicht überschritten wird und
- das Sieb aufgrund seiner Form den Materialtransport nicht behindert.

Als geeignet haben sich in den in Kapitel 5 dargestellten Versuchen insbesondere Bleche mit Rundlochung und Siebroste erwiesen.

Der Materialtransport soll – den Konstruktionsprinzipien der Eindeutigkeit und Funktionstrennung folgend – rein mechanisch erfolgen. Es gibt Kammschüttelbauarten, bei denen der Transport nicht nur über die Schüttelzinken erfolgt sondern gleichzeitig über den Luftstrom zur Staubabsaugung realisiert wird. Hierdurch werden einerseits erhöhte Kosten für die Abluftreinigung verursacht und andererseits wirken sich Schwankungen in der Rohstoffqualität negativ auf die Regelung des Massestroms aus.

Die als Transporthilfen erprobten Zinkenleisten (Abb. 5.21) haben gezeigt, dass hierdurch nicht nur der Materialtransport in Gutstromrichtung verstetigt wird, sondern dass darüber hinaus gleichzeitig eine sehr gute Auflockerung der Faserflocken erfolgt. Daher sollen auch Zinkenleisten in der Konstruktion eingesetzt werden.

¹ Im Tastversuch experimentell ermittelt.

Die maximale Maschinenbreite ist nach Anforderungsliste auf 2,5 m begrenzt. Aufgrund des einzuplanenden Platzbedarfs von Maschinenrahmen und Antrieb wird für die Auslegung des Schüttelkanals eine mit anderen handelsüblichen Maschinen der Faserindustrie kompatible Arbeitsbreite von 2 Metern gewählt.

9.4 Umsetzung der Konstruktionsvorgaben in einem Prototypen

Auf der Basis der erarbeiteten Konstruktionsvorgaben wurde die Versuchsschüttel zu einer Reinigungsmaschine für den Einsatz in der industriellen Kurzfasergewinnung weiterentwickelt (Abb. 9.2). Diese Kammschüttel wurde für die Verarbeitung von prallaufgeschlossenem Hanfstroh konzipiert und wird durch folgende Eckdaten charakterisiert:

Hauptabmaße (Länge x Breite x Höhe):	5,3 x 2,3 x 3,4 m
Antriebsleistung:	3 kW
Massestrom:	ca. 1,6 t/h
Siebabmaße (Länge x Breite):	5 x 2 m
Schüttelfrequenz/-winkel:	2,9 Hz / 4°
Neigung:	20°
Übergabehöhe (Zufuhr/Abfuhr):	2,3 / 2,2 m

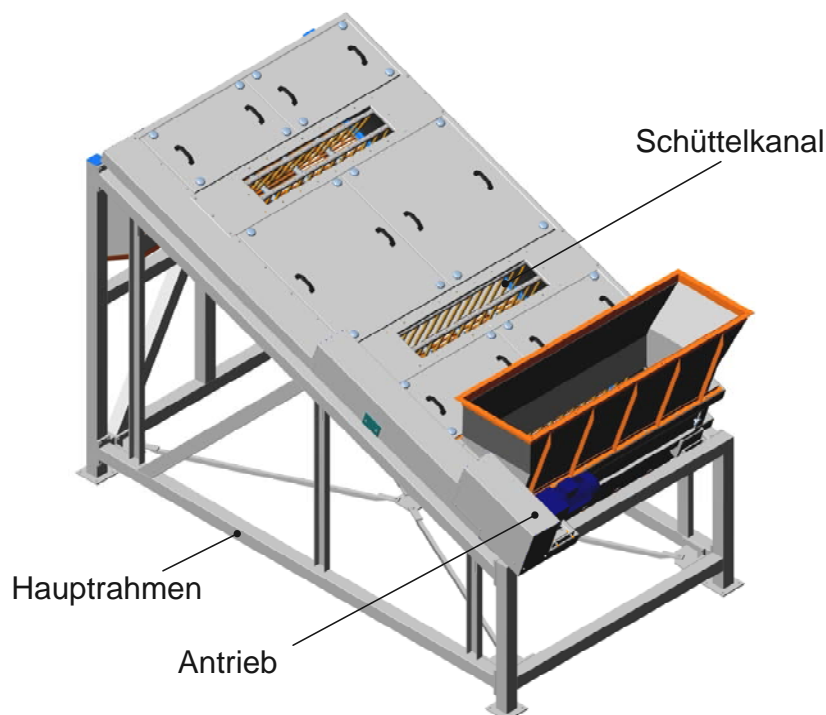
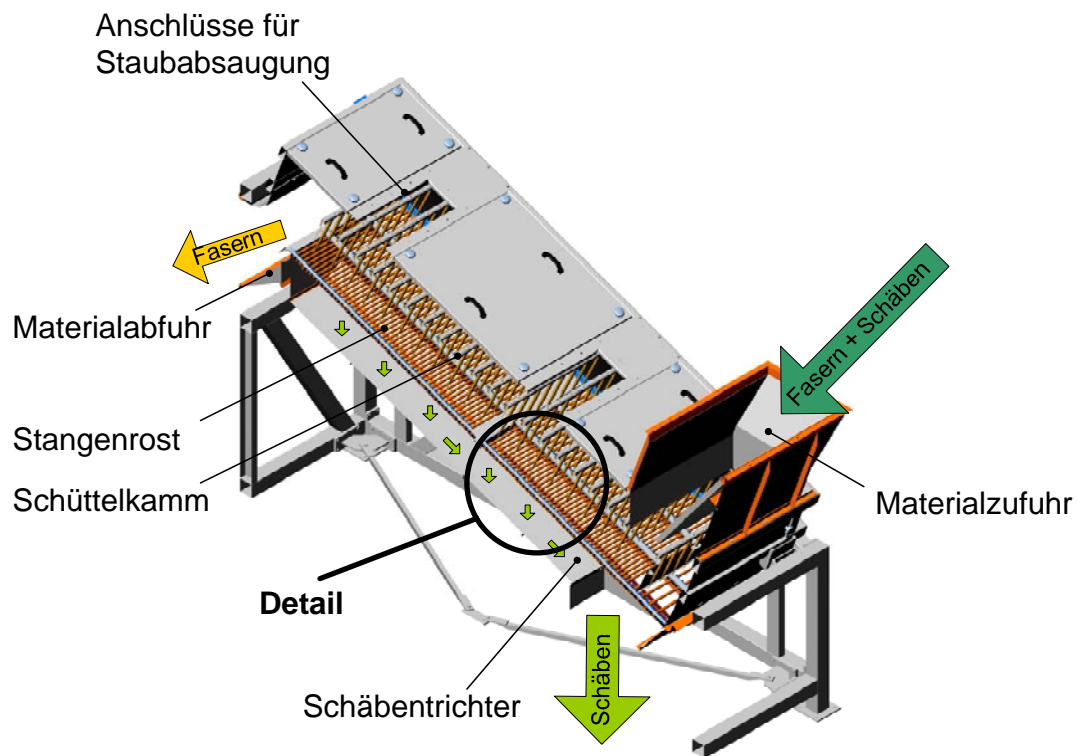


Abb. 9.2: Kammschüttel für die Reinigung von prallaufgeschlossenem Hanfstroh



Detail:

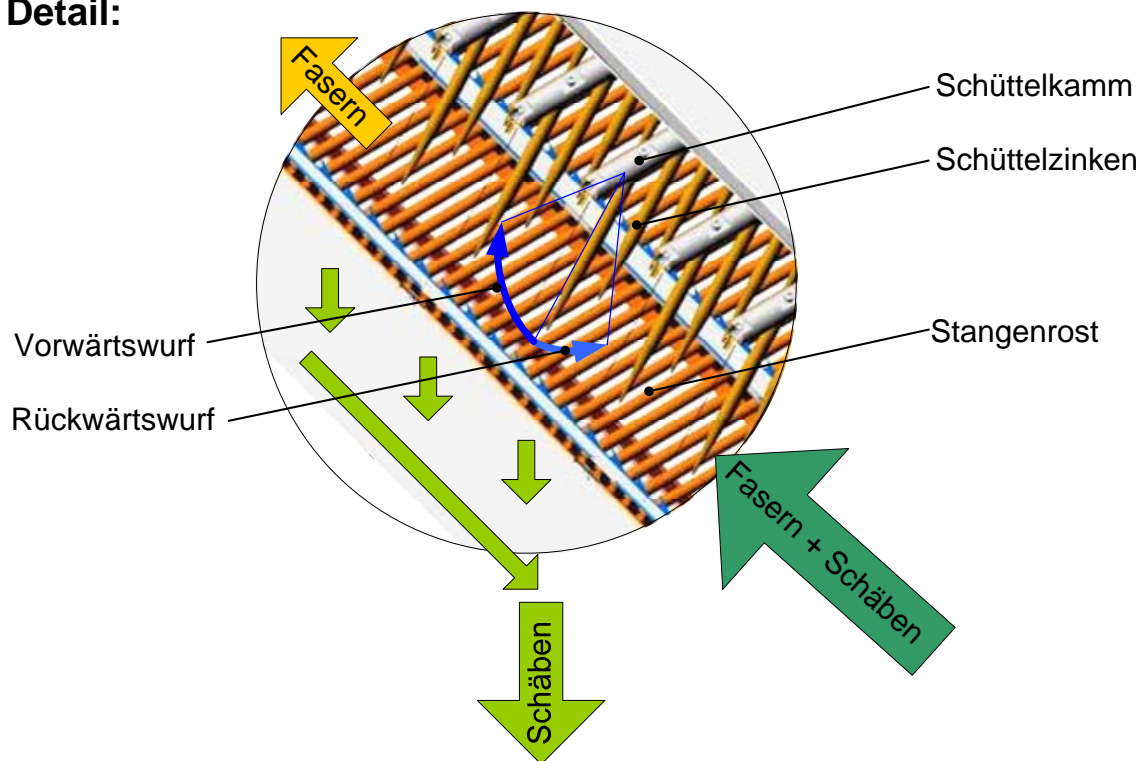


Abb. 9.3: Kammschüttel (Schnittansicht und Detail)

In Abbildung 9.3 ist der Aufbau der Kammschüttel im Schnitt dargestellt. Der Detailausschnitt zeigt noch einmal das Funktionsprinzip der Maschine, bei dem durch die Schüttelbewegung der Zinken die Schäben aus den Faserflocken ausgeschüttelt werden, so dass diese den Rost passieren und nur die gereinigten Fasern oberhalb des Rostes weiter transportiert werden. Abbildung 9.4 zeigt den gemäß den Darstellungen in Kapitel 5.7 optimierten Antrieb der Kammschüttel mit einem Masseausgleich mittels Federspeicher. Der Federspeicher besteht im Wesentlichen aus zwei gegen seitliches Ausknicken stabilisierten Federn, die auf der Koppel montiert sind und über einen mittleren Lagerbock am Rahmen befestigt sind. Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist der bauliche Aufwand im Verhältnis zum technischen Nutzen der Reduzierung von Maschinenbelastung und Leistungsaufnahme gering.

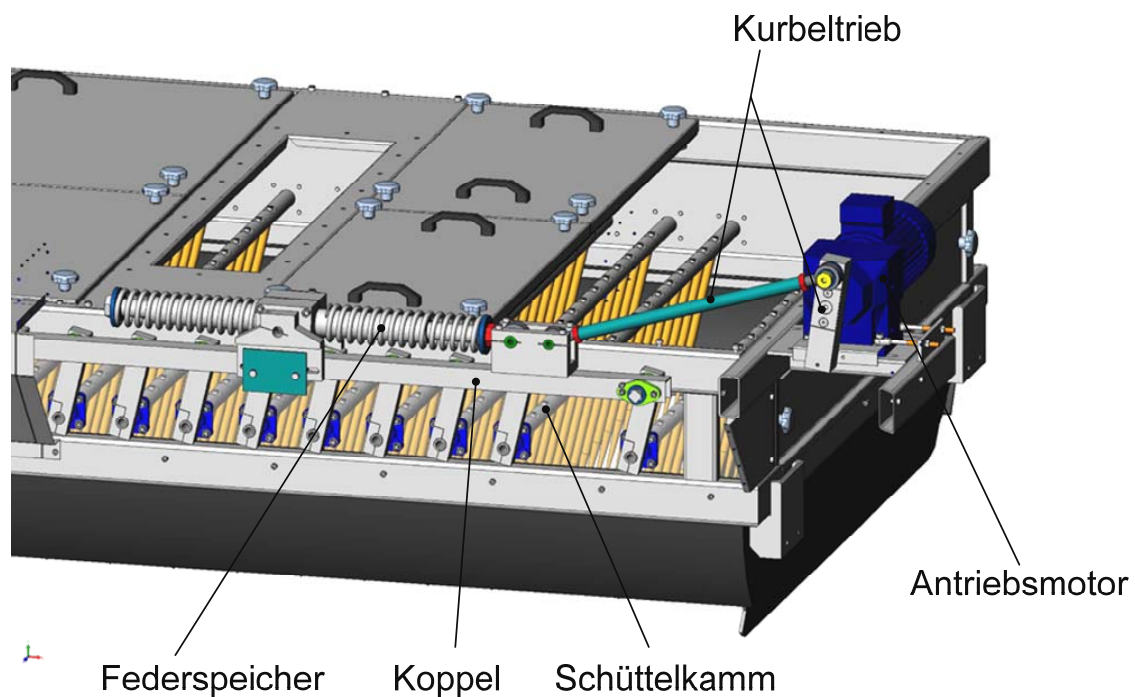


Abb. 9.4: Kammschüttelantrieb mit Federspeicher zum Masseausgleich

Abbildung 9.5 zeigt den als Sieb gewählten Stangenrost mit den auf diesen Rost montierten Zinkenleisten. Die Zinkenleisten verstetigen den Materialtransport in Gutstromrichtung und tragen erheblich zur Flockenauflösung bei. Da die Faserflocken auf dem Stangenrost nur eine sehr geringe Auflagefläche haben, ist sein Reibwiderstand gering und die Faserflocken können störungsfrei über den Rost gleiten. Die Roststangen werden über eine Klemmleiste im Rosteinschub gehalten (Abb. 9.6). Der komplette Rost kann ähnlich einer Schublade auf der am Hauptrahmen befestigten Gleitschiene herausgezogen und wenn nötig mit anderen

Siebeinbauten bestückt werden. Eine Abdeckung über dem Einschubmechanismus verhindert Materialablagerungen im Schüttelkanal. Durch die in Richtung Rost konisch zulaufenden Zinken wird auch hier das Verhaken von Fasern effizient unterbunden. Die Zinkenform hat sich bereits bei der Versuchsmaschine bewährt.

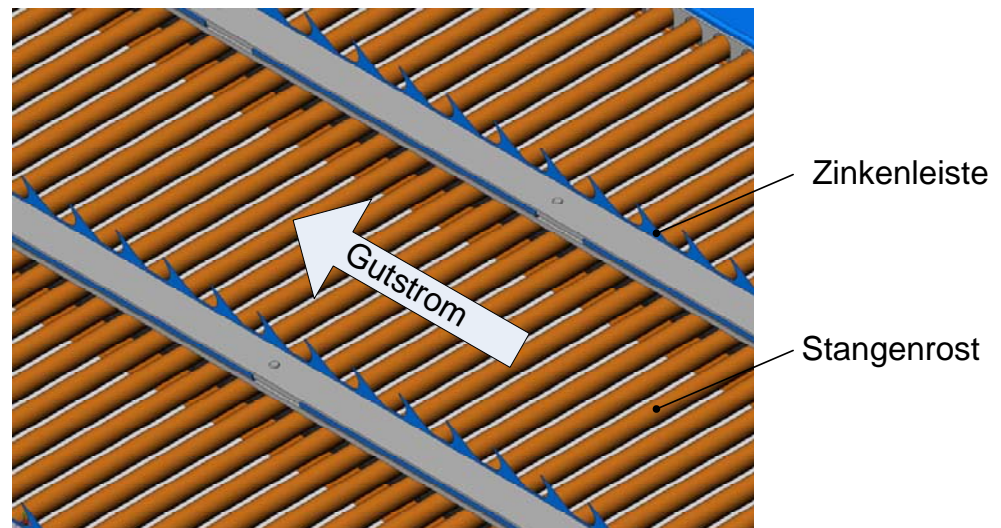


Abb. 9.5: Siebrost mit Zinkenleisten für die verbesserte Flockenauflösung in der Kammschüttel

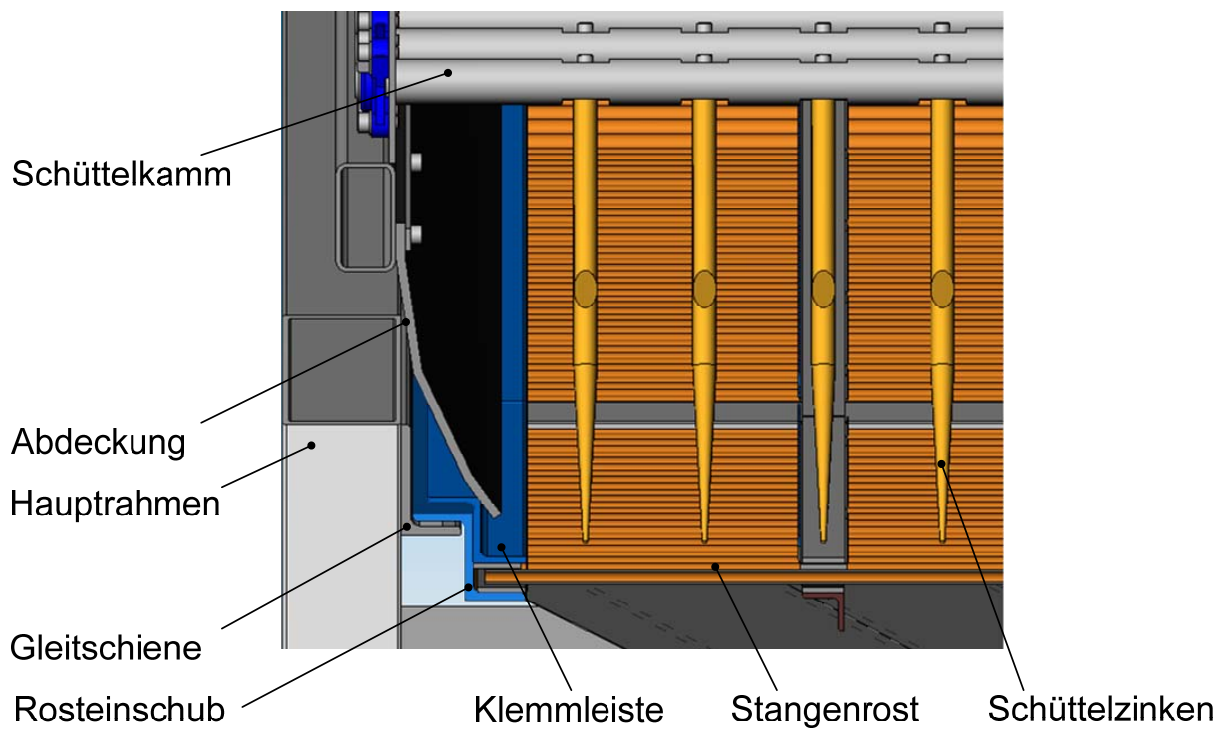


Abb. 9.6: Materialflussgerechte Gestaltung der Einbauten im Schüttelkanal

Merkmal		Ausprägung	Forderung/Wunsch	Prototyp
Ökonomie	Preis	1) < 75.000 EUR 1a) < 50.000 EUR	F W	++ ++
	Verfügbarkeit	2) 90% 2a) > 90%	F W	++ ++
Geometrie		3) kompakt	W	++
		3a) Länge x Breite x Höhe: max. 5500 x 2500 x 4000 mm	W	++
Energie	Massendurchsatz	4) 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch 4a) > 1,5 t/h Faser-Schäben-Gemisch	F W	++ +
	Leistung	5) < 25 kW 5a) < 15 kW	F W	++ ++
Stoffe	Eingang	6) entholzter Hanf aus geröstetem und ungeröstetem Hanfstroh mit vollständig von Fasern abgelösten Schäben 7) mittlere Faserlänge bis 20 cm 8) Material in Wirrlage 9) an Materialeigenschaften leicht anzupassen	F	++
	Ausgang	Faserstrom	F	++
Betrieb	Betriebssicherheit	10a) Schäbenanteil < 7 Masse-% 11) keine Nissen im Faserstrom	W	++
		12) geringe mechanische Belastung der Fasern 13) gute Auflockerung des Faserstromes zur Entstaubung	F	++
	Schäbenstrom	14) Faseranteil im Schäbenstrom < 10 % 14a) Faseranteil im Schäbenstrom < 5 %	F W	++ ++
		15) Wicklungen an rotierenden Teilen gut zu entfernen 15a) keine Wicklungen an rotierenden Teilen	F W	++ ++
	Wartungsarbeiten	16) Einhaltung gültiger Arbeits-, Sicherheits- und Umweltvorschriften	F	+
		17) ≤ 1 x täglich	F	++
		18) geringe Anzahl bzw. preiswerte Verschleißteile 19) einfacher Austausch von Verschleißteilen	F F	++ ++
		19a) mit wenig Verschleiß behaftet bzw. keine Funktionsminderung durch Verschleiß	F	++
	Reinigung	20) ≤ 1 x täglich	F	++

Tabella 9.2: Erwartete Erfüllung der Anforderungsliste durch den entwickelten Prototypen einer Kammschüttel
(Wertung wie Tab. 9.1: + gut, ++ sehr gut)

Wie aus Tabelle. 9.2 hervorgeht, kann von dem entwickelten Prototypen einer Kammschüttel für den Praxiseinsatz erwartet werden, dass er alle Forderungen der aufgestellten Anforderungsliste sehr gut erfüllt. Wunsch 4a bezüglich eines geforderten Massestroms von mehr als 1,5 t/h wird mit prognostizierten 1,6 t/h verarbeitetes Faser-Schäben-Gemisch aufgrund der aus Kompatibilitätsgründen mit anderen Anlagenkomponenten gewählten Arbeitsbreite vom 2 m nur gut erfüllt. Wird eine größere Reserve für den verarbeitbaren Massestrom benötigt, kann die Arbeitsbreite des Prototyps jedoch ohne Änderungen des Maschinenkonzeptes auf bis zu 2,5 m erhöht werden. Damit könnte ein Massestrom von ca. 2 t/h verarbeitet werden. Für noch größere Arbeitsbreiten von bis zu 5 m respektive einem Massestrom von 4 t/h sind Änderungen am Antriebs- und Lagerungskonzept der Schüttelkämme erforderlich. Ob derartige Arbeitsbreiten jedoch sinnvoll sind, hängt wesentlich von der Gestaltung der anderen Anlagenkomponenten ab. Aus Gründen der Verfügbarkeit erscheint in diesem Leistungssegment eine Anlagenausführung auf Basis zweier parallel angeordneter Verarbeitungslinien ggf. betriebswirtschaftlich sinnvoller. Forderung 9 nach einer leichten Anpassbarkeit der Reinigungsmaschine an verschiedene Faser-Schäben-Gemische wird aus Kostengründen nur gut erfüllt. Für andere Gemische kann es erforderlich sein, das Sieb auszutauschen, da auf einen verstellbaren Rost verzichtet wurde. Ein Austausch ist aufgrund der gewählten Konstruktion mit vertretbarem Aufwand möglich.

9.5 Fazit

Die gezeigten Simulationsrechnungen umfassen bei weitem nicht alle veränderlichen Maschinen- und Betriebsparameter. Jedoch konnte auf der Grundlage der Variation praxisrelevanter Parameter das bestehende Maschinenkonzept einer Kammschüttel weiterentwickelt werden. Mit Hilfe der Simulationsrechnungen konnten in wenigen Schritten geeignete Konstruktionsvorgaben für die Hauptabmessungen des Schüttelkanals (Länge 5m, Breite 2 m, Neigung 20°) und weitere zentrale Betriebsparameter (Schüttelwinkel 4°, Schüttelfrequenz 2,9 Hz) gefunden werden. Mit der hier im Ergebnis vorgestellten Konstruktion steht für die Reinigung von prallaufgeschlossenen Hanffaser-Schäben-Gemischen eine optimierte Reinigungsmaschine zur Verfügung, die alle auf der Grundlage der Praxiserfahrungen erarbeiteten Anforderungen erfüllt.

10 Fehlerquellen

Die die mathematische Modellierung von komplexen physikalischen Zusammenhängen auf der Grundlage gemessener technischer Größen ist grundsätzlich mit Fehlern behaftet. Auch die numerischen Berechnungen führen aufgrund der eingesetzten Näherungsverfahren zu Fehlern. In diesem Kapitel sollen daher zur qualitativen Bewertung der Fehler der durchgeführten Simulationsrechnungen die möglichen Fehlerquellen aufgezeigt werden. Eine Fehlerrechnung im eigentlichen Sinne wird nicht durchgeführt, da insbesondere die mit den experimentellen Untersuchungen verbundenen Fehler nur schwer eingeschätzt werden können.

Bei den experimentellen Untersuchungen stellen die erheblichen Schwankungen der Rohstoffeigenschaften die wesentlichste Quelle für Messwertstreuungen dar. Selbst dort, wo die Eigenschaften z. B. mit den gebräuchlichen textiltechnischen Messverfahren bestimmt wurden, sind die Messergebnisse aufgrund der naturgemäßen breiten Streuung der Eigenschaften der untersuchten Faser- und Schäbenproben, durch die Probennahme und durch die verwendeten Messprinzipien selbst mit erheblichen Fehlern behaftet. Die Untersuchungen erstreckten sich über mehrere Jahre. So kamen Faser-Schäben-Gemische verschiedener Hanfsorten und Anbaugebiete zum Einsatz, die unterschiedliche Röstgrade und Qualitäten aufwiesen. Die hiermit verbundenen Schwankungen in der Verarbeitbarkeit konnten nur grundlegend qualitativ durch die Einstufung in drei Qualitätsklassen (A-C) und durch entsprechende Korrekturfaktoren (K_{f1-3}) in der Modellierung berücksichtigt werden.

Auch durch die Versuchsdurchführung traten Messfehler auf. Im Zusammenhang mit den spezifischen Rohstoffeigenschaften zeigten die verarbeiteten Faser-Schäben-Gemische Unterschiede im Aufgabeverhalten an der Übergabestelle Förderband/Kammschüttel. Hierdurch konnte die Rohstoffe nicht immer gleichmäßig zugeführt und im Aufgabebereich der Kammschüttel verteilt werden. Die eingesetzten Zinkenleisten haben den Materialtransport erheblich verbessert, jedoch nicht vollständig gleichmäßig.

Die bekannten Konstruktionen der Kammschüttel wurden in den vergangenen 40 Jahren kaum weiterentwickelt. Das verfügbare Wissen ist vorrangig impliziter Natur, beruhend auf den Erfahrungen weniger Anlagenbetreiber und begrenzter Herstellerinformationen. Daher wurde die Konstruktion der Kammschüttel im Verlauf dieses Projektes begleitend zu den durchgeführten Experimenten permanent verändert und optimiert. Dies war mit systematischen Fehlern verbunden, wie sie zum Beispiel durch das veränderte Schwingungsverhalten des Maschinenrahmens durch Einsatz des in Kapitel 5 beschriebenen Schwingungsdämpfers verursacht wurden. Ferner wurden verschiedene Siebeinbauten grundlegend auf ihre Eignung erprobt. Veränderte Sieboberflächen beeinflussten nicht nur den Massestrom durch den Schüttelkanal sondern teilweise auch den Wurfprozess auf dem Sieb. Die Einflüsse der

Konstruktionsänderungen auf die Schäbenabscheidung konnte im Rahmen dieser Arbeit nur grundlegend qualitativ bewertet werden.

Bei den Messungen des Massestroms auf der Grundlage der Verweilzeiten des Siebgutes in der Kammschüttel traten ebenfalls größere Fehler auf. Da es sich um ein subjektives Messverfahren handelte, unterlag es zufälligen Fehlern, die von der Messperson abhingen. Für jede Messung wurden Einzelchargen von Faser-Schäben-Gemischen zwischen 3 und 12 kg verarbeitet. Die Massestrommessung beruhte darauf, dass die Messperson einschätzen musste, wann der Materialtransport im Schüttelkanal nach der Aufgabe beginnt und wann die letzte gereinigte Faserflocke den Schüttelkanal verlässt.

Auch die Analyse der Schäben- und Faserproben ist mit Fehlern behaftet, die nicht zuletzt von der Messperson abhängen. Da die Fasern eine Neigung zum Agglomerieren haben, hängt das Messergebnis wesentlich von der Probennahme ab. Die Rohstoffchargen neigten ferner zum Entmischen und Verfilzen durch Lagerung, Transport und Aufgabe auf das Zuführband. So lagen die Messfehler insbesondere bei der Schäbengehaltsbestimmung häufig im Bereich von +/- 20% des Messwertes.

Das Gebiet der Modellfehler ist sehr weit gesteckt. Die Anforderungen, die an die Modellierung gestellt werden sind allgemein gegenläufig. Zunächst soll das Modell die messbare Wirklichkeit gut wiedergeben. Andererseits soll es ebenso einfach zu verstehen und für die Praxis mit geringem Aufwand handhabbar sein. Durch die Wahl geeigneter Korrekturfaktoren konnte, wie in Kapitel 8 gezeigt, eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen erzielt werden. Für die Bestimmung der Korrekturfaktoren sind nur wenige Versuche an der Kammschüttel notwendig. Dafür kann auf die detaillierte Bestimmung des Einflusses spezieller Rohstoffeigenschaften wie Röstgrad, Faserfeinheitsverteilung, Entmischungsverhalten, Bindekräfte zwischen Fasern sowie zwischen Fasern und Schäben und den Einfluss des Siebbodens verzichtet werden.

Das entwickelte geometrisch-statistische Modell lässt sich noch weiter verbessern. Das Massestrommodell zeigt insbesondere im oberen Bereich der untersuchten Schüttelfrequenzen noch stärkere Abweichungen. Dies ließe sich durch eine weitergehende Analyse des Wurfverhaltens und Transportverhaltens der Faserflocken verbessern. Auch das Siebmodell lässt sich weiterentwickeln. Durch weiterführende Untersuchungen z.B. zur dreidimensionalen Netzwerkstruktur der Faserflocken und der Interaktion von Fasern und Schäben während des Siebvorganges können verbliebene Fehlerquellen und ggf. auch die Zahl der notwendigen Korrekturfaktoren reduziert werden.

11 Ausblick

Das in dieser Arbeit entwickelte neuartige Gesamtmodell für die Reinigung von Faser-Schäben-Gemischen in einer Kammschüttel auf Basis eines Massestrommodells für den Stofftransport durch den Schüttelkanal und eines geometrisch-statistischen Modells für das Trennen von Fasern und Schäben liefert Ergebnisse, die gut mit den Versuchdaten übereinstimmen. Dadurch werden für dieses Maschinensystem erstmals Simulationsrechnungen möglich, die die Anzahl der notwendigen Versuche für eine verbesserte Auslegung einer Kammschüttel erheblich reduzieren. Da bereits am Rechner generelle Tendenzen durch Parametervariation erkennbar sind, lassen sich vorab günstige Maschineneinstellungen ermitteln und gezielt in der Versuchsplanung berücksichtigen. Entwicklungszeiten für neue Maschinen können verkürzt und die Entwicklungskosten gesenkt werden.

Die Branche der Gewinnung von Hanffasern durch den Trockenaufschluss in sogenannten Kurzfasern für nicht-textile Anwendungen kann mit der Wiedertzulassung von Hanf in Deutschland im Jahr 1996 noch als eine sehr junge bezeichnet werden. Wesentliche bestehende Probleme haben ihre Ursache in einer ungenügend entwickelten Maschinenteknik für die mechanische Fasergewinnung. Die Faserreinigung stellt hierbei einen zentralen Prozessschritt dar. Leistungsfähige Weiterentwicklungen der Maschinenteknik auf Basis der hier dargestellten Untersuchungen können einen wichtigen Beitrag leisten, um die Maschinenlinien zuverlässiger und die Verarbeitung ökonomischer zu gestalten. Eine effiziente Fasergewinnung ist die Basis, damit Faseraufbereiter hochwertige Fasern und Schäben auch langfristig zu konkurrenzfähigen Preisen vermarkten können und gleichzeitig den Landwirten attraktive Strohpreise zahlen können. Nur wenn die technischen Weiterentwicklungen der vergangenen Jahre auch in die industrielle Praxis umgesetzt werden können, kann sich die Hanfindustrie zu einem verlässlichen Partner für Landwirtschaft und weiterverarbeitender Industrie entwickeln. Die Praxiserfahrungen der letzten 10 Jahre und die aktuellen Ergebnisse aus Faserforschung und Maschinenentwicklung stellen hierfür eine gute Basis dar.

Eine reproduzierbare hohe Qualität von Fasern und Schäben stellen einen entscheidenden Marktvorteil einheimischer Produkte aus Hanf dar. Verbesserungen der Fasermesstechnik sind Voraussetzung für ein verbessertes Qualitätsmanagement in der Fasergewinnung. Die Entwicklung von Online-Messverfahren für verschiedene Qualitätsparameter wie Röstgrad und Schäbengehalt stellen wichtige Bausteine für ein übergreifendes Qualitätsmanagement der Fasergewinnung aber auch für eine verbesserte Steuerung von einzelnen Prozessstufen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Rohstoffe und Zwischenprodukte dar. Solche verbesserten Messverfahren können gleichzeitig zur Verbesserung des hier vorgestellten Kammschüttel-Gesamtmodells beitragen, da sie die Basis für die detaillierte Berücksichtigung der Materialparameter darstellen. Für die Weiterentwicklung des Modells sind vor allem die prozessbegleitende Erfassung von Massestrom und Schäbengehalt der einzelnen Stoffströme gefragt.

12 Anhang

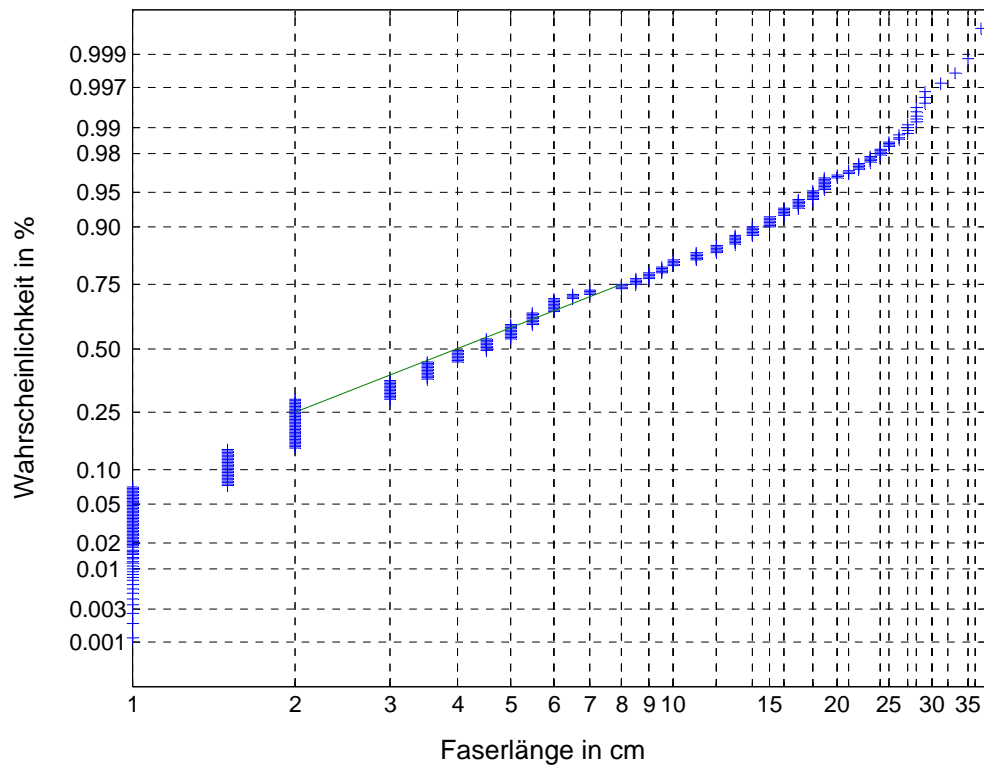


Abb. A4.1: Verteilung der Faserlänge bei Versuch C 2

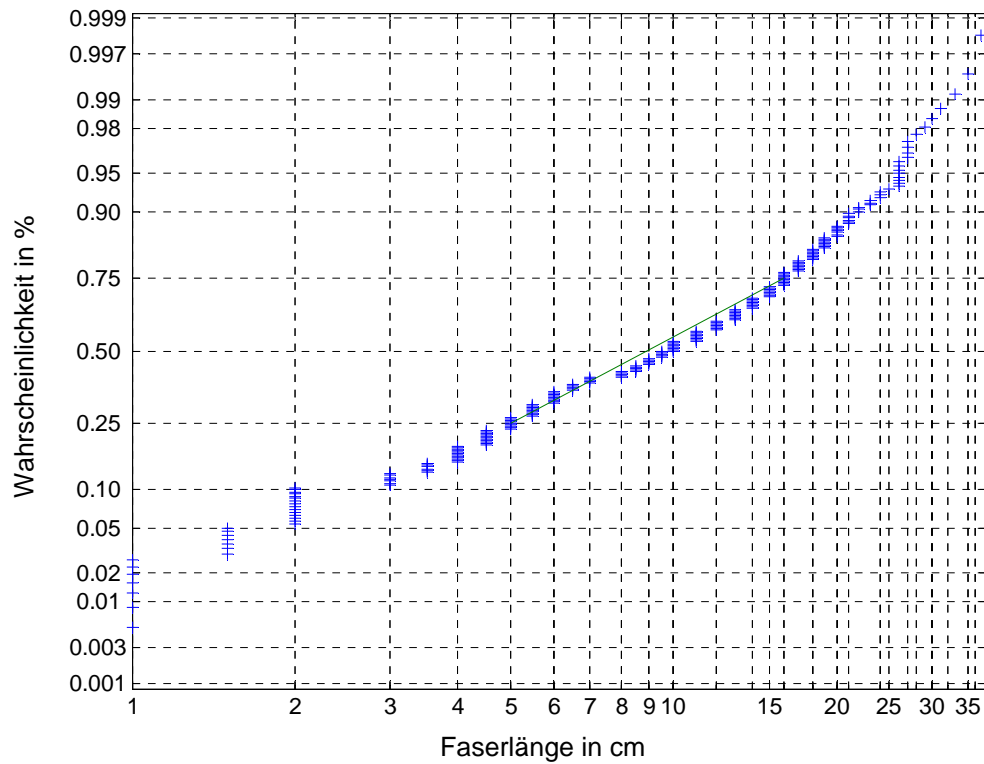


Abb. A4.2: Massegewichtete Verteilung der Faserlänge bei Versuch C 2



Abb. A4.3: Faserbreite und -feinheit in Abhängigkeit vom Röstgrad (als längenbezogene Breite mittels Bildanalyse mit Fibreshape 4.5 ermittelt, Faserfeinheit gravimetrisch ermittelt)

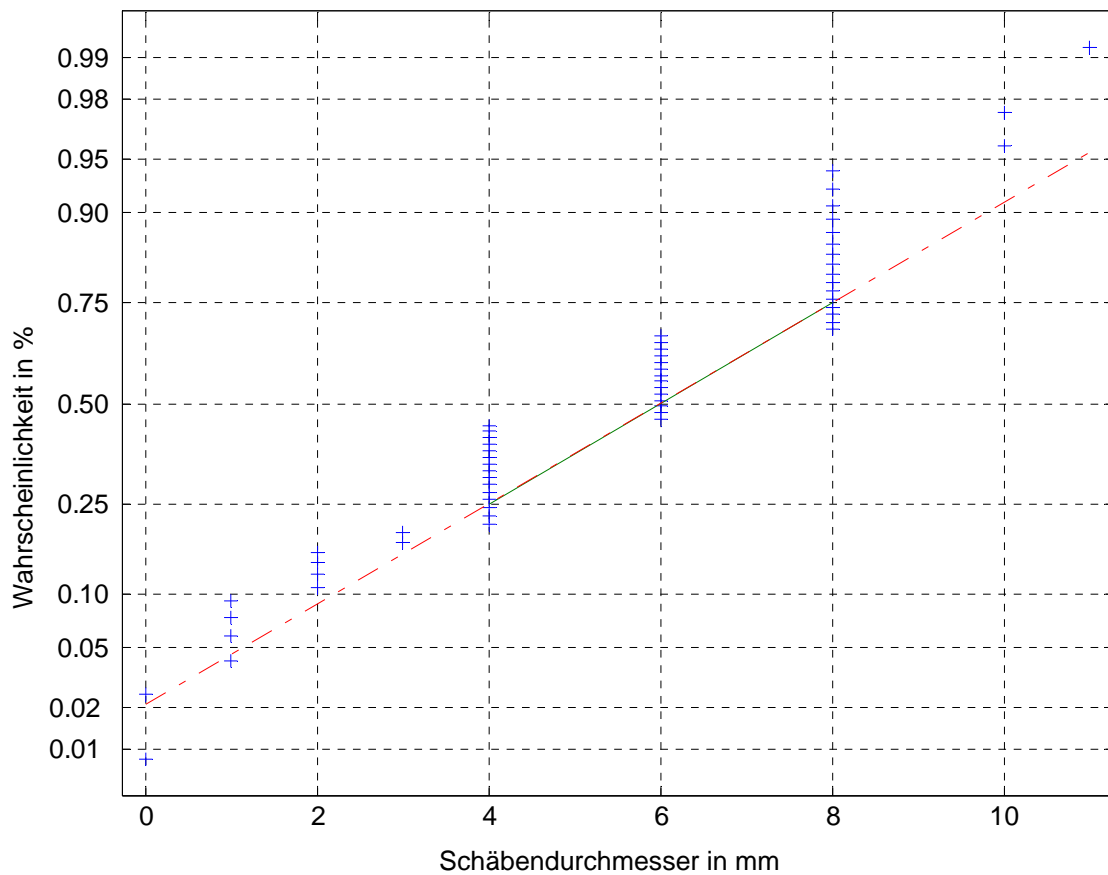


Abb. A4.4: Massengewichtete Verteilung der Schäbendurchmesser bei Versuch C 2

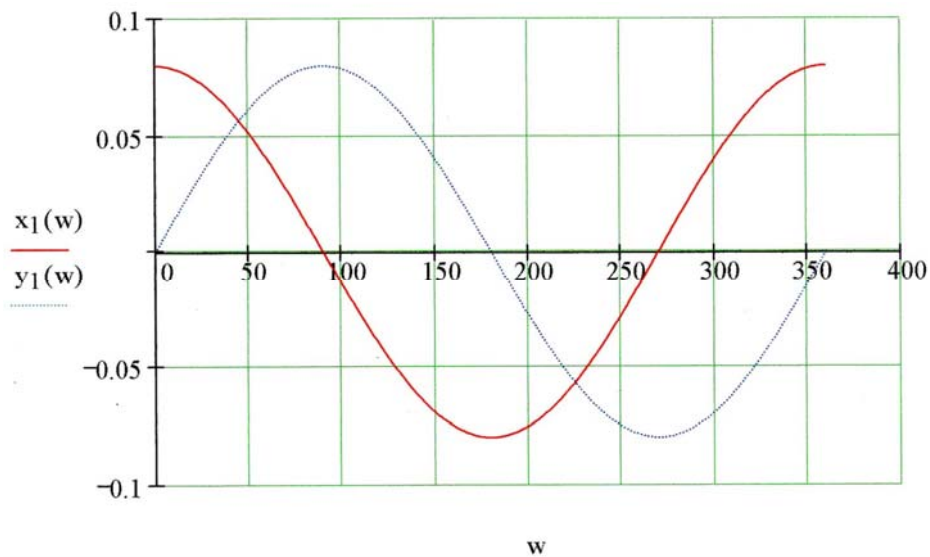


Abb. A5.1: x - y -Koordinaten von P_1 [m] über den Kurbelwinkel w [°]

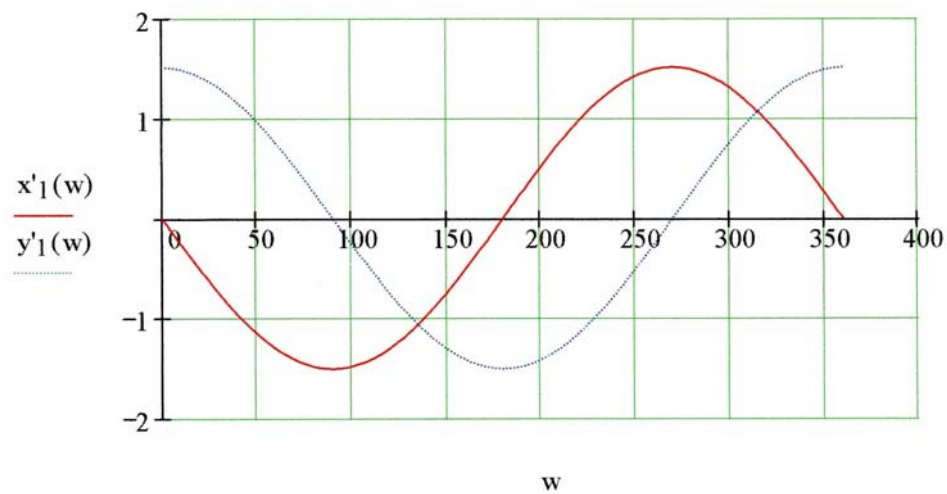


Abb. A5.2: Geschwindigkeit von P_1 [m/s] über den Kurbelwinkel w [°]

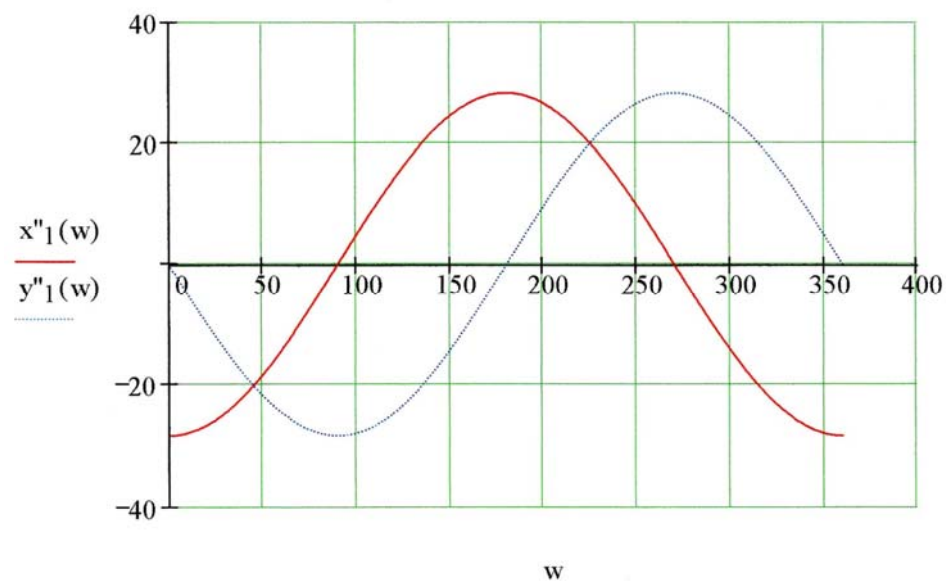


Abb. A5.3: Beschleunigung von P_1 [m/s²] über den Kurbelwinkel w [°]

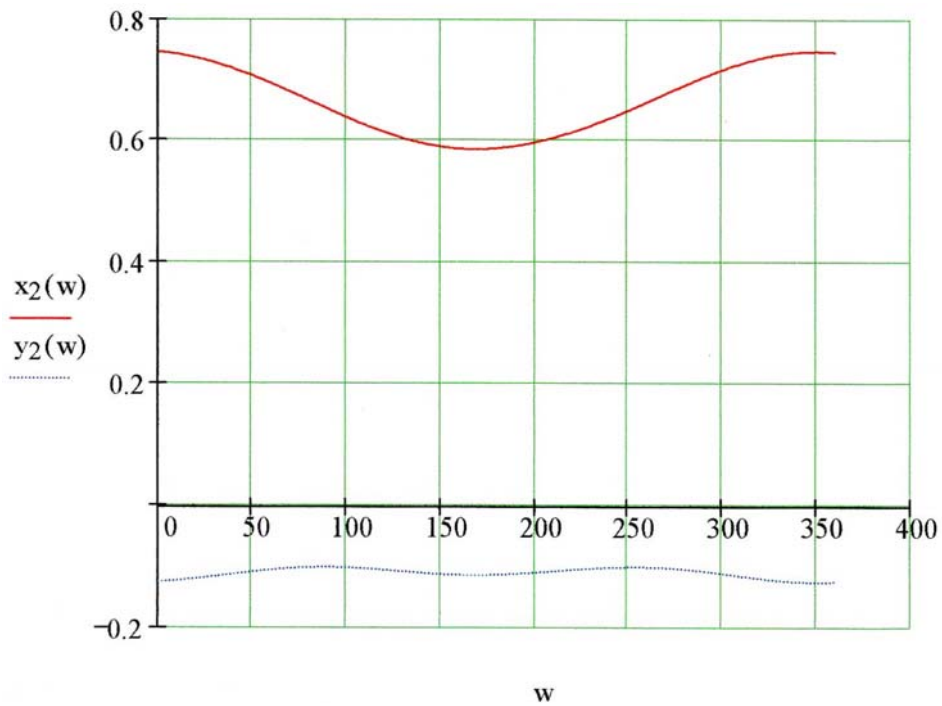


Abb. A5.4: x - y -Koordinaten von P_2 [m] über den Kurbelwinkel w [°]

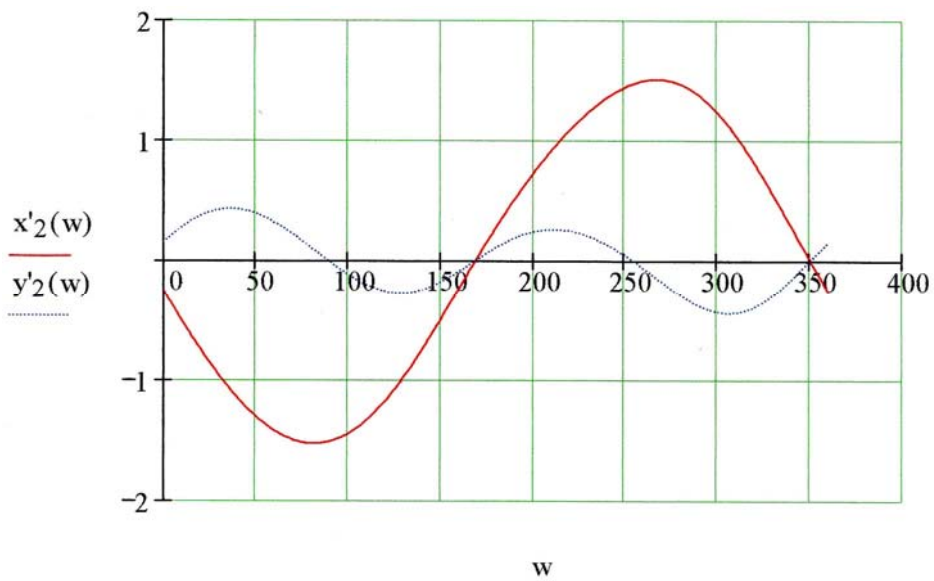


Abb. A5.5: Geschwindigkeit von P_2 [m/s] über den Kurbelwinkel w [°]

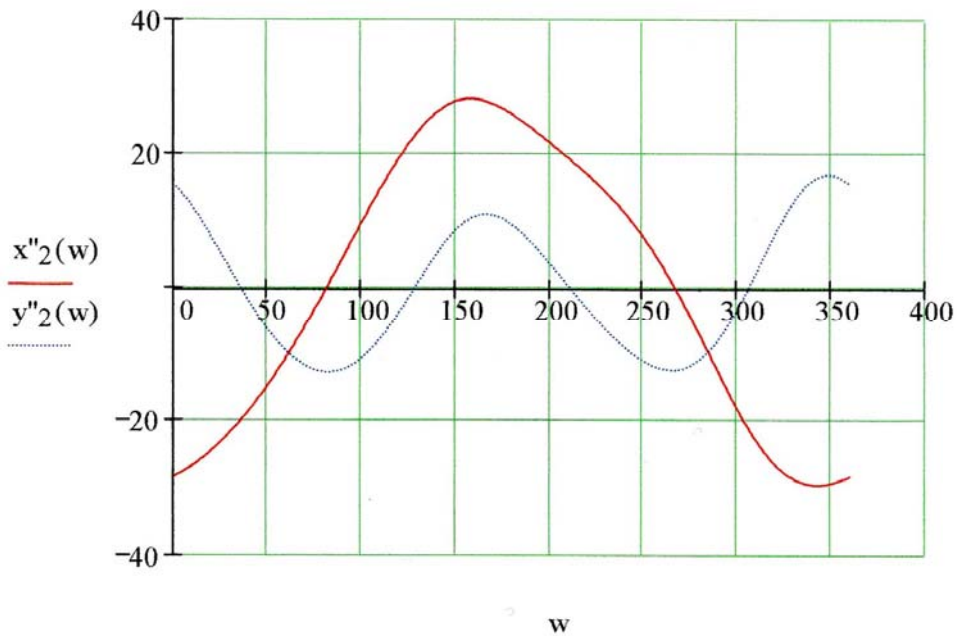


Abb. A5.6: Beschleunigung von P_2 [m/s^2] über den Kurbelwinkel w [$^\circ$]

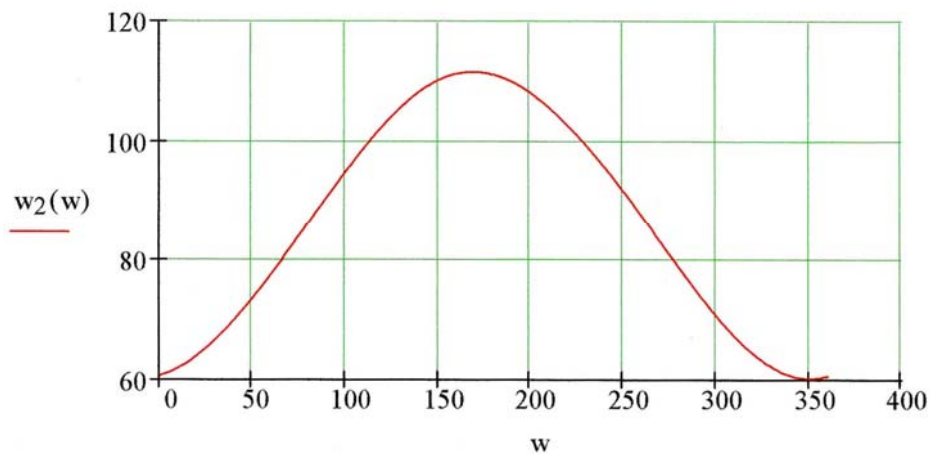


Abb. A5.7: x - y -Koordinaten von ω_2 [m] über den Kurbelwinkel w [$^\circ$]

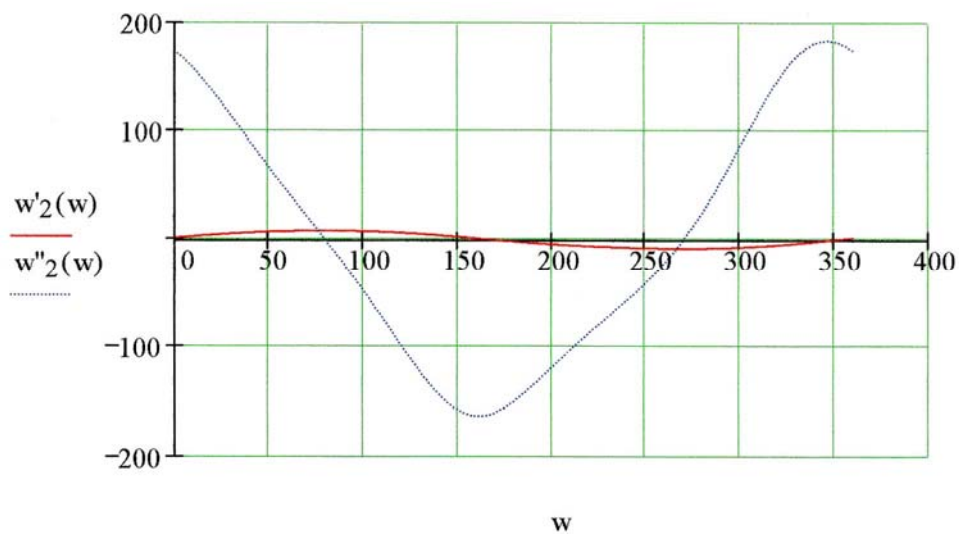


Abb. A5.8: Geschwindigkeit [$1/s$] und Beschleunigung von ω_2 [$1/s^2$]

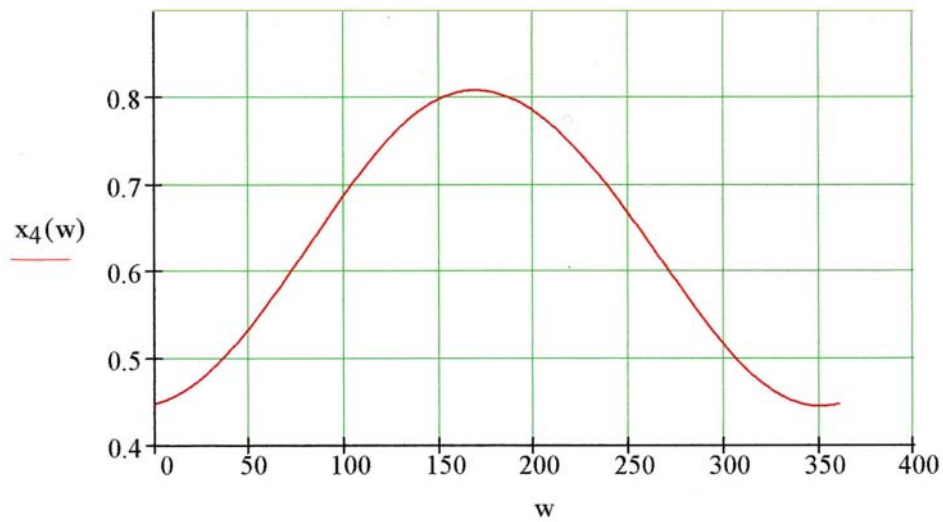


Abb. A5.9: x -Koordinate von P_4 [m] über den Kurbelwinkel w [°]

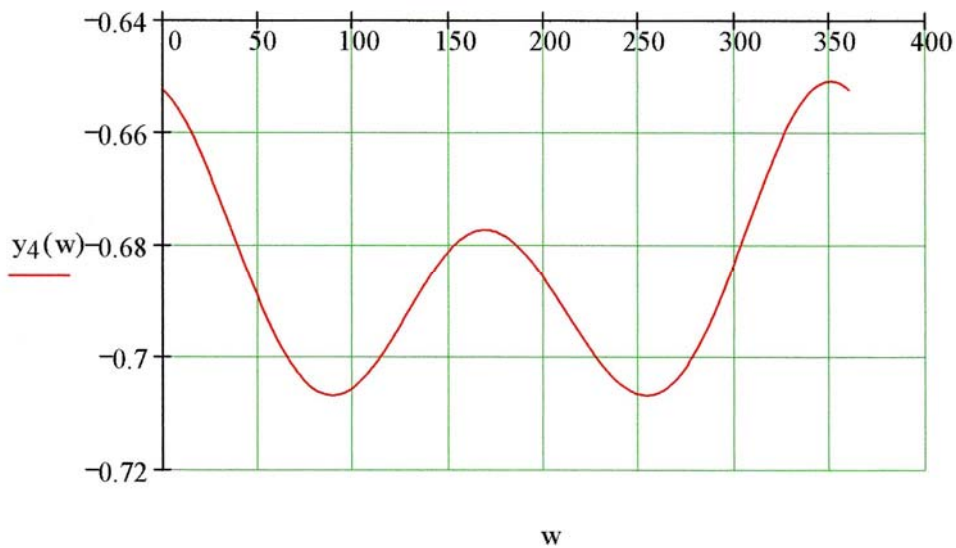


Abb. A5.10: y -Koordinate von P_4 [m] über den Kurbelwinkel w [°]

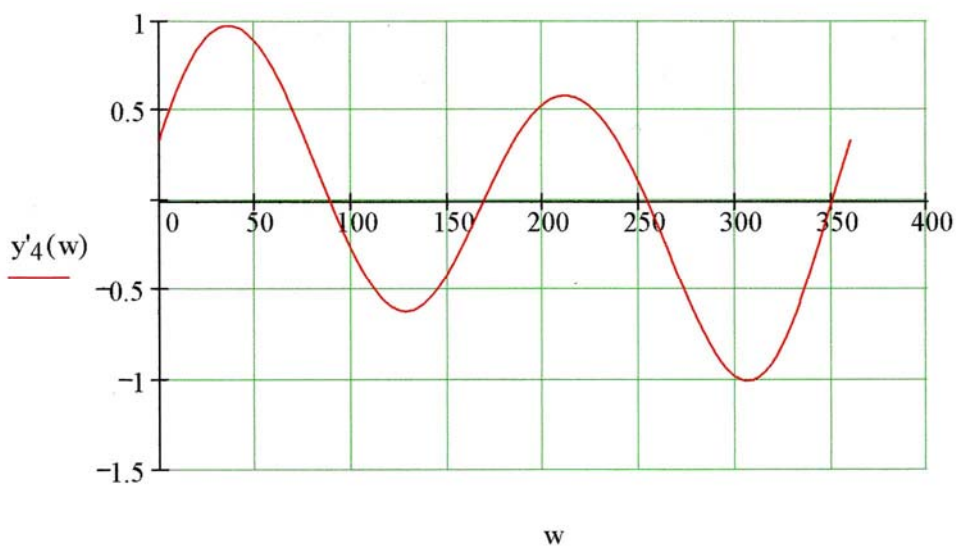


Abb. A5.11: Geschwindigkeit in x -Richtung von P_4 [m/s] über den Kurbelwinkel w [°]

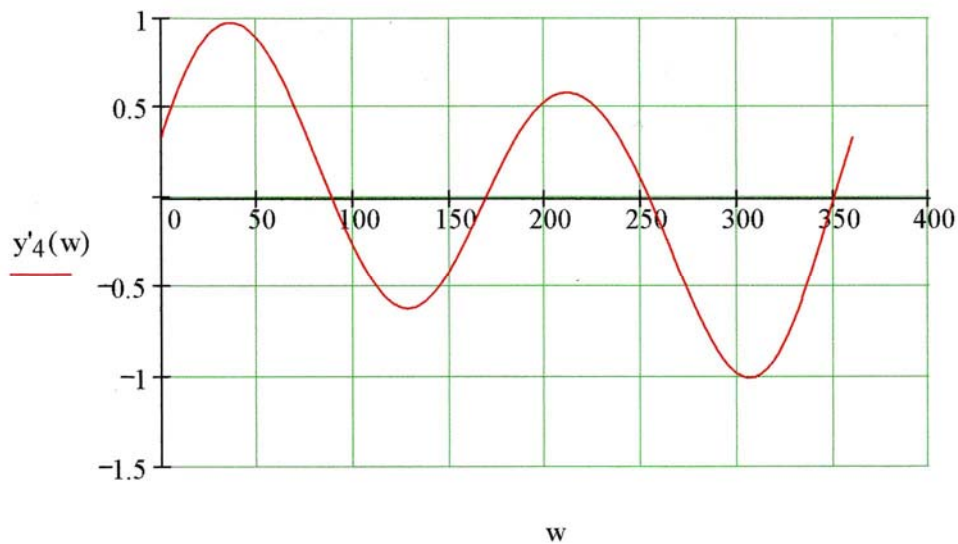


Abb. A5.12: Geschwindigkeit in y -Richtung von P_4 [m/s] über den Kurbelwinkel w [°]

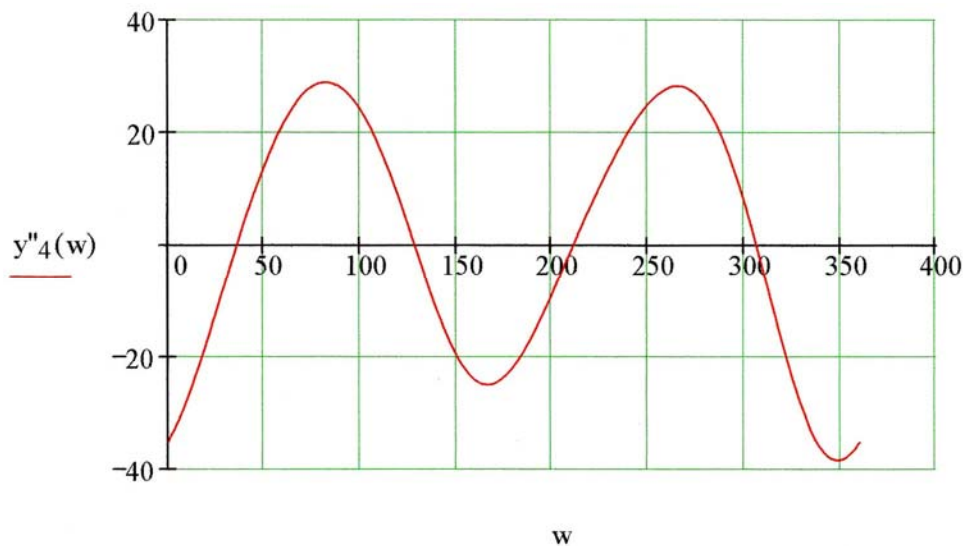


Abb. A5.13: Beschleunigung in x -Richtung von P_4 [m/s²] über den Kurbelwinkel w [°]

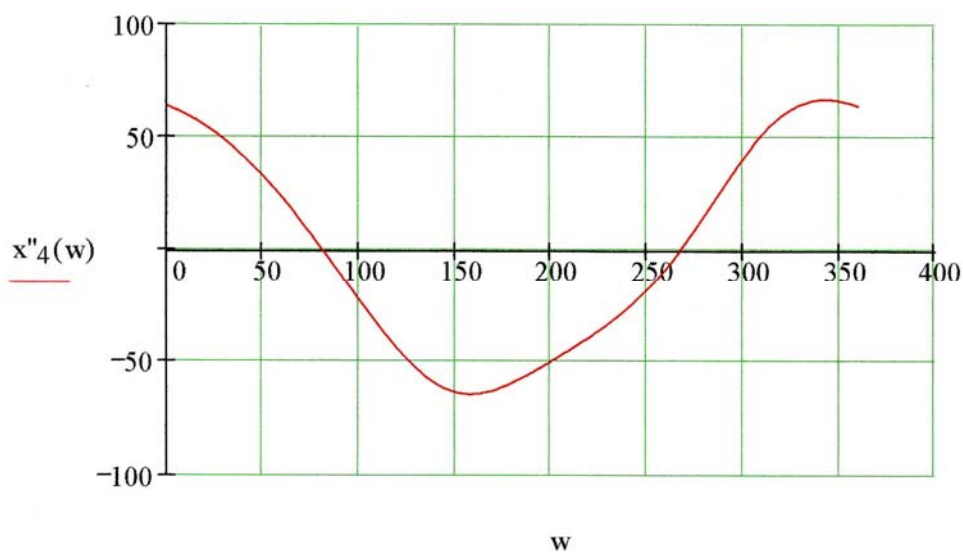


Abb. A5.14: Beschleunigung in y -Richtung von P_4 [m/s²] über den Kurbelwinkel w [°]

$$\left| \begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (y_{P1} - y_{S0}) & -(x_{P1} - y_{S0}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(y_{P1} - y_{S1}) & (x_{P1} - x_{S1}) & (y_{P2} - y_{S1}) & -(x_{P2} - x_{S1}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(y_{P2} - y_{S2}) & (x_{P2} - x_{S2}) & (y_{P3} - y_{S2}) & -(x_{P3} - x_{S2}) \end{array} \right|$$

$$\bullet \begin{bmatrix} F_{G10x} \\ F_{G10y} \\ M_{An} \\ F_{G21x} \\ F_{G21y} \\ F_{G32x} \\ F_{G32y} \\ F_{G30x} \\ F_{G30y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 \cdot g \\ 0 \\ m_2 \cdot \ddot{x}_{S1} \\ m_2 \cdot (\ddot{y}_{S1} + g) \\ J_{S1} \cdot \ddot{\omega}_1 \\ m_3 \cdot \ddot{x}_{S2} \\ m_3 \cdot (\ddot{y}_{S2} + g) \\ J_{S2} \cdot \ddot{\omega}_2 - M_{Ab} \end{bmatrix}$$

Lineares Gleichungssystem zur Beschreibung des Kammschüttelantriebs ohne Federspeicher (A5.1)

$$\left| \begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (y_{P1} - y_{S0}) & -(x_{P1} - y_{S0}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(y_{P1} - y_{S1}) & (x_{P1} - x_{S1}) & (y_{P2} - y_{S1}) & -(x_{P2} - x_{S1}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(y_{P2} - y_{S2}) & (x_{P2} - x_{S2}) & (y_{P3} - y_{S2}) & -(x_{P3} - x_{S2}) \end{array} \right|$$

$$\bullet \begin{bmatrix} F_{G10x} \\ F_{G10y} \\ M_{An} \\ F_{G21x} \\ F_{G21y} \\ F_{G32x} \\ F_{G32y} \\ F_{G30x} \\ F_{G30y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 \cdot g \\ 0 \\ m_2 \cdot \ddot{x}_{S1} - F_{Feder} \\ m_2 \cdot (\ddot{y}_{S1} + g) \\ J_{S1} \cdot \ddot{\omega}_1 - (y_2 - y_{S1}) \cdot F_{Feder} \\ m_3 \cdot \ddot{x}_{S2} - F_{Feder} \\ m_3 \cdot (\ddot{y}_{S2} + g) \\ J_{S2} \cdot \ddot{\omega}_2 - M_{Ab} - (y_3 - y_{S2}) \cdot F_{Feder} \end{bmatrix}$$

Lineares Gleichungssystem zur Beschreibung des Kammschüttelantriebs mit Federspeicher (A5.2)

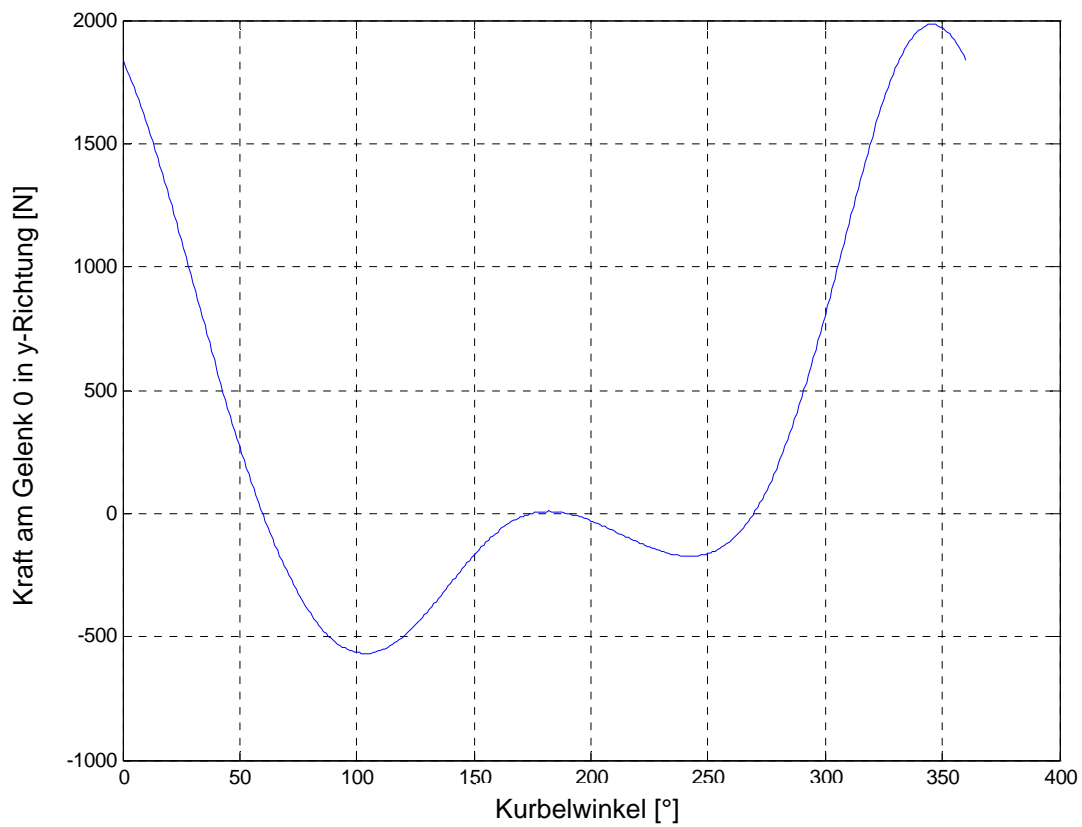
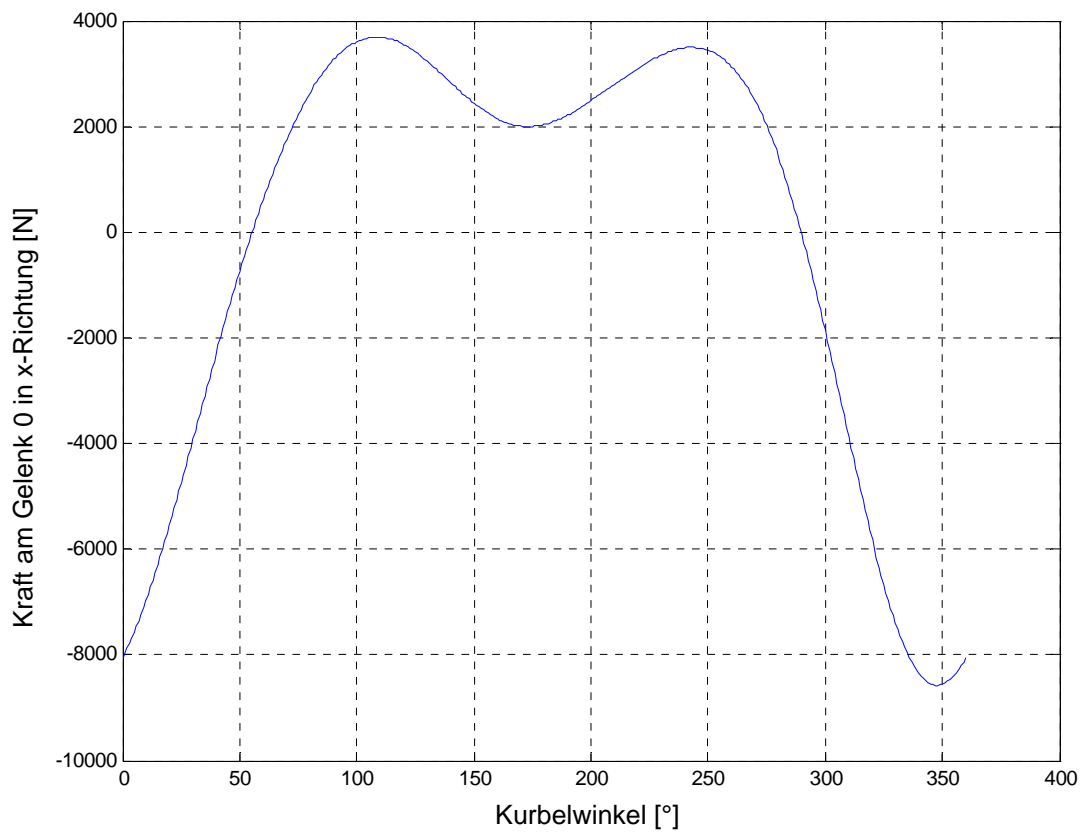


Abb. A5.15: Kräfte am Gelenk 0 (ohne Federspeicher)

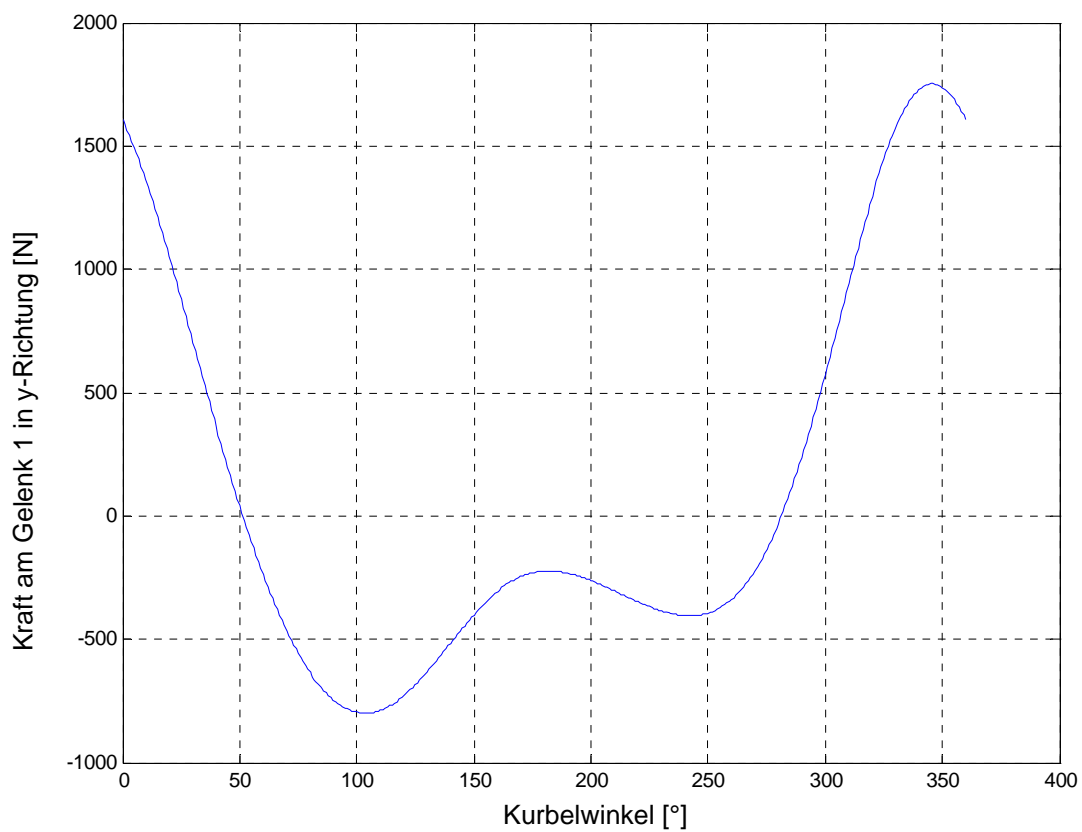
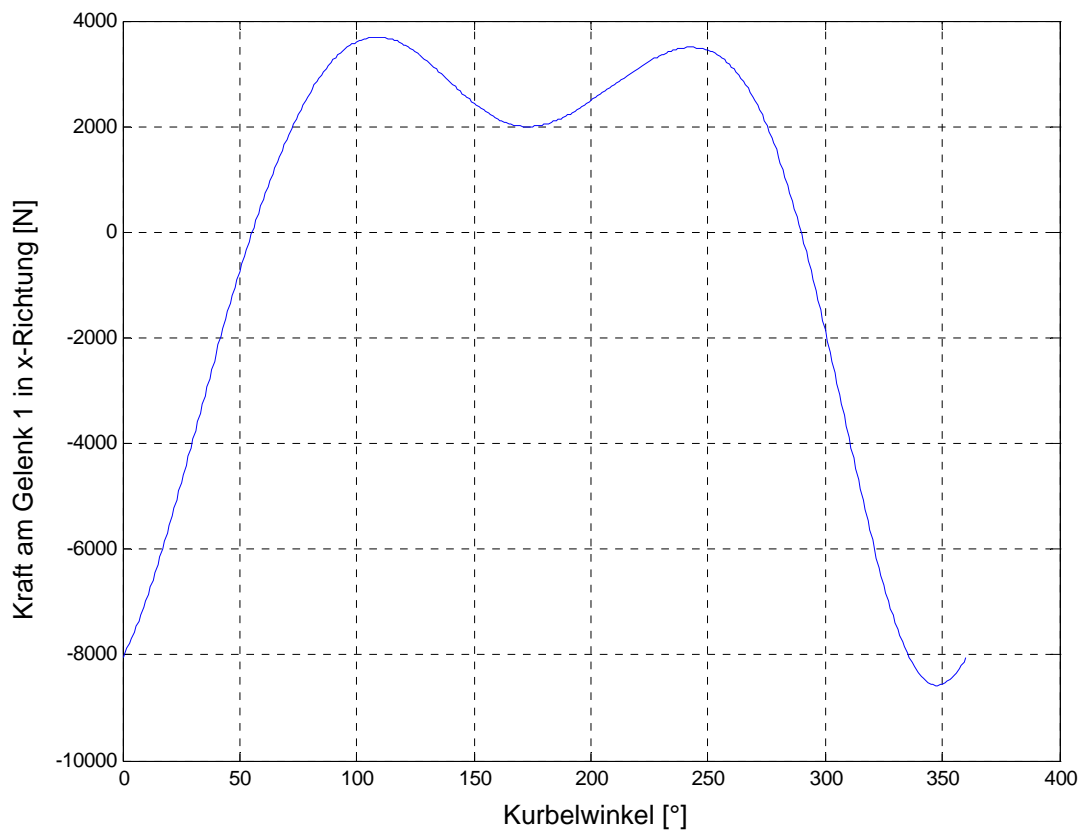


Abb. A5.16: Kräfte am Gelenk 1 (ohne Federspeicher)

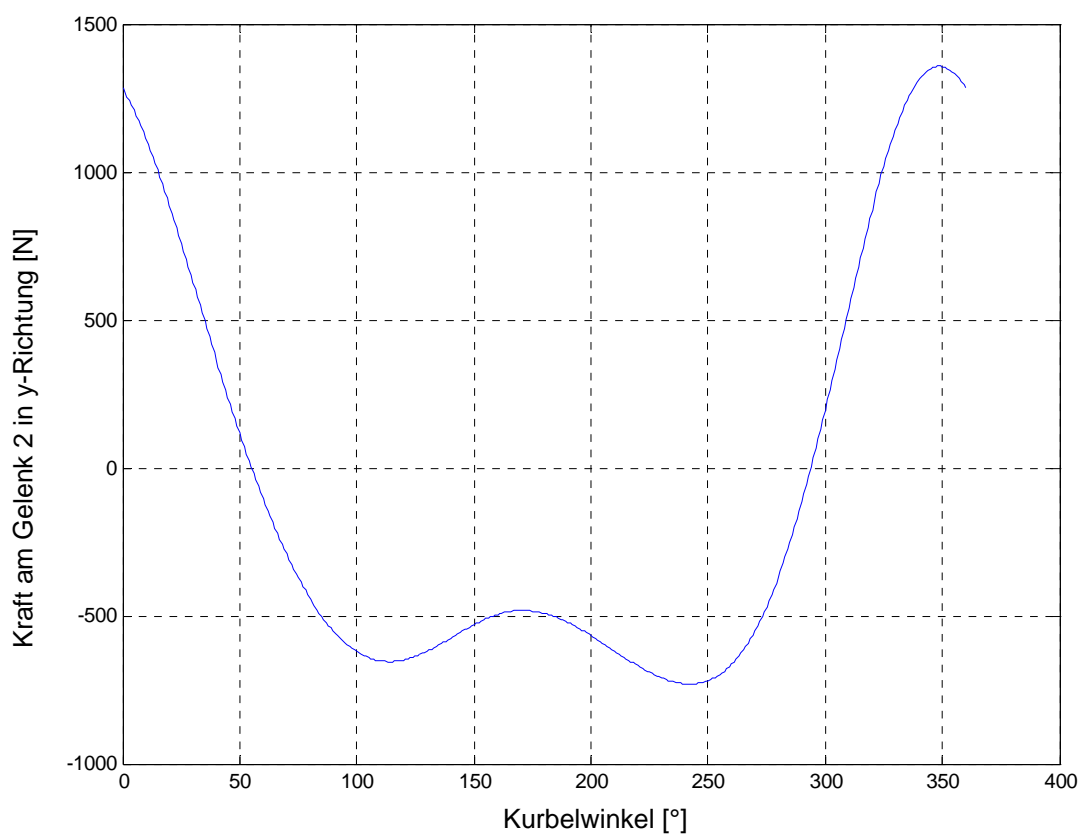
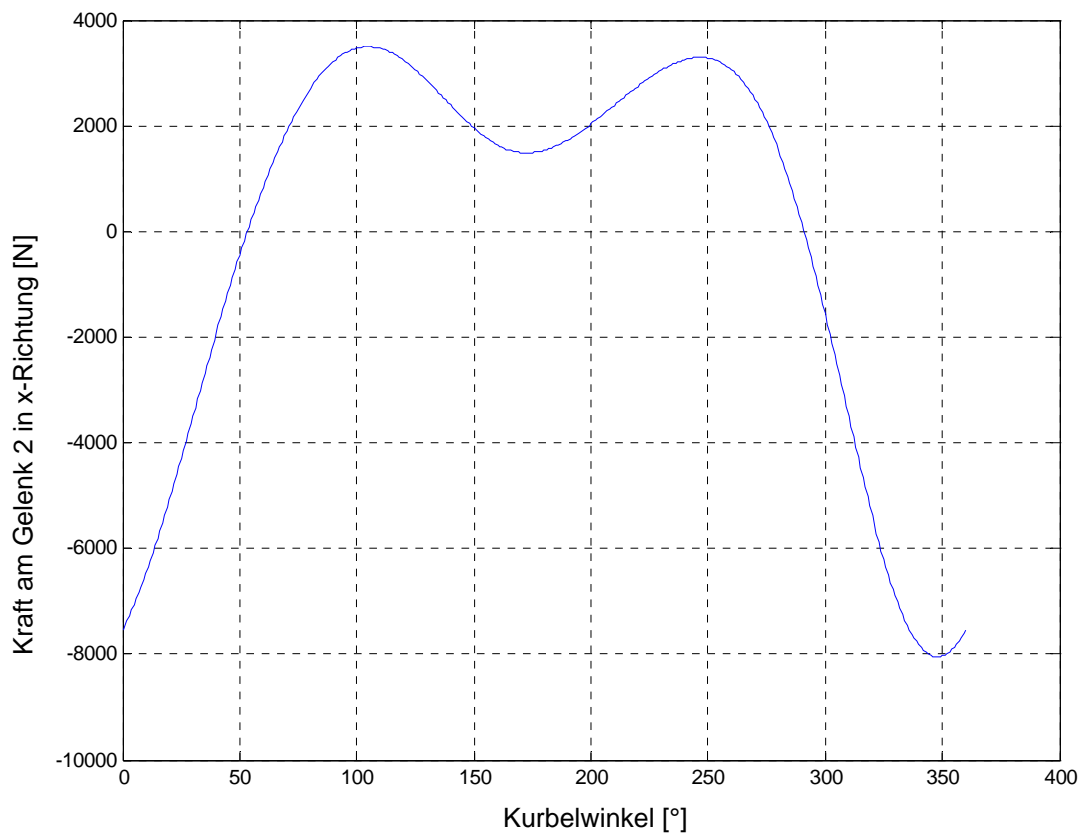


Abb. A5.17: Kräfte am Gelenk 2 (ohne Federspeicher)

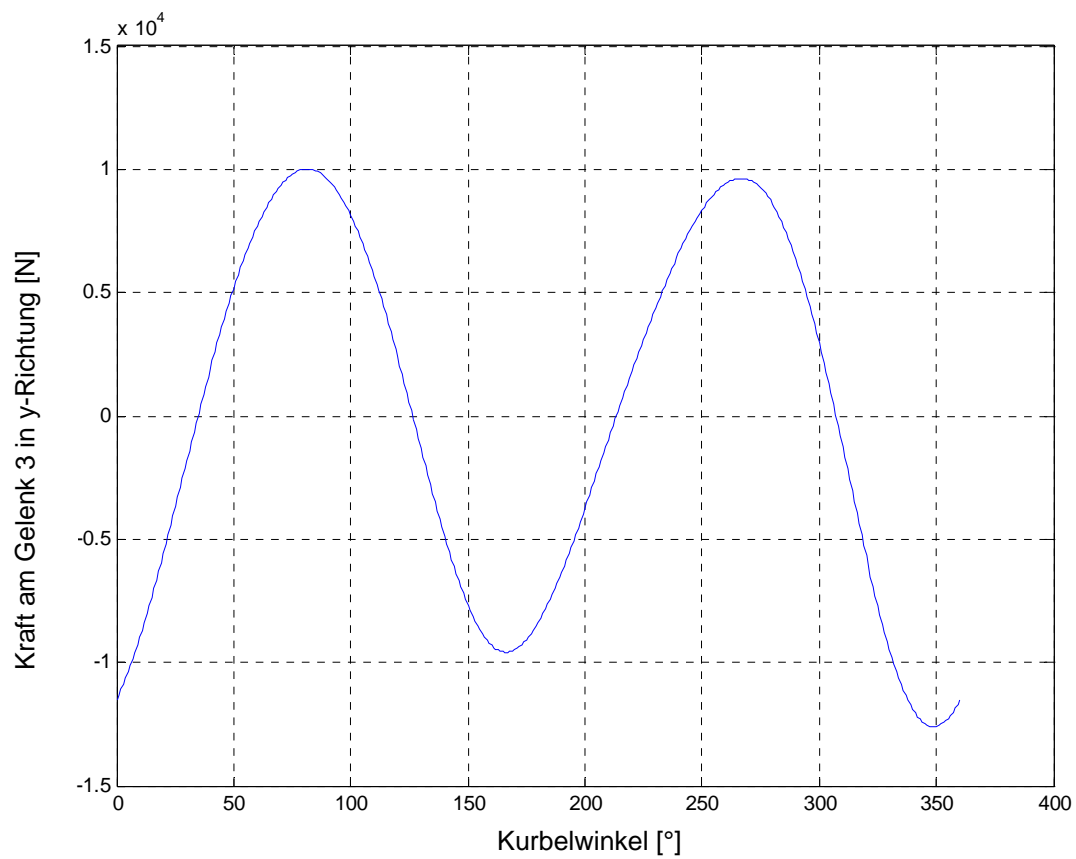
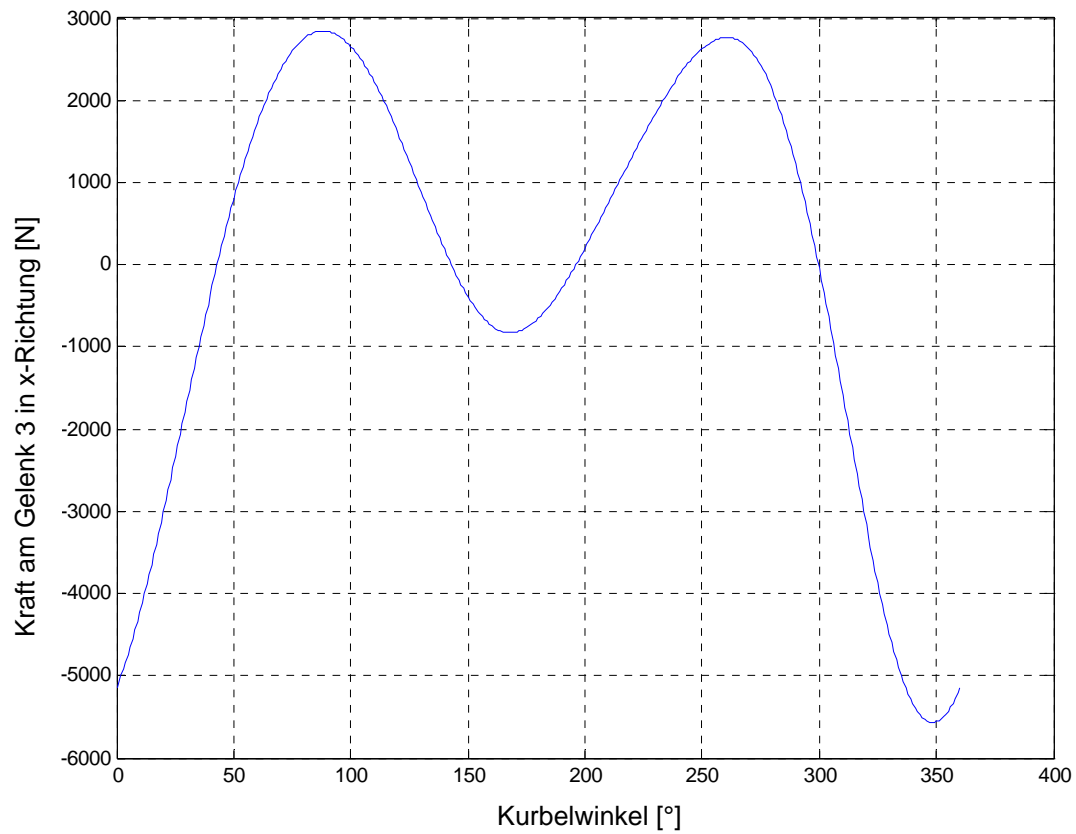


Abb. A5.18: Kräfte am Gelenk 3 (ohne Federspeicher)

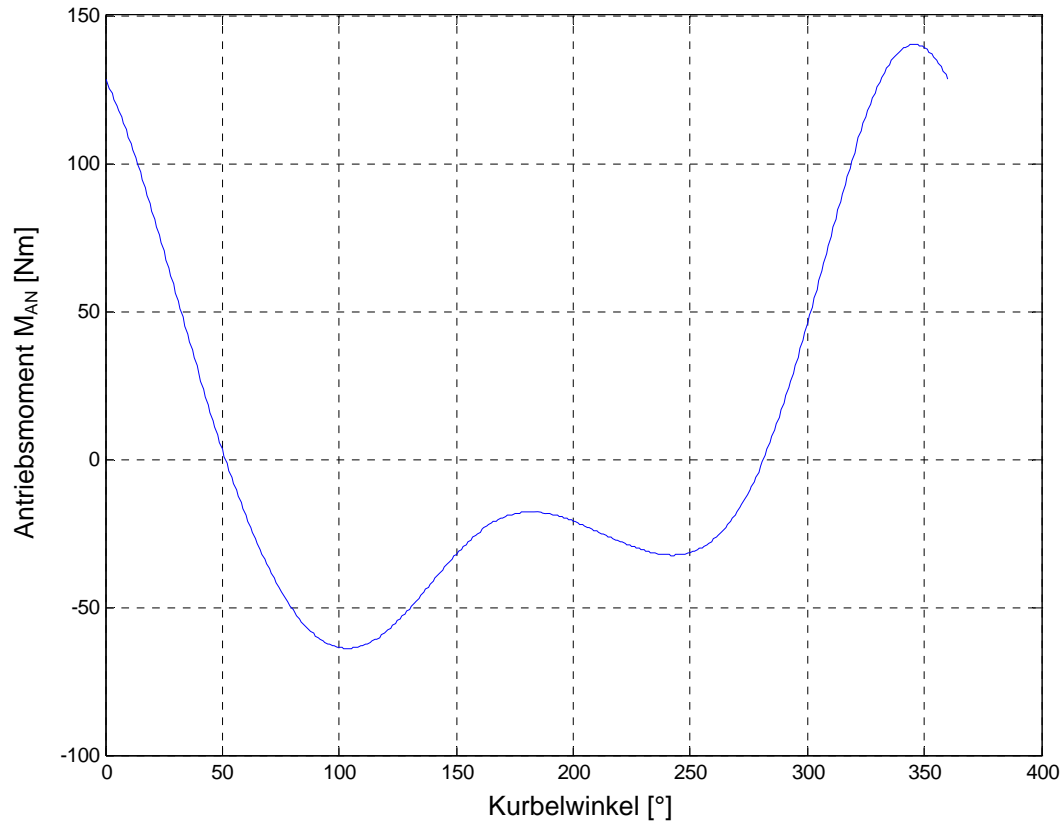


Abb. A5.19: Antriebsmoment (ohne Federspeicher)

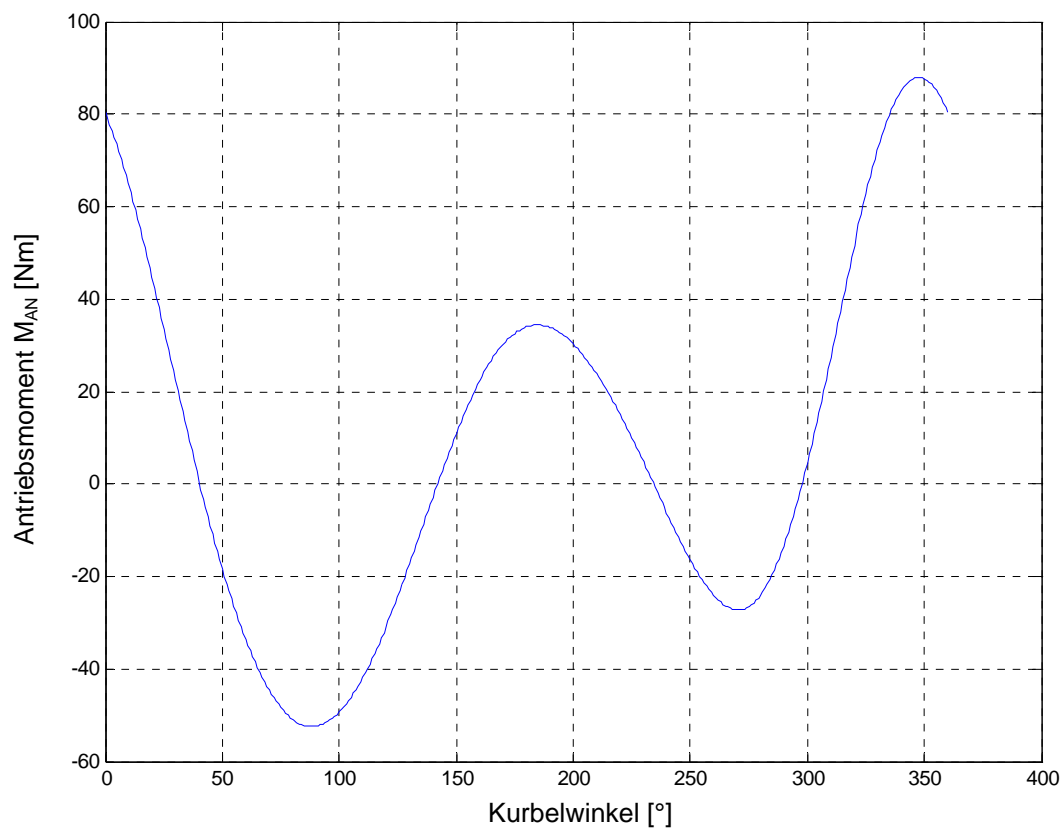


Abb. A5.20: Antriebsmoment (mit Federspeicher)

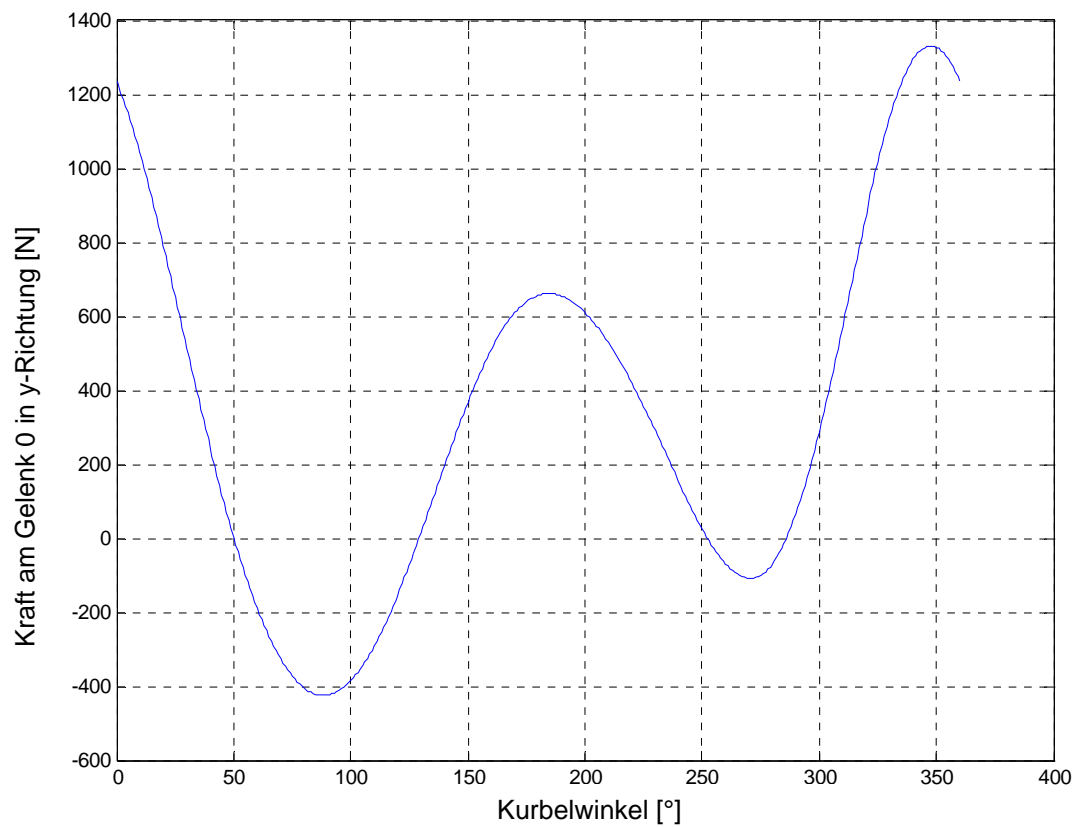
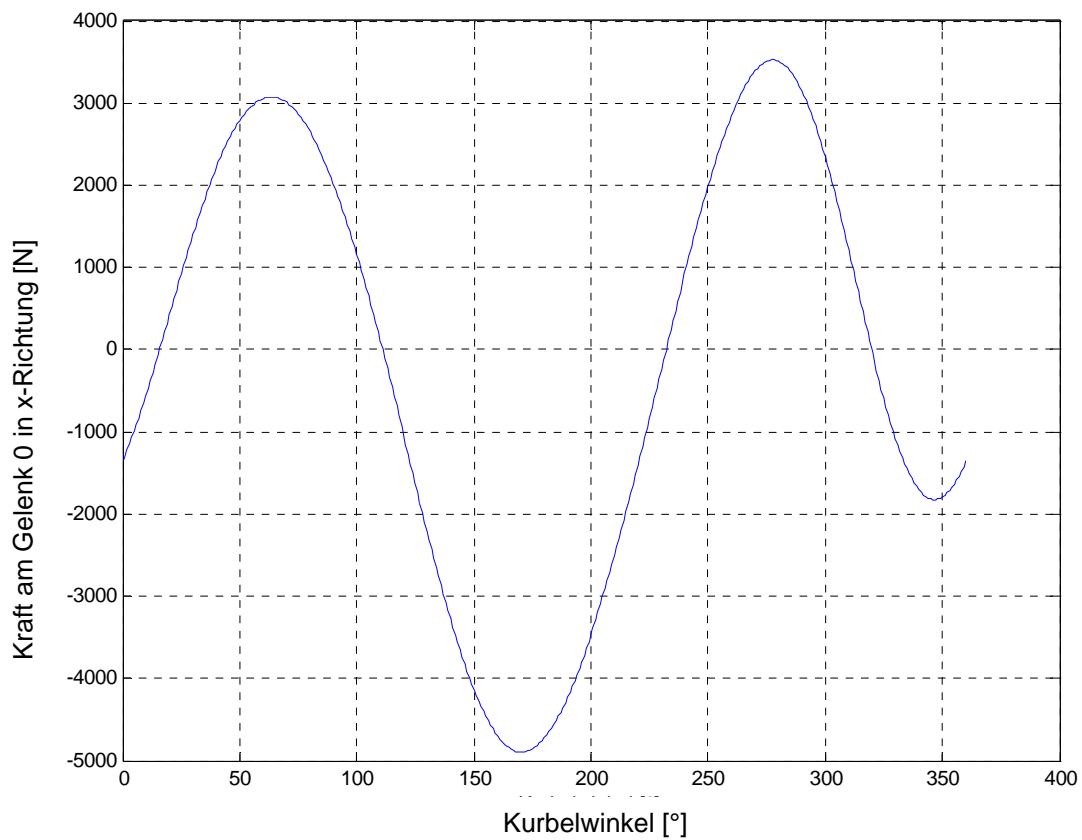


Abb. A5.21: Kräfte am Gelenk 0 (mit Federspeicher)

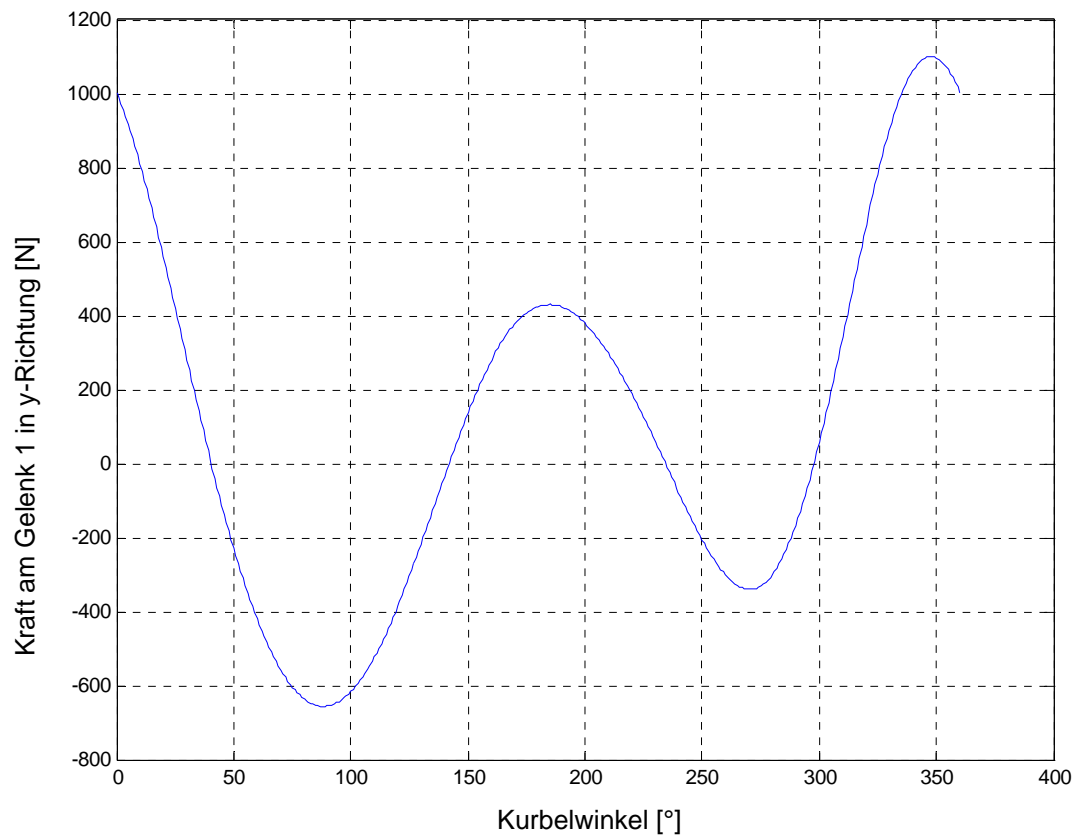
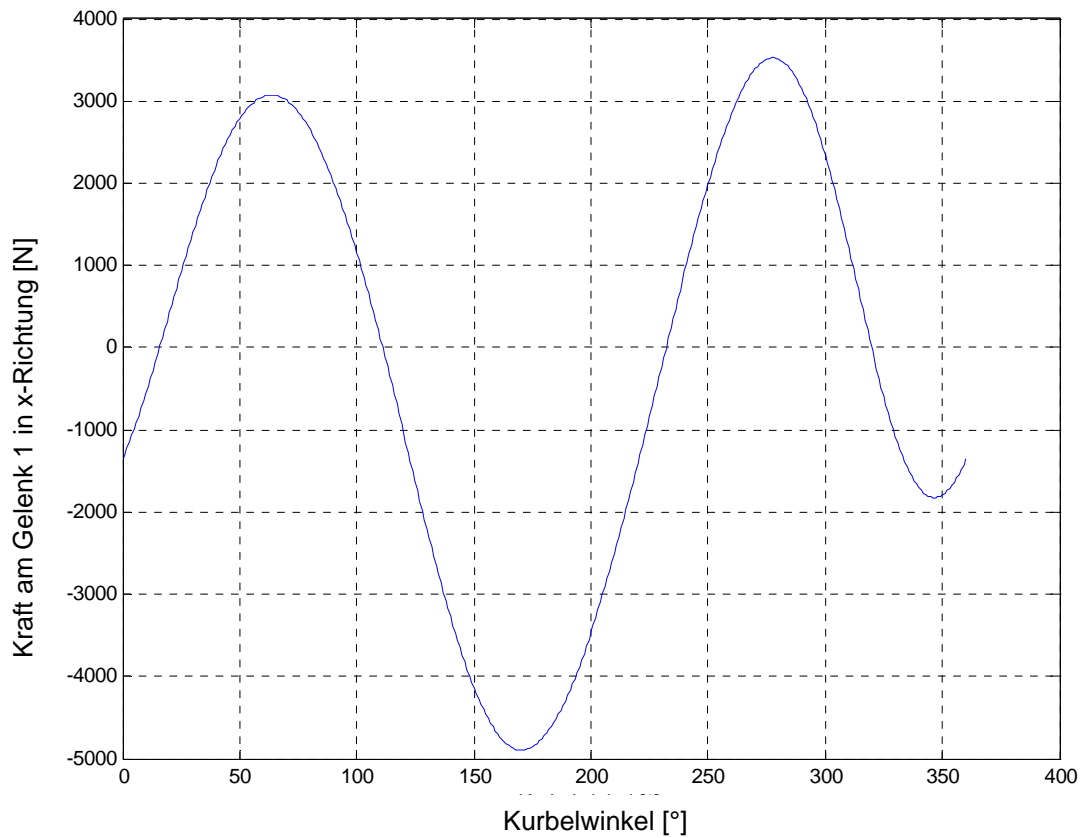


Abb. A5.22 Kräfte am Gelenk 1 (mit Federspeicher)

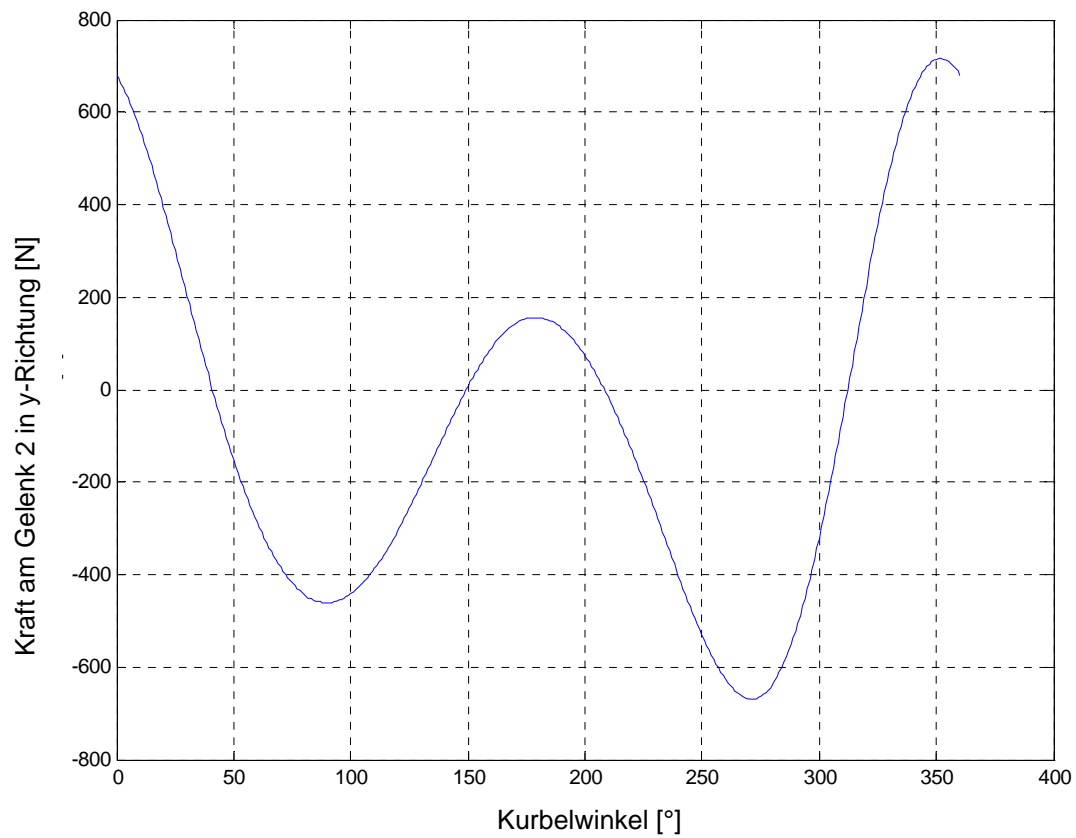
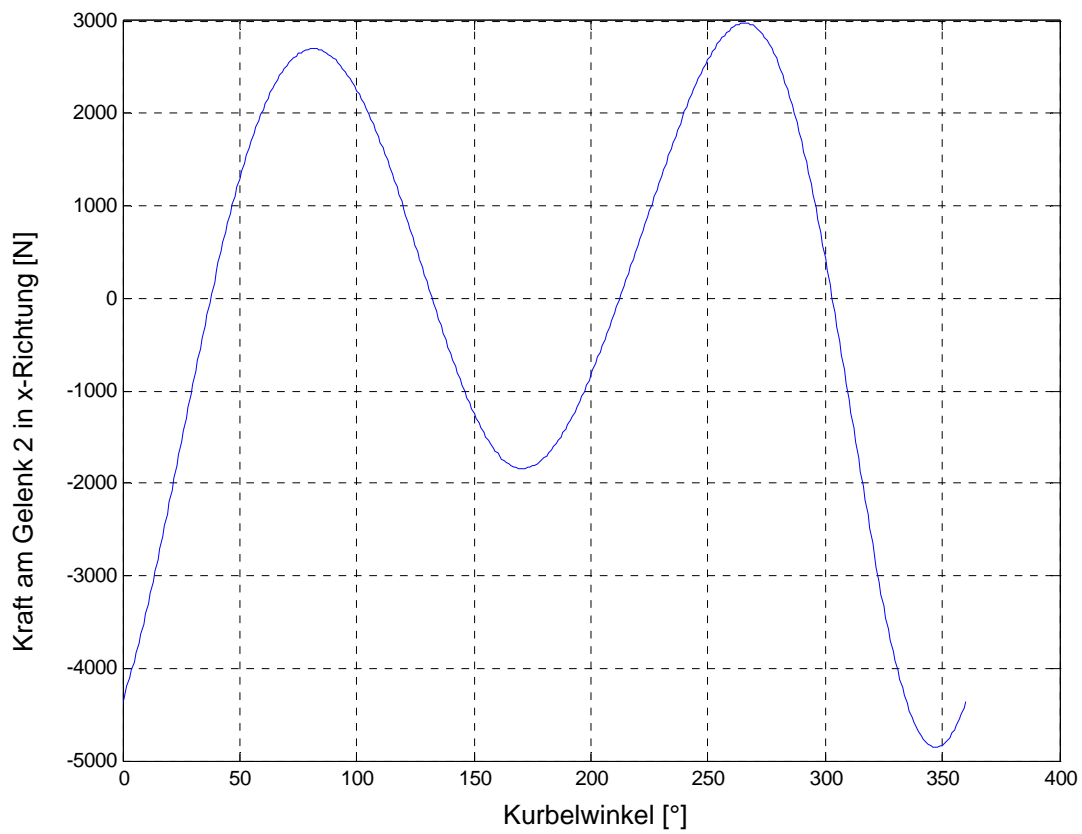


Abb. A5.23: Kräfte am Gelenk 2 (mit Federspeicher)

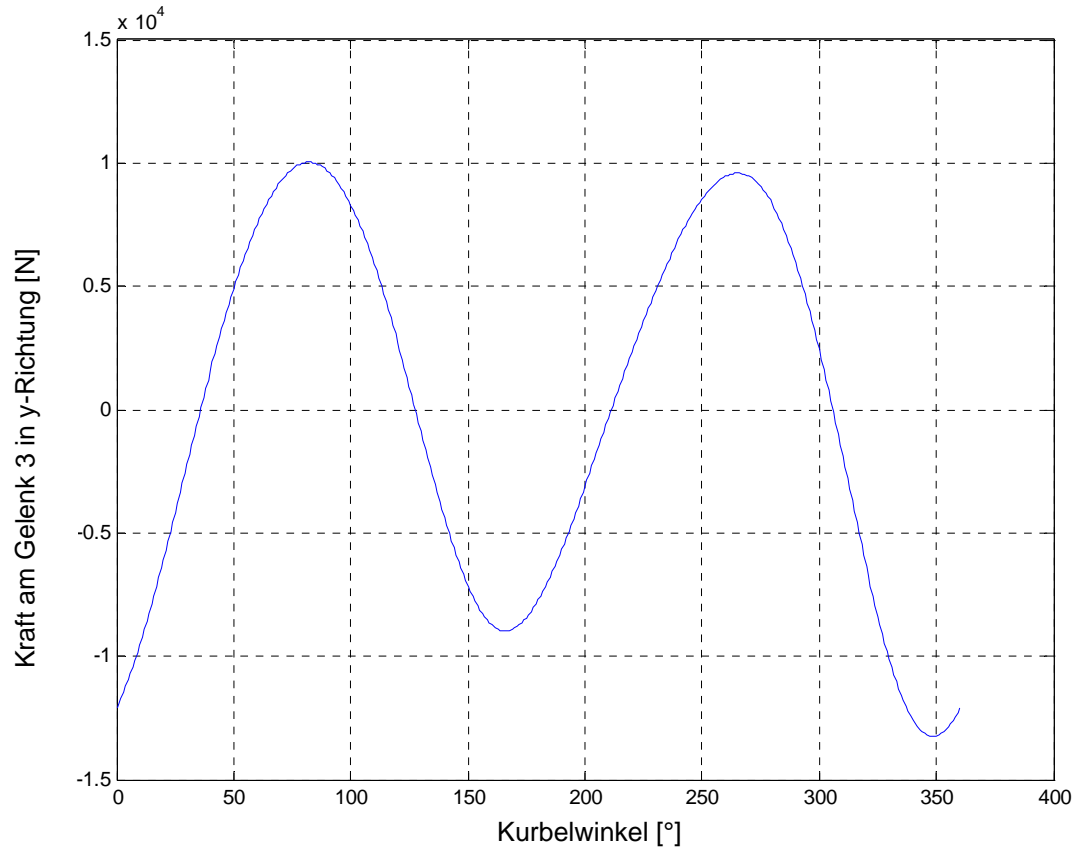
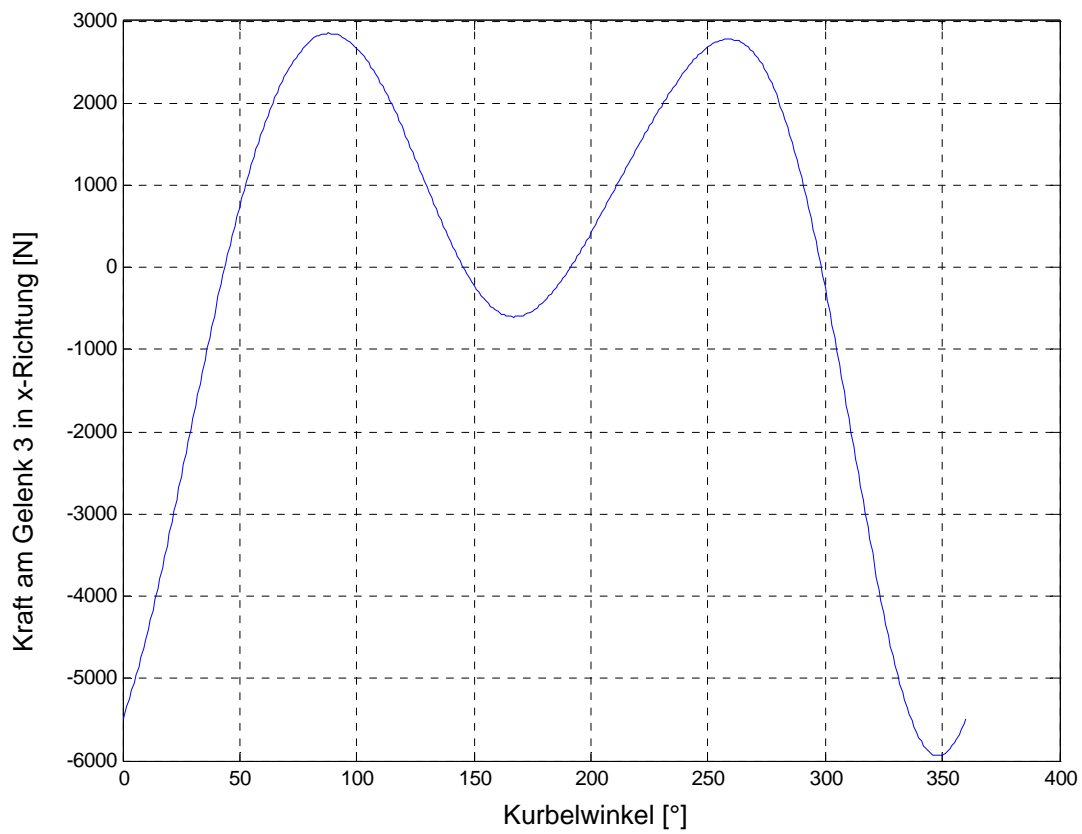


Abb. A5.24: Kräfte am Gelenk 3 (mit Federspeicher)

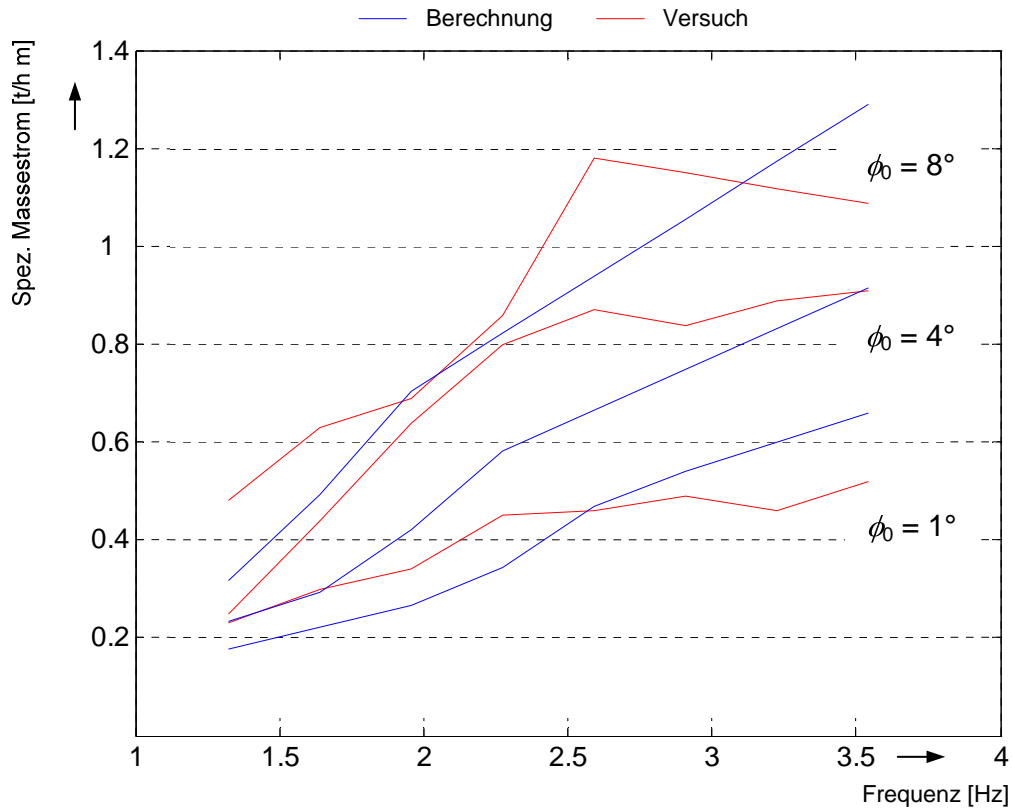


Abb. A6.1: Gegenüberstellung von berechnetem und gemessenem Massestrom im Kammschüttel in Abhängigkeit von Wurfwinkel und Schüttelfrequenz (Versuch D 2, $\gamma = 0^\circ$, Materialkategorie B geröstet)

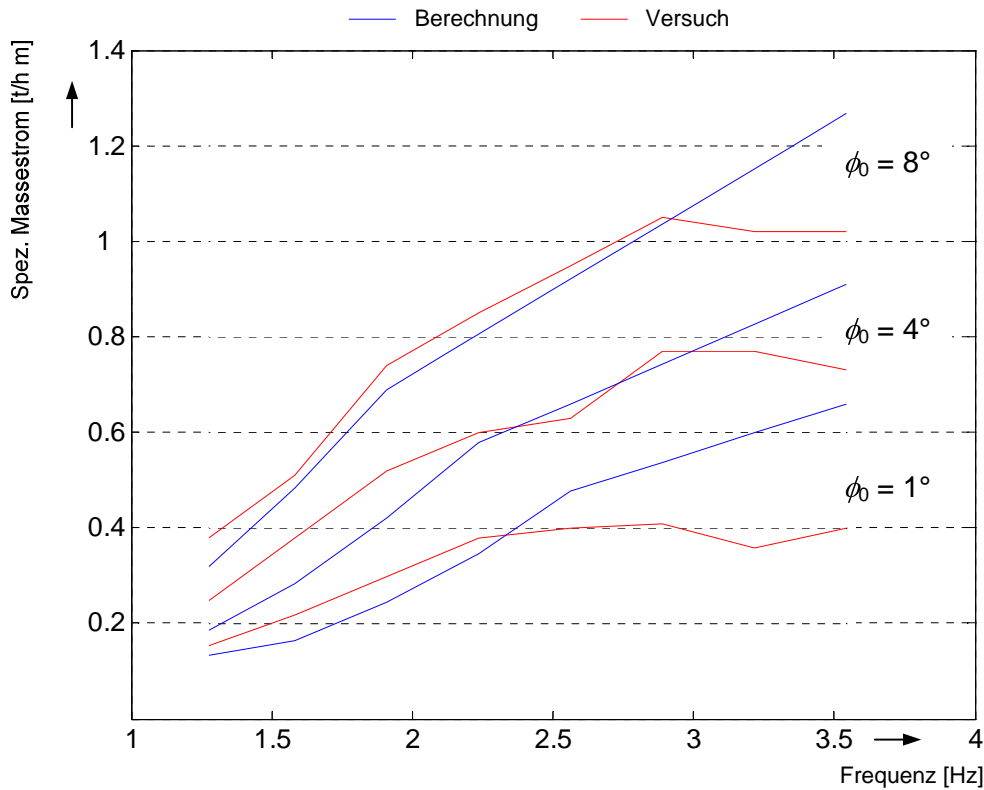


Abb. A6.2: Gegenüberstellung von berechnetem und gemessenem Massestrom im Kammschüttel in Abhängigkeit von Wurfwinkel und Schüttelfrequenz (Versuch D 4, $\gamma = 20^\circ$, Materialkategorie B geröstet)

13 Literatur

- AKIN et al. 2004 Akin, D.E.; Dodd, R.B.; Foulk, J.A.: Pilot plant for processing flax fiber. *Industrial Crops and Products* 21(2005)3, S. 369-378
- ALEX et al. 2003 Alex, A.; Kessler, R.W.; Kohler, R.; Mayer, G.; Nebel, K.; Tubach, M.: Erfolgsfaktoren für eine nachhaltige Faserwirtschaft. In: Tagungsband 4. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, S. 39 und CD-ROM, Erfurt 2003
- ANTHONY 2002 Anthony, W.S.: Separation of fiber from seed flax straw. *Applied Engineering in Agriculture* 18(2002)2, S. 227-233
- ATB 1997 Verfahren zur Ernte, Konservierung, Aufbereitung und Verarbeitung von Hanf. Erfinder: G. Kühne, M. Müller, C. Fürll, C. Idler, D. Ehlert, Patent DE 197 56 046, 1997
- ATB 1999 Vorrichtung zur Gewinnung von Kurzfasern. Erfinder: H. Hempel, Patent DE 199 18 166, 1999
- ATB 2003 Verfahren zur Aufbereitung von Naturfaserpflanzen. Erfinder: C. Fürll, C. Idler, R. Pecenka, B. Linke, Patent DE 103 46 365, 2003
- BAADER 1960 Baader, W.: Untersuchungen über das Verhalten eines Haufwerks großer Schichthöhe auf einem schwingenden Siebrost. Dissertation, TH Braunschweig 1960
- BAADER et al. 1969 Baader, W.; Sonnenberg, H.; Peters, H.: Die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerks auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage. *Grundlagen der Landtechnik* 19(1969)5, S.149-157
- BAKER et al. 1973 Baker, R.V.; Laird, W.: Extracting Sticks from Machine-Stripped Cotton. *Transactions of ASAE* 16(1973)1, S.497-499
- BASETTI et al. 1998 Bassetti, P.; Mediavilla, V.: Hanfanbau in der Schweiz – Geschichte, aktuelle Situation, Sorten, Anbau- und Erntetechnik, wirtschaftliche Aspekte und Perspektiven. *FAT-Berichte Nr. 516, Tänikon* 1998
- BECK 1992 Beck, T.: Messverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschafteneinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdescher. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 54, VDI-Verlag, Düsseldorf* 1992
- BECK 1999 Beck, F.: Simulation der Trennprozesse im Mähdescher. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 92, VDI-Verlag, Düsseldorf* 1999
- BECK et al. 1995 Beck, F.; Kutzbach, H.D.: Theoretische Untersuchungen zur Trennung von Korn/Stroh- und Korn/Spreu-Gemischen im Mähdescher. *Agrartechnische Forschung* 1(1995)2, S.120-128
- BEITZ et al. 1997 Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung*. 4. Aufl., Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1997

- BERNHARDT 1989 Bernhardt, Claus.: Granulometrie- Klassier- und Sedimentationsmethoden. Dissertation (B), Forschungsinstitut für Aufbereitung, Freiberg der AdW der DDR, Freiberg 1989
- BÓCSA et al. 2000 Bócsa, I.; Karus, M.; Lohmeyer, D.: Der Hanfanbau: Botanik, Sorten, Anbau und Ernte, Märkte und Produktlinien. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup 2000
- BÖRGER 1926 Börger, H.: Die Hanfspinnerei und Seilerwarenfabrikation in Deutschland. Deichertsche Verlagsbuchhandlung, Leipzig 1926
- BÖTTINGER 1993 Böttinger, S.: Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage in Mähdreschern. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 66, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993
- BRÖCKERS et al. 1995 J. Herer, M. Bröckers (Hrsg.): Die Wiederentdeckung der Nutzpflanze Hanf Cannabis Marihuana; 34. Aufl., Verlag Zweitausendeins, Frankfurt / Main 1995
- BUDACH 1996 Budach, S.: Untersuchungen neuer Korn-Stroh-Trennelemente für Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk. VDI-Berichte Nr. 1297, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996
- BUTZ 1999 Butz, M.: Quantitative Charakterisierung makroporöser Materialien mittels NMR-Mikroskopie, Dissertation, Humboldt-Universität Berlin 1999
- CHARLE et al. 1997 Charle, F.; Wolpers, M.: Flax tow and hemp working line. In: Tagungsband 2. Biorohstoff Hanf Symposium, Frankfurt am Main, 1997
- CHROLIKOW 1973 Chrolikow, W.: Der technologische Vorgang bei der Trennung von Gemischen auf Schwingsieben. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 23(1974)2: S. 431-433
- CLAUß 1992 Clauß, S.: Untersuchungen zur Intensivierung der Korn-Stroh-Trennung mittels Zinkenrotorschüttler. Dissertation, Technische Universität Dresden 1992
- CORTE 1982 Corte, H.: The porosity of paper. Chapter 6 in Handbook of Paper Science, Volume 2, Elsevier, Amsterdam 1982
- CORTE et al. 1965 Corte, H.; Lloyd, E.H.: Fluid flow through paper and sheet structure. In: Tagungsband Consolidation of the Paper Web Transactions of the Fundamental Research Symposium, Cambridge 1965, S. 981-1009.
- COTTON 2005 Cotton Processing, Hrsg.: Cotton Australia, Surry Hills 2005
<http://www.cottonaustralia.com.au/libraryindexh.html>, 01.06.2005, 10:50 Uhr
- DEHGHANI et al. 2002 Dehghani, A.; Monhemius, A.J.; Gochin, R.J.: Evaluating the Nakajima et al. model for rectangular-aperture screens. Minerals Engineering 15(2002), S.1089-1094

- DESANLIS 2006 Desanlis F. : Basics of hemp growing. 4th International Conference of the "European Industrial Hemp Association". CD-ROM, Hürth 2006
- DIN 53803 DIN 53803-1: Probenahme; Statistische Grundlagen der Probenahme bei einfacher Aufteilung, Ausgabe 1991-03
 DIN 53803-2: Probenahme; Praktische Durchführung, Ausgabe 1994-03
 DIN 53803-3: Probenahme; Statistische Grundlagen der Probenahme bei zweifacher Aufteilung nach zwei gleichberechtigten Gesichtspunkten, Ausgabe 1984-06
 DIN 53803-4: Probenahme; Statistische Grundlagen der Probenahme bei zweifacher Aufteilung nach zwei einander nachgeordneten Gesichtspunkten, Ausgabe 1984-06
- DIN EN ISO 1973 DIN EN ISO 1973: Textilien - Fasern - Bestimmung der Feinheit – Gravimetrisches Verfahren und Schwingungsverfahren, Ausgabe 1995-12
- DIN EN ISO 5079 DIN EN ISO 5079: Textilien - Fasern - Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung an Spinnfasern, Ausgabe 1996-02
- DODSON 1997 Dodson, C.T.J.; Sampson, W.W.: Modeling a class of stochastic porous media. Applied Mathematics Letters 10(1997)2: S. 87-89
- DODSON et al. 1996 Dodson, C.T.J.; Sampson, W.W.: The effect of paper formation and grammage on its pore size distribution. Journal of Pulp and Paper Science 22(1996)5: S. J165-J169
- DRESCHER et al. 1997 Drescher, K.; Brodersen, C.M.: Bestimmung der Wettbewerbskraft von Hanf in Deutschland. Agrarwirtschaft 46(1997)2, S. 100-108
- DRIELING 1999 Drieling, A.: Probleme bei der Charakterisierung von Festigkeit, Feinheit und Länge von Bastfasern unter Berücksichtigung verschiedener Aufschlussverfahren. Abschlussbericht Forschungsvorhaben FK Textil e.V./AiF 11083, Faserinstitut Bremen e.V., 1999
- DRIELING et al. 1999 Drieling, A.; Bäumer, R.; Müssig, J.; Harig, H.: Möglichkeiten zur Charakterisierung von Festigkeit, Feinheit und Länge von Bastfasern. Technische Textilien 42(1999)4, S.261-262
- DUBBEL 1997 Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Hrsg.: Beitz, W., Grote K.-H., 19. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1997
- FNR 1997 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Hanf, Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema "Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf". Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 7, Teil. 1 und 2, Landwirtschaftsverlag, Münster 1997
- FNR 2000 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Studie zur Markt- und Preissituation bei Naturfasern (Deutschland und EU). Gülzow 2000
- FNR 2006 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Naturfaserverstärkte Kunststoffe. Gülzow 2006

- FREYE 1980 Freye, Th.: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdeschers. Forschungsbericht Agrartechnik MEG Heft 47, Dissertation, Universität Hohenheim 1980
- FÜRLI et al. 2003 Füll, C.; Munder, F.; Hempel, H.: Untersuchungsergebnisse zur Erprobung der Faseraufschluss-Pilotanlage des Instituts für Agrartechnik Bornim. In: Tagungsband 4. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, S. 38 und CD-ROM, Erfurt 2003
- FÜRLI et al. 2007 Füll, C., Pecenka, R.; Idler, Ch.; Grundmann, P.: Verfahren zur Gewinnung und Verarbeitung von Naturfasern. In: Tagungsband zum 15. Arbeitswissenschaftlichen Seminar, VDI-MEG-Arbeitskreis: Arbeitswissenschaften im Landbau, Universität für Bodenkultur Wien 2007
- GASSAN 1997 Gassan, J.: Naturfaserverstärkte Kunststoffe – Korrelation zwischen Struktur und Eigenschaften der Fasern und deren Composites. Dissertation, Universität (Gh) Kassel, Shaker Verlag 1997
- GLASER 1976 Glaser, F.: Korn-Stroh-Trennung unter besonderer Berücksichtigung eines umlaufenden Siebbandschüttlers (Zinkenbandschüttlers). Dissertation, Technische Universität München 1976
- GRAF et al. 2005 Graf T., Reinhold G., Biertümpfel A.; Zorn W.: Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Faserhanf. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena 2005
- GROBLER 1987 Grobler, W.H.: Untersuchungen zur Korn-Stroh-Trennung mit überlagerten Beschleunigungen im Planetentrommelsortierer. Forschungsbericht Agrartechnik MEG Heft 140, Dissertation, Universität Stuttgart 1987
- GSCHOßMANN 1995 Gschoßmann, J.: Hanf: Aufschlusstechnologie der Fa. Gebr. Bahmer Maschinenbau GmbH. In: Online-Proceedings Biorohstoff Hanf 1995, Frankfurt am Main 1995
- GUSOVIUS 2002 Gusovius, H.-J.: Stoffwandlungen und Umwelteinflüsse in Verfahrensketten für Faserhanf. Dissertation, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Nr. 390, Culliver Verlag, Göttingen 2002
- GUSOVIUS 2006 Gusovius, H.-J.: Dickenmessung an Hanf/Flachsfasern mit FibreShape. In: Online-Proceedings zum Workshop Naturfasercharakterisierung und -verarbeitung am Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam 2006
- HEINEMANN 1995 Heinemann, O.: Erntetechnik für Flachs - Entwicklung und Umsetzung eines Großgerätes für die thermische Einleitung einer Standröste. Dissertation, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Nr. 272, Kiel 1995
- HERZOG 1927 Herzog, O. (Hrsg.): Technologie der Textilfasern, Bd. V.2; Hanf und Hartfasern, Julius Springer, Berlin 1927
- HESCH et al. 1996 Hesch, R.; Meyer, A.; Beckmann, F.; Hes, K.: Hanf-Perspektiven für eine ökologische Zukunft, Eine realistische Betrachtung. TAOASIS-Verlag, Lemgo 1996

- HEUSER 1924 Heuser, O.: Der deutsche Hanf. Verlag S. Hirzel, Leipzig 1924
- HÖFFL 1985 Höfl, K. Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1985
- HOLT et al. 2002 Holt, G.A.; Baker, R.V.; Brashears, A.D.: Lint quality and turnout of stripper cotton when bypassing the second stage extractor. Applied Engineering in Agriculture 18(2002)4, S. 411-415
- HÜBNER 2000 Hübner, R.: Entwicklung eines Modells zur Auslegung einer rotierenden Reinigungseinrichtung im Mähdrescher. Dissertation, Technische Universität Dresden, w.e.b. Universitätsverlag, Dresden 2000
- HÜBNER et al. 1998 Hübner, R.; Bernhardt, G.: Grundlagen zur rotierenden Reinigung im Mähdrescher. VDI/MEG-Tagung Landtechnik Graching, VDI-Berichte Nr. 1449 (1998), S. 157-162
- ISENSEE et al. 1999 Isensee, E.; Heinemann, O.: Erntetechnik für Standröstflachs. Landtechnik 54(1999)2, S. 353-356
- JÜRGENS 2006 Jürgens: Betriebswirtschaftliche Planung zum Hanfanbau. Diplomarbeit, Fachhochschule Osnabrück 2006
- KARUS et al. 2006 Karus, M.; Ortmann, S.; Gahle, Ch.; Pendarovski, C.: Einsatz von Naturfasern in Verbundwerkstoffen für die Automobilproduktion in Deutschland von 1999 bis 2005. nova-Institut, Hürth 2006
- KAUP et al. 2003 Kaup, M.; Karus, M.; Ortmann, S.: Naturfasereinsatz in Verbundwerkstoffen in der deutschen und österreichischen Automobilindustrie, nova-Institut, Hürth 2003
- KOCH et al. 1966 Koch, P.-A.; Satlow G. (Hrsg.): Großes Textil-Lexikon, Fachlexikon für das gesamte Textilwesen. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1966
- KÖHLER et al. 2000 Köhler, E.; Bergner, A.; Odenwald, S.: Einfluss der Herstellung auf die Eigenschaften vernadelter Flachsfaser/Polypropylen-Vliese. Technische Textilien 43(2000)3, S.25-26
- LEHMANN 2002 Lehmann, T.: Low coast- Verfahren“ zur Herstellung von Hanffasern für die Vliesherstellung und optionaler Schäbenverwertung in Lehmelementen. In: Tagungsband International Conference "Production, Processing and Use of Natural Fibres", S. 63 und CD-ROM, Potsdam 2002
- LI et al. 2003 Li, J.; Webb, C.; Pandiella, S.S.; Campell, G.M.: Discrete particle motion on sieves – a numerical study using the DEM simulation. Powder Technology 133(2003), S. 190-202
- LÖFFLER et al. 1992 Löffler, F.; Raasch, J.: Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden 1992
- LÖWE 1998 Löwe, R.: Abschlussbericht "Inbetriebnahme der Flachsfaseraufbereitungsanlage "Flaksy". Institut für Umweltforschung Schlieben 1998

- MARQUART 1919 Marquart, B.: Der Hanfbau. Verlagsbuchhandlung Paul Parey, Berlin 1919
- MASTEL et al. 1998 Mastel, K.; Stolzenburg, K.; Seith, B.: Untersuchungen zu pflanzenbaulichen, erntetechnischen und ökonomischen Fragen des Anbaus von Faser- und Körnerhanf. Informationen für die Pflanzenproduktion Heft 7/1998. LAP Forchheim 1998
- MASTEL et al. 2002 Mastel, K.; Götz, G.: Prüfung des Prototyps einer Erntemaschine (Hanfvollernter) zur Nutzung von Hanfstroh und Körnern. in Tagungsband International Conference "Production, Processing and Use of Natural Fibres", S. 35-38 und CD-ROM, Potsdam 2002
- MCALISTER 2001 McAlister, D.D.: Gin Process Control and the resultant textile yarn and knit fabric quality. Applied Engineering in Agriculture 17(2001)6, S. 761-764
- MEINEL 1974 Meinel, A.: Klassierung auf Stößelschwingsiebmaschinen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Freiburger Forschungsheft A537, Dissertation, Bergakademie Freiberg 1974
- MEINEL 1999 Meinel, A.: Zu den Grundlagen der Klassierung siebschwieriger Materialien. Aufbereitungstechnik 40(1999)7, S. 313–327
- MEINEL 2001 Meinel, A.: Zur Klassierung siebschwieriger Schüttgüter – Grundlegende Betrachtungen. Aufbereitungstechnik 42(2001)7, S. 315-326
- MIECK 1999 Mieck, K. P.: Stand und Entwicklung des Einsatzes von Naturfasern für Composites, eine werkstofftechnische Betrachtung. In: Tagungsband 2. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Erfurt 1999
- MÖLLER 1996 Möller, J.: Mähdrescher Systemoptimierung am Beispiel des LEXION 480. VDI-Berichte Nr. 1297 (1996), VDI Verlag, Düsseldorf 1996
- MORGNER 1999 Morgner, F.W.: Aufbereitung nachwachsender Rohstoffe für den Einsatz in technischen Produkten. In: Tagungsband 2. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, CD-ROM, Erfurt 1999
- MUNDER et al. 2002 Munder, F.; Fürll, C.; Hempel, H.: Processing of natural fibre plants to starting materials for industrial applications. In: Tagungsband AGENG2002, Budapest 2002, S. 195-196
- MUNDER et al. 2003 Munder, F.; Fürll, C.; Hempel, H.: Advanced Decortication Technology for not retted Bast Fibres. Journal of Natural Fibers 1(2004)1, S. 49-65
- MÜSSIG 1999 Müssig, J.: Beurteilung der Eignung des Einsatzes von Hanffasern für den Automobilbereich aus technischer Sicht. schriftliche Fassung des Vortrags anlässlich des Technikseminars "Verbundwerkstoffe mit Hanffasern", Faserinstitut Bremen – FIBRE, Bremen 1999

- MÜSSIG 2001 Müssig, J.: Untersuchung der Eignung heimischer Pflanzenfasern für die Herstellung von naturfaserverstärkten Duroplasten – vom Anbau zum Verbundwerkstoff-. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 5 Nr. 630, VDI Verlag, Düsseldorf 2001
- MÜSSIG et. al. 1997a Müssig, J, Harig, H.: Herstellung von Hanfnadelfilzen; In: Tagungsband NRW–Hanftag 1997 „Hanf & Co. – Rohstoffe für eine nachhaltige Entwicklung“, Landwirtschaftskammer Westfalen–Lippe 1997, S. 34–46
- NÖTZOLD 1969 Nötzold, H.-D. (Hrsg.): Spinnereitechnische Grundlagen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1969
- NOWOTNY 2007 Hanf-Faser-Fabrik, Nowotny, R.: Hanfanbau. www.hanfaser.de, 19.07.2007, 10:05 Uhr
- PASILA 2004 Pasila, A.: The dry-line method in bast fibre production. Publications of Department of Agricultural engineering and household technology 15, Dissertation, Universität Helsinki 2004
- PATENT 1902 Reichspatent Nr. 144 399: Schüttelmaschine für Flachs, Hanf u. dgl.. Erfinder: P. Liebscher, Kaiserliches Patentamt Berlin 1902
- PATENT 1908 Reichspatent Nr. 211 295: Schüttelmaschine mit Schüttelnadeln zum Reinigen von Faserabfällen. Erfinder: C.O. Liebscher, Kaiserliches Patentamt Berlin 1908
- PECENKA 2004 Pecenka, R.: Cost Reductions in Natural Fibre Processing. Agrartechnische Forschung 10 (2004)5, S. E48-E53
- PECENKA 2006 Pecenka, R.; Fürll, Ch.; Gusovius, H.-J.: Praxisanforderungen an Fasermesstechnik für den Einsatz in der Naturfasergewinnung. In: Online-Proceedings zum Workshop Naturfasercharakterisierung und -verarbeitung am Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam 2006
- PECENKA et al. 2002 Pecenka R.; Fürll, Ch.: Effizientes Reinigen von Hanf- und Flachsfasern nach dem Prallaufschluss. In: Tagungsband International Conference "Production, Processing and Use of Natural Fibres", S. 57-58 und CD-ROM, Potsdam 2002
- PECENKA et al. 2003 Pecenka R.; Fürll, C.; Munder, F.: Experiences in fibre straw processing with a pilot plant using advanced technologies for decortication and fibre cleaning. In: Online-Proceedings NJF's 22nd Congress „Nordic Agriculture in Global Perspective“, Turku 2003
- PECENKA et al. 2007 Pecenka, R.; Idler, Ch.; Grundmann, Ph. ; Gusovius, H.-J.: Tube Ensiling of Hemp – Initial Practical Experience Agricultural Engineering Research 13(2007)1, S. 15-26
- POILLET 2000 Poillet, P.: LAROCHE Hemp Processing Line. In: Online-Proceedings BIORESOURCE HEMP 2000, Wolfsburg 2000
- RADOSAVLJEVIC 2002 Radosavljevic, L.: Experimental test and development of the hemp fibres cleaning machine. Diplomarbeit, Universität von Novi Sad 2002

- REGGE 1974 Regge, H. u. Reumschüssel, G.: Untersuchungen an einer neuartigen, kombinierten Dresch- und Abscheideeinrichtung. *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden*, 23(1974)2, S. 108-112
- REGGE 1980 Regge, H.: Möglichkeiten zur Steigerung der Siebleistung von Getreide-
reinigungsmaschinen. *agrartechnik* 30(1980)1, S. 18-20
- REUSSMANN 2006 Reußmann, T.: Mechanische Prüfung von Naturfasern für die
Kunststoffverstärkung. In: *Online-Proceedings zum Workshop
Naturfasercharakterisierung und -verarbeitung am Leibniz-Institut für
Agrartechnik, Potsdam 2006*
- RIETSEMA 1967 Rietsema, R.A.: Der Faseraustausch in der Karde. Dissertation,
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Verlag Leemann AG,
Zürich 1967
- SCHLÖBLER et al. 2000 Schlöbler, Th.; Knothe, J. Entwicklung naturfaserverstärkter Kunststoff-
bauteile für das Kfz-Interieur und -Exterieur; In: *Online-Proceedings
BIORESOURCE HEMP 2000, Wolfsburg 2000*
- SCHMID 2006 Schmid, H.: Characterization of High Aspect Ratio Objects Using the
Powdershape Quantitative Image Analysis System. In: *Online-
Proceedings zum Workshop Naturfasercharakterisierung und -verarbei-
tung am Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam 2006*
- SCHÖNEFELD 1955 Schönefeld, H.; Bastfasern, Eine Faserstofflehre. VEB Fachbuchverlag,
Leipzig 1955
- SCHROTH 1995 Schroth, T.: Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Flachsröste.
Dissertation, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Nr. 263,
Hohenheim 1995
- SCHUBERT 1975 Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Bd. 1,
3. Aufl., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1975
- SCHUBERT 1990 Schubert, H.: Mechanische Verfahrenstechnik, 3. Aufl., Deutscher
Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1990
- SEEGER 2006 Seeger, S.: Auswertesoftware FiberScanner zur Faserlängenmessung. In:
*Online-Proceedings zum Workshop Naturfasercharakterisierung und -
verarbeitung am Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam 2006*
- SIEBENEI- Siebeneicher, Franz: Die Hanfspinnerei und Bindfadenfabrikation. Aegis
CHER 1956 Verlag, Ulm 1956
- SOLDINGER 1999 Soldinger, M.: Interrelation of stratification and passage in the screening
process. *Minerals Engineering* 12(1999)5, S. 497-516
- SOLDINGER 2000 Soldinger, M.: Influence of particle size and bed thickness on the
screening process. *Minerals Engineering* 13(2000)3, S. 297-312
- SOLDINGER 2002 Soldinger, M.: Transport velocity of a crushed rock materila bed on a
screen. *Minerals Engineering* 15(2002) S. 17-27

- SONNENBERG 1970 Sonnenberg, H.: Korn-Stroh-Trennung mit Doppelkurbel-Hordenschüttlern. Grundlagen der Landtechnik 20(1970)6, S.161-166
- STEEGER 2004 Steeger J.: Nachhaltige Entwicklung durch nachwachsende Rohstoffe? Dissertation, Rheinische-Friedrich-Wilhelms Universität Bonn 2004
- STIEß 1995 Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 1. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1995
- TECHGZ 1988 Lehrbücher für den Facharbeiter für Textiltechnik (Autorenkollektiv): Technologie der Garn und Zwirnerstellung. Lehrbücher für den FA für Textiltechnik, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1988
- TU CHEMNITZ 2003 Vorlesungsskript zur Lehrveranstaltung Rechnergestützte Getriebeauslegung; TU Chemnitz 2003
- VDI 2221 VDI-Richtlinie 2222: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure 1993
- VDI 2222 VDI-Richtlinie 2222: Blatt 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Blatt 2: Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. Verein Deutscher Ingenieure 1982
- VDI 2235 VDI-Richtlinie 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren. Verein Deutscher Ingenieure; 1987
- VDI 2729 VDI – Richtlinie 2729: Modulare kinematische Analyse ebener Gelenkgetriebe mit Dreh- und Schubgelenken. Verein Deutscher Ingenieure 2003
- VOLLHEIM et al. 2001 Vollheim, B.; Budzler, V.; Gerlach, G.; Mägel, M.; Pusch, T.; Offermann, P.: Fremdstofferkennung in der Baumwollspinnerei unter Echtzeitbedingungen. Melliand Textilberichte 4(2001), S. 248-251
- WESSEL 1967a Wessel, J.: Grundlagen des Sieben und Sichtens, Teil I: Theoretische Darstellung und Behandlung des Klassierens. Aufbereitungstechnik 8(1967)2, S. 53-62
- WESSEL 1967b Wessel, J.: Grundlagen des Sieben und Sichtens, Teil II: Das Siebklassieren. Aufbereitungstechnik 8(1967)4, S. 167 - 180
- WESSEL 1967c Wessel, J.: Grundlagen des Sieben und Sichtens, Teil III: Das Sichten, Aufbereitungstechnik 8(1967)8, S. 417-428
- WILKERSON et al. 2001 Wilkerson, J. B.; Kirby, J. S.; Hart, W.E.: Design and evaluation of a cotton flow rate sensor. Trans. of ASAE 44(2001)6, S. 1415-1420