

Optimieren der Reinigung von Hanf- schäben im axialen Fluss

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

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Carsten Lühr

aus Rostock

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Ay

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Fürll

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Dezember 2016

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB). Finanziell wurde das Projekt im Rahmen des Programms ZIM - Kooperationen gefördert. Dem BMWi sei deshalb an dieser Stelle gedankt.

Wissenschaftlich angeregt und betreut wurde das Projekt von Dr.-Ing. R. Pecenka und Prof. Dr.-Ing. habil. P. Ay. Der gewährte Freiraum bei der Bearbeitung und die gleichermaßen fordernde wie fördernde Arbeitsatmosphäre in der Abteilung 3 des ATB boten günstige Bedingungen für die Durchführung. Durch vielfältige Aufgabenstellungen aus Forschung und Praxis konnte ich mich außerdem fachlich und persönlich sehr gut weiterentwickeln. Meinen Betreuern gebührt deshalb an dieser Stelle besonderer Dank.

Wertvolle Hilfe erfuhr ich insbesondere von Dr. H.-J. Gusovius bei der Literaturrecherche sowie Dr. T. Hoffmann bei der Programmierung des Simulationsmodells in MATLAB® und von Studenten und Praktikanten durch Mithilfe bei Versuchen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ch. Fülll danke ich für die vielen wertvollen fachlichen sowie auch privaten Gespräche und als wegweisenden Ideengeber zur Entwicklung des Projekts.

Herzlicher Dank gilt hier besonders Dr.-Ing. H. Schemel und Dipl.-Ing. T. Teodorov die mich bei der Bewältigung des Arbeitsplans mit der Versuchsmaschine, in einem nur begrenzten zur Verfügung stehenden Versuchszeitraum bei widrigen Klimabedingungen im Winter, unermüdlich unterstützt haben.

Besonders haben ebenso die Kolleginnen und Kollegen der Abteilung 3 durch ihre große Hilfsbereitschaft, Zusammenarbeit und kritische Diskussion zum Ergebnis dieser Arbeit beigetragen.

Ganz besonderen Dank gilt meiner Familie, die mich unterstützend bei den Höhen und Tiefen in der Anfertigung dieser Arbeit begleitet und auf viele gemeinsame Stunden verzichtet hat.

Potsdam, den 02. August 2016

Carsten Lühr

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Inhaltsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis	VI
Zusammenfassung	IX
1 Einleitung	1
2 Zielstellung der Arbeit	3
3 Hanf als nachwachsender Rohstoff in Deutschland und Europa	5
3.1 Die Hanfpflanze	6
3.2 Gewinnbare Pflanzenteile vom Hanf und deren Anwendungsbereiche	9
3.2.1 Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Schäben	10
3.3 Schäben als Nebenprodukt bei der mechanischen Gewinnung von Hanffasern	12
4 Die Schäbenreinigung	15
4.1 Aufgabe und Funktionsstruktur der Schäbenreinigung	15
4.2 Eigenschaften des Eingangsmaterials	16
4.3 Aufbau typischer Aufschlussanlagen und Reinigungslinien	21
4.4 Stand der Technik in der Schäbenreinigung	24
4.5 Anforderungen an die Schäbenreinigung	28
5 Schäbenreinigung im axialen Fluss	30
5.1 Stand der Technik	30
5.2 Erweiterte Anforderungen an die Schäbenreinigung im axialen Fluss	33
5.3 Präzisierte Aufgabenstellung und Neuheitswert einer optimierten Schäbenreinigung im axialen Fluss auf Basis eines Axialfraktionierers	34
5.4 Maschinenkonzeption eines Axialfraktionierers	35
5.5 Axialfraktionierer-Versuchsstand	37
5.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung	37
5.5.1.1 Aufbau eines Kondensers	41
5.5.2 Grundlegende zu erwartende Versuchsergebnisse	41
5.6 Siebraum und Paddelgeometrie im Hinblick auf den Materialtransport und das Abscheidevermögen	43
5.6.1 Varianten der Siebflächengestaltung	43
5.6.2 Einflussparameter des Materialtransports	44
5.6.2.1 Vorschubwinkel β in der Axialebene	48

5.6.2.2	Vorschubwinkel γ in der Horizontalebene	50
5.6.3	Zusammenhang der Vorschubwinkel in Abhängigkeit von Lauf- und Steigungswinkel	52
5.6.4	Wirkende Kräfte beim Abwurf	53
5.6.5	Funktionsanalyse der Paddelfunktion	54
5.6.6	Konstruktion eines Paddels zur optimierten Siebflächenräumung.....	55
5.7	Optimieren der Partikelbewegung im Arbeitsraum des Axialfraktionierers.....	56
5.7.1	Funktionsanalyse zur Abwurfbewegung und Staubabsaugung im Arbeitsraum	56
5.7.2	Theorie der Partikelbewegung im Schwerfeld	57
5.7.3	Konstruktion eines Versuchsstandes zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit..	60
5.7.4	Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit	63
5.7.5	Versuchsergebnisse	64
5.8	Schlussfolgerungen für die Modellierung	68
6	Modellentwicklung für Wurf- und Gutbewegungen in einem Axialfraktionierer.....	70
6.1	Modellierung von Partikelbewegungen in Schneckenförderern	70
6.2	Modellierung der Partikelbewegung in einem Axialfraktionierer.....	71
6.2.1	Kinematik und Kinetik des Materialtransports.....	71
6.2.2	Schräger Wurf.....	75
6.2.3	Numerische Umsetzung der entwickelten Bewegungsgleichungen	76
6.2.3.1	Simulation der Wurfbewegung von Schäbenpartikeln	79
6.2.3.2	Simulation der Wurfbewegung von Faserflocken	85
6.2.3.3	Zusammenfassung der Parameterstudie	91
6.2.4	Berechnung des Massestroms.....	92
7	Modellentwicklung für den Aussiebungsvorlauf.....	98
7.1	Ansatz für das Abscheideverhalten der Schäben	98
7.2	Bestimmung der Modellparameter.....	100
8	Bewertung des Massestrommodells sowie des Aussiebungsvorlaufs.....	102
8.1	Versuchsdurchführung und –ergebnisse.....	102
8.1.1	Einfluss des Massestroms.....	103
8.1.2	Einfluss der Paddelanordnung auf den Aussiebungsvorlauf	104
8.1.3	Einfluss der Drehzahl auf den Aussiebungsvorlauf	106
8.1.4	Qualität der Austragsfraktionen.....	108
8.2	Modellvalidierung.....	111
9	Einsatz des Axialfraktionierer-Gesamtmodells im Konstruktions- und Entwicklungsprozess.	115
9.1	Konstruktionstechnische Überarbeitung des Axialfraktionierers	115

9.2	Auslegung eines anforderungsgerechten Axialfraktionierers	115
9.3	Bestimmung der Material- und Betriebsparameter für die Simulation	119
9.3.1	Simulationsergebnisse	119
9.4	Umsetzung der Konstruktionsvorgaben in einem Prototypen	123
9.5	Fazit	127
10	Fehlerquellen	128
11	Ausblick	130
12	Anhang	131
13	Literaturverzeichnis	133

Symbolverzeichnis

I...IV		Messachse
A_p	mm^2	Körperquerschnittsfläche
A_f	cm^2	Füllungsfläche
a_p		Anzahl Paddel pro Ganghöhe
a_s		Anzahl Paddelschnecken pro Welle
b	m	Strecke
c_w		Widerstandsbeiwert
C_A		Abscheidekonstante
d	m	Durchmesser
d_K	mm	Kugeldurchmesser
d_{50}	mm	Medianwert
e_p		Eingriffsbreite pro Paddel
f	s^{-1}	Frequenz
F	N	Kraft
F		Fehler
F_A	N	Auftriebskraft
F_G	N	Gewichtskraft
F_H	N	Hangabtriebskraft
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Reibkraft
F_W	N	Luftwiderstandskraft
F_Z	N	Fliehkraft
F_{H_Z}	N	zusätzliche Hangabtriebskraft am Paddel durch die Zentrifugalkraft hervorgerufen
F_{N_Z}	N	zusätzliche Normalkraft am Paddel durch die Zentrifugalkraft hervorgerufen
F_{R_Z}	N	zusätzliche Reibkraft am Paddel durch die Zentrifugalkraft hervorgerufen
g	m s^{-2}	Fallbeschleunigung
G	m	Ganghöhe einer Helix
G_p	m	Ganghöhe einer Paddelschnecke
h	mm	Segmenthöhe
h	m	Strecke
h_M	m	Höhe Maschinenraum
k	kg m^{-1}	materialspezifischer Faktor
l	m	Strecke
l	mm	Füllungshöhe über Siebboden
l	mm	Sieblochmaß
m	kg	Masse
M		Motor
\dot{m}	t h^{-1}	Massestrom
n	min^{-1}	Umdrehung
n_s		Anzahl der Siebberührungen
n_{w1}	min^{-1}	Drehzahl Welle 1
n_{w2}	min^{-1}	Drehzahl Welle 2
p		Durchtrittswahrscheinlichkeit
p_{n_s}		Abscheidewahrscheinlichkeit
P		Position des Partikels
P'		Position des Partikels nach Bewegung
q	m^{-1}	Materialkonstante
r	mm	Radius
r_p	mm	Partikelposition auf dem Radius
r'	mm	Radius Oberkannte Füllungsfläche
R	%	Restschäben
s	mm	Kreissehne

s	m	Abscheideweg
t	s	Zeit
t_{Paddel}	s	benötigte Zeit zum Erreichen der Partikeleintrittsposition in den Paddelflugkreis
t_{Partikel}	s	benötigte Zeit zum Eintritt in den Paddelflugkreis
t_{Schritt}	s	Zeitschritt für Iteration
t_u	s	Zeit für eine Umdrehung
t_1, t_2	mm	Sieblochmaße
T_A	s	Zeitkonstante
u		Anzahl Umdrehungen
v	m s^{-1}	Geschwindigkeit
v_0	m s^{-1}	Anfangsgeschwindigkeit
v_a	m s^{-1}	axiale Fördergeschwindigkeit
v_u	m s^{-1}	Umfangsgeschwindigkeit
V_P	m^3	Partikelvolumen
\dot{V}	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	Volumenstrom
w	m	Strecke
w	mm	Sieblochmaß
w_S	m s^{-1}	Sinkgeschwindigkeit
x	m	x-Koordinate
xy		Radialebene
xz		Horizontalebene
y	m	y-Koordinate
yz		Vertikalebene in radialer Richtung
z	m	z-Koordinate
α	°	Steigungswinkel des Paddel
α	°	Öffnungswinkel für Füllungsfläche
α'	°	Öffnungswinkel Oberkante für Füllungsfläche
β	°	Vorschubwinkel (Vertikalebene in axialer Richtung)
δ	°	Verdrehungswinkel
γ	°	Vorschubwinkel (Horizontalebene)
$\Delta\varphi$	°	Änderung des Laufwinkels
φ	°	Laufwinkel, Neigungswinkel schiefe Ebene
φ_P	°	Positionswinkel des Partikels
μ		Reibwert
ρ_F	kg m^{-3}	Dichte des strömenden Mediums
ρ_P	kg m^{-3}	Partikeldichte
ρ_S	kg m^{-3}	Schüttdichte
ρ_{SFG}	kg m^{-3}	Schüttdichte des Schäben-Faser-Gemischs
ω	s^{-2}	Winkelgeschwindigkeit
Φ	%	Füllungsgrad

Indizes

1, 2, 3	Motorkennzeichnung, Zeitpunkte
a	axiale Richtung
j	Zählvariable
k	Zählvariable
n	Laufvariable
rel	relativ
SFG	Schäben-Faser-Gemisch
t	tangentiale Richtung
th	theoretisch
W1	Welle 1
W2	Welle 2

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V.
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
bzw.	beziehungsweise
d. h.	das heißt
dp	doppelte Paddelanordnung
FM	Feuchtmasse
L	Materialkategorie: Hanf leicht geröstet
ne	nacheilende Paddelanordnung
N	Materialkategorie: Fasernessel
NFC	NFC GmbH Nettle Fibre Company
S	Materialkategorie: Hanf stark geröstet
SFG	Schäben-Faser-Gemisch
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
ve	vorauselende Paddelanordnung
VOFA	VOFA Vogtlandfaser GmbH & Co. KG
V	Materialkategorie: Hanf VOFA
V/H	Materialkategorie: Hanf VOFA/Hammermühle
W	Materialkategorie: Hanf über Winter gestanden
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
zw.	zwischen

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation widmet sich der Reinigung von Schäben-Faser-Gemischen als Nebenprodukt der Fasergewinnung aus Hanfstroh. In diesem Zusammenhang stellt die Arbeit einen Versuch dar, wesentliche Schritte der Verarbeitung von Naturfaserstroh bis hin zur Rohfaser herauszuarbeiten, um einen Überblick verschiedener Typen von Faseraufschlussanlagen im Allgemeinen und den Austragsstellen von potentiell zu reinigenden Schäben-Faser-Gemischen im Speziellen gewinnen zu können. Ziel war es, diese für den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb wichtigen Gemische in seine Hauptbestandteile Schäben und Fasern zu separieren und den darin enthaltenen Staub zu entfernen. Das Separieren und damit Reinigen des Gemischs erfolgte nach einem völlig neuartigen Prinzip auf Basis einer Paddelschnecke und einer dazu abgestimmten Siebfläche. Die Paddelschnecke wurde zunächst detailliert analysiert und verschiedene Varianten der Paddelanordnung aufgezeigt. Die für eine Modellierung der Gutbewegung von Schäben entscheidende Luftwiderstandskraft wurde anhand des ermittelten Materialparameters Schwebegeschwindigkeit bestimmt. Ein numerisches Modell zur Partikelbewegung beim Abwurf vom Paddel zeigt die Interaktion von Paddel und Partikel für verschiedene Konstruktions- und Betriebsparameter (Drehzahl, Steigungswinkel, Paddelanordnung, Paddelbreite). Ausgehend von den ermittelten optimalen Einstellungen kann der maximal zu erreichende Massestrom über dem Sieb auf Basis der Verschiebewegung einer Schäben-Faser-Gemischportion berechnet werden. Die ermittelten Masseströme bilden die Grundlage der Modellierung des Abscheideverhaltens von Schäben über einem Sieb. Die Ergebnisse der Modellierung wurden anhand einer Versuchsmaschine zur Reinigung von Schäben-Faser-Gemischen in einem Aussiebungsvorgang validiert. Durch geeignete Versuchsaufbauten konnte der ausgetragene Masseanteil entlang des Abscheidewegs für kleine Abschnittswerten von nur 30 cm bestimmt und zusätzlich eine Qualitätsanalyse der sich in den Versuchen einstellenden Gesamtfractionen vorgenommen werden.

Mit der vorliegenden Arbeit konnten wesentliche Zusammenhänge, zwischen Konstruktions- und Betriebsparameter einer Paddelschnecke und dem Abscheideverhalten von Schäben über einem Sieb aufgezeigt werden. Es wurde somit die Grundlage geschaffen, mit den entwickelten Modellen zum Massestrom sowie dem Aussiebungsvorgang, bereits frühzeitig auf den Entwicklungsprozess einer Reinigungsmaschine Einfluss nehmen zu können. Eine bedarfsgerechte Maschinengestaltung (Sieblänge) für die gewünschten Anforderungen (Abscheidegrad) wurde somit ermöglicht. Dies kann sich für den Maschinenbaukonstrukteur als ein wesentlicher Vorteil hinsichtlich Entwicklungszeit und -kosten herausstellen. Für die hanfverarbeitende Industrie wurde eine Reinigungsmaschine mit minimalem technischem Aufwand, bestehend aus nur einer Prozessstufe und damit verbundene geringe Anschaffungs- sowie Betriebskosten für den Anlagenbetreiber, zur Verfügung gestellt. Neben der Reinigung der Schäben wurden die im Gemisch enthaltenen höherwertigen Kurzfasern mit einem geringen Restschäbenanteil zurückgewonnen und damit die Anlagenökonomie weiter verbessert. Erstmals konnten die Schäben-Faser-Gemische qualitativ hochwertig mit einem Massestrom von bis zu 3 t h^{-1} in gereinigter Form dem Markt für eine Weiterverarbeitung angeboten werden.

1 Einleitung

Nach jahrelangem Rückgang des Hanfanbaus in Deutschland konnte in den letzten Jahren wieder eine Zunahme des Hanfanbaus verzeichnet werden. So stieg die Anbaufläche in Deutschland von zwischenzeitlich nur noch 500 ha wieder auf 1500 ha im Jahr 2015 [EIHA, 2015]. Europaweit konnten sogar 25.224 ha im Jahr 2015 erreicht werden [EIHA, 2015]. Im Jahr 2011 wurde mit ca. 8000 ha Anbaufläche der niedrigste Wert seit 1994 verzeichnet, nimmt aber seitdem wieder stetig zu und lässt für 2016 einen weiteren Anstieg in Europa erwarten [Carus et al., 2016]. Immer mehr europäische Länder starten mit einem Anbau von Hanf und bekunden Interesse an Aufschluss- bzw. Verarbeitungstechnologien. Neben Europa sind China (mehr als 80.000 ha im Jahr 2008) und Canada (ca. 44.000 ha im Jahr 2014) die größten Hanfproduzenten [Müssig, 2010], [Alberta Agriculture and Forestry, 2015]. Weiterhin wurden in Canada im Jahr 2015 mehr als 640.000 ha Flax allein für die Samengewinnung angebaut [Agriculture and Agri-Food Canada, 2016]. Moderne Faseraufschlussanlagen für Hanf wären in der Lage, auch dieses Stroh zu verarbeiten und somit könnte sich für die Landwirte ein zusätzliches interessantes Einkommen generieren lassen.

Der Rückgang der Anbauflächen war rückführbar auf den Wegfall der gesonderten EU-Beihilfen für den Hanf- und Flachs-anbau [Europäische Union, 2000a] und die Angleichung der Flächenbeihilfe an das Niveau für Getreide im Jahr 2001. Später wurden auch die Beihilfen für die Erstverarbeitung von Hanf [Europäische Union, 2000b] im Jahr 2008 eingestellt. Infolgedessen ging die Zahl der bestehenden Faseraufschlussanlagen zurück. Zuletzt stellte auch die lange als Vorzeiganlage geltende Firma Hemp Technology Ltd. ihren Betrieb in England im Jahre 2013 ein. Ein kostendeckender Anlagenbetrieb ist im Bereich des Faseraufschlusses oft nur schwer zu erreichen.

26.000 Tonnen produzierter Hanffasern konnten im Jahr 2010 in Europa verzeichnet werden [Carus, 2015]. Ein Großteil der in Europa produzierten Fasern mit ca. 55 % (2010) findet Verwendung im Zellstoffbereich [Carus, 2015]. Der Dämmstoffbereich folgt mit ca. 26 % (2010) [Carus, 2015]. Dabei ist zu beachten, dass nur 0,5 % der verwendeten Naturfasern im europäischen Dämmstoffmarkt aus Hanf und Flax bestehen. Der dritte große Anwendungsbereich mit ca. 14 % (2010) sind die Verbundwerkstoffe, vor allem im Automobilbereich eingesetzt [Carus, 2015]. Auch hier besteht nur ein geringer Teil der eingesetzten Fasern aus Hanf mit 5 % (2012), bezogen auf die gesamte Einsatzmenge von Naturfasern für Verbundwerkstoffe im Automobilbereich [Carus et al., 2014]. Zunehmend ist der Markt an Hanfprodukten, insbesondere Samen, für den Lebensmittelsektor [Hempro Int., 2015]. Eine weitere Begründung in der aktuellen Zunahme des Hanfanbaus liegt wahrscheinlich auch an der Nachfrage nach dem Hanfinhaltsstoff Cannabidiol (CBD) für pharmazeutische Produkte. CBD ist neben THC (Delta-9-Tetrahydrocannabinol) ein zweites und im Vergleich in größeren Mengen vorhandenes Canabinoid vom Industriehanf. Für den Anbau zugelassene Sorten müssen einen THC Anteil von weniger als 0,2 % aufweisen und im Sortenkatalog der Europäischen Union für landwirtschaftliche Pflanzenarten aufgeführt sein. CBD lässt sich als Extraktstoff vor allem aus den Blättern und Blüten gewinnen und weist keine psychoaktiven Wirkungen auf. Beim mechanischen Aufschluss des oberen Pflanzendrittels konnte in der Staubfraktion für verschiedene Hanfsorten ein CBD Gehalt von 0,78 bis 1,89 Masse-% (TM) ermittelt werden [Cappelletto et al., 2001]. Hier wird ein großes Potential in der therapeutischen Behandlung verschiedenster Krankheiten und Symptome, wie zum Beispiel Angststörungen, Schizophrenie, Epilepsie, Diabetes, Krebs, Entzündungen und Schmerzen gesehen [Grottenhermen, 2015].

Bei der Verarbeitung von Hanfstroh und der Gewinnung der Fasern fällt mengenmäßig der größere Anteil von bis zu 60 Masse-% in Form sogenannter Schäben an. Damit werden die in Faseraufschlussanlagen in kleinere Fragmente gebrochenen verholzten Kernbereiche der Pflanzenstängel bezeichnet. In gereinigter Form werden sie vor allem im Einstreubereich für Kleintiere und Pferde bzw. Baubereich eingesetzt. Immer wieder wurden von verschiedenen Herstellern Schäbenplatten, als Leichtbauplatten auf dem Markt angeboten. Die Herstellung war im Vergleich zu einer handelsüblichen Spanplatte noch vergleichsweise teuer und eine gesicherte gleichbleibend hohe Verfügbarkeit an gereinigten Hanfschäben war aufgrund der sinkenden Anbauflächen nicht gegeben. Mit der Zunahme der Hanfanbauflächen könnte dieser Sektor wieder interessant werden, da bei der Verarbeitung des Hanfes wieder größere Mengen an Schäben anfallen werden.

Am ATB wurde eine komplette Faseraufschlussanlage entwickelt und 2008 in die Industrie überführt (Abb. 1.1). Das Kernstück dieser Anlage bildet die neu entwickelte Aufschlussmaschine (7) die nach dem Prinzip des Prallaufschlusses arbeitet. Nach [Fürl et al., 2007] beträgt der Massestrom bis zu 3 t h^{-1} . Neben der hier gezeigten Faserreinigung (9+10) wurde aufgrund des geringen Massestroms am ATB auch eine leistungsfähigere faserschonendere Reinigung auf Basis einer Kammschüttel entwickelt [Pecenka, 2008]. Noch nicht ausgereift war eine Schäbenreinigung (13) mit der das Nebenprodukt qualitativ hochwertig aufbereitet werden kann.

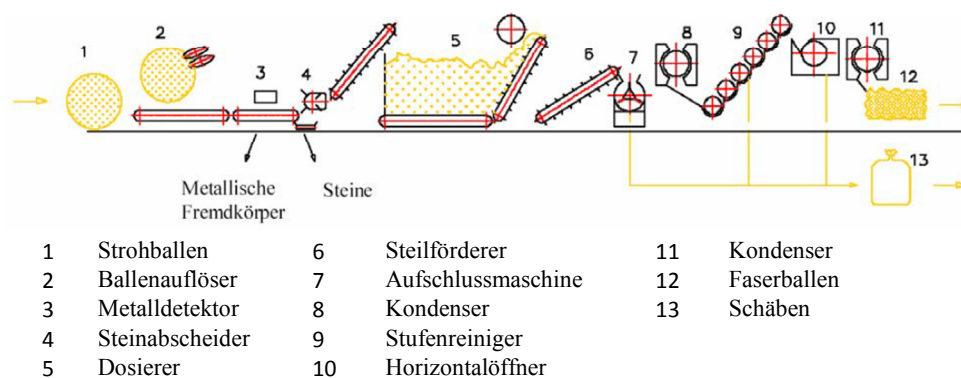


Abb. 1.1: Technologisches Schema der Pilotanlage [Fürl et al., 2003]

Aufgrund der noch fehlenden Reinigungstechnologie für Schäben und mit dem Hintergrund steigender Anbauflächen und damit in größeren Mengen anfallender Schäben zeigt sich die Notwendigkeit eines leistungsfähigen und effektiven Verfahrens in diesem Bereich.

2 Zielstellung der Arbeit

Nach [Nötzold, 1969] besteht die Funktion der Faserreinigung vorrangig im Separieren der Schäben und des Staubs aus den Fasern. Verbunden mit einer Faserreinigung ist aber auch immer ein Faserfehlaustrag aus dem zu reinigenden Gutstrom. Somit bildet sich neben den gewonnenen gereinigten Fasern ein Nebenprodukt, welches als Schäben-Faser-Gemisch bezeichnet wird und zusätzlich mit Staub verunreinigt ist. Ausgehend vom eingesetzten Hanfstroh kann der Masseanteil dieses Gemisches unabhängig von der Aufschlusstechnologie und der nachfolgenden Faserreinigung bis zu 70 Masse-% betragen. Hohe Investitionen, laufende Kosten derzeitiger Anlagen und zu gering erzielte Verkaufspreise für Naturfasern erfordern ein zusätzliches Aufbereiten der Nebenprodukte. Die dann besser gereinigten Schäben können für höherwertige Anwendungen als bisher möglich angeboten werden. Zudem hat sich durch die abgeschafften Beihilfen der EU für den Anbau und die Erstverarbeitung von Naturfasern die Notwendigkeit für das wirtschaftliche Betreiben von Faseraufschlussanlagen verstärkt.

Traditionell kommen für die Reinigung von Schäben-Faser-Gemischen vorrangig Trommelsiebe bzw. Reinigungsmaschinen aus der Baumwollindustrie zum Einsatz. Ein Auflösen der Faserflocken, in denen die Schäben meist verhakt sind, kann mit diesen Maschinen nicht erzielt werden. Um eine effektive und damit kostendeckende sowie auch qualitativ hochwertige Reinigung zu erreichen wurde am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. ein völlig neuartiges System zur Schäbenreinigung entwickelt und patentiert (Abb. 2.1).

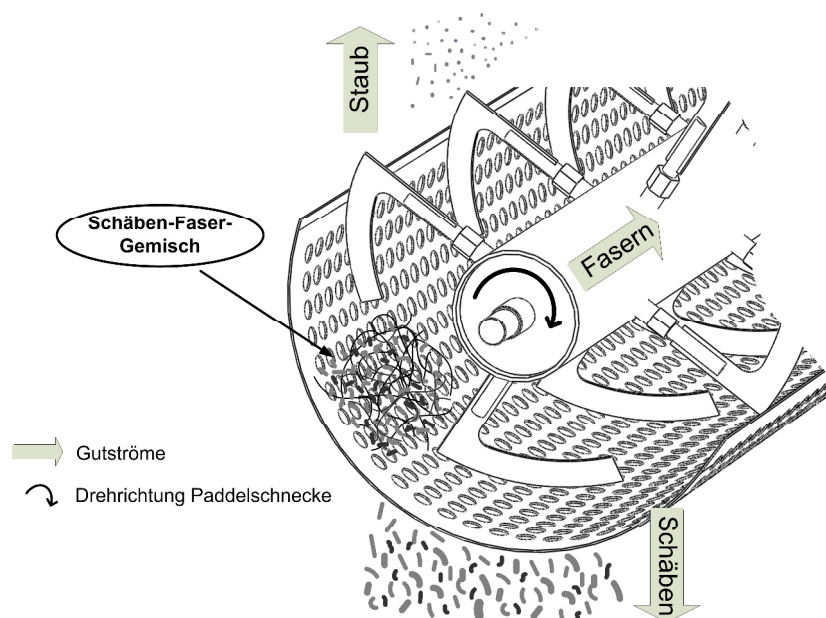


Abb. 2.1: Paddelschnecke über einer Siebfläche zur Reinigung von Schäben aus der Naturfasergewinnung

Das Prinzip basiert auf einer Paddelschnecke mit einer auf diese Schnecke abgestimmten halbkreisförmigen Siebfläche und einer quer zum axialen Vorschub verlaufenden Absaugung. Mit diesem einfachen sowie auch robusten Aufbau lassen sich die Schäben-Faser-Gemische effizient aufbereiten und in ihre Hauptbestandteile Schäben, Fasern und Staub separieren bzw. reinigen.

Aufbauend auf dem neuartigen Reinigungsprinzip waren detaillierte Untersuchungen zum Aufbau einer Paddelschnecke sowie den unterschiedlichen Anordnungsvarianten und deren Einfluss auf das Massestromverhalten des zu transportierenden Gutes notwendig. Grundlegende Zusammenhänge und die Wirkungsweise in der Reinigung/Aufbereitung von Schäben-Faser-Gemischen waren hierbei zu analysieren. Zielstellung der vorliegenden Arbeit war die Bereitstellung von Grundlagenwissen für die konstruktive Umsetzung des Reinigungsprinzips in einer Industriemaschine, die der Anforderung moderner Faseraufschlussanlagen mit Verarbeitungskapazitäten von bis zu 5 t Hanfstroh pro Stunde gerecht wird. Die Aufbereitung des Schäben-Faser-Gemischs in nur einer Prozessstufe ist als besonderer Wunsch hervorzuheben.

Um dieses Ziel zu erreichen, waren folgende Hauptarbeitsschritte notwendig:

- Agrartechnische Analyse/Auswertung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse, Anforderungen des Marktes, relevante Entwicklungstrends der Fasergewinnung sowie eigener vorliegender Erfahrungen
- Agrartechnische Analyse/Auswertung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse, Anforderungen des Marktes, relevante Entwicklungstrends der Fasergewinnung sowie eigener vorliegender Erfahrungen
- Erarbeitung von Vorgaben für das Trennverfahren hinsichtlich der
 - relevanten Verfahrensparameter der Fasergewinnung, insbesondere der Anforderungen an die Qualität der Schäben und vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Anforderungen der Naturfaserwirtschaft
 - abzuleitenden Prozessparameter für eine möglichst optimale Trennung und Klassierung von Schäben und Fasern
- Bestimmen der Materialeigenschaften von Schäben
- Modellieren des Wirkprinzips einer Paddelschnecke für die Reinigung eines Schäben-Faser-Gemischs und der darauf aufbauenden Maschine mit dem Ziel der Analyse:
 - des Massestroms in Abhängigkeit von Betriebs- und Konstruktionsparametern
 - des Trennverhaltens von Schäben und Fasern
- Durchführen von Versuchen zur Analyse des Einflusses natürlicher Schwankungen der Rohstoffeigenschaften
- Validieren der Modelle für Massestrom- und Trennverhalten
- Optimieren der Versuchseinrichtung zu einer Industriemaschine

3 Hanf als nachwachsender Rohstoff in Deutschland und Europa

Der in Deutschland seit 1996 wieder zugelassene Nutz- oder Industriehanf zählt zur Hanfart *Cannabis sativa*. Der indische Hanf (*Cannabis indica*) wiederum wird für die Herstellung von Drogen bzw. Arzneimitteln verwendet und ist für den landwirtschaftlichen Anbau verboten.

Aktuell sind in Deutschland 49 Sorten (2015) zum ständigen Anbau zugelassen [BLE, 2015]. Diese Sorten weisen einen THC-Gehalt von weniger als 0,2 % auf.

Hanf ist eine jahrhundertealte Nutzpflanze, mit vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten. Schon seit dem Mittelalter diente Hanf als Rohstoff für die Herstellung von Seilen, Segeltuch, Bekleidungstextilien, Papier, Baustoffen und Ölprodukten [Hesch et al., 1996].

Aufgrund der hohen Zugfestigkeit der Fasern war er für die Herstellung von Seilen sehr gefragt. Die Verwendung für Segeltücher liegt vor allem in der Widerstandsfähigkeit gegenüber Salzwasser sowie einer geringen Wasseraufnahme im Vergleich zu Baumwolle begründet.

Baumwolle konnte aber bereits um 1800 kostengünstiger produziert werden als Hanf. Mit der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert wurden zudem immer mehr neue Produkte entdeckt, die kostengünstiger und in Massenproduktion hergestellt werden konnten. Dies führte dazu, dass am Anfang des 20. Jahrhunderts die Hanfverarbeitung fast vollständig zum Erliegen kam. Kurzzeitig konnte der Hanfanbau während der beiden Weltkriege einen Aufschwung verzeichnen. Hier war eine wirtschaftliche Unabhängigkeit von Importen wichtig, um zum Beispiel Planen, Uniformen und Seile für die Kriegsmaschinerie produzieren zu können.

Im Jahr 1982 kam es dann zum völligen Verbot des Hanfanbaus durch das Betäubungsmittelgesetz in Deutschland und erst 14 Jahre später dann die Wiedezulassung der THC-armen Hanfsorten. Die Abb. 3.1 zeigt die beschriebene Entwicklung der Anbauflächen von Deutschland in den letzten 100 Jahren im Vergleich mit Frankreich und Italien. So kam es in Frankreich nie zu einem völligen Anbauverbot.

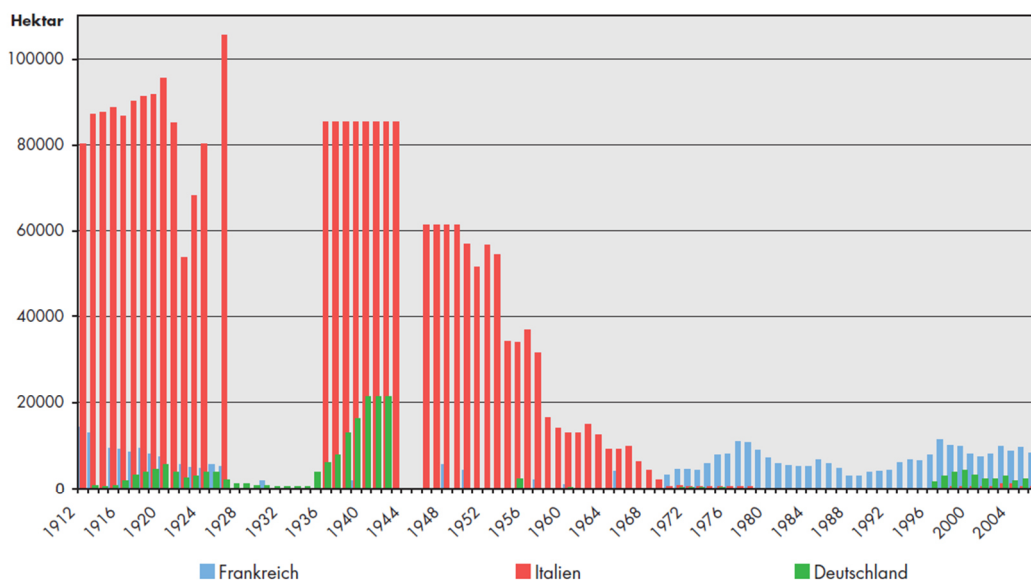


Abb. 3.1: Hanfanbau in Deutschland, Frankreich und Italien von 1912 bis 2006 [FNR, 2008]

In den ersten Jahren nach der Wiedezulassung in Deutschland entstand eine Vielzahl von Hanfaufschlussanlagen. Mittlerweile hat sich die Anzahl der bestehenden Anlagen im Jahr 2015 wieder auf wenige reduziert. Einer der Gründe war vor allem die unausgereifte Maschinenteknik zum Faseraufschluss bzw. Reinigung, mit der kein wirtschaftliches Arbeiten möglich war. So wurden zum Teil alte Maschinen eingesetzt bzw. Maschinen aus anderen faserverarbeitenden Bereichen adaptiert ohne eine Anpassung an die speziellen Anforderungen von Hanf vorzunehmen. Im östlichen Bundesgebiet befinden sich noch drei Faseraufschlussanlagen, in Mecklenburg die NFC GmbH Nettle Fibre Company, in Brandenburg die Hanffaser Uckermark eG und in Thüringen die VOFA Vogtlandfaser GmbH & Co. KG. Im westlichen Bundesgebiet befindet sich noch eine kleinere Anlage, die High Coating Products GmbH in Baden-Württemberg.

Heute werden Hanffasern in Deutschland als technische Fasern vor allem für naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK), insbesondere im Automobilbereich, Dämmstoffe, Vliese, und Filze eingesetzt [FNR, 2008]. Eine in Deutschland aufbereitete Hanffaser für eine textile Anwendung in der Bekleidungsindustrie ist derzeit nicht bekannt. Es gibt aber Ansätze im Rahmen eines Projektes zur Nutzung von Winterhanf, als Zweit- bzw. Zwischenfrucht, für die Gewinnung von verspinnbaren Fasern [Borchert, 2015]. Diese Art von Hanf wird erst im Juli zur Aussaat gebracht und bleibt den Winter über auf dem Feld stehen. Eine Röste der Stängel findet hier am stehenden Stängel statt, so dass der Hanf bei entsprechender Trockenheit direkt nach der Ernte in Ballen gepresst werden kann. Eine Feldliegezeit für eine Röste der Stängel ist dementsprechend nicht mehr notwendig. Bei dieser Anbauvariante lassen sich sehr feine und weiche Fasern gewinnen, die sich auch gut verspinnen lassen. Ein hoher Strohmasseertrag, wie er bei der herkömmlichen Anbauvariante erreicht werden kann, ist aufgrund der erst im Sommer erfolgten Aussaat nicht zu erwarten. Bei einer textilen Anwendung der gewonnenen hochwertigen Faser könnte sich diese Anbauvariante ökonomisch aber als durchaus vielversprechend erweisen.

3.1 Die Hanfpflanze

Morphologisch gesehen besteht der Hanfstängel aus Holz- und Bastgewebe. Wie in der Abb. 3.2 zu erkennen befindet sich das Bastgewebe als dunkler Bereich am Rand des Stängels. Den weitaus größeren Teil bildet der verholzte Kern (Schäben) der sich daran anschließt. Im Inneren des Hanfstängels befindet sich die Markhöhle mit dem Mark, welches hier weiß zu sehen ist. Im Laufe der Wachstumsperiode sterben die Markzellen ab und verschwinden weitestgehend, so dass der Stängel dann hohl ist.

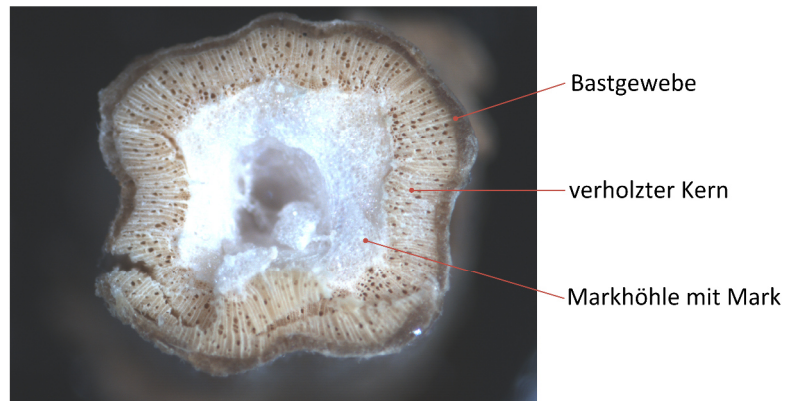


Abb. 3.2: Auflichtaufnahme von einem Querschnitt durch den Halm eines Hanfstängels

Die eigentlichen Hanffasern liegen im Bastgewebe als Faserbündel vor und sind eingebettet im Parenchymgewebe. Umgeben sind die Fasern dann noch nach außen von der Epidermis, als sogenannte Schutzschicht der Pflanze.

Der mechanisch aufschließbare Faseranteil von Hanfstroh liegt in Abhängigkeit von Sorte und Anbau- und Klimabedingungen zwischen 20 und 30 Masse-% [Höppner et al., 2000], [Cappelletto et al., 2001], [Francken-Welz et al., 2003].

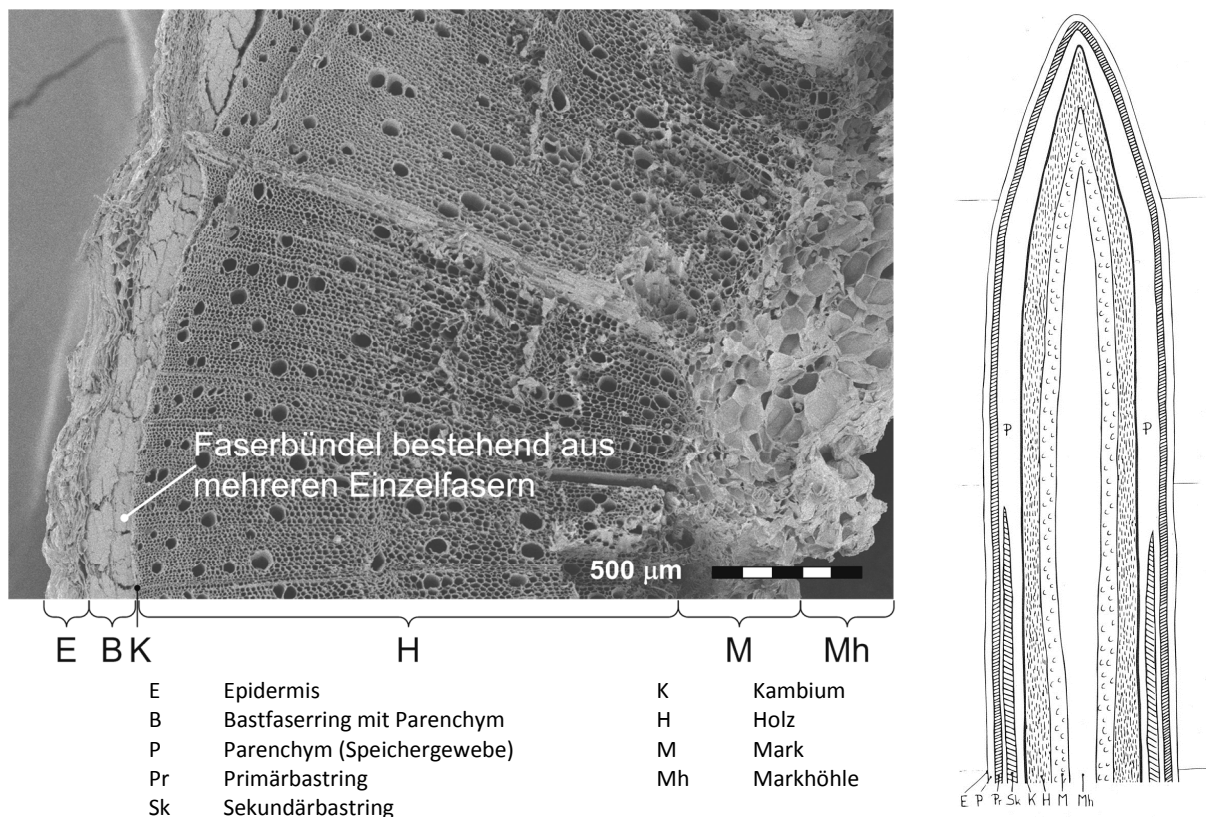


Abb. 3.3: Quer- und Längsschnitt durch den Halm eines Hanfstängels (links: REM-Aufnahme, rechts: Zeichnung nach [Hesch et al., 1996])

Ein typischer Bereich für die chemischen Bestandteile in einer Hanfpflanze liegen bei 11 - 14 % Lignin, 21 - 27 % Hemi-Zellulose, 49 - 54 % Zellulose und 5 - 7 % Asche [Cappelletto et al., 2001].

Die wesentlichen Bestandteile der Hanfpflanze unterteilt nach Schäben und Fasern zeigt die Tab. 3.1. Die Prozentanteile zu 100 können als Übrige bezeichnet werden, welche vor allem Proteine, Pektine, Kohlenhydrate und Asche beinhalten.

Tab. 3.1: Vergleich der chemischen Zusammensetzung von Hanfschäben und Hanffasern
* [Bedetti et al., 1976], ** [Van der Werf et al., 1994], *** [Bag et al., 2011], **** [Brazdauskis et al., 2014]

	Schäben [%]				Fasern [%]	
Zellulose	38,0*	34,5**	42,0***	43,7****	67,0*	64,8**
Hemi-Zellulose	31,0*	17,8**	25,0***	31,8****	13,0*	7,7**
Lignin	18,0*	20,8**	20,7***	22,0****	4,0*	4,3**

In der Arbeit von [Bag et al., 2011] werden ausführlich die prozentualen Anteile von Extraktstoffen aus Hanfschäben (Fedora 17) in bestimmten Temperaturbereichen bei Verwendung verschiedener Lösungsmittel beschrieben. Zugleich führte eine Extraktion zu Veränderungen der viskoelastischen Eigenschaften durch Modifikation der Lignine und der Hemicellulosen. Die Tab. 3.2 zeigt eine Zusammenfassung der löslichen Bestandteile.

Tab. 3.2: Extraktionsausbeuten und Zusammensetzung der Extraktstoffe von Hanfschäben [Bag et al., 2011]

	Extraktions- anteil ^a (%)	Zusammensetzung vom Extrakt ^b					
		N (%)	C (%)	Proteine (%)	Kohlen- hydrate (%)	Lignin (%)	Asche (%)
kalt (20°C im Chargenbehälter)							
Tol/EtOH (1)	0,6	0,5	69,9	0,1	4,6	61,1	1,0
EtOH (2)	0,6	0,8	61,7	0,2	9,2	65,8	10,1
Wasser (3)	2,5	2,3	45,1	1,8	7,4	26,0	57,7
aufeinanderf. Extraktion (1)+(2)+(3)	3,0	1,3	41,4	1,3	7,7	30,1	37,2
heiß (Soxhlet-Apparatur)							
Tol/EtOH (4)	2,4	0,5	62,2	n. f.	5,1	64,0	2,2
EtOH (5)	2,2	1,3	51,6	0,2	11,1	69,0	7,8
Wasser (6)	2,6	1,5	30,1	1,3	15,3	27,4	36,2
aufeinanderf. Extraktion (4)+(5)+(6)	5,0	0,9	49,3	0,9	15,4	52,8	27,6

^a bezogen auf Ausgangsmaterial; ^b bezogen auf Extraktstoff; n. f. nicht feststellbar

Die Dichte der Schäben werden mit 300 kg m⁻³ [Hesch et al., 1996] bzw. mit 250 - 330 kg m⁻³ [Pecenka, 2008] angegeben.

Die Fasern weisen eine fünfmal höhere Dichte im Vergleich zu den Schäben auf und werden mit 1,48 g cm⁻³ [Müssig, 2010] bzw. 1,44 g cm⁻³ [Hesch et al., 1996] angegeben.

Der Hanf ist eine einjährige Pflanze und ursprünglich zweihäusig, d. h. es gibt männliche und weibliche Pflanzen. Die männlichen Pflanzen reifen zuerst ab, um die weibliche Pflanze zu bestäuben. Da-

nach sterben die männlichen Pflanzen ab. Die weiblichen Pflanzen bringen den Samen zur Reife und sterben dann ebenfalls ab. Man kann sagen, dass die männliche Pflanze ca. 4 Wochen eher erntereif ist als die weibliche Pflanze. Durch diese unterschiedlichen Vegetationsphasen der Hanfpflanzen im Feldbestand, ist es schwierig einen optimalen Erntezeitpunkt zu definieren. So verändern sich die Eigenschaften der Fasern in Abhängigkeit vom Reifegrad der Hanfpflanze. Aus diesem Grund wurden einhäusige Pflanzen gezüchtet, d. h. männlich und weiblich auf einem Stängel, um somit eine gleichmäßigere Abreifung herbeizuführen. Zum Erntezeitpunkt können die Stängel eine Höhe von 2 bis 4 m aufweisen.

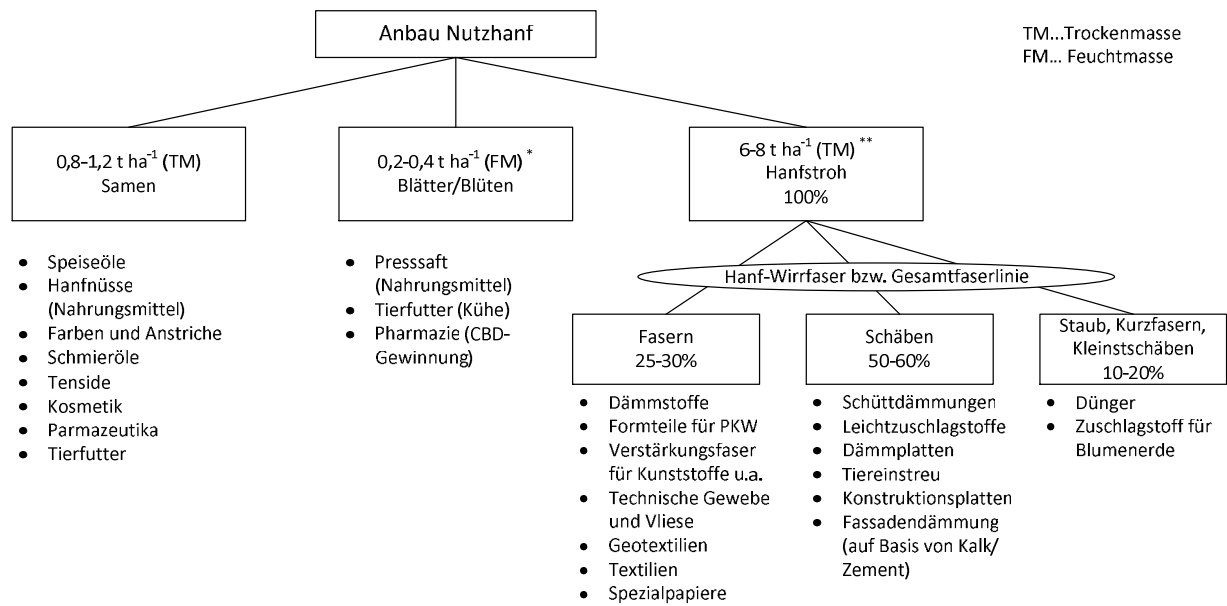
Die Aussaat kann Mitte April bis Mitte Mai erfolgen, wobei der Zeitpunkt auch regional angepasst werden muss [Hesch et al., 1996]. Erntereif ist der Hanf bereits nach 100 Tagen. Eine beginnende Körnerreife setzt aber erst ab Mitte August ein. Beachtet werden muss, dass mit zunehmender Dauer die Fasern weiter verholzen (Lignifizierung) [Bluhm, 1998], [Christen et al., 2007], sich die Eigenschaften der Fasern verändern und damit einen Einfluss auf die spätere Verwendung haben kann. Mit einem zunehmend späteren Erntezeitpunkt nimmt ebenfalls das Witterungsrisiko zu. So verlängert sich die notwendige Zeit zur Abtrocknung des Stroh auf eine Restfeuchte von weniger als 15 % um mehrere Tage, bei gleichzeitiger Abnahme der zur Verfügung stehenden Bergezeit [Gusovius, 2002].

Die erzielbaren Trockenmasseerträge von Hanfstroh hängen sehr stark von den Anbaubedingungen, Anbauregion und der verwendeten Sorte ab. So können für Deutschland im Mittel $6,22 \text{ t ha}^{-1}$ (1996 - 2002), für die Region Champagne in Frankreich im Mittel $8,72 \text{ t ha}^{-1}$ (2000 - 2004) und für Holland im Mittel $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ (2000 - 2004) erzielt werden [Bouloc, 2013]. Bei der Samenernte werden Erträge bis zu $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ erreicht [Gusovius et al., 2016].

Die Vorteile des Hanfanbaus liegen unter anderem im Verzicht auf Herbizide, da die Pflanze schon nach kurzer Zeit den Boden beschattet, was ein Wachsen von Unkraut verhindert [Heuser, 1924], [Hesch et al., 1996]. Sie hat eine geringe Anfälligkeit für Schädlinge und durch die tiefe Wurzel lockert sie den Boden auf, was wiederum Vorteile für den Anbau von Folgefrüchten bringt.

3.2 Gewinnbare Pflanzenteile vom Hanf und deren Anwendungsbereiche

Für eine wirtschaftliche Verarbeitung besteht immer mehr das Interesse an einer ganzheitlichen Nutzung der Hanfpflanze. Die drei Haupterntebereiche sind Samen, Blätter und Blüten sowie das Hanfstroh. In einer Faseraufschlussanlage werden aus dem Hanfstroh die drei Produktfraktionen Fasern, Schäben und Staub gewonnen. Die Abb. 3.4 zeigt die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der aus der Hanfpflanze gewonnenen Produktfraktionen mit ihren Masseanteilen bzw. anteiligen Masseprozenten.



* Ertragsmessung für ein Versuchsfeld am ATB, es liegen noch keine gesicherten Praxiswerte vor, ist stark abhängig vom Erntesystem

** Hanfstrohertrag in Deutschland, kann anderweitig bis auf 12 t ha⁻¹ steigen

Abb. 3.4: Aufteilung des Hanfstrohs in Pflanzenteile (Produktfraktionen) sowie deren Anwendungsgebiete, erweitert nach [Hesch et al., 1996] und [FNR, 2008]

3.2.1 Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Schäben

Schon 1916 machte man sich Gedanken über die Verwendungsmöglichkeit von Hanfschäben. Sie wurden zur dieser Zeit als Abfallprodukt ohne Wert für andere Zwecke, die mit dem Einsatz für eine Papierherstellung konkurrieren könnten, gesehen [Dewey et al., 1916]. Es wurden Versuche zur Herstellung von Papieren durchgeführt, die eine ähnlich gute Bewertung im Vergleich zu Papieren aus Holz erhalten haben. Betrachtet man die gegenwärtigen Anwendungsbereiche der produzierten Hanfschäben in Europa fällt auf, dass über zwei Drittel der Schäben für den Einstreubereich von Pferden und Kleintieren genutzt werden (Abb. 3.5).

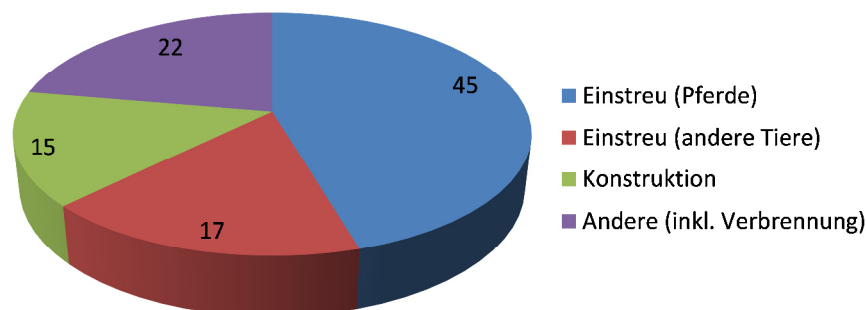


Abb. 3.5: Aufteilung der Anwendungen von Hanfschäben in Europa von der Ernte 2010 (total: 44.000 t) [Carus et al., 2013]

Dies liegt unter anderem an der enorm hohen Wasseraufnahmefähigkeit von Hanfschäben, die sich damit sehr gut für diesen Einsatzzweck eignen. So konnte im Rahmen von [EU-CRAFT PROJECT, 2002]

bei einer Wasserlagerung von Hanfschäben eine Wasseraufnahme von 400 Masse-% nachgewiesen werden. Auch im Hanfproduktlinienprojekt [NOVA, 1996] wird von einer 4 bis 5-fachen Feuchtigkeitsaufnahme vom Ausgangsgewicht gesprochen.

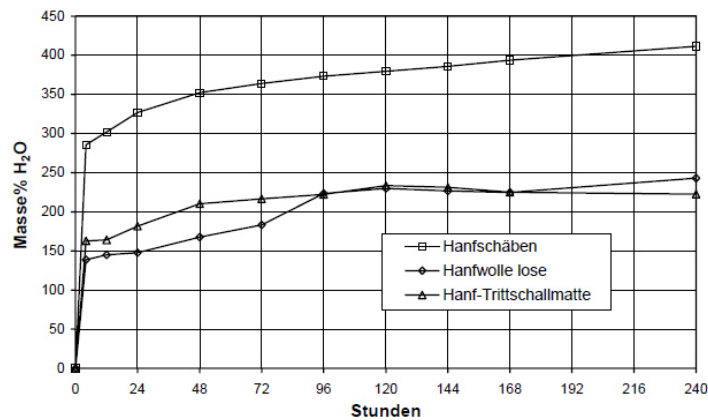


Abb. 3.6: Wasseraufnahme von Hanfschäben und Hanffasern [EU-CRAFT PROJECT, 2002]

Die Eignung im Baubereich als Dämmstoff zeigt sich in einem hohen Isoliervermögen der Hanfschäben. Die Wärmeleitfähigkeit einer losen Hanfschäbensschüttung kann mit einem Wert $\lambda = 0,05 \text{ W (m K)}^{-1}$ angegeben werden (Tab. 3.3).

Tab. 3.3: Wärmeleitfähigkeitswerte für eine lose Hanfschäbensschüttung [EU-CRAFT PROJECT, 2002]

Probe	Dichte Kg/m ³	Konditionierung °C / %rH	Dicke mm	Mitteltemp. °C	Temp.Diff. K	Lambda W/mK
SHIVESE0	133,0	trocken	65,4	10	5	0,04927
SHIVESE1	133,0	trocken	65,4	10	10	0,04915
SHIVESE2	131,0	23 / 50	66,3	10	5	0,05177
SHIVESE3	127,0	23 / 80	68,4	10	5	0,05368

Bei der Herstellung von Dämmmaterialien aus Schäben konnte die Firma Steico AG für ein Produkt „Canarroof“ mit einer Rohdichte von nur $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ einen Wert von $0,04 \text{ W (m K)}^{-1}$ erreichen [Gahle, 2007]. Besonders interessant ist auch die Herstellung von Schäbenplatten als Konstruktionswerkstoffe, analog zu einer handelsüblichen Spanplatte aus Holz. So konnte gezeigt werden, dass mit einer anteiligen Beimischung von Hanfschäben zum Teil verbesserte mechanisch-technologische Eigenschaften erzielt wurden bzw. auch neue Produkteigenschaften bei reinen Hanfplatten [Nonninger et al., 2010], [Pecenka et al., 2010]. In Abb. 3.7 ist eine reine Hanfschäbenplatte dargestellt, welche mit einer HPL-Deckschicht und einem 2 mm Kunststoffanleimer beschichtet wurde.



Abb. 3.7: Hanfschäbenplatte mit einem komplett substituierten Holzanteil

In einer Voruntersuchung zu einem Bioraffineriekonzept konnte die Gewinnung von Furfural aus Hanfschäben und einer anschließenden Herstellung von einer bindemittellosen Hanfschäbenplatten gezeigt werden [Brazdauskis et al., 2014]. Die Fertigungstechnik bei diesem Verfahren muss allerdings noch optimiert werden, um Platten mit verbesserten mechanischen Eigenschaften und Qualität zu erhalten. Auch eine Kombination von Schäben und Fasern in einer Platte ist denkbar. So zeigt die Einbringung einer Hanffasermatte in eine Schäbenplatte zur Unterstützung der Biegeeigenschaften besonders gute Werte im Vergleich zu einer traditionellen auf Holz basierenden Spanplatte [Sam-Brew et al., 2015].

Hanfschäbenplatten wurden von verschiedenen Herstellern auf dem Markt angeboten. Die Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH stellte eine mit HPL beschichtete Platte unter dem Namen „Hanffaser Compsite“ mit einer Rohdichte von 450 kg m^{-3} vor [Thermopal, 2010]. Die Kosche-Gruppe zeigte in Zusammenarbeit mit Resopal ein Light furniture-board „Hemp“ mit einer geringen Rohdichte von nur $300 - 340 \text{ kg m}^{-3}$ [Kosche-Group, 2005], [BM-online, 2005]. Ein langfristig zum Verkauf angebotenes Produkt konnte sich jedoch nicht durchsetzen. Die Anforderungen für die Herstellung solcher Produkte bestehen zum einen in einer hohen Qualität und zum anderen an eine hohe Verfügbarkeit gereinigter Schäben. So sollten die Schäben einen geringen Restfaser- bzw. Staubanteil aufweisen, da es sonst zu einem Wickeln der Fasern an den Streuwalzen der Vlieslegelinie zur Plattenherstellung kommt und der Staub als sogenannter „Leimfresser“ zu einem erhöhten Leimverbrauch führt.

3.3 Schäben als Nebenprodukt bei der mechanischen Gewinnung von Hanffasern

Nach der Ernte und meist auch einer Liegezeit auf dem Feld (Röste) wird der Hanf in Quader- oder Rundballen gepresst. In Faseraufschlussanlagen werden diese Ballen dann wieder auseinander genommen, um daraus die Bastfasern zu gewinnen. Neben den Fasern fallen bei dem Aufschluss in der „Trockengutlinie“ noch weitere Materialströme wie zum Beispiel die Schäben an.

In der Funktionsstruktur in Abb. 3.8 wird deutlich in welchen Verfahrensschritten und an welcher Prozessstufe die Schäben anfallen. Die Verfahrensschritte „Entholzen des Hanfstrohs“ und „Reinigen der Hanffasern“ waren viele Jahre von zentraler Bedeutung im Hanfaufschluss. Mit zunehmendem Kostendruck der Verarbeitungsanlagen entwickeln sich die ursprünglich als Nebenprodukt anfallen-

den Schäben nun ebenfalls zu einem Hauptprodukt. Der Verfahrensschritt „Reinigen der Schäben“ kommt damit ebenfalls einer zentralen Bedeutung zu. Wie in der Abb. 3.8 dargestellt, handelt es sich bei der Fraktion Schäben in den beiden genannten Verfahrensschritten (Entholzen des Hanfstrohs/Reinigen der Fasern) nicht um ein reines Produkt, sondern um ein Mischprodukt.

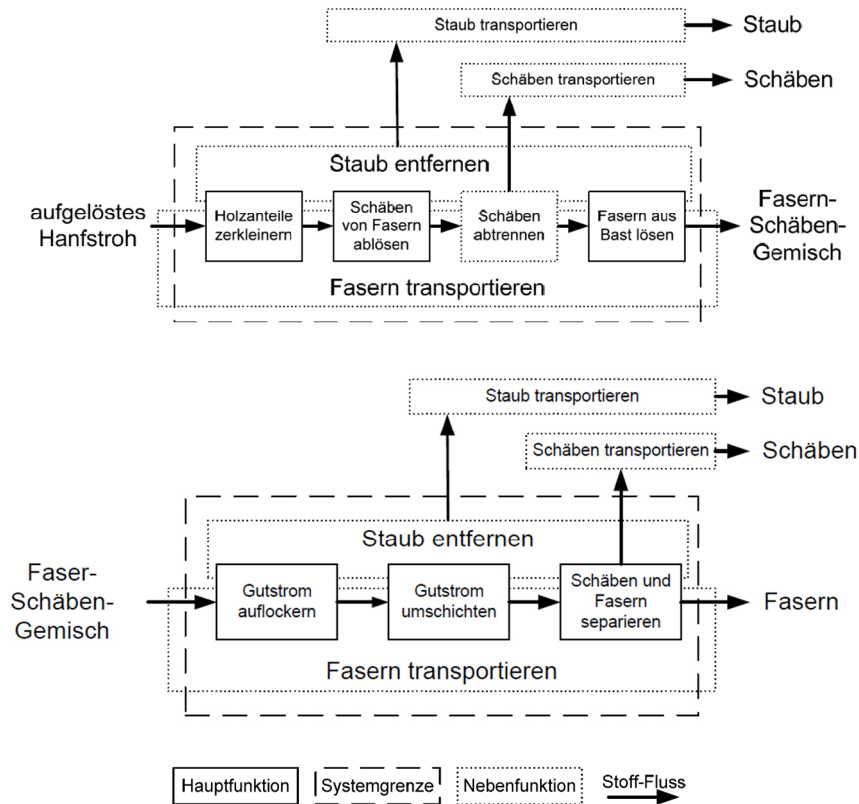


Abb. 3.8: Funktionsstruktur des Entholzens von Hanfstroh (oben) bzw. des nachgelagerten Reinigens von Hanffasern (unten) [Pecenka, 2008]

Da in diesen Verfahrensschritten die Fasergewinnung im Vordergrund steht, wird dementsprechend der Reinheit der Fasern, der Staub- und Schäbenfreiheit eine größere Bedeutung zugemessen. Dies wird mit einem Verlust an Fasern im Reinigungsprozess zugunsten einer reinen Faserfraktion erkauft. Eine Separierung in zwei Bestandteile kann in der Praxis nicht ideal verlaufen, sondern es kommt immer zu Überschneidungen der zu trennenden Fraktionen. Man spricht von einer idealen sowie realen Trennung, die über die Trennschärfe definiert ist [Müller, 2008]. Bei der Fasergewinnung wird alles was im Verfahrensschritt „Reinigen der Fasern“ abgetrennt wird in der Schäbenfraktion gesammelt. Es handelt sich somit um ein Schäben-Faser-Gemisch, welches mit Staub verunreinigt ist. Auch die bereits abgetrennten Schäben im Verfahrensschritt „Entholzen des Hanfstrohs“ sind mit einem Großteil an Staub, Ultrakurzfasern und mineralischen Bestandteilen vermengt. Der mengenmäßige Anteil hängt vom verwendeten Entholzungsverfahren (Brecherwalzen, Hammermühlen, Sichertmühlen) bei diesem Verfahrensschritt ab. In leistungsfähigen Aufschlussanlagen ist die Verwendung von Hammermühlen oder auch Sichertmühlen für den Strohaufschluss – den Kernprozess des Gesamtverfahrens [Munder et al., 2004] – inzwischen üblich. Bei der vom ATB entwickelten Sichertmühle wird eine Abscheidung der Schäben von bis zu 50 Masse-% sowie große Teile von Staub und Verunreinigungen erreicht [Munder et al., 2003]. Eigene Untersuchungen in einer Praxisanlage bei Verwendung dieser Sichertmühle zeigten einen Gesamtabscheidungsanteil an dieser Sichertmühle von ca. 15 Masse-% bezogen auf die Eingangsmasse an Hanfstroh (Abb. 3.9). Dies ist allerdings stark abhängig von

der verwendeten Sieblochweite in der Sichter­mühle, vom Massestrom, der Absaugleistung an der Mühle sowie von der verwendeten Strohsorte bzw. dem Röstgrad. Als Schäben-Faser-Gemisch fielen im Bereich des Reinigens der Hanffasern (siehe Abb. 3.8) ca. 45 Masse-% an. In Abhängigkeit von den genannten Parametern konnten Schäben-Faser-Gemische mit bis zu 62 Masse-% erzielt werden.

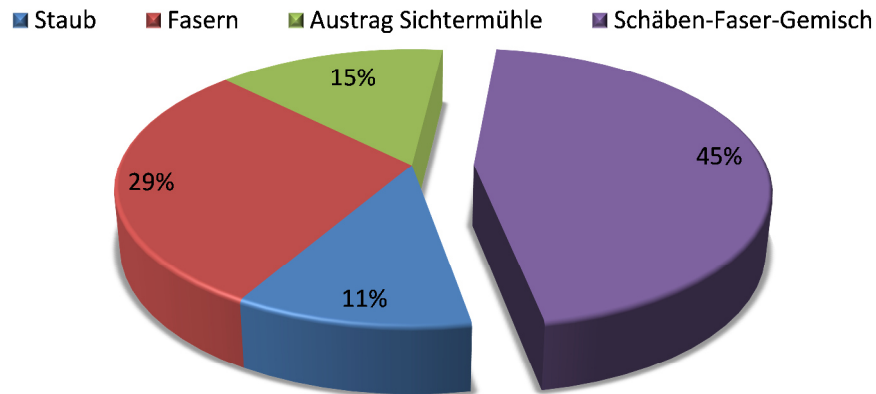


Abb. 3.9: Masseverteilung der Zwischenprodukte bei der Fasergewinnung in einer Praxisanlage (geröstetes Hanfstroh mit einem Massestrom von $1,1 \text{ t h}^{-1}$)

Entlang der Prozesskette in einer Faseraufschlussanlage entstehen verschiedene Fraktionen, die einen Großteil an Schäben enthalten und meist wieder zu einem Stoffstrom zusammengeführt werden. Damit steht dann ein sogenanntes Schäben-Faser-Gemisch als Sammelfraktion diverser Austragsstellen (siehe Abb. 1.1) für eine weitere durchzuführende Reinigung zur Verfügung. Hier zeigt sich die Schwierigkeit der Reinigung dieser Fraktion, da sie sich aus den Reststoffen verschiedenster Aufschluss- und Reinigungsprozesse zusammensetzt und unterschiedliche Bestandteile in je nach Anlageneinstellung, Strohqualität und Massestrom wechselnden Mischungsverhältnissen aufweist.

Einen ganz anderen Ansatz verfolgt die „Feuchtgutlinie“ bzw. „Konservatlinie“. Im Gegensatz zur „Trockengutlinie“ wird hier auf eine Röste nach der Ernte verzichtet. Bei diesem Verfahren werden bei der Ernte die Faserpflanzen aus dem Bestand gehäckselt und anschließend feuchtkonserviert. Dies kann in Schlauchsilos oder auch in gepressten und eingestreckten Ballen erfolgen. Anschließend kann das Häckselgut sukzessive und je nach Bedarf entnommen und verarbeitet werden. In einer Pilotanlage konnte das Hanfkonservat zu Faserwerkstoffplatten verarbeitet werden [Gusovius et al., 2009]. Das Material wird dabei unter Verwendung eines Zerfaserungsextruders und einer Scheibenmühle zu einem Faserstoff aufbereitet [Wallot et al., 2011]. Auch zeigte sich die Möglichkeit des Einsatzes der Fasern in Spritzgussformteilen und deren Verbesserung bestimmter Eigenschaften [Wallot et al., 2012]. Die Vorteile bei der „Konservatlinie“ liegen in einer Verminderung des Verlustrisikos des Pflanzenmaterials durch den Wegfall der Röste und der damit einhergehenden Wetterabhängigkeit. Weiterhin konnte durch eine Reduzierung des verfahrenstechnischen Aufwands bei Ernte und Verarbeitung des kompletten Pflanzenmaterials (Fasern und Schäben) zu einem Faserstoff eine kostengünstige Alternative zur „Trockengutlinie“ bereitgestellt werden.

Zu beachten ist, dass die in dieser Arbeit betrachtete Produktfraktion eines Schäben-Faser-Gemischs nur der „Trockengutlinie“ entstammt.

4 Die Schäbenreinigung

4.1 Aufgabe und Funktionsstruktur der Schäbenreinigung

Die Qualität der Ablösung von den Schäben ist abhängig von der eingesetzten Entholzungstechnologie. In der Faserreinigung werden lose Schäben abgetrennt, Fasern verfeinert und dabei zum Teil auch noch fest verbundene Schäben und Fasern voneinander getrennt. Dies funktioniert aber nur in einem bestimmten Maß, d. h. die Faserreinigung kann nur einen Teil, der in dem Entholzungsschritt noch nicht vollständig abgelösten Schäben von den Fasern, nachentholzen. Da die Fasern das Hauptprodukt stellen, wird das Interesse auf einen geringen Schäbengehalt in den Fasern gelegt. Die Reinigungsmaschinen werden so konfiguriert, daß noch fest verbundene Schäben und Fasern sich eher im Schäben-Faser-Gemisch ansammeln. Weiterhin geht eine Faserreinigung auch mit einer Faserkürzung einher. Durch die verwendeten Sieblochweiten in der Faserreinigung oder Klemmpunktgeometrien in der Faseröffnung gehen Kurzfasern aus der eigentlichen Faserfraktion verloren und werden zusammen mit den Schäben zum Schäben-Faser-Gemisch transportiert. Staub wird zwar aus den Fasern entfernt, aber nur vereinzelt dem gesamten Materialstrom entnommen und zur Filteranlage abgeführt. Weiterhin wird auch in jeder Bearbeitungsstufe Material in Kleinstpartikel zermahlen, welche sich zusammen mit dem Staub und allen anderen genannten Bestandteilen im Abgang von der Faserreinigung befinden.

Da die Fasern die Eigenschaft besitzen, sich zu verhaken, zu verknäulen und Faserflocken zu bilden, werden damit Schäben und Staub im Inneren eingeschlossen. Das Schäben-Faser-Gemisch muss also durch einen aktiven mechanischen Eingriff aufgelockert werden, damit zunächst Staub, Kleinstpartikel und Ultrakurzfasern (1 - 2 cm) je nach Gewicht oder Dichte über die Schwerkraft oder einen Luftstrom abgetrennt werden können. Danach oder auch parallel dazu erfolgt die Separierung von gereinigten Schäben. Zum Schluss soll versucht werden, die bereits ausgereinigten Fasern so aufzubereiten, dass diese möglichst wenige Schäben enthalten. Wie schon angeführt, ist dies abhängig von der verwendeten Entholzungstechnologie.

Es ergibt sich hieraus nach [Pahl et al., 2003] folgende Funktionsstruktur für die Schäbenreinigung (Abb. 4.1):

Hauptfunktionen:

- Schäben und Fasern separieren (Fasern abtrennen)
- Zusammenhalt von Agglomeraten auflösen durch
 - Auflockern
 - Umschichten
 - Auseinanderziehen
- zurückgewonnene Fasern von Restschäben befreien (Restschäben abtrennen)

Nebenfunktionen:

- Material transportieren
- Kleinstpartikel, Staub und Ultrakurzfasern entfernen

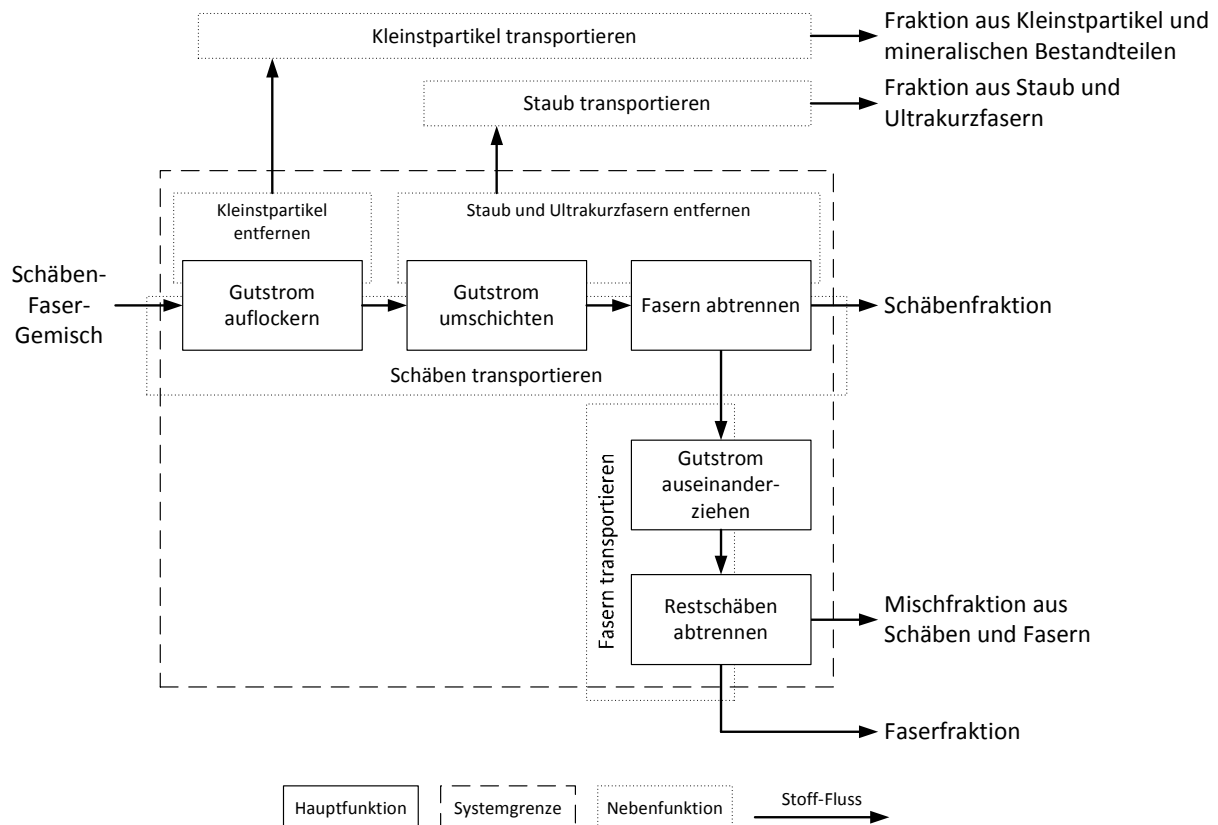


Abb. 4.1: Funktionsstruktur der Schäbenreinigung bei gleichzeitiger Rückgewinnung möglichst reiner Fasern

In der weiteren Nennung von Schäben-Faser-Gemischen wird in dieser Arbeit ab hier auf die Abkürzung SFG zurückgegriffen.

4.2 Eigenschaften des Eingangsmaterials

Neben den bereits in Kapitel 4.1 genannten Einflussfaktoren zur Zusammensetzung eines SFG's ergeben sich aufgrund des eingesetzten Hanfstrohs nach [Bócsa et al., 2000], [Gusovius, 2002] noch weitere Einflussfaktoren wie

- Röstgrad
- Hanfsorte
- Ernteverfahren/Lagerbedingung
- Feuchtegehalt des Hanfstrohs bei Verarbeitung

Die für diese Arbeit hauptsächlich eingesetzten Versuchsmaterialien wurden in der ehemaligen Pilotanlage vom ATB und jetzigen Industrieanlage zum Faseraufschluss aufbereitet. Mit freundlicher Unterstützung der NFC GmbH Nettle Fibre Company, dem Praxispartner im Bereich der Faserpflanzenabteilung vom ATB, konnten typische SFGs, wie sie im Bereich der Fasergewinnung als Nebenprodukt anfallen, gewonnen werden. Für die Entholzung des Strohs kam die vom ATB entwickelte Sichter-

mühle zum Einsatz. Das in diesem Prozessschritt anfallende Gemisch als Abgang unter dem Sieb der Sichter­mühle wird als Ausgangsstoff für die Schäbenreinigung nicht betrachtet. Der aufgeschlossene Materialstrom über dem Sieb wird weiter zu einer kombinierten Faserreinigungslinie geführt, in der das SFG als Abgang anfällt (Abb. 4.2). Diese Reinigung besteht aus den folgenden Einzelmaschinen:

1. Tambour
2. Stufenreiniger
3. Horizontalöffner

In dem Tambour 1. wird mit einem Walzenelement welches mit mehreren kurzen Stäben bestückt ist über einem Rost ein Großteil der Schäben abgeschieden. Diese Fraktion (a) enthält neben den Schäben einen geringen Anteil an Fasern aber einen großen Teil an Kleinstpartikeln. In der 2. Reinigungseinheit, dem Stufenreiniger, wird mit hintereinander geschalteten Walzen, welche ebenfalls mit kurzen Stäben bestückt sind, der Materialstrom über Siebe schräg nach oben befördert. Dabei fallen neben den Schäben auch eine größere Menge an Fasern und ein geringer Teil an Kleinstpartikel als Fraktion (b) an. Nach dem Stufenreiniger besteht der eigentliche zu fördernde Massestrom nur noch aus Fasern mit einem geringen Anteil an Schäben. In der anschließenden Faseröffnung 3. werden neben der Verfeinerung der Fasern auch noch die restlichen Schäben ausgekämmt. Hier handelt es sich um ein Gemisch welches nicht für die Schäbenreinigung genutzt und im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird.

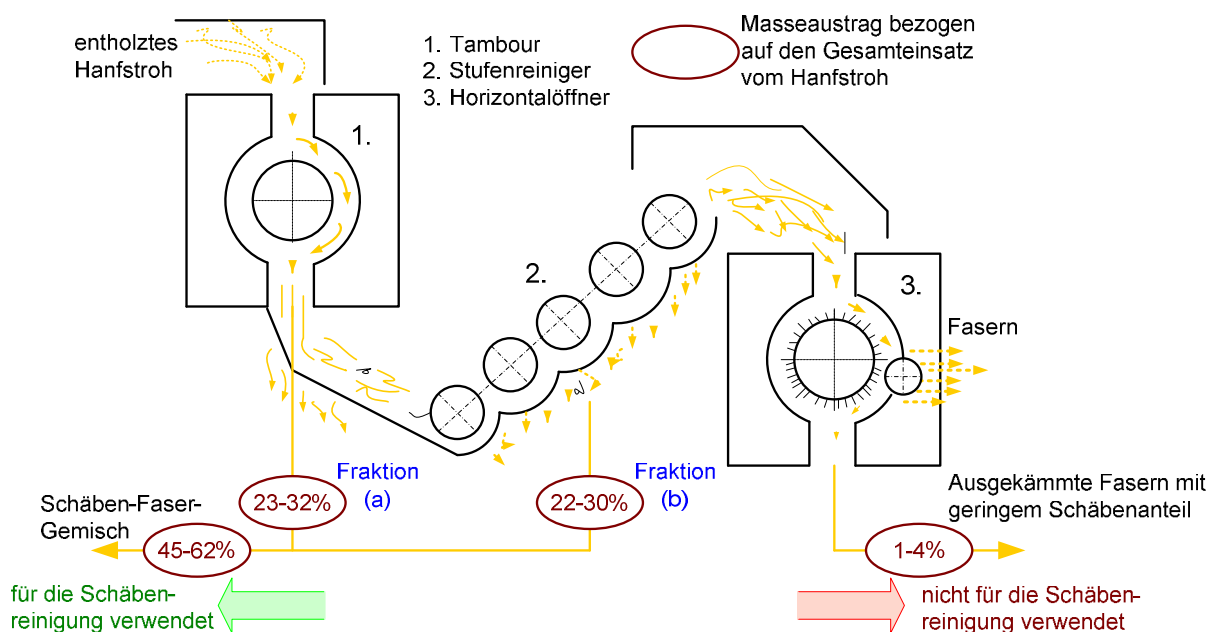


Abb. 4.2: Schematische Darstellung der Austragsstellen vom SFG (Hanf) bei der Faserreinigung

In der Praxis werden meist alle anfallenden SFG wieder zusammengeführt und als ein Gesamtgemisch zur Schäbenreinigung transportiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die zwei anfallenden Fraktionen (a) und (b) näher auf ihre Zusammensetzung untersucht (Abb. 4.3). Die Darstellung zeigt eine typische Zusammensetzung der jeweiligen anfallenden Fraktion als massengewichtete Bestandteile.

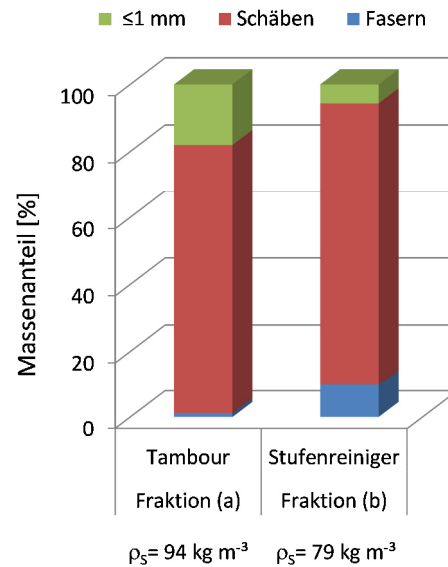


Abb. 4.3: Masseverteilung der Bestandteile vom SFG für die unterschiedlichen Austragsstellen bei der Faserreinigung (geröstetes Hanfstroh)

Bei der Herstellung des SFG als Ausgangsstoff für die zu entwickelnde Reinigungsmaschine wird ebenfalls nur noch ein gesamtes SFG betrachtet, welches sich aus den zwei genannten Einzelfraktionen (Fraktion (a) und (b), siehe Abb. 4.2) zusammensetzt.

Vier unterschiedliche Strohvarianten wurden in der genannten Faseraufschlussanlage verarbeitet (Abb. 4.4). Dabei handelt es sich um drei Hanfstrohvarianten und eine Nesselstrohvariante. Ein besonderes Augenmerk bei der Auswahl vom Hanf wurde auf den Röstgrad gelegt. Dieser hat einen entscheidenden Einfluss auf die Entholzung und damit auch auf die Zusammensetzung vom späteren SFG. Zur Auswahl kam eine vom ATB angebaute Strohsorte „Bialobrzeskie“, welche im Winterzeitraum noch auf dem Feld gestanden hatte und erst im Frühjahr geerntet worden war. Hierbei handelt es sich eher um eine sehr stark geröstete Hanfstrohvariante. Weiterhin wurde eine stark und eine leicht geröstet Hanfstrohvariante zur Erzeugung des SFG ausgewählt. Das Nesselstroh sei hier nur kurz genannt, ohne weiter auf die botanische Herkunft einzugehen. Da sich diese Bastfaserpflanze ähnlich der Hanfpflanze bearbeiten und aufschließen lässt, soll im Rahmen dieser Arbeit das möglich Potential der Reinigungsmaschine zur Aufbereitung des Gemisches auch für andere Bastfaserpflanzen gezeigt und ausgesuchte Ergebnisse präsentiert werden.



Abb. 4.4: Faserstrohballe (von links nach rechts: Hanf über Winter gestanden, Hanf leicht geröstet, Hanf stark geröstet, Fasernessel)

Für eine leichtere Identifizierung in dieser Arbeit erhalten die genannten Strohvarianten nur noch ein Buchstabenkürzel. Die Tab. 4.1 stellt die Benennung der Strohvarianten und wichtige bei der Verarbeitung aufgenommene Eckdaten aus der Faseraufschlussanlage dar.

Tab. 4.1: Material und Verarbeitungsdaten verschiedener Strohsorten zur Herstellung von SFGen

	Hanf (ATB)	Hanf (NFC)	Hanf (NFC)	Fasernessel (NFC)
Kürzel	[W]	[L]	[S]	[N]
Ballenart	Quader	Quader	Rund	Quader
Ballengröße	klein	groß	normal	groß
Röstgrad	über Winter gestanden	leicht	stark	normal
Samen enthalten	nein	ja	ja	nein
Feuchte [%]	13,0	12,0		12,1
Massestrom [t h ⁻¹]	1,00	0,96		0,92
Hammermühle				
Frequenz HM [Hz]:	50	60	53	45
Abweiserstellung:	1,9	3,8	3,8	1,9
Schlägerart:	breit	schmal	schmal	schmal
Produktionsfraktionen				
SFG [%]	62,45	55,45	56,76	69,05
Fasern [%]	26,93	20,43	21,24	13,98
Rest [%]	10,62	24,12	22,00	16,97

Weiteres Versuchsmaterial wurde aus der Faseraufbereitungsanlage VOFA Vogtlandfaser GmbH & Co. KG bezogen. Nähere Details zum Faserpflanzenstroh lagen in diesem Fall nicht vor. Zur Aufbereitung kann aber folgendes genannt werden. Eine Variante ist ein Gemisch wie es normalerweise in der Anlage als SFG anfällt und in dieser Arbeit mit [V] bezeichnet wird. Ein zweites Gemisch [V/H] wurde nach Modifizierung der Anlage mit einer kleinen Hammermühle nachbereitet. Ziel war es den Anteil großer Schäben zu reduzieren und noch fest miteinander verbundene Fasern und Schäben (nicht vollständig aufgeschlossenes Stroh) zu trennen.

In einer Siebanalyse wurde von allen für die Versuche eingesetzten SFGen der massenbezogene Anteil von 3 Größenklassen an Schäben und einer Faserfraktion bestimmt (Abb. 4.5). Der Faseranteil in den SFGen liegt zwischen 3 und 9 Masse-%. Der Anteil an Kleinstpartikel beträgt zwischen 8 und 25 Masse-%. Entscheidend ist, ob das Stroh zur Röste auf dem Feld gelegen hat und beim Pressen des Strohs zu Ballen mögliche Sandanteile mitaufgenommen wurden, die den Feinanteil beeinflussen.

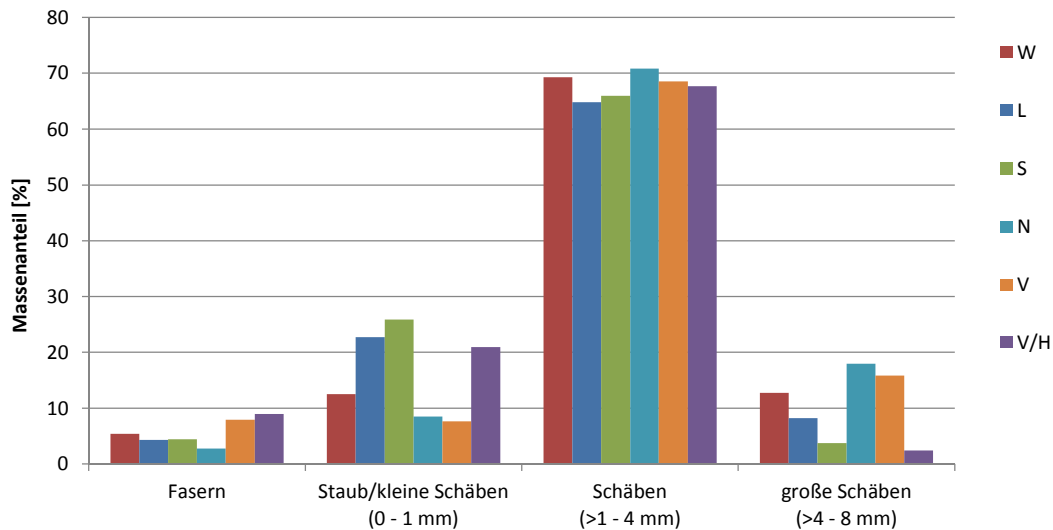


Abb. 4.5: Masseverteilung der Bestandteile vom SFG als Austrag von der Faserreinigung

Auch Blatt, Blüten und Samenreste, welche bei der Entholzung zu Kleinstpartikel zerschlagen werden, führen zu Schwankungen in der Masseverteilung. So zeigt der über dem Winter gestandene Hanf [W] einen geringen Anteil an Kleinstpartikel im Vergleich zur Variante [L] und [S] auf. Dies liegt in der Erntemethode (Wegfall der Röstliegezeit) sowie des durch Abbauprozesse nicht mehr vorhandenen Blatt- und Blütenstandes. Weiterhin auffällig ist die Verschiebung von Fein- und Grobanteil für die Gemische [V] und [V/H]. Deutlich erkennbar ist der Einfluss einer Nachentholzung mit einer Hammermühle auf die Partikelgrößenverteilung, die den Grobanteil verringert, aber damit auch gleichzeitig den Feinanteil erhöht. Die Effektivität der Nachentholzung auf die Trennung von noch fest verbundenen Fasern und Schäben kann erst nach der Reinigung des SFG betrachtet werden.

Eine detaillierte Betrachtung der Korngrößenverteilung der Schäben aus einem SFG zeigt die Abb. 4.6 für die Strohvariante von über dem Winter gestandenen Hanf [W].

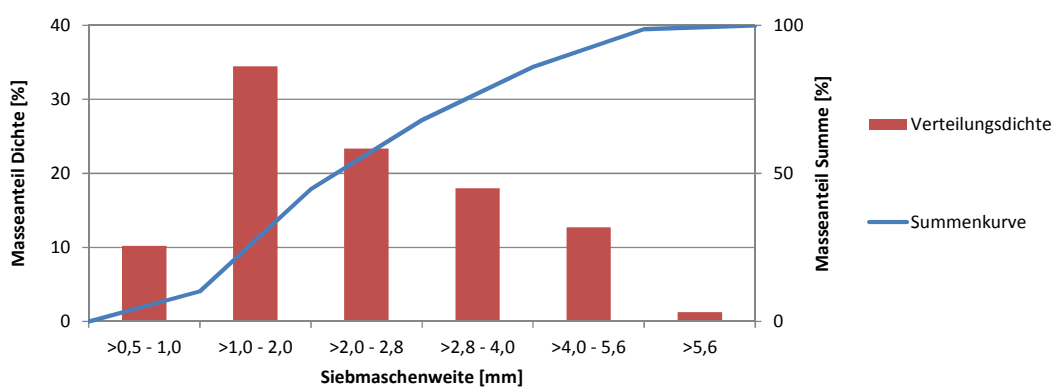


Abb. 4.6: Schabengrößenverteilung aus dem SFG für die Strohvariante [W]

Diese typische massebezogene Schäbenverteilung liefert für den Medianwert des Partikeldurchmessers einer Schäbe von $d_{50} = 2,2$ mm. Wie schon bei der Masseverteilung der Bestandteile vom SFG gezeigt, unterliegen dementsprechend auch die in diesem Fall betrachteten Schäben, Schwankungen in den Partikelgrößenklassen, jeweils abhängig von der Strohvariante sowie der Aufschlussbedingung/Aufbereitung.

4.3 Aufbau typischer Aufschlussanlagen und Reinigungslinien

Zur Aufbereitung von Hanf wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von unterschiedlichen Anlagen entwickelt und aufgebaut. Diese wurden im Laufe der Jahre zum Teil umgesetzt, aus verschiedenen Anlagen neu zusammengestellt, weiterentwickelt und modifiziert. Die Darstellungen in der Abb. 4.7 bis Abb. 4.12 zeigen unterschiedliche Konzepte bzw. vorhandene Faseraufschlussanlagen. Diese reichen von sehr einfachen und aus wenigen Stufen bestehenden bis hin zu sehr komplexen und vielen Stufen bestehenden Reinigungslinien.

Sehr aufwendige Anlagen stellen die Konzepte von der Firma Temafa, La Roche und Bahmer dar (Abb. 4.7, Abb. 4.8, Abb. 4.9). Aufgrund der eingesetzten Brechertechnologie zum Faseraufschluss ist ein hoher maschinentechnischer Aufwand für die nachfolgende Faserreinigung nötig. Es werden je nach gewählter Reinigungstechnologie mehrere Kammschuttel, Stufenreiniger und Faseroffner kombiniert und in Reihe geschaltet.

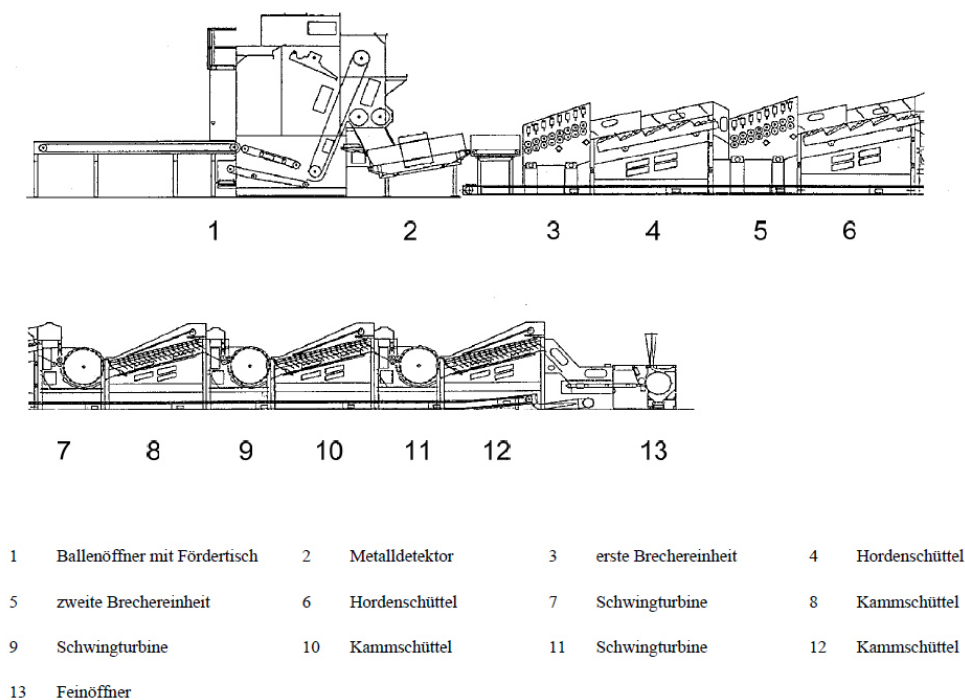


Abb. 4.7: Anlagenkonzept der Fa. Temafa, Stand 1999 [Morgner, 1999]

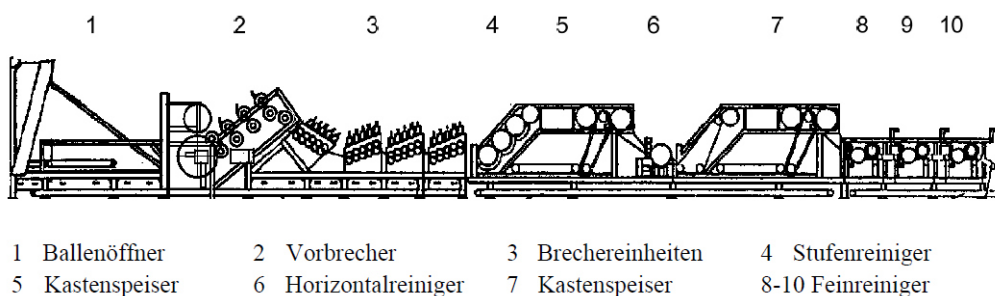


Abb. 4.8: Anlagenkonzept der Fa. Bahmer [Löwe, 1998]

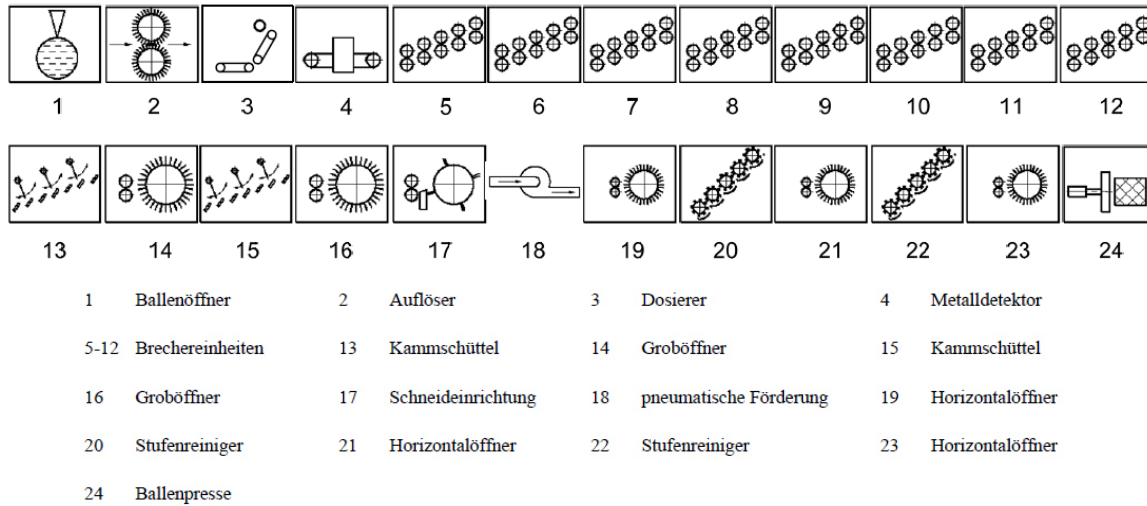


Abb. 4.9: Anlagenkonzept der Fa. Laroche, Stand 1996 [FNR, 1997]

Eine neu entwickelte Versuchsanlage zur Faser- und Schäbengewinnung bestehend aus wenigen Einzelmaschinen mit einem Massestrom von bis zu 1 t h^{-1} zeigt die Abb. 4.10.

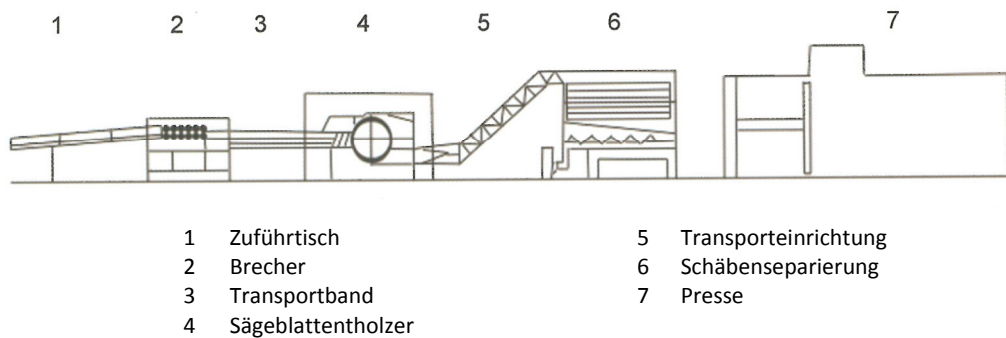


Abb. 4.10: Entholzungslinie als Versuchsanlage LENKON in Steszew [Cierpucha, 2013]

Einen ganz anderen Ansatz verfolgt das Konzept der Firma Dun Agro. Hier findet eine Vorentholzung von gehäckseltem Stroh auf dem Feld und einem Abtransport als Schüttgut statt. In der eigentlichen Anlage erfolgt die Separierung in Schäben und Fasern. Diese kompakte und für sehr hohe Masseströme von bis zu 6 t h^{-1} ausgelegte Reinigungslinie basiert auf der Verwendung von großen Trommelsieben. Zwischen den verschiedenen Trommelsiebstufen, die hier platzsparend als Turm angeordnet sind, werden immer wieder kleinere Entholzungseinheiten zum Nachaufschluss angeordnet. Eine abschließende Bearbeitung der Fasern erfolgt hier ebenfalls in einem Fein- bzw. Horizontalöffner.

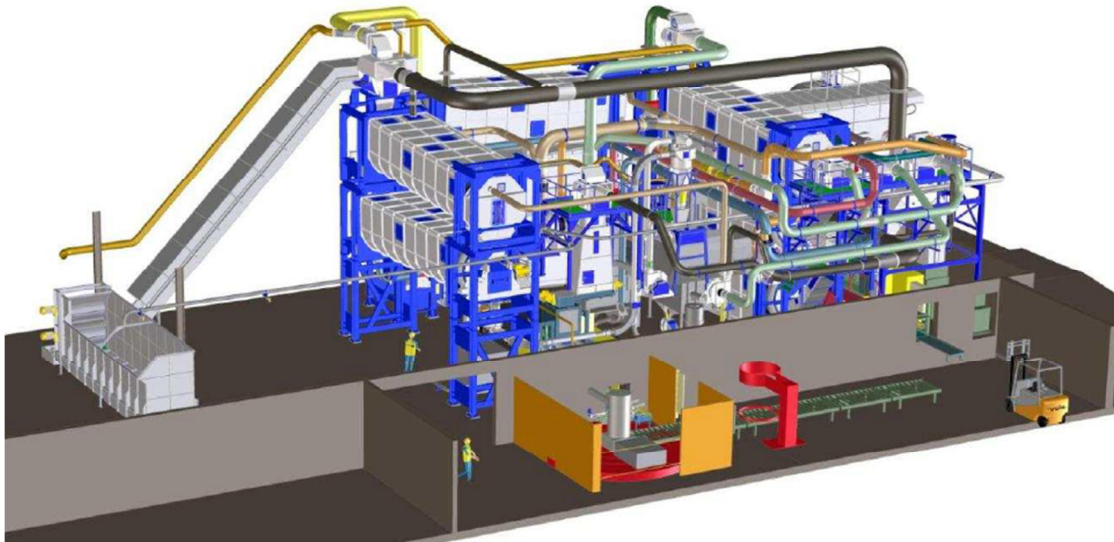


Abb. 4.11: Hanfaufbereitungsanlage der Firma Dun Agro, gebaut durch die Firma Van Dommele [Dun et al., 2009]

Das vom ATB entwickelte und in die Industrie überführte Konzept weist ähnlich der LENKON-Anlage eine einfache, aber sehr wirkungsvolle Aufschluss- und Reinigungslinie bei hohen Masseströmen von bis zu 3 t h^{-1} auf (Abb. 4.12). Die Kernbereiche Ballenöffnung (Station 2 und 3), Entholzung (Station 4) und Faserreinigung sowie -verfeinerung (Station 6 und 8) werden von wenigen bzw. einer Einzelmachine wirksam bearbeitet.

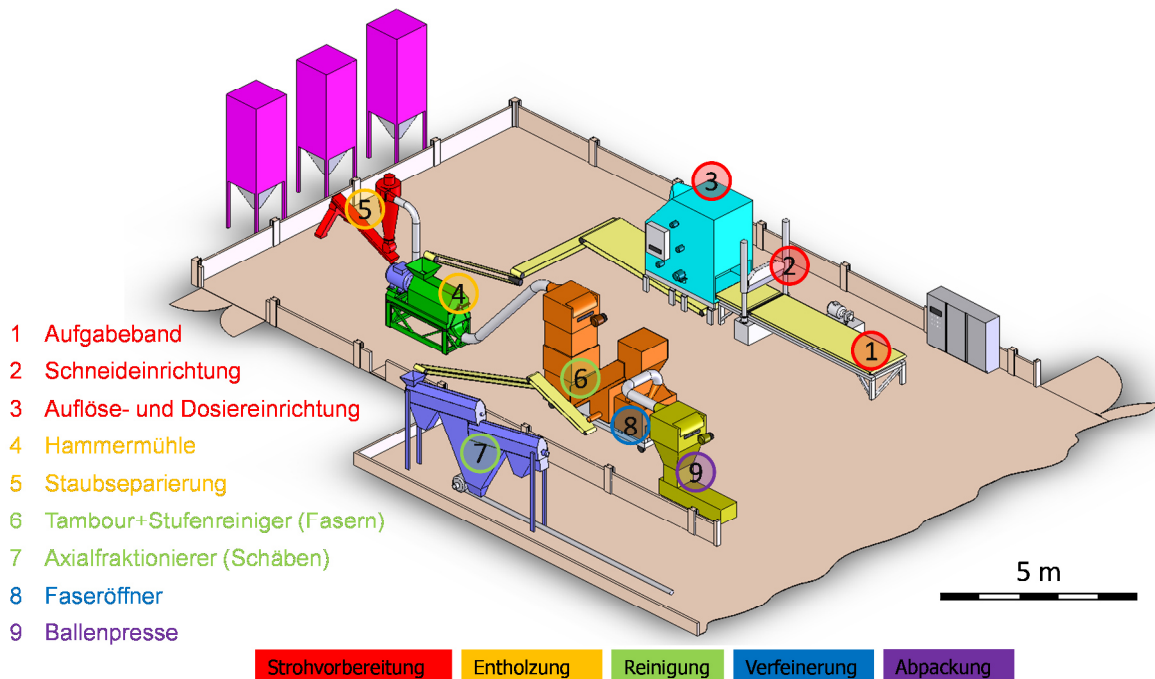


Abb. 4.12: Modifizierte ATB Pilotanlage zur Hanfverarbeitung, erweitert nach [Pecenka et al., 2012]

Eine Zusammenstellung der anfallenden prozentualen Produktströme bei Verwendung dieses Anlagenlayouts zeigt das Fließschema in der Abb. 4.13.

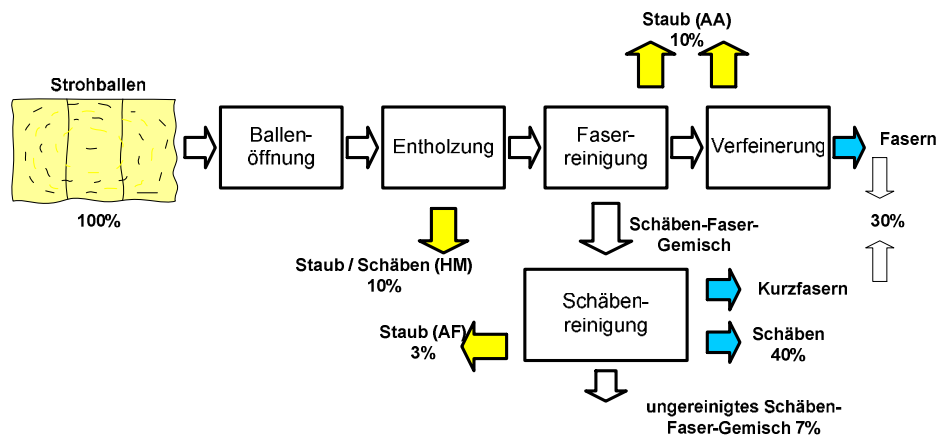


Abb. 4.13: Verfahrensschritte beim Strohaufschluss [Dicke et al., 2015]

Deutlich wird bei allen gezeigten Anlagen, dass die Partikelgrößen und die Zusammensetzung von einem SFG auf sehr unterschiedliche Weise im Aufschluss- und Verarbeitungsprozess anfallen können. Ein wichtiger Punkt ist das Zusammenführen von verschiedenen Austragsstellen in der Reinigungslinie zum SFG, die für eine Schäbenreinigung genutzt werden sollen. Mit den in Kapitel 4.2 beschriebenen SFG soll eine möglichst große Bandbreite abgedeckt werden. Eine individuelle Anpassung der zu entwickelnden Reinigungsmaschine an die verschiedenen Anlagentypen ist sicherlich unabdingbar. Für die Entwicklung bedeutet dies, nicht die Maschine in ihrem Grundprinzip, aber in ihren Parametern weitestgehend flexibel zu gestalten.

4.4 Stand der Technik in der Schäbenreinigung

Eine häufig zum Einsatz kommende Maschine in der Schäbenreinigung ist die sogenannte Duvex vom belgischen Hersteller Van Dommele. Diese Siebmaschine mit gebogenem Siebboden wurde ursprünglich für den Einsatz in der Baumwollindustrie konzipiert und ist erst dann für den Bereich der Schäbenreinigung adaptiert worden. Eine große Trommel mit Stäben, an denen Gummilaschen befestigt sind, bewirkt eine Vorschubbewegung in Längsrichtung. Im unteren Bereich befindet sich das Sieb, durch das die Schäben abgeschieden werden sollen. Arbeitsorgane, Sieb- und Arbeitsräume sowie auch Wellendrehzahlen sind für Baumwolle ausgelegt und erschweren somit eine optimale Trennung von Fasern und Schäben. Aufgrund hoher Drehzahlen wird das Material stark umhergewirbelt, ohne dass die Schäben effektiv abgeschieden werden. Die Maschine hat eine Länge von 10 m und kann einen Massestrom von bis zu 4 t h^{-1} verarbeiten.



Abb. 4.14: Duvex vom belgischen Hersteller Van Dommele

Eine ähnliche Variante wird auch vom Hersteller Demaitere angeboten (Abb. 4.15). Der obere Arbeitsraum ist hier aber nicht rund sondern eckig gestaltet. Die Arbeitsorgane an der Welle sind ähnlich ausgeprägt wie der vom Hersteller Van Dommele. Für die Erreichung des gewünschten Reinigungsgrades bei hohen Masseströmen werden zum Teil mehrere Maschinen zur Aufteilung und damit Reduzierung des Massestroms parallel bzw. zur Verlängerung des Abscheidewegs hintereinander geschaltet.



Abb. 4.15: Reinigungsmaschine (Typ Duvex) vom belgischen Hersteller Demaitere

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Stufenreinigers (Abb. 4.16). Ursprünglich werden diese Maschinen lediglich zur Reinigung von Fasern eingesetzt. In diesem Fall wurden die Maschinen aber soweit optimiert, dass sich im Austrag unter den Sieben, nur noch gereinigte Schäben befinden. In Praxisanlagen befindliche Stufenreiniger weisen einen erheblichen Faserfehlaustrag zusammen mit den Schäben auf, die eine Nachreinigung dieses Gemisches notwendig machen.

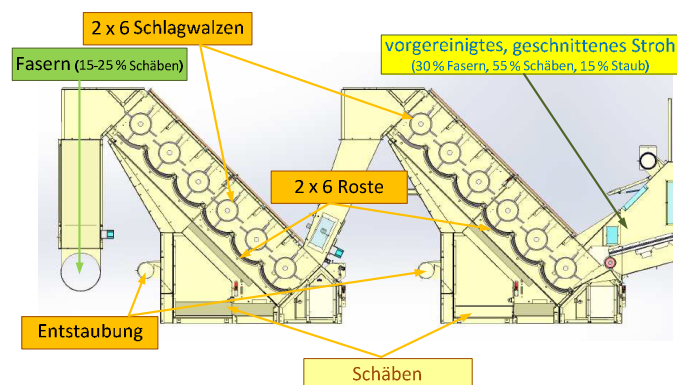


Abb. 4.16: Konzept zur Schäbengewinnung bei der Faserreinigung von der Firma LAROCHE [Masi, 2013]

Auch mit Trommelsieben wird versucht das Gemisch in seine Einzelbestandteile zu separieren (Abb. 4.17). Hier besteht jedoch die Gefahr der Flockenbildung mit einer Einwicklung der Schäben darin.



Abb. 4.17: Trommelsieb zur Reinigung der Schäben

Eine sehr große Variante eines Trommelsiebes zeigt die Abb. 4.18. Hier wird eine enorm große für die Schäbenabscheidung zur Verfügung stehende Siebfläche geschaffen. Realisiert wird dies über den Durchmesser des Trommelsiebes sowie dessen Länge. Somit können bei dieser Variante hohe Masseströme gereinigt werden. Zusätzlich wurden im Sinne einer kompakten Bauweise sowie einer leicht schräg verlaufenden Gutführung zwei Trommelsiebe vorteilhaft übereinander gestellt. Zwei entsprechende Entholzungseinheiten vor den Trommelsieben sorgen für die gewünschte Schäbengröße sowie einem nachgelagerten Faseraufschluss/Entholzung.

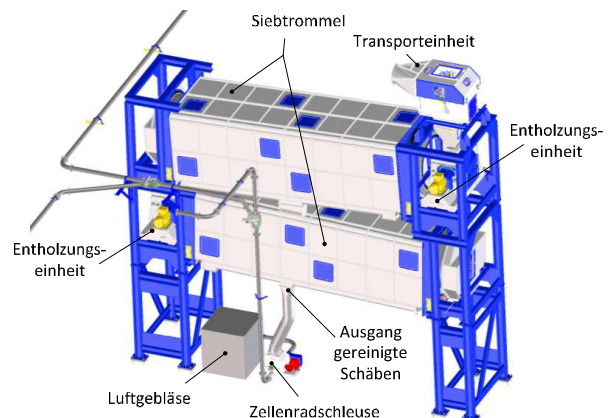


Abb. 4.18: Siebtrommelturm nach dem Prinzip von Dun Agro, gebaut durch die Firma Van Dommele (3D Schema rechts: [Dun et al., 2009])

Die Abb. 4.19 stellt eine schematische Darstellung eines zweistufigen Axialfraktionierers mit seiner SFG-Eintragsstelle und den verschiedenen Austragsstellen sowie einer nach dem Patent EP2145988 [ATB, 2014] gebauten Labormaschine dar.

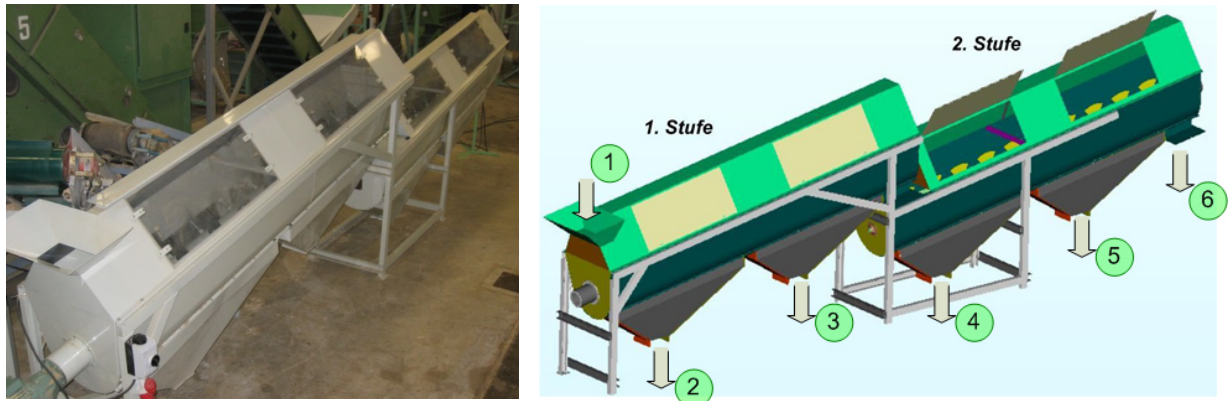


Abb. 4.19: links: Axialfraktionierer im Labormaßstab für die ATB-Pilotanlage rechts: Schematische Darstellung des Axialfraktionierers [Fürl et al., 2008a], erweitert durch [Lühr et al., 2013]

Ziel des Patents ist es, in einem zweistufigen Reinigungsdurchlauf das SFG in seine Hauptbestandteile zu separieren und zu fraktionieren. Der Eintrag des SFG's erfolgt an Position ①. In der 1. Stufe werden mit entsprechenden Drehzahl und Sieblochgeometrie an den Positionen ② und ③ gereinigte Schäben unterschiedlicher Korngrößen abgeschieden. In der 2. Stufe können durch die Verwendung von der 1. Stufe abweichende Maschinenparameter vor allem größere mit Fasern verunreinigte Schäben abgeschieden werden (Position ④ und ⑤). In der Position ⑥ gewinnt man aus dem SFG gereinigte Fasern mit einem geringen Schäbenanteil zurück.

4.5 Anforderungen an die Schäbenreinigung

Die Anforderungen an die Schäbenreinigung können nur im Zusammenhang mit der Betrachtung einer Gesamtanlage zur Fasergewinnung formuliert werden.

Überprüft man den gegenwärtigen Stand der Technik in der Schäbenreinigung mit den ökonomischen Anforderungen der Aufbereitung eines Nebenproduktes aus der Fasergewinnung von Hanfstroh, so ergeben sich für den Anlagendurchsatz und die Produktqualität gesteigerte Zielvorgaben für einen langfristig wirtschaftlichen Betrieb einer Gesamtanlage. Als Basis für die Berechnung wird das ATB-Konzept zur Hanfstrohverarbeitung herangezogen (Abb. 4.20). Bei einem Massestrom von $2,5 \text{ t h}^{-1}$ Hanfstroh würde man die Gewinnschwelle erreichen [Pecenka et al., 2012]. Durch die beschriebenen unterschiedlichen Austragsstellen an schäbenhaltigen Fraktionen und für eine Aufbereitung in Frage kommenden Fraktionen kann mit einem Anteil von ca. 60 Masse-% SFG gerechnet werden. Dies würde für die Schäbenreinigungslinie einem Mindestmassestrom von $1,5 \text{ t h}^{-1}$ SFG entsprechen. Die Berechnung von [Pecenka et al., 2012] stellt ebenfalls für einen Bereich von $4 - 6 \text{ t h}^{-1}$ eine optimale Beziehung zwischen Anlageninvestition, Strohlogistikkosten und Gewinn heraus. Damit könnte bei einer Auslegung der Schäbenreinigungslinie von bis zu 3 t h^{-1} SFG diesem Bereich entsprochen werden.

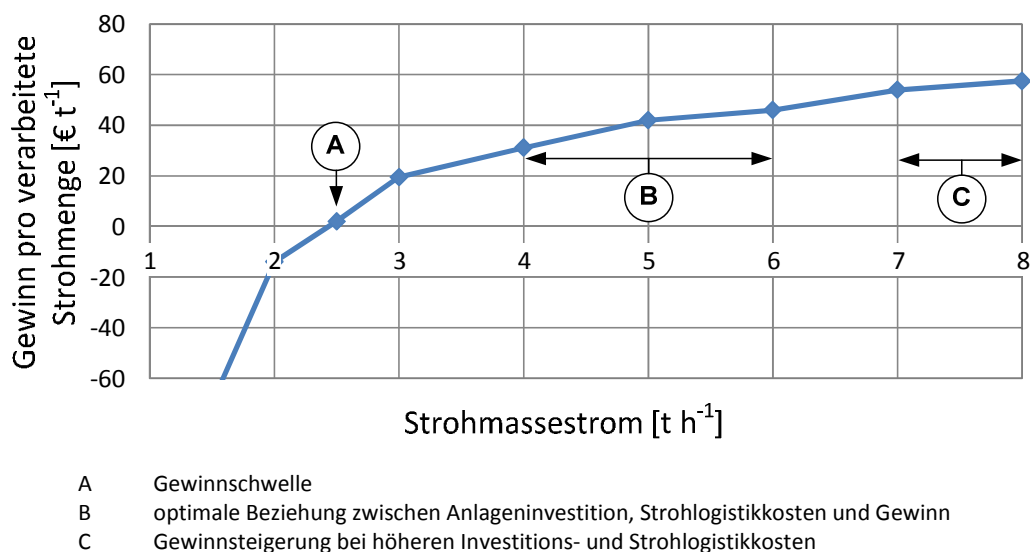


Abb. 4.20: Gewinnrechnung für eine Hanfverarbeitung mit dem ATB-Verarbeitungsbetrieb in Abhängigkeit zum Strohmassestrom, modifiziert nach [Pecenka et al., 2012]

Wie in den vorherigen Kapiteln bereits gezeigt, handelt es sich beim SFG um ein Restprodukt aus Faseraufschluss, Faserreinigung und Faseröffnung. Ziel sollte es sein, einen Anteil an gereinigten Schäben aus dem SFG von über 80 Masse-% zu erreichen, um ebenfalls bei einem Gesamtanteil von 50 Masse-% gereinigter Schäben bezogen auf 100 Masse-% Hanfstroh zu liegen. Der Restfasergehalt der gereinigten Schäben sollte dabei deutlich weniger als 1 Masse-% betragen. Die Entfernung der Fasern bezieht sich dabei größtenteils auf Kurzfasern, die bei der Gewinnung der Fasern (Faserreinigung) nicht erfasst werden konnten und durch Siebe gefallen sind bzw. ausgekämmt wurden. Für den maximal zulässigen Staubanteil in den gereinigten Schäben wird sich an den Anforderungen einer österreichischen Norm für Tiereinstreu orientiert (Tab. 4.2). Es werden in dieser Norm mit F1 und F2

zwei Produktklassen mit einem unterschiedlichen Feinanteil definiert. Als Anforderung an die Schäbenreinigung wird ein Staubanteil von weniger als 2 Masse-% festgeschrieben.

Tab. 4.2: Auszug aus einer österreichischen Norm zu Tiereinstreu aus nachwachsenden Rohstoffen [ÖNORM S 1030, 2008]

Kriterien der ON S 1030 und ihre Aussagekraft			
Parameter	Grenzwerte		Beeinträchtigung/Aussagekraft
Fremd-Störstoffe	0 %		Produktfremde Bestandteile wie z.B. Glas, Kunststoffteile, Steine,... können die Gesundheit des Pferdes beeinträchtigen.
Wassergehalt	15 %		Je feuchter eine Einstreu ist, desto eher neigt sie zur Schimmelbildung und desto geringer die ist Saugfähigkeit.
Grobanteil	0,5 %		Alle Teile, die größer als 16 mm sind gelten als Grobanteil. Neben einer schlechteren Saugfähigkeit, stören sie beim Ablegen des Pferdes.
Feinanteil	F1	F2	Alle Teile, die kleiner als 0,5 mm sind gelten als Feinanteil. Ein hoher Feinanteil belastet die Lungen von Mensch und Tier und kann allergische Reaktionen hervorrufen.
	1	2 %	
Schüttvolumen	Kein Grenzwert [l] bzw. [kg/m ³]		Beim Schüttvolumen wurde kein Grenzwert eingeführt, da es hier auf die Vorlieben der Anwender ankommt. Je nachdem, ob leichte oder etwas schwerere Steu bevorzugt wird. Dieser Wert ist allerdings wichtig um den Bedarf an Streu berechnen zu können. So benötigt man bei einer Steu mit höherem Schüttvolumen weniger Ballen, um eine bestimmte Einstreuhöhe zu erreichen.
Saugfähigkeit	SF1	SF2	Die Saugfähigkeit gibt an, wie viel Wasser im Verhältnis zum Gewicht des Streumaterials aufgenommen werden kann. Je höher dieser Wert ist, desto besser ist das Stallklima, da der Urin besser aufgenommen wird, das Pferd nicht im Nassen steht und sich Gerüche weniger stark entwickeln können.
	300% - 400%	220% - 300%	

5 Schäbenreinigung im axialen Fluss

5.1 Stand der Technik

Das Prinzip der axialen Reinigung mittels rotierender Arbeitswerkzeuge wurde bereits Ende des vorletzten Jahrhunderts angewendet. Ein Patent von J. N. Smith aus dem Jahre 1893 zeigt eine Maschine zur Baumwollreinigung (Abb. 5.1). Durch Schrägstellung der Maschine von der Eintragsöffnung hinab in Richtung Austragsöffnung erfolgt der Vorschub des Materialstroms in axialer Richtung. Durch eine Siebflächenöffnung im unteren Bereich der Maschine können Fremdkörper abgeschieden werden. Die Bezeichnung der Maschine wurde mit „Cotton-cleaner“ angegeben.

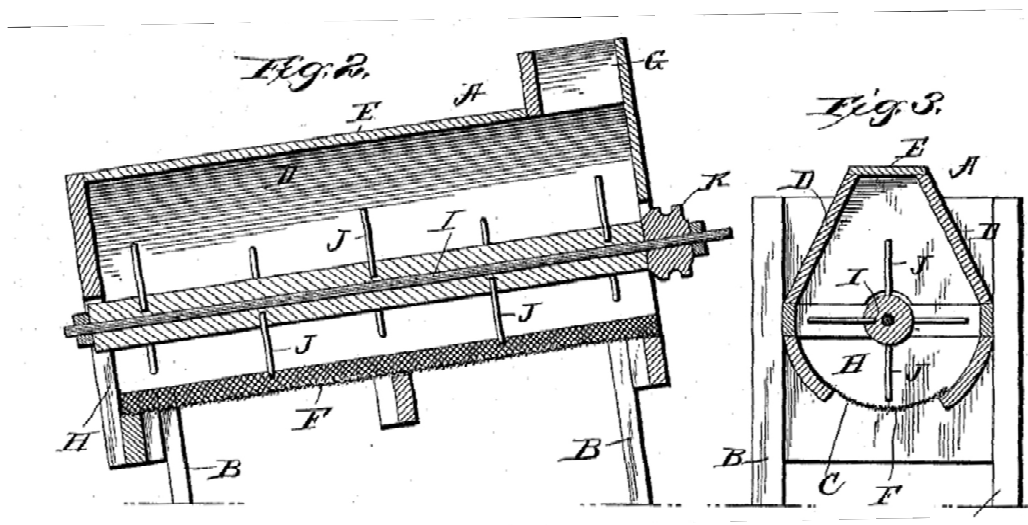


Abb. 5.1: Patent zur Baumwollreinigung [Smith, 1893]

Im Gegensatz zur Verwendung eines feststehenden Siebes besteht die Möglichkeit einer rotierenden Siebtrommel, wie in Abb. 5.2 dargestellt. Das Patent der Firma Ankal Pty Limited zur Reinigung von Faserpflanzen zeigt eine doppelte Anordnung von einer inneren und einer äußeren Siebtrommel. Ebenfalls wird durch eine Schrägstellung der Maschine ein Vorschub des Materials in axialer Richtung bewirkt. In diesem Fall wird ohne eine Welle mit Arbeitsorganen ausgekommen, da sich Leitbleche zu Durchmischung des Gutes an der rotierenden Siebtrommel befinden. Durch den Einsatz unterschiedlicher Maschenweiten von den Siebtrommeln können zwei verschiedene Siebfraktionen gewonnen werden. Die Reinigungsanlage ist stufenweise aufgebaut und ermöglicht das Durchlaufen des Gutstroms in mehrere Kammern.

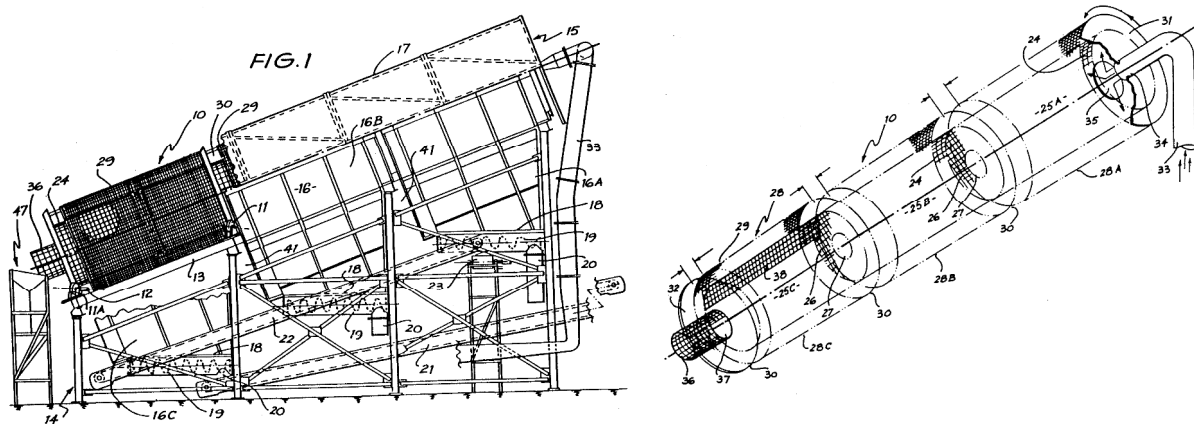


Abb. 5.2: Schematische Darstellung einer Reinigungsanlage für Faserpflanzen mit einer inneren und äußeren Siebtrommel [Ankal Pty Limited, 1991]

Auch in der Landwirtschaft kommt das axiale Reinigungsprinzip zum Einsatz (Abb. 5.3). In einem von der Firma Class patentierten Mähdrescher zur Flaxaufbereitung wird der Gutstrom mittels eines Rotors in die axiale Richtung vorwärts bewegt.

In der Einlaufzone (Sektion A) wird ohne ein Sieb gearbeitet und das Material über installierte Arbeitsorgane bearbeitet. Dies bewirkt ein Abziehen der Fasern vom Stängel. Im nächsten Abschnitt, dem Feinbrechen in Sektion B mit einem größeren Durchmesser, werden ebenfalls über angepasste Arbeitswerkzeuge das Material schonend bearbeitet und Holzbestandteile von den Fasern abgelöst. Umgeben ist diese Sektion von einer Siebfläche mit Löchern von 3 cm. Im Auflockerungsabschnitt, der Sektion C, wird mit einer höheren Geschwindigkeit und einem kleineren Durchmesser lockere holzähnliche Partikel abgeschieden. Das faserhaltige Material wandert weiter über den Siebboden zum Ende der Reinigungsstrecke und wird in der Sektion D durch entsprechende Einbauten ausgeworfen.

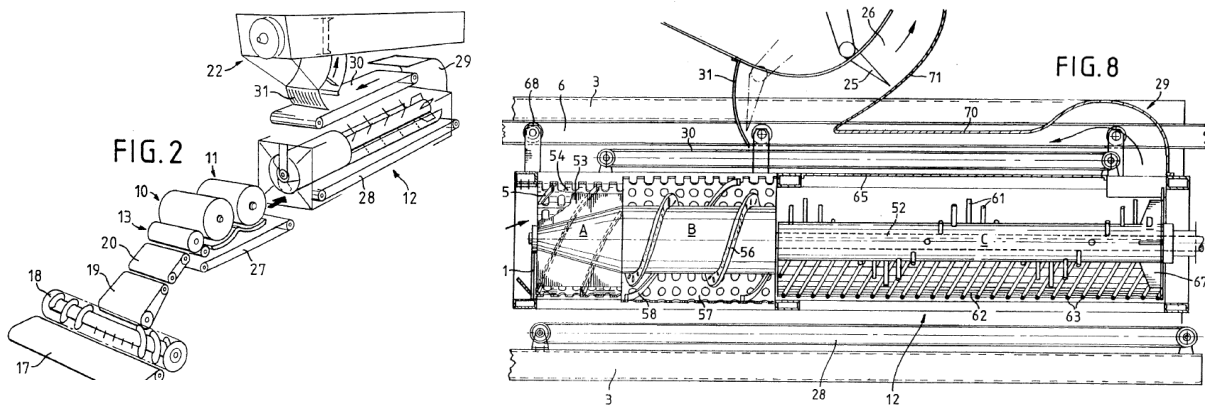


Abb. 5.3: Patent einer Dresch- und Reinigungsmaschine für Flax [Claas OHG, 1995]

Ein weiteres Patent zeigt eine Methode zur Herstellung von Tiereinstreu. Unter anderem beinhaltet die Variante von der Firma Cargill Limited eine Prozessstufe zur Schäbenabscheidung (Abb. 5.4). Über eine mit Stäben bestückte und sich drehende Welle werden Schäben über einem Siebboden abgeschieden.

Fig. 8

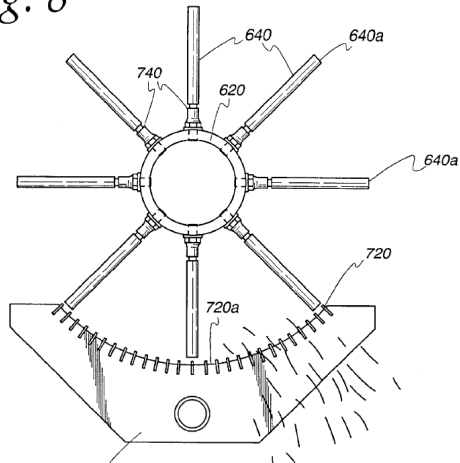


Fig. 9

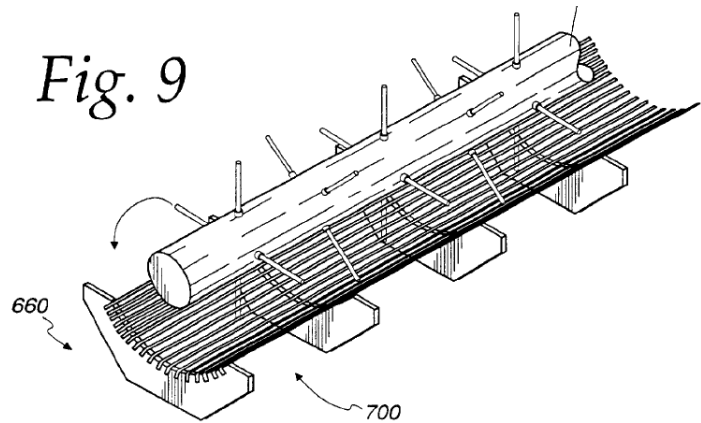


Abb. 5.4: Ausgewählte Prozessstufe von einem Patent für eine komplette Reinigungslinie zur Herstellung von Tierestreu [Cargill Limited, 2003]

Das vom ATB entwickelte und patentierte Verfahren zur Schäbenreinigung, beruht auf einer Paddelschnecke mit einem Siebboden (Abb. 5.5).

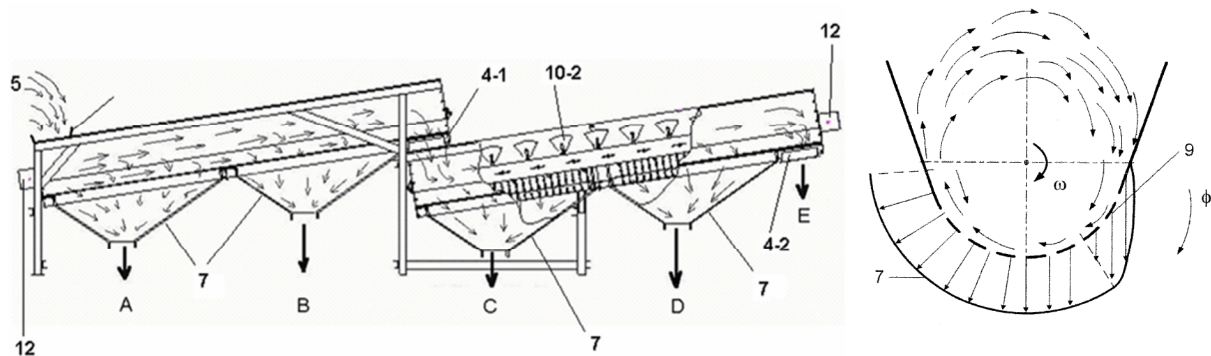


Abb. 5.5: Schematische Darstellung des Axialfraktionierers [ATB, 2014]

Aufgrund der Anordnung der Paddel kommt es zu einem geführten Vorschub in axialer Richtung, sowie einem Abwurf des Gutes vom Paddel über die Welle. Dies begünstigt die Auflockerung des SFG's und kann bei Wahl geeigneter Konstruktions- und Betriebsparameter zu einem Herauslösen von Schäben aus den Faserflocken führen. Somit können mit diesem System neben den Schäben auch gleichzeitig Fasern gereinigt werden.

5.2 Erweiterte Anforderungen an die Schäbenreinigung im axialen Fluss

In dem Kapitel 4.5 konnten die grundlegenden Anforderungen an die Schäbenreinigung im Allgemeinen herausgearbeitet werden. Für die Erweiterung der Schäbenreinigung im axialen Fluss und mit dem Hintergrund der verschiedenen Systeme aus der Patentrecherche, stellen sich für die Entwicklung eines Maschinensystems mit dem Einsatzgebiet in einer modernen Praxisanlage zur Bastfaser-gewinnung folgende erweiterte Anforderungen:

- Die Reinigung soll so effizient sein, dass die Reinigungslinie zur Schäbenreinigung nur aus einer Einheit besteht (Restfasergehalt < 1 Masse-%).
- Neben der Reinigung der Schäben sollen Kurzfasern mit einem geringen Schäbenanteil aus dem Gemisch zurückgewonnen werden (Restschäbengehalt < 10 Masse-%).
- Durch die Verwendung eines aktiven mechanischen Eingriffs in das SFG sollen Faserflocken aufgelockert und Schäben herausgelöst werden.

In der Tab. 5.1 sind die grundlegenden Anforderungen aus dem Kapitel 4.5 sowie die erweiterten Anforderungen an die Schäbenreinigung zusammengefasst.

Tab. 5.1: Anforderungsliste für die Schäbenreinigung

Merkmal	Ausprägung	Bemerkung
Massestrom SFG	bis zu 3 t h ⁻¹	
Masseanteil an gereinigten Schäben	> 80 %	abhängig vom SFG bzw. Entholungsgrad
davon Restfasern	< 1 %	
davon Staub	< 2 %	Forderung
	< 1 %	Wunsch
Masseanteil an gereinigten Fasern	bis zu 5 %	abhängig vom Faseranteil im SFG
davon Restschäben	< 10 %	

5.3 Präzisierte Aufgabenstellung und Neuheitswert einer optimierten Schäbenreinigung im axialen Fluss auf Basis eines Axialfraktionierers

Die Analyse zum Reinigen von Schäben-Faser-Gemischen im axialen Fluss zeigt eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten. Neben den gezeigten Wirkprinzipien gibt es nur wenig Literatur zu den Konstruktions- und Betriebsparametern. Werte zu den erzielbaren Reinigungsgraden mit den unterschiedlichen Prinzipien sind nicht dokumentiert. Das Patent zum Axialfraktionierer (EP2145988) zeigt am meisten Potential zur Umsetzung der genannten Anforderungen. Diese Maschine befindet sich aber in einem Labormaßstab und ist für einen industriellen Einsatz noch nicht optimiert. Zusammenhänge zwischen Paddelgeometrie, Anordnung, Drehzahl und deren Einfluss auf eine effektive Trennung sind noch weitestgehend unklar. Die Übertragung des Patents auf einen industriellen Maßstab mit einem zu erzielenden Massestrom wirft weitere Fragen zu den Abmaßen und Betriebsparametern der Maschine auf. Auch müssen die bei der Reinigung anfallenden möglichen Fraktionen aus dem Patent so aufgeteilt werden, dass sie den Ansprüchen einer industriellen Faseraufschlussanlage entsprechen.

Das Wirkprinzip dieses Axialfraktionierers beruht auf einer sich drehenden und mit bestimmten Arbeitsorganen ausgestatteten Welle über einer halbkreisförmigen Siebfläche (Abb. 5.6). Die Arbeitsorgane sollen die Form eines sichelförmigen Paddels aufweisen und müssen in einer speziellen Art und Weise zueinander angeordnet werden. In der Literatur oder auch in dem Patent wird allgemein bei dieser Variante von einer Paddelschnecke gesprochen. Bei genauer Betrachtung handelt es sich aber um eine in Segmente unterteilte und verdrehte Bandschnecke. Die Zusammenhänge einer solchen Anordnung bleiben dabei völlig unklar und müssen noch herausgearbeitet werden. Der Begriff Schnecke ist dabei auch irreführend, da die korrekte Bezeichnung für diese Form eine Helix ist. Die Verwendung des Begriffs Paddelschnecke ist aber allgemein üblich, und wird daher in dieser Arbeit zum einfacheren Verständnis auch weiterhin verwendet.

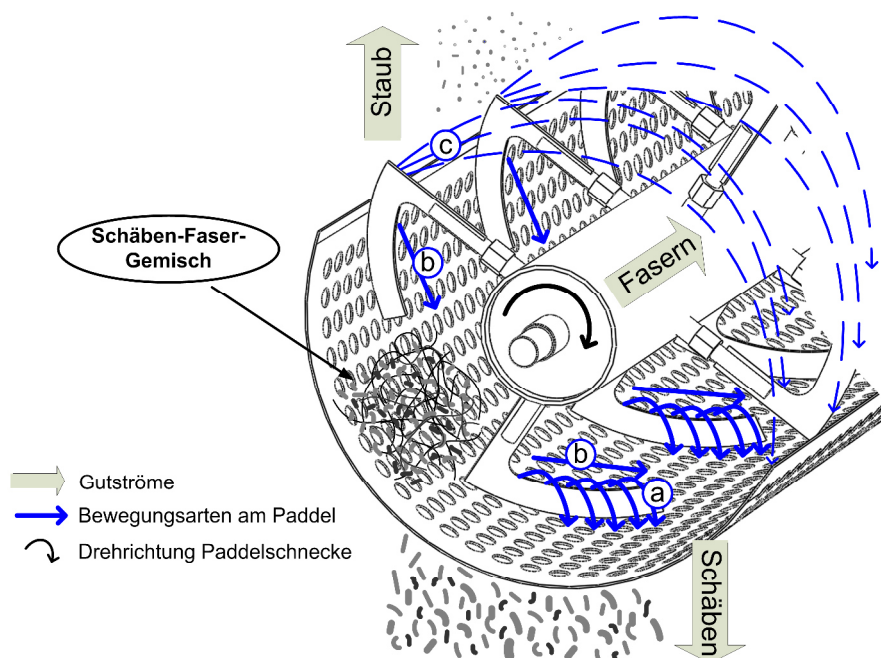


Abb. 5.6: Wirkprinzip des Axialfraktionierers

a) Bewegung über das Paddel, b) Bewegung entlang des Paddels, c) Abwurf vom Paddel

Das Besondere bei der Verwendung einer Paddelschnecke ist, dass es neben dem Transport des Gutes in axialer Richtung zu einer intensiven Auflockerung des SFG's bei gleichzeitiger Siebflächenräumung durch das Paddel selbst kommt. Dadurch steht den losen Schäben immer wieder eine freie Siebfläche zum Passieren der Lochgeometrie bereit. Anhand der blauen Pfeile in der Abb. 5.6 kann man drei typische Hauptbewegungsarten (a, b, c) des Gemisches erkennen. Befindet sich das Paddel im unteren Bereich, also direkt über der Sieboberfläche, kommt es zu einem Fließen des Gutes über das Paddel (a). Dadurch können sich die Partikel neu ausrichten und die kurz zuvor geräumte Siebfläche passieren. Ein Teil des Gutes fließt entlang des Paddels in axiale Richtung (b) und wird dabei auch mit nach oben geschoben. Durch die unterbrochene Anordnung der Helix kann das Material am Ende des Paddels entlang der Siebfläche wieder nach unten rutschen. Es wird den Partikeln also genügend Zeit eingeräumt sich immer wieder neu auszurichten und dabei das Sieb zu passieren, bevor ein nachfolgendes Paddel das Material weiter in axialer Richtung vorwärts schiebt. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit kann nicht mehr alles Material vom Paddel fließen, so dass es mit nach oben genommen und aufgrund der wirkenden Zentrifugalkraft vom Paddel auf die gegenüberliegende Siebfläche geworfen wird (c). Hier rutscht das Material dann entlang der Siebfläche wieder nach unten und die Schäben können ebenfalls das Sieb passieren. Durch Verwendung höherer Drehzahlen können auch Faserflocken zerschlagen bzw. auseinandergezogen werden, so dass eingeschlossene Schäben aus diesen herausfallen. Damit ergeben sich für die Optimierung der Schäbenreinigung in einem Axialfraktionierer folgende Arbeitsschritte:

- Entwickeln eines Versuchsaxialfraktionierers für die grundlegende Analyse des Einflusses allgemeiner Konstruktions- und Betriebsparameter auf den verarbeitbaren Massestrom und das Abscheideverhalten von Schäben aus der Restfraktion (Nebenprodukt) der Fasergewinnung von Hanf
- Analyse zum Aufbau und der Gestaltungsform einer Paddelschnecke für eine materialflussgerechte Gestaltung, insbesondere zur Auflösung von Faserflocken und Agglomeraten
- Analyse und Modellierung der Partikelbewegung in Abhängigkeit von Konstruktions- und Betriebsparametern
- Analyse und Modellierung des Massestroms und des Siebverhalten von Schäben in einem Axialfraktionierer
- Anwenden und Bewerten des Modells für Simulationsrechnungen im Hinblick auf die Auslegung einer Reinigungsanlage für Schäben-Faser-Gemisch mit spezifischen Anforderungen

5.4 Maschinenkonzeption eines Axialfraktionierers

Auf Grundlage der typischen Zusammensetzung eines SFG, den gewünschten zu erzielenden, bzw. anfallenden Siebfraktionen und Übernahme des bekannten Wirkprinzips wurde das in Abb. 5.7 dargestellte Maschinenkonzept für den Bau einer Versuchsmaschine erarbeitet. Die Forderungen nach nur einer kompakten maschinenbaulichen Einheit sowie neben einer Reinigung der Schäben auch weitestgehend schäbenfreie Kurzfasern zurückzugewinnen, können mit diesem Konzept nachgekommen werden.

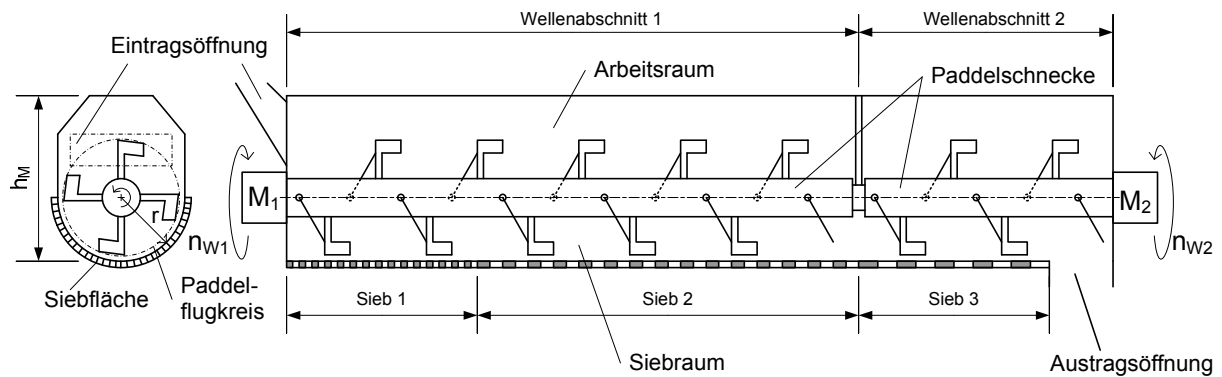


Abb. 5.7: Maschinenkonzept des ATB-Axialfraktionierers

In Vereinfachung zum Patent erfolgt die Realisierung in zwei Wellenabschnitten, die unabhängig voneinander mit verschiedenen Drehzahlen betrieben werden können. Im Wellenabschnitt 1 werden über einer engmaschigen Siebfläche (Sieb 1) Staub und Kleinstpartikel und anschließend über einer Siebfläche mit größerer Maschenweite (Sieb 2) gereinigte Schäben abgeschieden. Der Wellenabschnitt 2 ist für die Reinigung der bis dahin transportierten Fasern mit den darin eingeschlossenen Schäben vorgesehen. Über einer grobmaschigen Siebfläche (Sieb 3) sollen dann Schäben mit fest verbundenen Faserfragmenten, sowie aus den Faserflocken herausgelöste Schäben ausfallen. Dieser Bereich kann auch als Überlauf betrachtet werden, um am Ende des kompletten Abscheidewegs die möglichst schäbenfreien Kurzfasern zurückzugewinnen. Die Abb. 5.8 zeigt den nach diesen Vorgaben entwickelten und in Zusammenarbeit mit einem Praxispartner konstruierten sowie gebauten Versuch axialfraktionierer.



Abb. 5.8: Versuch axialfraktionierer des ATB

Der Materialvorschub über dem Sieb erfolgt nur über die verbaute Paddelschnecke in Abhängigkeit verschiedener Paddelanordnungen. Der Abscheideweg hat eine Länge von 6 m bei einem Paddelradius von 0,5 m und stellt im Vergleich zu den bisher bekannten in der Praxis vorkommenden Reinigungsmaschinen (siehe Kapitel 4.4), eine kleinere konstruktionstechnische Lösung dar. Die Projektierung sieht dennoch einen maximalen Massestrom von bis zu 3 t h^{-1} vor.

5.5 Axialfraktionierer-Versuchsstand

5.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Versuchsaufbau und -durchführung zur Optimierung des Axialfraktionierers bis hin zu einer Industriemaschine erfolgte in zwei verschiedenen Versuchsvarianten.

Der grundlegende Aufbau entspricht der in Abb. 5.9 (Variante 1) bzw. Abb. 5.10 (Variante 2) dargestellten Anordnung. Über eine Dosiereinrichtung, welche mit einem Bunker und einem Austragsband ausgestattet ist, wird über die Drehzahl des Förderbands ein entsprechender Massestrom eingestellt. Mit Hilfe einer Transporteinheit, einem sogenannten Kondensers, wird das Gut vom Dosierer zur Reinigungsmaschine transportiert. In der Versuchsanordnung nach Variante 1 (siehe Abb. 5.9) soll entlang der Reinigungsstrecke der Aussiebungsverlauf aufgenommen werden. Dies bedeutet, wieviel Material befindet sich noch nach einem bestimmten Abscheideweg über dem Sieb bzw. wieviel Material ist schon von der gesamten Einsatzmenge durchs Sieb gefallen. Anhand dieses Verlaufes lässt sich der Abscheidegrad in Abhängigkeit vom Massestrom, den Betriebsparametern sowie den Paddelanordnung bestimmen. Der Aussiebungsverlauf ist dabei in drei Bereiche unterteilt, die sich jeweils auf eine bestimmte Sieblochweite entlang des Abscheidewegs beziehen. Unter dem Sieb, entlang des Abscheidewegs befinden sich im Abstand von 30 cm Auffangbehälter für den Siebdurchgang. Am Ende des Abscheidewegs befindet sich ein weiterer Auffangbereich für den Siebüberlauf, welcher dann ohne Sieb ausgetragen wird.

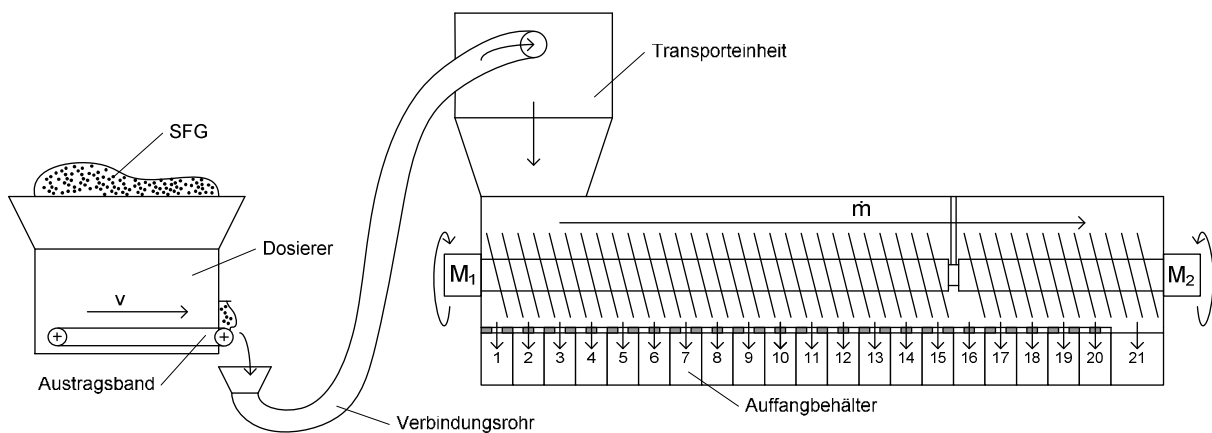


Abb. 5.9: Versuchsaufbau schematisch (Variante 1)

In der Versuchsanordnung nach Variante 2 (siehe Abb. 5.10) wurden dann nur noch die jeweiligen Fraktionen entsprechend ihrer Siebmaschenweite für eine Qualitätsanalyse betrachtet. Die vorher in einzelnen Behältern aufgefangenen Austragsmengen müssen nun als Gesamtfraktion betrachtet werden. Dazu wurden die einzelnen Auffangbehälter entfernt und in den entsprechenden Bereichen Trichter unter den Sieben (①-④) montiert, die es wiederum ermöglichten die vier Endfraktionen gesondert voneinander aufzufangen.

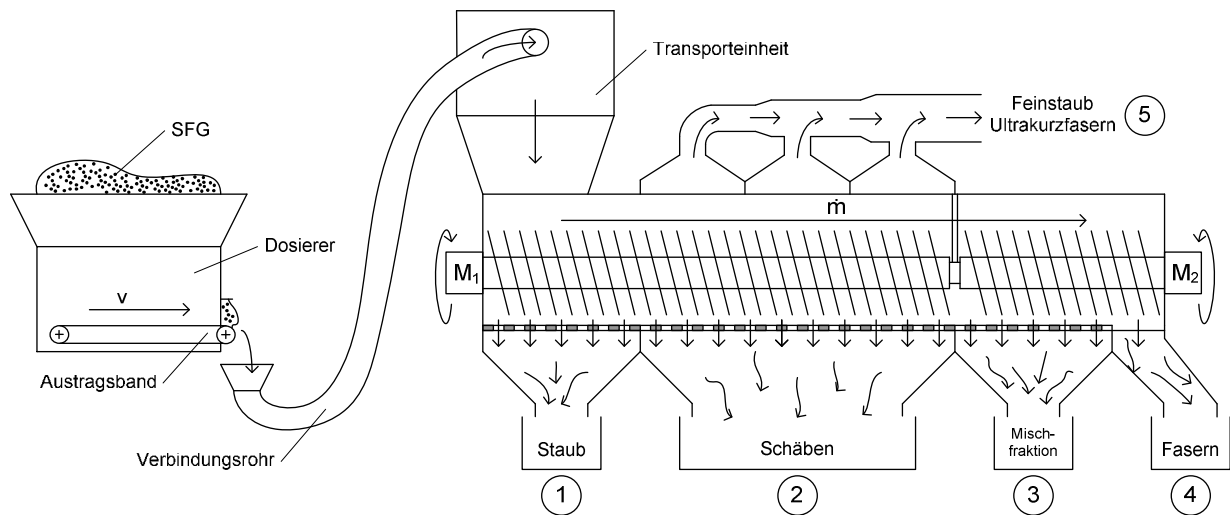


Abb. 5.10: erweiterter Versuchsaufbau (Variante 2)

Parallel dazu wurde im Bereich der Schänenabscheidung eine über Luft indizierte Staubabscheidung (⑤) quer zur Förderrichtung des Gutstroms installiert.

Zusammenfassend können die Ziele beider Versuchsanordnungen wie folgt definiert werden:

- Variante 1: Bestimmung Abscheidegrad
- Variante 2: Qualitätsanalyse

Versuchsablauf

Das verwendete Versuchsmaterial mit seinen Materialparametern wurde bereits im Kapitel 4.2 näher beschrieben. Das für die Versuche eingesetzte Material wurde direkt bei der Fasergewinnung an der Maschinenaustragsstelle in der Verarbeitungsanlage als Nebenprodukt in Big Bags abgefüllt. Damit konnte sehr gut der zeitlichen Abfolge von Materialbereitstellung und späterer Verwendung des Versuchsmaterials (SFG) sowie auch den örtlichen Gegebenheiten am Versuchsstandort zur Erprobung der Reinigungsmaschine entsprochen werden. Das SFG konnte damit sukzessive und entsprechend einer Maschineneinstellung, portionsweise als Big Bag dem Versuchsdurchlauf zugeführt werden. Die Masse pro abgefüllten Big Bag betrug zwischen 110 und 150 kg. Eine mögliche Entmischung des Gutes innerhalb eines Big Bags beim Transport vom Aufbereitungsort zum Verarbeitungsort konnte nicht ausgeschlossen werden. Durch die Verwendung des kompletten Sacks pro Versuchsdurchgang und Befüllung der Dosiereinrichtung bei gleichzeitiger Durchmischung, konnte eine Homogenisierung des Ausgangsmaterials sichergestellt werden. Die Massestromsteuerung erfolgte über das Austragsband der Dosiereinrichtung. Unter Verwendung eines Kondensers konnte dann das SFG im Luftstrom zur Reinigungsmaschine kontinuierlich transportiert und von oben in die Reinigungsmaschine zugeführt werden (Abb. 5.11). Das Prinzip des ursprünglich in der Baumwollindustrie und nun auch in Faseraufschlussanlagen eingesetzten Kondensers als Transporteinrichtung wird im Kapitel 5.5.1.1 näher erläutert. Die Zeit für jeden Versuchsdurchlauf wurde mittels einer Stoppuhr gemessen. Nach jedem Versuchsdurchlauf wurden die unter der Maschine befindlichen Behälter geleert und gewogen. Aus der verarbeiteten Masse des SFG's und der dafür benötigten Zeit wurde jeweils der Massestrom bestimmt.

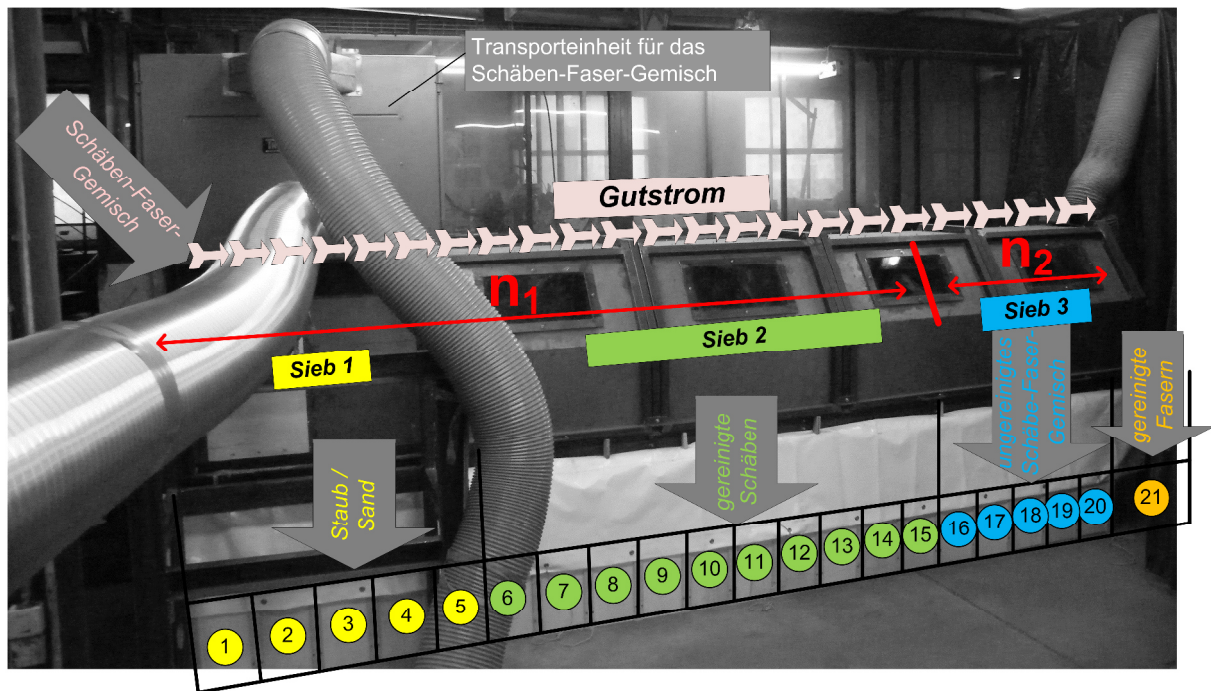


Abb. 5.11: Versuchsaufbau in der Versuchshalle (Variante 1)

Probennahme und -analyse

Die Probennahme erfolgte für die Grundgesamtheit als repräsentative Probe. Dies bedeutet, dass die Differenz zwischen der an der Probe gefundenen Kenngröße und der Kenngröße der Grundgesamtheit zufällig ist. Nach der [DIN 53803 Teil 2, 1994] unter Berücksichtigung der [DIN 53803 Teil 1, 1991], [DIN 53803 Teil 3, 1984] und [DIN 53803 Teil 4, 1984] wurde durch eine einstufige Auswahl eine kleine Stichprobe aus dem Ausgangsmaterial bzw. den jeweiligen Siebfractionen und der Endfraktion entnommen. Die Stichprobenmenge lag bei den Fraktionen Staub, Schäben und Mischfraktion zwischen 300 und 500 g und bei den gereinigten Fasern zwischen 100 und 300 g. Jeweils aus der Mitte des zu beprobenden Haufwerks erfolgte die Auswahl der Proben systematisch, d. h. die Art der Auswahl beruht nicht auf dem Zufallsprinzip. Nach [DIN 53803 Teil 2, 1994] ist eine systematische Auswahl einer zufälligen Anordnung der zu prüfenden Grundgesamtheit eine Zufallsprobe.

Für die Partikelgrößenanalyse der Schäben in einem Siebturm wurden Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe nach [ISO 3301 Teil 1, 2001] und mit Lochblechen nach [ISO 3310 Teil 2, 2001] ausgewählt. Die Siebanalyse erfolgte in Anlehnung an die [DIN 66165 Teil 2, 1987] unter Berücksichtigung der [DIN 66165 Teil 1, 1987]. Die Schwierigkeit bestand in einem Separieren der Schäben von noch in den jeweiligen Fraktionen enthaltenden Fasern. Eine vorherige Entnahme der Fasern aus der Siebprobe von Hand wäre mit einem nicht vertretbaren Aufwand verbunden. Somit musste eine Lösung gefunden werden, während des eigentlichen Siebvorgangs die Fasern aus dem Gut zu entnehmen. Der Vorteil ist, dass es bei der Siebung von einem mit Fasern durchsetztem Gut wie den eigentlich zu siebenden Schäben zu einer Ansammlung von sogenannten Fasergewöllen kommt, die sich auf den jeweiligen Siebstufen ablagern. Durch eine Unterbrechung des Siebvorgangs erfolgte nun eine erleichterte Entnahme dieser Faseranteile. Dabei mussten nur, falls vorhandenen, die eingeschlossen Schäben in den Fasergewöllen herausgelöst und in die entsprechende Siebstufe zurückgelegt werden. Nach endgültigem Abschluss der Siebung erfolgte wiederum eine Überprüfung nach noch vorhandenen Fasern in den einzelnen Siebstufen. Hierbei handelte es sich meist um einzelne Fasern die aus dem Siebgut von Hand leicht entnommen werden konnten. Damit konnte der immer noch erheb-

liche Zeitaufwand einer Probenanalyse im Vergleich zu einer vorherigen Aussortierung deutlich reduziert werden.

Für die Probenanalyse der Fraktion „gereinigte Fasern“, wurde sich aufgrund des sehr hohen Faseranteils auf ein händisches Sortieren in Faser und Schäbe beschränkt. Dies war trotz einer reduzierten Probenmenge von ca. 30 g mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Eine maschinelle Lösung für eine Separierung der Faserfraktion mit einem sogenannten Labor-Grobaflöser wäre denkbar, ist aber durch das Grundprinzip der Maschine nur eingeschränkt möglich und führt zu einem verfälschenden Ergebnis der Masseanteile von Fasern und Schäben.

Versuchsplan

Die Tab. 5.2 gibt einen Überblick der durchgeführten Versuche mit den eingesetzten Materialien, den variierten Konstruktions- sowie Betriebsparametern und den aufgenommenen Messgrößen. Aufgrund des eng gestrickten Versuchszeitraums konnten nicht immer alle Parametervariationen durchgeführt werden. So wurden bestimmte Versuchseinstellungen mit einem geringen zu erwartenden Erkenntnisgewinn nicht weiter in das Versuchsprogramm aufgenommen.

Tab. 5.2: Versuchsplan

Rohstoff	Material		KP ¹		Betriebsparameter			Messgrößen		
	Kategorie	Kürzel	Paddelanordnung (ne, ve, dp)	Massestrom (0,5 - 3,0 t h ⁻¹)	Drehzahl Welle 1 (40/60/80 min ⁻¹)	Drehzahl Welle 2 (100/120/140 min ⁻¹)	ohne/mit Absaugung	SF ² -Masseanteil	AF ³ -Masseanteil	Analyse des Sieb- durchgangs
Hanf (ATB)	Winterhanf	[W]	x	x	x	x	x/x	x	x	x
Hanf (NFC)	leicht geröstet	[L]	x	x	x	x	x/x	x	x	x
Hanf (NFC)	stark geröstet	[S]	x	x	x	x	x/x	x	x	x
Fasernessel (NFC)	Nessel	[N]	x	x	x	x	x/x	x	x	x
Hanf (VOFA)	typisches SFG	[V]	x	x	x	x	-/x	-	x	x
Hanf (VOFA)	mit HM ⁴ bear- beitetes SFG	[V/H]	x	x	x	x	-/x	-	x	x

¹KP... Konstruktionsparameter, ²SF... Siebfach, ³AF... Austragsfraktion, ⁴HM... Hammermühle

5.5.1.1 Aufbau eines Kondensers

Die Hauptaufgabe eines Kondensers besteht im Transport eines Feststoffes im Luftstrom und anschließender Abscheidung des Feststoffes aus dem Luftstrom (Abb. 5.12). Die notwendige Luft erzeugt der Kondensator über einen eingebauten Radiallüfter selbst. Im Inneren befindet sich eine drehende Siebtrommel. Durch die kleinen Perforierungen kann die Luft ins Innere der Trommel und dann aus dem Kondensator über den Lüfter nach außen entweichen. Der Feststoff wird dabei nach unten über eine Fächerwalze abgeschieden.

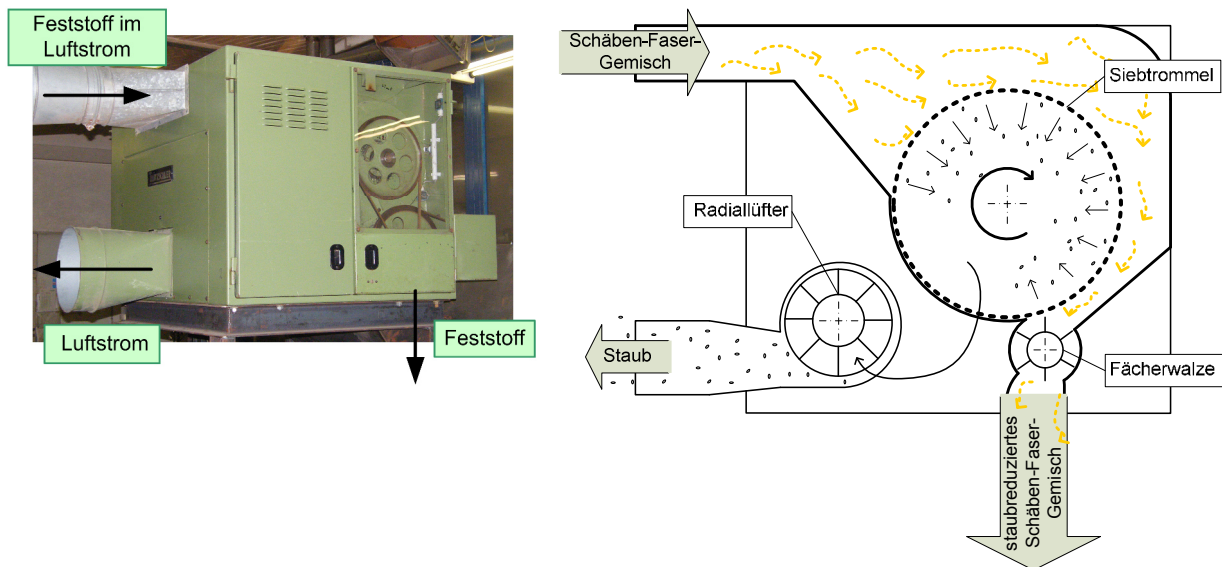


Abb. 5.12: Kondensator als Transporteinrichtung (links) sowie Funktionsweise als Prinzipdarstellung (rechts)

Durch den Transport und Abscheidvorgang wird auch ein Teil des Feststoffes über die Luft und durch die perforierte Siebtrommel mit abgeschieden. Da Kondensator üblicherweise in Faseraufschlussanlagen eingesetzt werden, sollte das auch hier so sein. Der bei den Versuchen entstandene Verlust wurde ermittelt und in der Auswertung berücksichtigt.

5.5.2 Grundlegende zu erwartende Versuchsergebnisse

Für die Reinigung eines SFG bei der gewählten Versuchsanordnung lassen sich drei typische Aussiebungsverläufe annehmen (Abb. 5.13). Die Darstellung beruht auf der Berechnung, dass 100 Masse-% des SFG's der Menge in den Behältern von 1 bis 21 entspricht. Jedes Siebfach entspricht einem Abscheideweg von 30 cm und stellt jeweils als Messpunkt das Ende des entsprechenden Abscheidewegs. So entspricht zum Beispiel das Siebfach 9 dem Messpunkt auf dem Abscheideweg von 2,7 m.

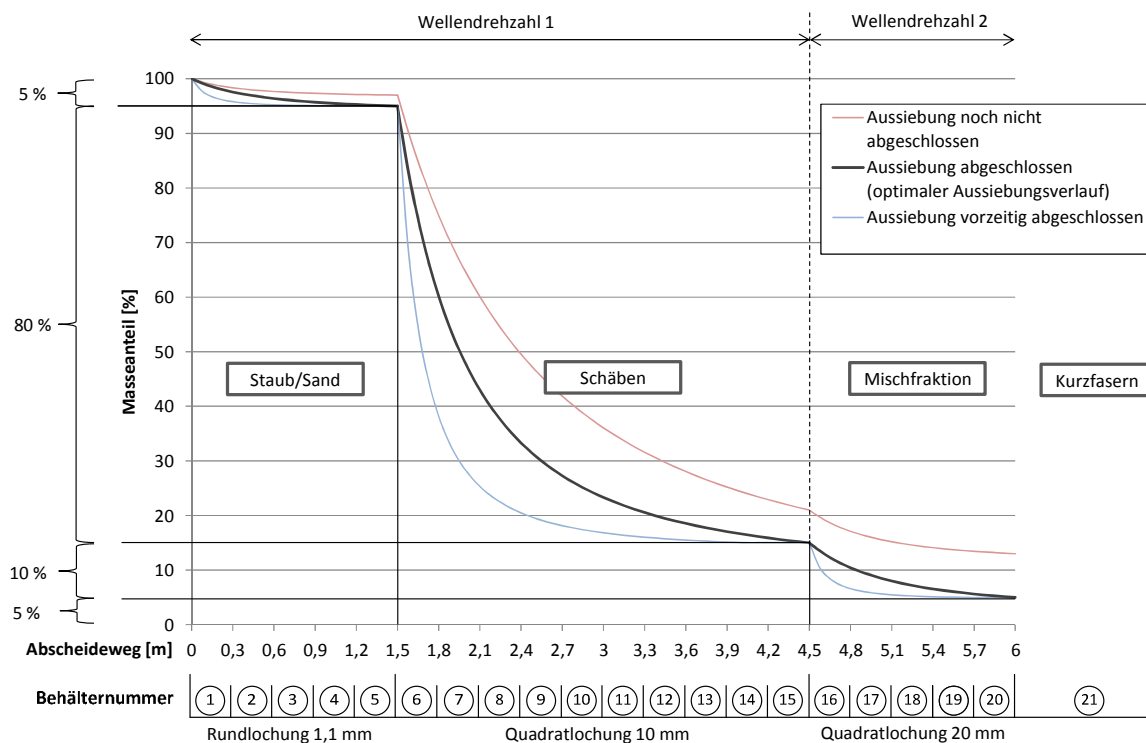


Abb. 5.13: Theoretisch vorhersagbarer prinzipieller Ausiebsverlauf für ein SFG bei entsprechend gewählter Versuchsanordnung

Folgende Siebfächer bilden entsprechend des darüber liegenden Siebabschnitts entsprechender Sieb-
lochweite eine Austragsfraktion:

- 1 - 5 Staubfraktion (Rundlochung 1,1 mm)
- 6 - 15 Schäbenfraktion (Quadratlochung 10 mm)
- 16 - 20 Mischfraktion (Quadratlochung 20 mm)
- 21 Faserfraktion (ohne Sieb)

An der Ordinate in Abb. 5.13 lässt sich dann der entsprechende Masseanteil einer jeden Fraktion bezogen auf 100 Masse-% SFG ablesen. Prinzipiell sind drei grundlegende Ausiebsverläufe beschreibbar. Im optimalen Fall entspricht der Abscheideweg einer jeden Fraktion der notwendigen Reinigungslänge zum Abscheiden der in diesem Bereich abscheidbaren Partikelmasse. Wird die maximale abscheidbare Menge in einem entsprechenden Siebbereich schon früher erreicht, kommt es nur zu einem Weitertransport des noch über dem Sieb befindlichen Gutes. Der Abscheideweg könnte in diesem Fall verkürzt werden oder hätte noch Reserven für einen höheren Massestrom. Bei einer zu kurzen Reinigungstrecke kann nicht das gesamte Material entsprechend der Sieblochweite vollständig abgetrennt werden. Das Gut wird dann in den nächsten Siebbereich geschoben und führt dort zur Verunreinigung dieser Fraktion. Der Masseanteil über dem Sieb erhöht sich somit zum Ende der Reinigungsstrecke. Bei dieser Annahme müsste der Abscheideweg in den entsprechenden Bereichen verlängert bzw. der Massestrom verringert werden.

5.6 Siebraum und Paddelgeometrie im Hinblick auf den Materialtransport und das Abscheidevermögen

5.6.1 Varianten der Siebflächengestaltung

Für die Gestaltung der Siebflächen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Möglichkeiten der Lochform sowie -anordnung (Abb. 5.14). Grundlegend bestimmt die Freifläche des Siebes das Abscheideverhalten vom eingesetzten Gut, sprich der Trennung in Grobkorn und Feinkorn bzw. Siebdurchgang [Schubert, 1975], [Stieß, 2009].

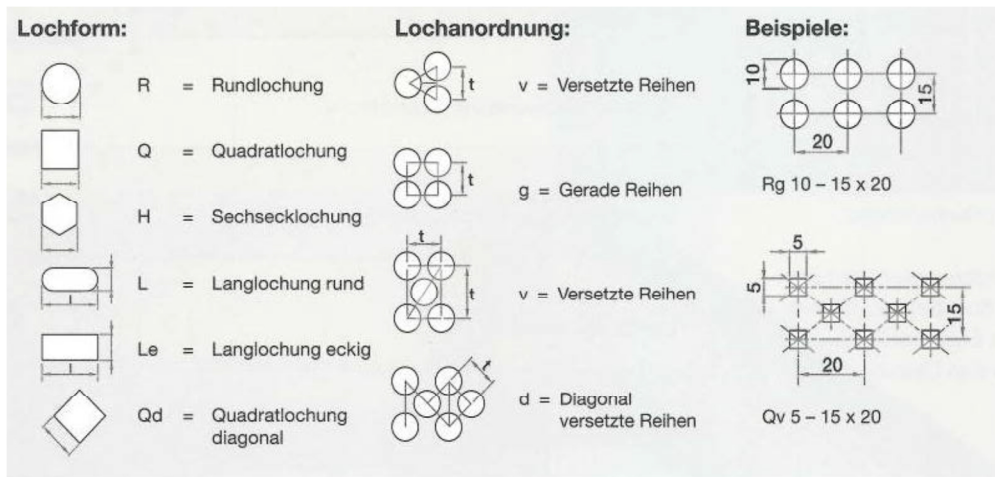


Abb. 5.14: Lochformen und -anordnung [RMIG GmbH, 2010]

Eine Analyse der Durchtrittswahrscheinlichkeit eines Partikels bei einer entsprechenden Siebform in Abhängigkeit von der Partikelgröße erfolgt noch in Kapitel 7 im Rahmen der Modellentwicklung für den Ausiebsverlauf. Die für die Versuche in Betracht kommenden Siebe sind in der Tab. 5.3 zusammengestellt.

Tab. 5.3: Verwendete Siebe in der Versuchsmaschine

Beschreibung	Normbezeichnung [ISO 7806, 1983]	Perforierung	Lochweite [mm]	Lochteilung [mm]	Freifläche [%]	Länge [m]
Sieb 1	Rv 1,1-2	Rundlochung	1,1	2,0	27,44	1,5
Sieb 2	Qg 10-12	Quadratlochung	10,0	12,0	69,44	3,0
Sieb 3	Qg 20-25	Quadratlochung	20,0	25,0	64,00	1,5

Die Auswahl erfolgte mittels der Labormaschine (siehe Abb. 4.19) und der damit erzielten Größenfraktionen. Einen späteren Einsatz von gereinigten Hanfschäben im Einstreumarkt kann damit sehr gut entsprochen werden. Dies wird gegenwärtig noch subjektiv und ohne genaue Vorgaben vom Verarbeiter bzw. Vermarkter beurteilt. Einen möglichen Ansatz zur Beurteilung der Schabengröße für den Einstreumarkt im speziellen für Pferde kann die österreichische Norm S 1030 geben (siehe Tab. 4.2).

5.6.2 Einflussparameter des Materialtransports

Der Aufbau sowie die Konstruktion einer Schnecke zum axialen Transport können auf sehr unterschiedlicher Weise erfolgen. Damit verbunden sind verschiedene Einsatzgebiete der Schnecken die neben einem Transportieren auch ein Durchmischen begünstigen. Es können Schüttgüter bis hin zu dickflüssigen Materialien damit transportiert werden. In Abb. 5.15 ist eine Zusammenstellung unterschiedlicher zum praktischen Einsatz kommender Schneckengewinde dargestellt.



Bild 11: Endloses Schneckengewinde



Bild 12: Mehrfachgewinde

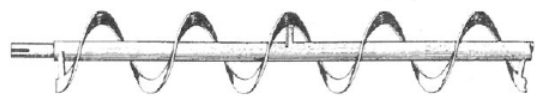


Bild 13: Bandgewinde

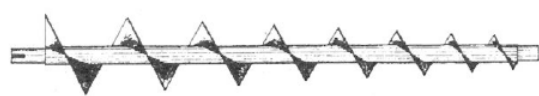


Bild 14: Konusgewinde

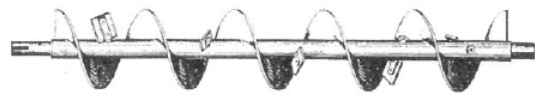


Bild 15: Schneckengewinde mit eingesetzten Mischflügeln



Bild 16: Schneckengewinde mit aufgesetzten Wendablechen

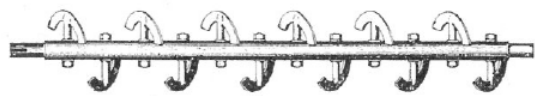


Bild 17: Paddelschnecke



Bild 18: Vierkantwelle mit eingesetzten Mischflügeln



Bild 19: Eingeschnittenes Schneckengewinde

Abb. 5.15: Schneckengewinde [Salzer, 1968]

Unabhängig aller unterschiedlichen Ausprägungen der Wendeln von den Schnecken, lassen sich diese über die Steigungshöhe definieren. In [Pajer et al., 1967] und [Salzer, 1968] wird die Steigungshöhe G von Schnecken wie folgt bestimmt (Gleichung 5.1):

$$G = \tan \alpha * \pi * r \quad (5.1)$$

Die Übertragung der Gleichung auf ein Bandgewinde sieht wie in der Abb. 5.16 aus.

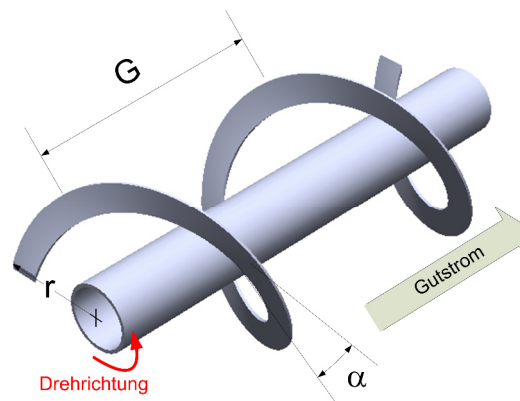


Abb. 5.16: Geometrische Beziehungen an einem Bandgewinde

Um zu einer Paddelschnecke zu kommen, wird das Bandgewinde in mehrere Segmente unterteilt. Hierbei sollen die sich wiederholenden vier verschiedene Farben später jeweils eine Umdrehung bilden (Abb. 5.17).

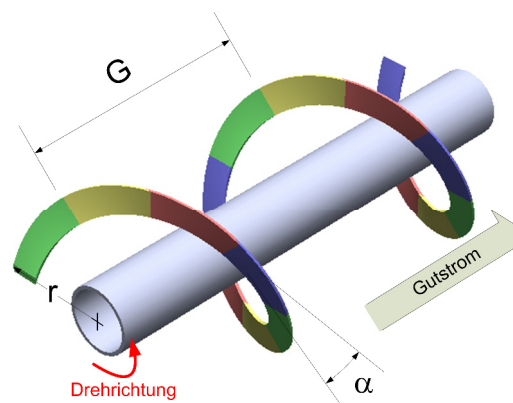


Abb. 5.17: Einteilung des Bandgewindes in Segmente

Durch Verdrehen der einzelnen Segmente in definierten Abständen zueinander sowie auch das Ineinanderwickeln von mehreren Bandschnecken (mehrgängig) lassen sich verschiedene Paddelschnecken konstruieren. Drei Varianten einer Paddelschnecke sollen in dieser Arbeit näher untersucht werden.

Bei der Verwendung einer einzelnen Bandschnecke (eingängig) lassen sich daraus prinzipiell zwei grundlegende Varianten anordnen (Abb. 5.18). Die Zahlen an den einzelnen Segmenten geben die Reihenfolge der Abschnitte vor dem Auseinanderdrehen wieder und zeigen gleichzeitig die Abfolge beim Eingriff in den Gutstrom zur axialen Vorwärtsbewegung. Bei einem Verdrehungswinkel $\delta = 90^\circ$ der Paddel zueinander, entsteht eine sogenannte nacheilende Paddelanordnung, die in dieser Arbeit kurz mit [ne] bezeichnet wird. Die Bezeichnung leitet sich aus der Reihenfolge der zueinander angeordneten Paddel beim Eingriff in den Gutstrom ab. Eine weitere Möglichkeit ist das Auseinanderdrehen der Paddel um einen Verdrehungswinkel $\delta = 270^\circ$. In diesem Fall entsteht eine vorauseilende Anordnung, in dieser Arbeit mit [ve] bezeichnet, da sich nun das direkt benachbarte Paddel beim Eingriff in den Gutstrom um 90° verdreht davor befindet.

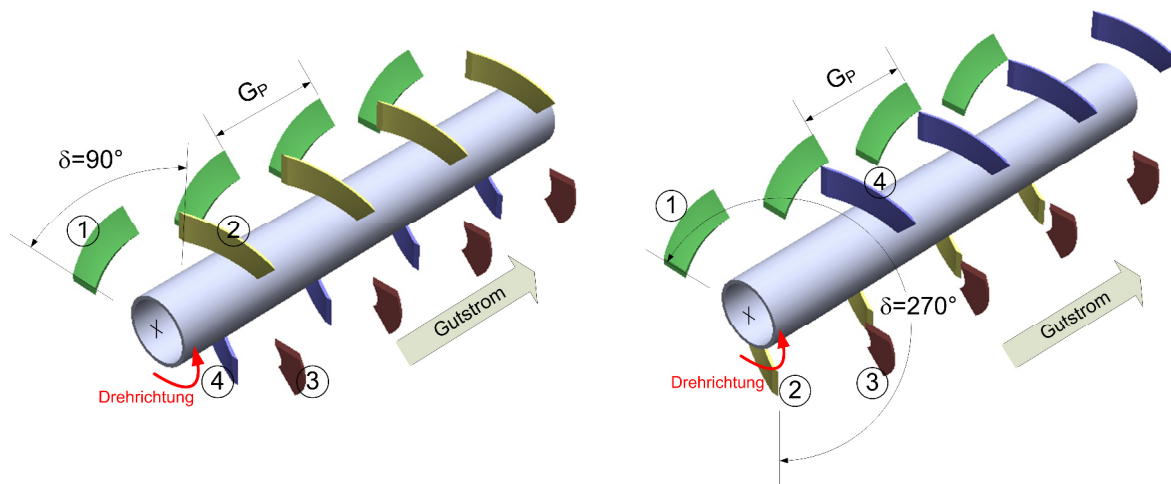


Abb. 5.18: links: nachteilige Anordnung [ne], rechts: und vorseilende Anordnung [ve]

Beim Ineinanderwickeln von zwei Bandschnecken, wie sie in der Abb. 5.19 gezeigt wird, ist dann nur noch eine Paddelanordnung möglich. Durch die versetzte Anordnung der beiden Bandschnecken um 180° und einem anschließenden Auseinanderdrehen um einen Verdrehungswinkel $\delta = 90^\circ$ heben sich die nachteilige und die vorseilende Paddelanordnung gegenseitig auf. Aus diesem Grund wird diese Konstellation als doppelte Paddelanordnung bezeichnet und kurz mit [dp] gekennzeichnet.

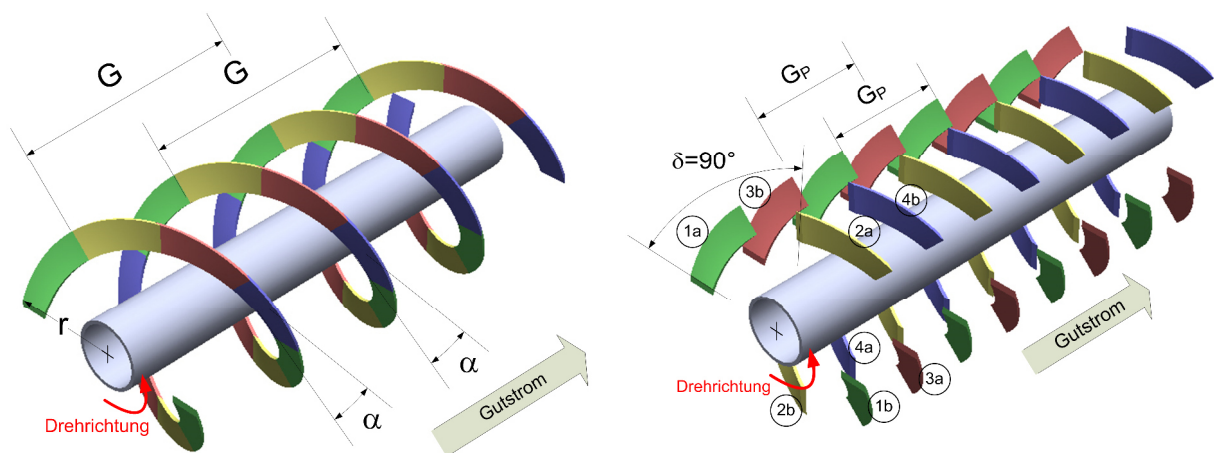
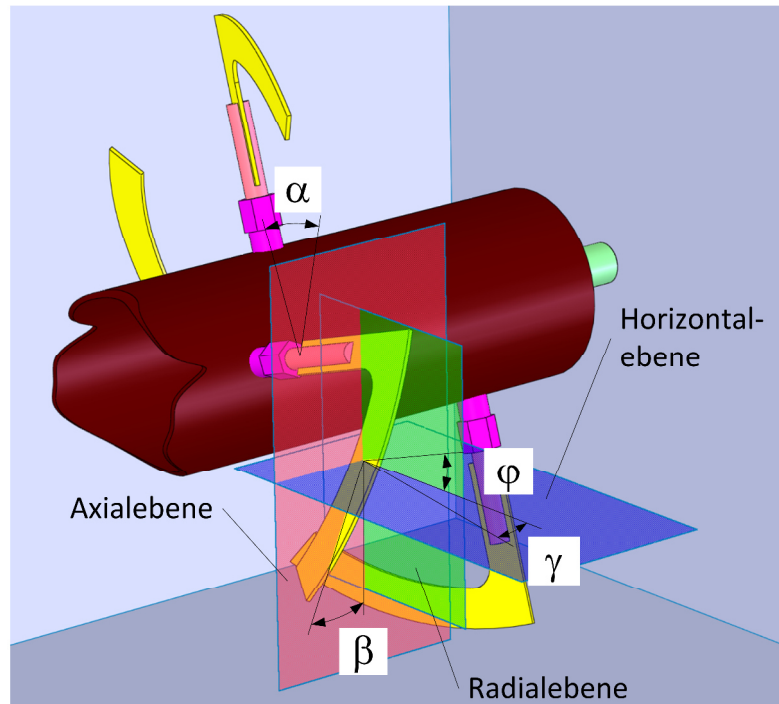


Abb. 5.19: doppelte Paddelanordnung [dp] (zwei Schnecken ineinander gewickelt)

In allen drei Fällen muss die Drehrichtung der Paddelschnecke beachtet werden, damit das Gut in die gewünschte axiale Richtung bewegt wird.

Für eine Betrachtung des Materialtransports, welches ein Abgleiten am Paddel bzw. auch Abwerfen vom Paddel beinhaltet, wurden die Winkelverhältnisse bei der Bewegung um seine Drehachse näher untersucht. Dazu wurde folgendes Modell vom Paddel mit seinem konstanten Steigungswinkel α aufgestellt (Abb. 5.20). In den drei Hauptebenen (Axialebene, Horizontalebene, Radialebene) lassen sich die veränderlichen Schnittwinkel β , γ , φ in Abhängigkeit von der jeweiligen Position des Winkels beschreiben. Der Schnittwinkel φ in der Radialebene ist identisch mit dem Laufwinkel φ des Paddels um seine Drehachse. Die Schnittwinkel β und γ als Vorschubwinkel in ihrer jeweiligen Ebene stehen in Abhängigkeit von dem Steigungswinkel α und dem Laufwinkel φ .



- α Steigungswinkel des Paddel
- β Vorschubwinkel in der Axialebene (vertikal)
- γ Vorschubwinkel in der Horizontalebene (horizontal)
- φ Laufwinkel des Paddel (identisch mit dem Schnittwinkel in der Radialebene)

Abb. 5.20: Darstellung der Winkel am Paddel

Die Abb. 5.21 zeigt das Paddel in den drei Betrachtungsebenen sowie die direkte Ansicht in der Paddelebene. Über den fest einzustellenden Steigungswinkel α vom Paddel und der jeweiligen Position des Paddels (Laufwinkel φ) bei der Bewegung um den Drehpunkt sollen nun die jeweiligen Vorschubwinkel in den entsprechenden Ebenen berechnet werden.

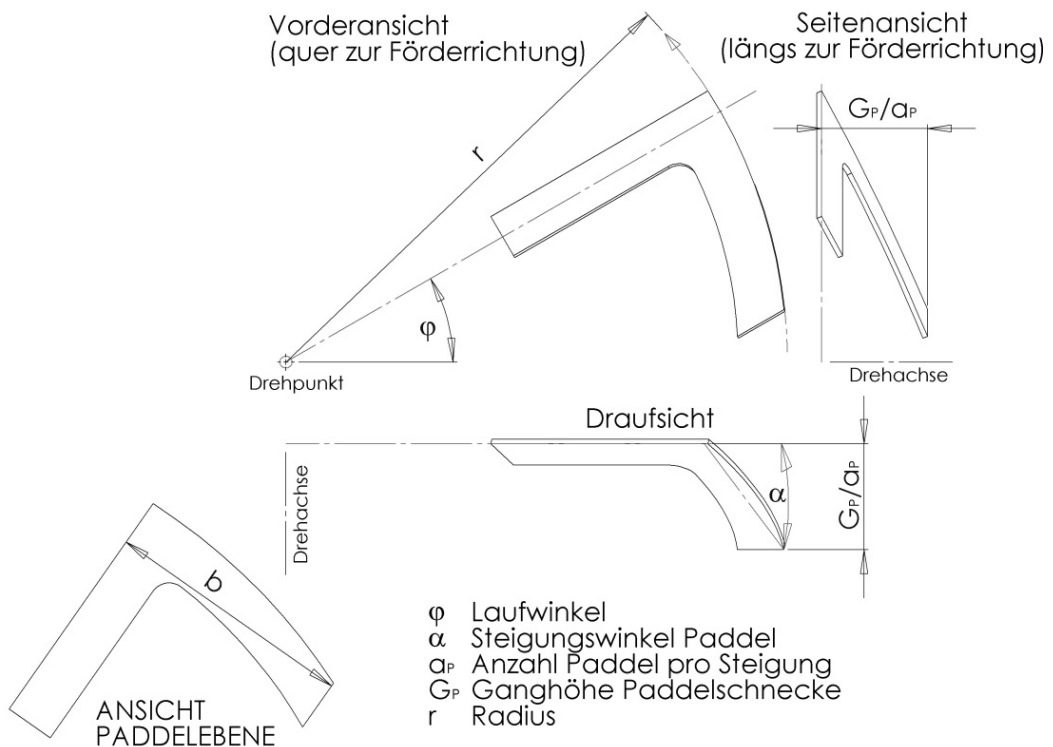


Abb. 5.21: Ansichten des Paddels in den verschiedenen Hauptebenen

5.6.2.1 Vorschubwinkel β in der Axialebene

Die Herleitung des vertikalen Vorschubwinkels in der Axialebene in Abhängigkeit von α und φ lässt sich durch geometrische Beziehungen zwischen den verschiedenen Ansichtsebenen vom Paddel durchführen (Abb. 5.22).

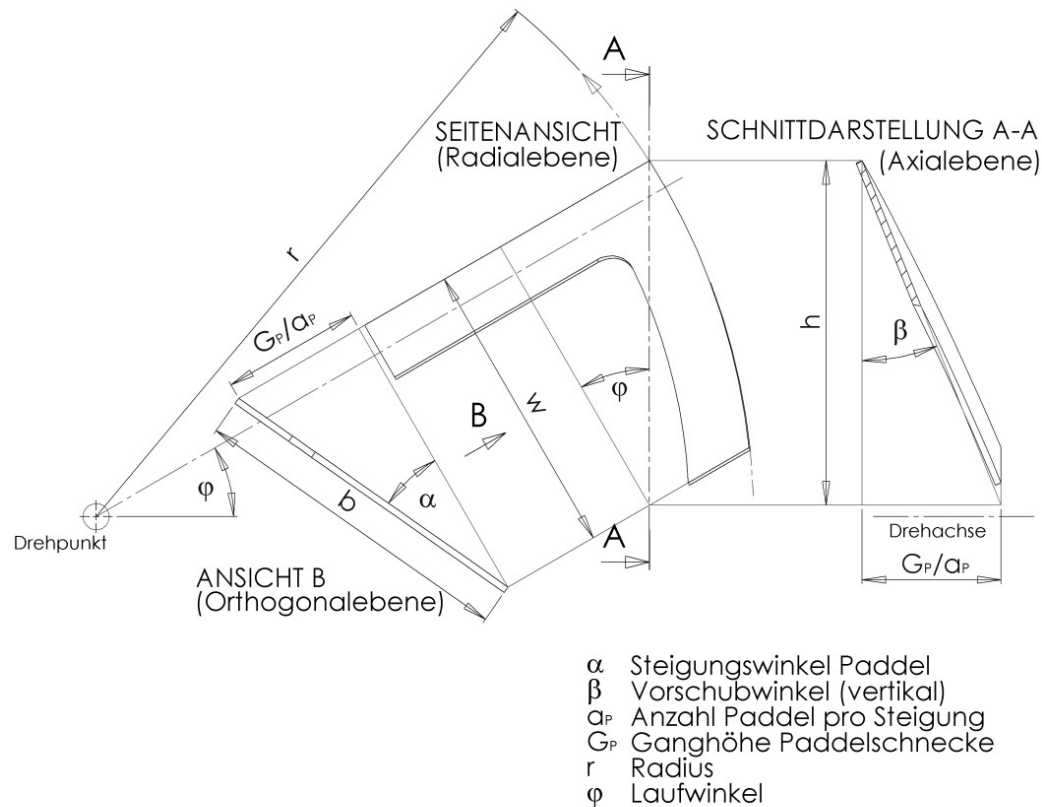


Abb. 5.22: Zusammenhang geometrischer Verhältnisse zur Bestimmung des Vorschubwinkels β in der Axialebene

Unter Verwendung der Orthogonalebene (Ansicht B), Radialebene und Axialebene und darin enthaltener geometrische Größen wird die Herleitung des Winkels β in den folgenden Gleichungen 5.2 bis 5.13 gezeigt:

In der Orthogonalebene sind die Winkelverhältnisse wie folgt definiert:

$$\cos(\alpha) = \frac{w}{b} \quad (5.2)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{G_P/a_P}{b} \quad (5.3)$$

Die Umstellung der Gleichungen 5.2 und 5.3 nach der Strecke w sowie G_p/a_p liefert:

$$w = \cos(\alpha) * b \quad (5.4)$$

$$G_p/a_p = \sin(\alpha) * b \quad (5.5)$$

In der Radialebene sind die Winkelverhältnisse wie folgt:

$$\cos(\varphi) = \frac{w}{h} \quad (5.6)$$

Die Umstellung der Gleichung 5.6 nach der Strecke h liefert:

$$h = \frac{w}{\cos(\varphi)} \quad (5.7)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 5.4 in die Gleichung 5.7 entsteht das neue Winkelverhältnis:

$$h = \frac{\cos(\alpha) * b}{\cos(\varphi)} \quad (5.8)$$

In der Axialebene sind die Winkelverhältnisse wie folgt beschreibbar:

$$\tan(\beta) = \frac{G_p/a_p}{h} \quad (5.9)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 5.5 und 5.8 in die Gleichung 5.9 ergibt sich:

$$\tan(\beta) = \frac{\sin(\alpha) * b * \cos(\varphi)}{\cos(\alpha) * b} \quad (5.10)$$

Folgender Winkelzusammenhang besteht:

$$\sin(\alpha) = \tan(\alpha) * \cos(\alpha) \quad (5.11)$$

Somit ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung 5.11 in Gleichung 5.10 und Kürzen folgender Zusammenhang:

$$\tan(\beta) = \cos(\varphi) * \tan(\alpha) \quad (5.12)$$

Die Auflösung der Gleichung 5.12 ergibt in der Axialebene den Winkel β in Abhängigkeit vom Steigungswinkel α und dem momentanen Laufwinkel φ :

$$\beta = \arctan(\cos(\varphi) * \tan(\alpha)) \quad (5.13)$$

Mit der Gleichung 5.13 kann nun für jede Position des Paddels (Laufwinkel $\varphi \leq 90^\circ$) und in Abhängigkeit von dem Steigungswinkel α des Paddels der entsprechend Vorschubwinkel β in der Axialebene bestimmt werden.

5.6.2.2 Vorschubwinkel γ in der Horizontalebene

Analog zur Bestimmung des axialen Vorschubwinkels β kann auch der Vorschubwinkel γ in der Horizontalebene bestimmt werden (Abb. 5.23).

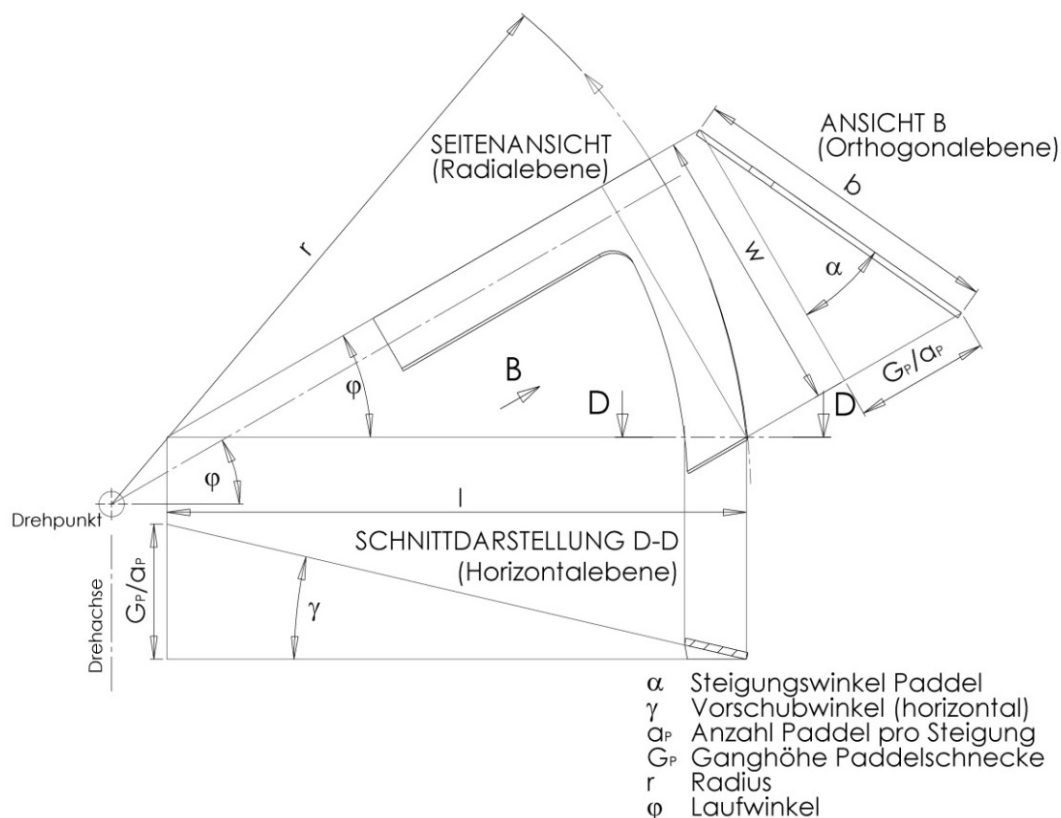


Abb. 5.23: Zusammenhang geometrischer Verhältnisse zur Bestimmung des Vorschubwinkels γ in der Horizontalebene

Unter Verwendung geometrischer Paddelmaße in der Orthogonalebene, Radialebene sowie Horizontalebene und deren Beziehung zueinander, kann der Winkel γ in Abhängigkeit von α und φ berechnet werden (Gleichungen 5.14 bis 5.20).

In der Radialebene sind die Winkelverhältnisse wie folgt:

$$\sin(\varphi) = \frac{w}{l} \quad (5.14)$$

Die Umstellung der Gleichung 5.14 nach der Strecke l liefert:

$$l = \frac{w}{\sin(\varphi)} \quad (5.15)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 5.4 in die Gleichung 5.15 entsteht das neue Winkelverhältnis:

$$l = \frac{\cos(\alpha) * b}{\sin(\varphi)} \quad (5.16)$$

In der Horizontalebene sind die Winkelverhältnisse wie folgt beschreibbar:

$$\tan(\gamma) = \frac{G_P/a_P}{l} \quad (5.17)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 5.5 und 5.16 in die Gleichung 5.17 ergibt sich:

$$\tan(\gamma) = \frac{\sin(\alpha) * b * \sin(\varphi)}{\cos(\alpha) * b} \quad (5.18)$$

Somit ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung 5.11 in Gleichung 5.18 und Kürzen folgender Zusammenhang:

$$\tan(\gamma) = \sin(\varphi) * \tan(\alpha) \quad (5.19)$$

Die Auflösung der Gleichung 5.19 ergibt in der Horizontalebene den Winkel β in Abhängigkeit vom Steigungswinkel α und dem momentanen Laufwinkel φ :

$$\gamma = \arctan(\sin(\varphi) * \tan(\alpha)) \quad (5.20)$$

Damit kann nun auch der Vorschubwinkel γ nach der Gleichung 5.20 für jede Position des Paddels (Laufwinkel $\varphi \leq 90^\circ$) und in Abhängigkeit von dem Steigungswinkel α des Paddels der entsprechende Vorschubwinkel γ in der Horizontalebene berechnet werden. Der Unterschied in den beiden Berechnungen der Vorschubwinkel (Gleichungen 5.13 und 5.20) besteht in der Verwendung des Sinus bzw. Cosinus vom Laufwinkel φ . Daran zeigt sich, dass das Betrachtungssystem um 90° gedreht ist.

5.6.3 Zusammenhang der Vorschubwinkel in Abhängigkeit von Lauf- und Steigungswinkel

Für die entwickelten Gleichungen zur Berechnung der Vorschubwinkel β und γ in ihren entsprechenden Ebenen wurde in Abhängigkeit vom Laufwinkel φ und Steigungswinkel α eine dreidimensionale Darstellung der Zusammenhänge aller 4 Winkel erarbeitet. Die Abb. 5.24 zeigt für den Steigungswinkel α in dem Bereich von 0° bis 45° und für den Laufwinkel φ von 0° bis 90° die resultierenden Vorschubwinkel β und γ . Dabei wurden die Steigungswinkel α von 10° , 25° und 40° zur besseren Verdeutlichung farblich hervorgehoben.

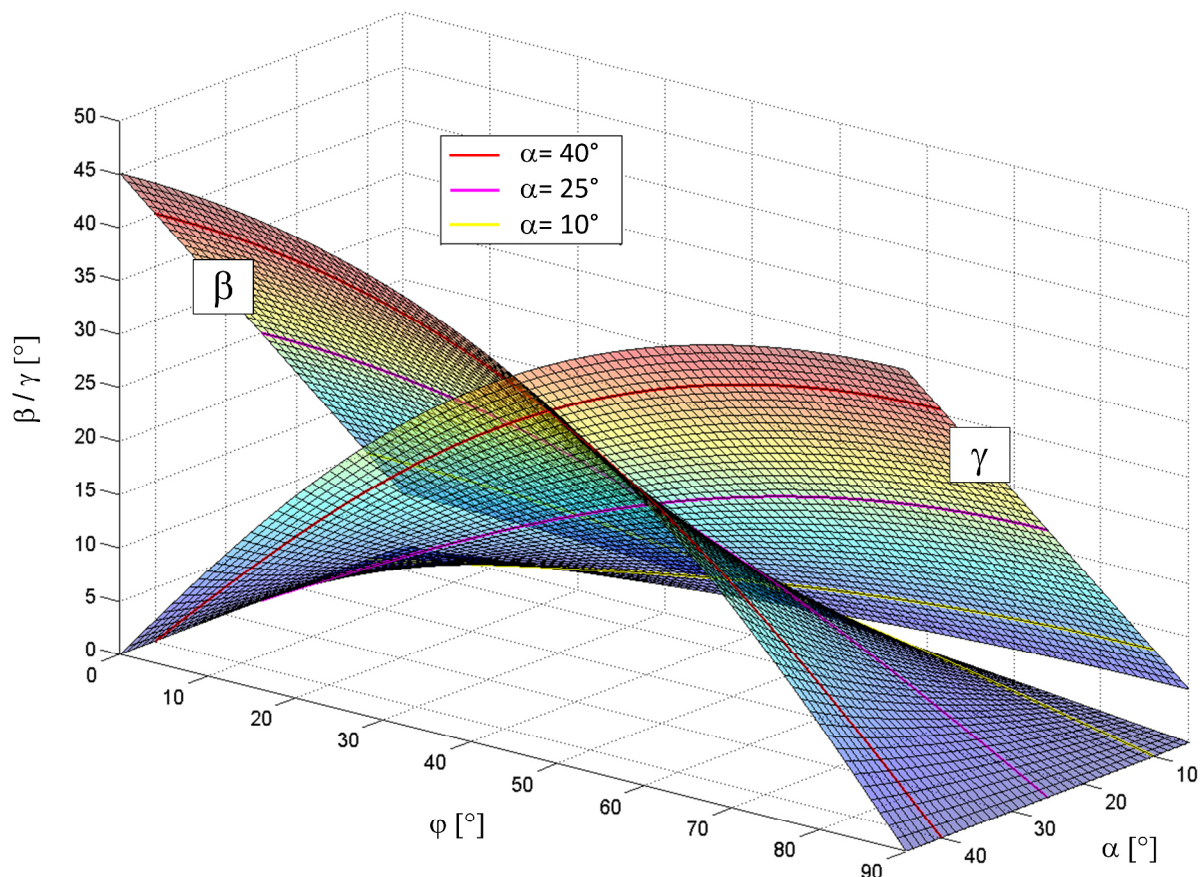


Abb. 5.24: Zusammenhang der Winkel am sich drehenden Paddel

Bei einem Laufwinkel von $\varphi = 45^\circ$ weisen die Vorschubwinkel β und γ jeweils den gleichen Wert auf. Je größer der Steigungswinkel α ist, umso so größer ist die absolute Änderung der Vorschubwinkel β und γ entlang des Laufwinkels φ (rotierendes Paddel). Dabei zeigt sich, dass der Vorschubwinkel β für kleine Laufwinkel nur eine geringe Änderung vollzieht und erst mit größer werden Laufwinkel sich bis auf $\beta = 0^\circ$ ändert. Beim Vorschubwinkel γ wiederum zeigt sich bereits eine große Änderung für kleine Laufwinkel φ , welche mit zunehmenden Laufwinkel dann aber abnimmt und schließlich den eingestellten Steigungswinkel ($\gamma = \alpha$) erreicht. Diese Zusammenhänge werden für eine spätere Berechnung der Partikelbewegung auf dem Paddel und dem sich daraus ergebenden Abwurf zur Flugbahnberechnung genutzt (siehe Kapitel 6.2).

5.6.4 Wirkende Kräfte beim Abwurf

Für die Betrachtung der Bewegung eines Partikels auf dem Paddel gilt es zunächst zwei grundlegende Bewegungszustände zu definieren. Bei der Aufstellung eines Kräftegleichgewichts muss die Bewegungsrichtung des Partikels an der geneigten Ebene beachtet werden (Abb. 5.25). Die wirkende Gewichtskraft F_G kann in ihre Kraftkomponenten der Normalkraft F_N und der Hangabtriebskraft F_H aufgeteilt werden. Die Normalkraft bildet in Verbindung mit einem materialspezifischen Faktor, dem Haftreibungskoeffizienten μ , die Reibkraft F_R .

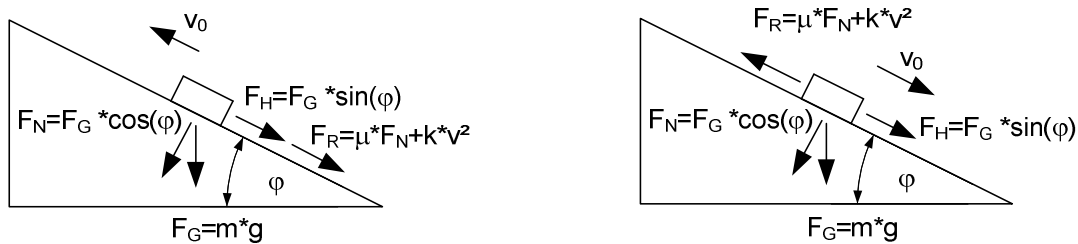


Abb. 5.25: Schematische Darstellung der zwei Bewegungszustände an der geneigten Ebene mit Luftreibung $=k \cdot v^2$ (links: Aufwärtsbewegung, rechts: Abwärtsbewegung)

Zusammen mit der Luftreibung wirkt sie entgegen der Bewegungsrichtung. Für die Luftreibung kann kurz $k \cdot v^2$ geschrieben werden, wobei k nach Gleichung 5.21 definiert ist.

$$k = \frac{1}{2} * c_w * A_p * \rho \quad (5.21)$$

- c_w Widerstandsbeiwert
- A_p Körperquerschnittsfläche
- ρ Dichte des strömenden Mediums

Bewegt sich nun ein Körper entlang einer schiefen Ebene nach oben, zeigen die Reibkraft und die Hangabtriebskraft entgegen der Bewegungsrichtung nach unten. Im zweiten Betrachtungsfall, einer Bewegungsrichtung des Partikels nach unten, wirken Reibkraft und Hangabtriebskraft in entgegengesetzter Richtung. Dies gilt es auch bei einer Partikelbewegung am Paddel zu beachten.

Hier kommt es zu einer überlagerten Bewegung aus einer Mitnahme des Partikels vom sich drehenden Paddels sowie einem Abgleiten des Partikels am Paddel nach unten infolge der Gravitationskraft. Aufgrund der wirkenden Zentrifugalkraft bewegt sich das Partikel dabei nach außen. Die Abb. 5.26 zeigt den Zusammenhang aus der tangentialen Geschwindigkeitskomponente v_{tan} und der relativen Geschwindigkeitskomponente v_{rel} , verursacht durch die Zentrifugal- sowie Erdbeschleunigung.

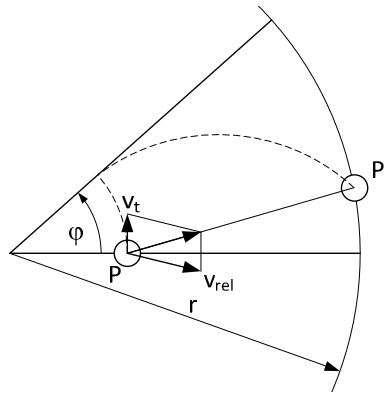


Abb. 5.26: Schematische Darstellung des Bewegungsablaufs bei einer Kreisbewegung mit nach außen gerichteter sowie abgleitender Geschwindigkeit

Das Partikel an der Position P startet mit der Kreisbahngeschwindigkeit und bewegt sich aufgrund der wirkenden Zentrifugalkraft nach außen. Durch die Schrägstellung des Paddels kommt es zeitgleich zu einem Abrutschen des Partikels entlang des Paddels und die Position P' ist erreicht. Das Paddel hat sich um den Laufwinkel φ weiter gedreht, wobei das Partikel an der Position P' eine vom Laufwinkel φ abweichende Winkelposition einnimmt.

5.6.5 Funktionsanalyse der Paddelfunktion

Handelsübliche Paddel für Trogschnecken weisen meist einen runden Außenradius auf, entsprechen dem Radius der verwendeten Trogwand. Der Vorteil dieser Standardpaddel liegt in dem Variablen Einsatz verschiedener Steigungswinkel. So kann das Paddel beginnend von einer Nullstellung (senkrecht zur Achse) von der Position weggedreht werden, ohne dass es zur Kollision mit der Außenwand kommt. Je weiter ein Paddel schräg gestellt wird, umso mehr läuft das Ende vom Paddel von der Trogwand weg. Dies macht sich besonders bei großen bzw. langen Paddelsegmenten bemerkbar. Die Abb. 5.27 zeigt den Zusammenhang im Querschnitt für drei bereits schon näher betrachtete Steigungswinkel.

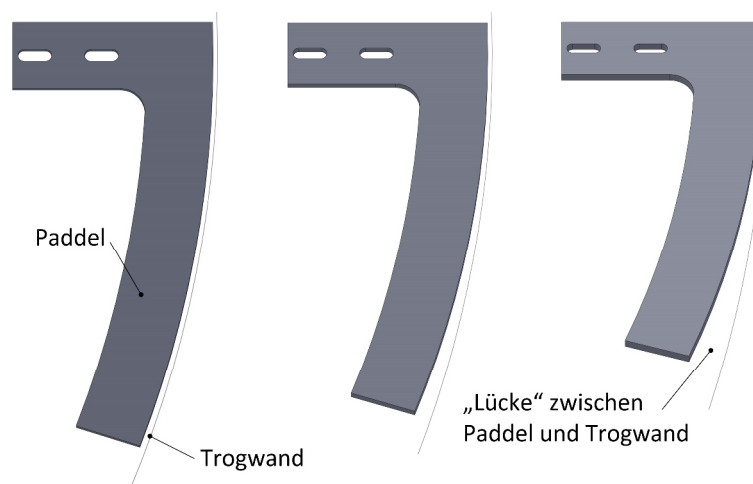


Abb. 5.27: Darstellung eines Paddels mit runder Außenkante für drei verschiedene Steigungswinkel (von links nach rechts: $\alpha = 10^\circ, 25^\circ, 40^\circ$)

Für die zu entwickelnde Reinigungsmaschine gilt es neben dem Transport des Materials über die Siebfläche, gleichzeitig dieses auch optimal zu räumen. Ein Paddel mit einer runden Außenkante ist für diesen Einsatzzweck nicht geeignet, da es dann zu Bereichen entlang des Abscheidewegs kommt die gar nicht oder nur ungenügend beräumt werden. Damit würde freie Siebfläche für das Passieren von Schaben durch das Sieb verloren gehen. Es zeigt sich also, dass die Außenkante vom Paddel entsprechend der konkreten Winkelstellung α , einer Parabel folgen muss.

5.6.6 Konstruktion eines Paddels zur optimierten Siebflächenräumung

Die Vorüberlegungen zur optimierten Paddelgeometrie zeigten die Notwendigkeit einer abgestimmten Paddelaußenkante zum Siebflächenradius. Die Verwendung der parabelförmigen Außenkante, abweichend von einer kreisförmigen Außenkante zeigt für einen Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$ eine optimale Form für eine gleichmäßige Räumung der Siebfläche (Abb. 5.28). Damit ist das Paddel auch unabhängig von der Länge des Sichelbogens, da dieser exakt dem Siebflächenradius im Querschnitt folgt.



Abb. 5.28: Optimiertes Paddel mit angepasster Außenkante an die Siebflächengeometrie für einen Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$

Für die Verwendung unterschiedlicher Paddelformen und Steigungswinkel bzw. auch zum Ausgleich von produktionstechnischen Ungenauigkeiten wurde ein Paddelsystem entwickelt, welches eine hohe Variabilität aufweist (Abb. 5.29). So kann über ein Schraube-Mutter-System der Steigungswinkel eingestellt und zur Fixierung entsprechend gekontert werden. Über Langlöcher im eigentlichen Paddel kann der Abstand zur Siebfläche genau angepasst werden. Durch die Klemmverbindung von Paddel und Schaft kann bei Bedarf nur das Paddel auf einfache Weise ausgetauscht werden.

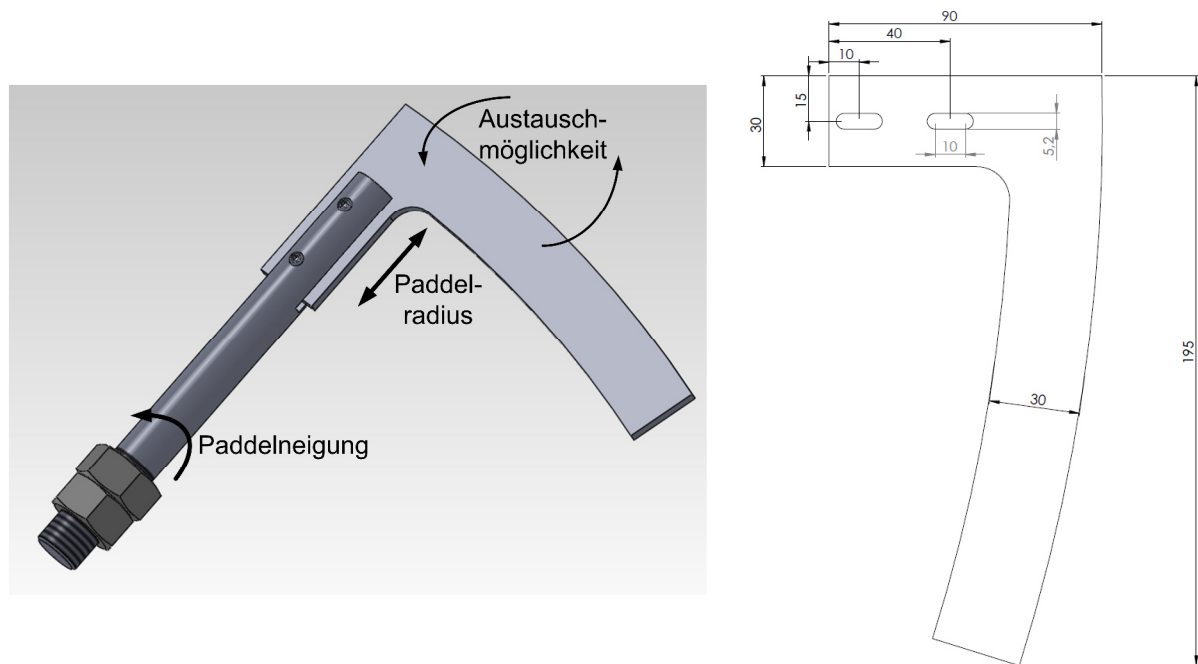


Abb. 5.29: Optimiertes Paddel mit angepasster Außenkannte an die Siebflächengeometrie für einen Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$

Zu beachten ist, dass bei Verwendung dieser optimierten Paddelform ein Wegdrehen aus dem vorgegebenen Steigungswinkel nur bedingt möglich ist. Eine Vergrößerung des Steigungswinkels wäre bedenkenlos möglich. Bei einer Reduzierung des Steigungswinkels kommt es aber unweigerlich zu einer Kollision mit dem Siebflächenradius. In diesem Fall muss der Abstand vom Paddel zur Siebfläche vergrößert werden, was wiederum eine verschlechterte Räumung der Siebfläche zur Folge hätte.

5.7 Optimieren der Partikelbewegung im Arbeitsraum des Axialfraktionierers

Wie bereits dargestellt, soll bei der Reinigung eines SFG's das Material vom Paddel über den Siebraum hinaus mitgenommen und dann abgeworfen werden (siehe Abb. 5.6). In dem oberen Arbeitsraum soll mit einer überlagerten Luftströmung vor allem Staub und Ultrakurzfasern als Schwebepartikel aus diesem Bereich entfernt werden, ohne die eigentliche Abwurfbewegung zu beeinflussen. Notwendige Kennwerte von Schaben bei der Bewegung im Luftstrom sind dafür zu ermitteln.

5.7.1 Funktionsanalyse zur Abwurfbewegung und Staubabsaugung im Arbeitsraum

Durch das Prinzip einer Paddelschnecke wird das Gut auf dem Sieb vorwiegend auf die Steigseite vom Paddel geschoben. Damit steht freie Siebfläche zum Passieren der Schaben auf der gegenüberliegenden

den Seite bereit. Da die Paddelschnecke mit einer Drehzahl betrieben werden soll, die ein Abwerfen vom Paddel über die Welle begünstigt, besteht die Möglichkeit auch diese Siebfläche zu nutzen. Ein tangentialer Auslauf der Siebfläche ab einem Winkel von 60° soll einer materialflussgerechten Wurfbewegung entsprechen und zur Erhöhung eines möglichen Siebereignisses beitragen. Die Abb. 5.30 zeigt den sich ausbildenden Querschnitt vom Sieb- und Arbeitsraum mit seiner unteren Siebflächenbegrenzung und der oberen Gehäuseabdeckung.

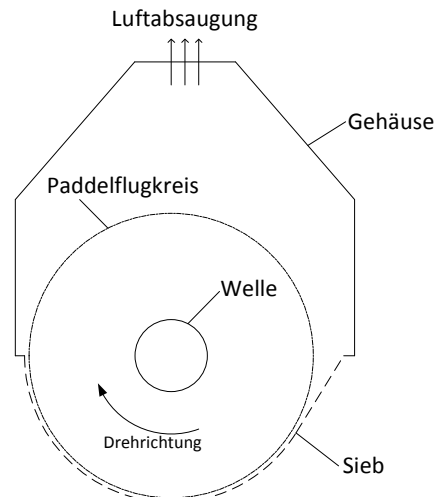


Abb. 5.30: Ausbildung des Sieb- und Arbeitsraums im Querschnitt

Der obere Bereich muss so gestaltet werden, dass der Bauraum genügend Platz für eine Wurfbewegung bietet. Gleichzeitig muss die im oberen Bereich anzuschließende Staubabsaugung genügend Abstand vom Paddelradius und den Wurfbahnen haben. Ein sich von der Luftanschlussstelle aufweitendes Maschinengehäuse entspricht einer strömungsgerechten Gestaltung mit einer abnehmenden Strömungsgeschwindigkeit. Damit kann die Luftgeschwindigkeit so eingestellt werden, dass sie keinen nennenswerten Einfluss auf die Gutstrombewegung im Bereich des Paddelradius ausübt, aber gleichzeitig im oberen Bereich in der Schwebelage befindliche Staubpartikel erfassen kann.

5.7.2 Theorie der Partikelbewegung im Schwerfeld

Für die Bewegung eines Partikels im Schwerfeld bei einem umgebenden Fluid (in unserem Fall Luft) lassen sich nun verschiedene Kräftegleichgewichte für verschiedene Zeitpunkte und Bewegungsphasen aufstellen (Abb. 5.31). Der Fall a) beschreibt den Zustand zum Zeitpunkt $t = 0$ in dem das Partikel losgelassen wird und die Sinkgeschwindigkeit noch null ist. Die Beschleunigungsphase im Fall b) weist einen sehr kurzen Zeitabschnitt auf und ist in der Verfahrenstechnik für die meisten Anwendungen vernachlässigbar klein [Stieß, 2009]. Hier ist die Phase gemeint in der das Partikel zu sinken beginnt bis hin zu seiner Endgeschwindigkeit. Im Fall c) hat das Partikel seine Endgeschwindigkeit erreicht mit der es konstant sinkt. Die Trägheitskraft kommt in diesem Fall nicht mehr zur Anwendung und ist gleich null. Der letztgenannte Fall ist von besonderem Interesse und soll näher untersucht werden.

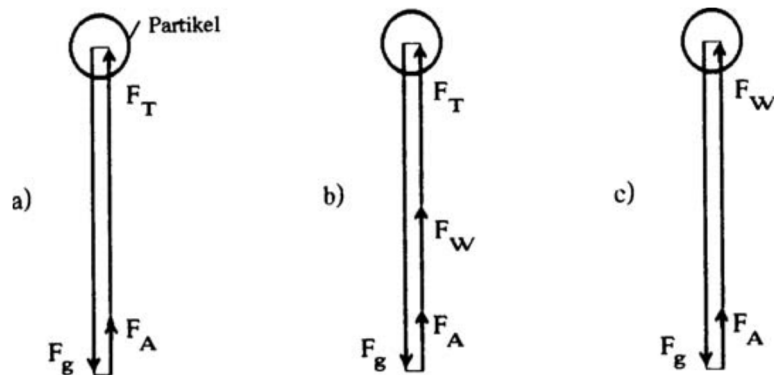


Abb. 5.31: Kräftegleichgewicht an sinkender Partikel [Stieß, 2009]
 (a) Zeitpunkt $t = 0$, (b) Beschleunigungsphase, (c) stationäres Sinken

F_g	Gewichtskraft
F_A	Auftriebskraft
F_T	Trägheitskraft
F_W	Widerstandskraft

Da die Kräfte im Fall c) auf einer Richtung liegen, wird für den zu untersuchenden Bewegungsfall folgender Zusammenhang aufgestellt (Gleichung 5.22):

$$F_G = F_A + F_W \quad (5.22)$$

Die nach unten wirkende Gewichtskraft wirkt der nach oben gerichteten Auftriebskraft und der Widerstandskraft entgegen. Die Gleichungen 5.23 bis 5.25 zeigen dem mathematischen Zusammenhang zur Bestimmung der jeweiligen Kräfte.

$$F_G = \rho_P * V_P * g \quad (5.23)$$

$$F_A = \rho_F * V_P * g \quad (5.24)$$

$$F_W = c_w * \frac{\rho_F}{2} * w_s^2 * A_P \quad (5.25)$$

Durch Umstellung der zuvor genannten Zusammenhänge kann nun der Widerstandsbeiwert c_w bestimmt werden (Gleichung 5.26)

$$c_w = \frac{2 * (\rho_P - \rho_F) * V_P * g}{\rho_F * w_s^2 * A_P} \quad (5.26)$$

Mit dem c_w -Wert lässt sich dann für ein Partikel die Luftreibung bei verschiedenen Geschwindigkeiten berechnen. Dabei hat die Auftriebskraft einer Schabe in Luft nur einen sehr geringen Einfluss. Soll für die Bestimmung des c_w -Wertes mit der Masse eines Partikels gerechnet werden, kann durch die

vorherrschende Auftriebskraft beim Wiegen in Luft die Berechnung näherungsweise nach Gleichung 5.27 erfolgen.

$$c_w = \frac{2 * m * g}{\rho_F * w_s^2 * A_P} \quad (5.27)$$

Wie aus dieser Gleichung erkennbar, ist für die Bestimmung des c_w -Wertes die Kenntnis der Schweb- bzw. Sinkgeschwindigkeit notwendig. Führt man an einem sinkenden Partikel eine von unten konstante Luftströmung entgegen, ergibt sich der in Abb. 5.32 dargestellte Zusammenhang. Das Partikel bewegt sich jetzt mit seiner Sinkgeschwindigkeit relativ zu der ihm entgegengesetzten Luftströmung. Das Partikel hat nun die Absolutgeschwindigkeit u . Im Betrachtungsfall c) ist die Absolutgeschwindigkeit $u = 0$ und das Partikel wird als Schwebekorn bezeichnet. Damit sind die Sinkgeschwindigkeit w_s und die Luftgeschwindigkeit v vom Betrag her gleich groß. Daher wird in dieser Arbeit beim Erreichen dieses einen speziellen Zustandes von einer Schwebegeschwindigkeit gesprochen. Damit kann der c_w -Wert für eine Partikel berechnet werden. Alle Partikel die nun im Vergleich eine geringere Schwebegeschwindigkeit aufweisen würden, werden als Feingut nach oben abtransportiert. Partikel mit einer größeren Schwebegeschwindigkeit würden als Grobgut nach unten sinken.

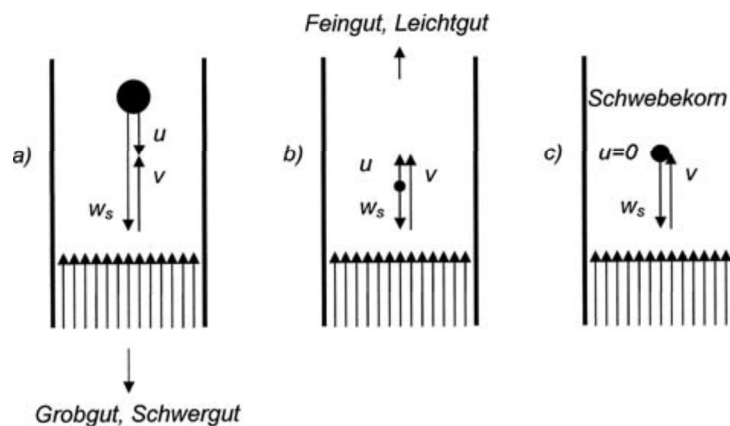


Abb. 5.32: Prinzip der Gleichgewichts-Gegenstrom-Klassierung. (a) Absinken des Grobguts (Schwerguts) nach unten; (b) Aufwärtstransport des Feinguts (Leichtguts) nach oben; (c) In-Schwebe-Bleiben des Gleichgewichtskorns [Stieß, 2009]

Anhand des c_w -Wertes für eine bestimmte Partikelform kann nun wiederum der Luftwiderstand für eine beliebige Geschwindigkeit des Partikels bei Kenntnis der Querschnittsfläche die der Bewegungsrichtung entgegen wirkt und der Dichte der Luft berechnet werden (Gleichung 5.28).

$$F_W = c_w * \frac{\rho_F}{2} * v^2 * A_P \quad (5.28)$$

Somit kommt es zum Beispiel bei der Berechnung der Bewegungsbahn eines schrägen Wurfes zu einer reduzierten Wurfweite (ballistische Kurve), im Vergleich zur idealen Wurfparabel ohne den Einfluss des Luftwiderstandes.

5.7.3 Konstruktion eines Versuchsstandes zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit

Für die Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit (Sinkgeschwindigkeit) wurde sich für die Gegenstromsichtung entschieden.

In Bezug auf die Arbeit zur Untersuchung des Spaneflugs bei der Trockenbearbeitung metallische Werkstoffe von [Dressler, 2006] wird auf einen entsprechenden Versuchsstand zurückgegriffen. Der grundlegende Aufbau entspricht der Arbeit von [Gonell, 1928] zur Untersuchung der Kornzusammensetzung staubförmiger Stoffe. Wie in Abb. 5.33 zu sehen, besteht der grundlegende Versuchsaufbau aus einem Radialventilator, einem aufrechten Rohr und einem Auffangbehälter.

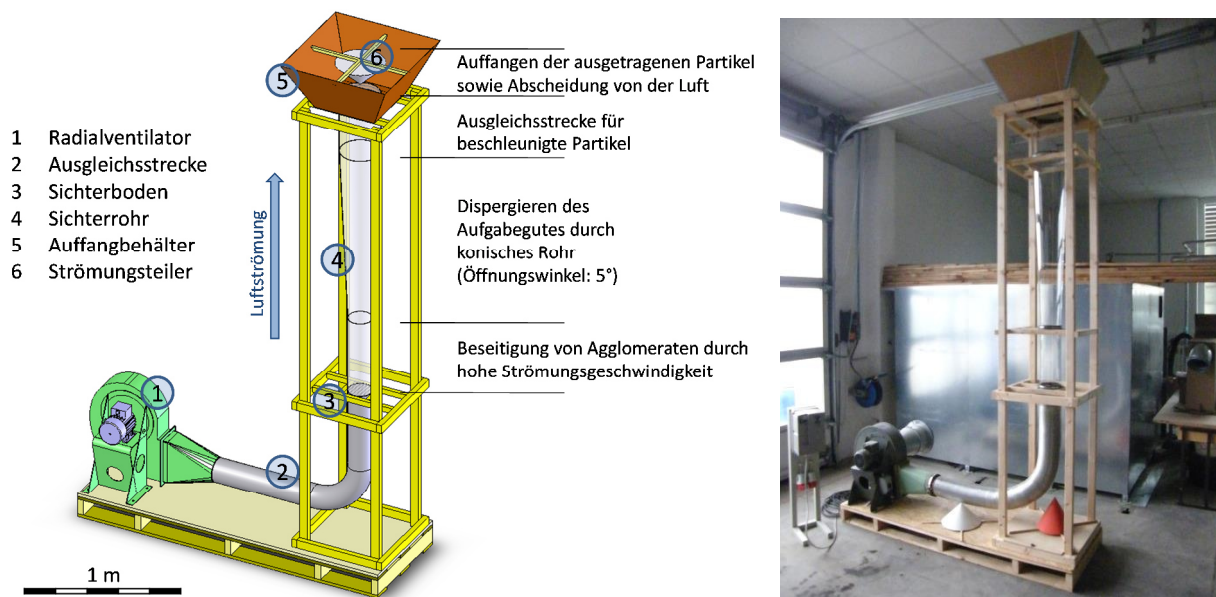


Abb. 5.33: Schematische Darstellung und gebauter Versuchsstand zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit

Der notwendige Luftvolumenstrom wird über einen Radialluffter ① erzeugt. Über eine Irisblende direkt am Lufteinlass kann der Luftvolumenstrom grob voreingestellt werden. Eine Feinjustierung bzw. Veränderung des Volumenstroms innerhalb einer Versuchsreihe erfolgt mittels einer Drehzahlregelung über einen an den Radialluffter angeschlossenen Frequenzumrichter. Über ein Rohr als Ausgleichsstrecke in Abschnitt ② wird der Luftstrom in die Vertikale zum Sichterboden ③ gelenkt. Dieser besteht aus einem engmaschigen Drahtgitter mit einem Durchmesser von 150 mm und einem darunter sitzenden Gleichrichter zur Vermeidung von Stromungsturbulenzen (Abb. 5.34).



Abb. 5.34: engmaschige Siebfläche als Aufgabeflache (links) und darunter sitzender Gleichrichter aus Strohhalmen (rechts)

Über dem Siehboden folgt das eigentliche Siebrohr ④. Es besteht zunächst aus einem Rohrteilstück mit dem gleichen Durchmesser wie der Siehboden und einer Länge von 450 mm. Dann folgt ein konisches Rohrteilstück mit 1200 mm Länge und einem sich aufweitendem Querschnitt auf 250 mm Durchmesser. Den Abschluss bildet ein Rohrteilstück mit dem gleichen Durchmesser und einer Länge von 400 mm. Mit dieser Anordnung des Siebrohrs lässt sich nun nach Einstellen eines bestimmten Luftvolumenstroms das Aufgabegut vom Siehboden abheben. Durch das sich aufweitende Rohrteilstück und der damit verbundenen Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit wird verhindert, dass die Partikel aus dem Siebrohr unkontrolliert nach oben herausschießen. Das obere Abschlussrohr dient dabei als Ausgleichsstrecke für beschleunigte Partikel aus dem sich aufweitenden Rohrteilstück. Damit wird gewährleistet, dass nur Partikel mit einer kleineren Sinkgeschwindigkeit, ähnlich der gerade in diesem oberen Bereich vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeit, ausgetragen werden. Aus dem Rohr ausgetragene Partikel werden in einem abnehmbaren Auffangbehälter ⑤ gesammelt. Damit ausgetragene Partikel beim Herabfallen nicht wieder in das Rohr eintreten können, befindet sich noch über dem Rohraustritt ein Strömungsteiler ⑥. Die Partikel werden dadurch nach außen abgelenkt und landen dann im Auffangbehälter. Ein Wiedereintritt in das Siebrohr wird damit verhindert.

Zur Überprüfung des Strömungsprofils im Austrittsrohr wurde nach Abb. 5.35 der Querschnitt mit einem Strömungssensor (Thermoanemometer) vermessen.

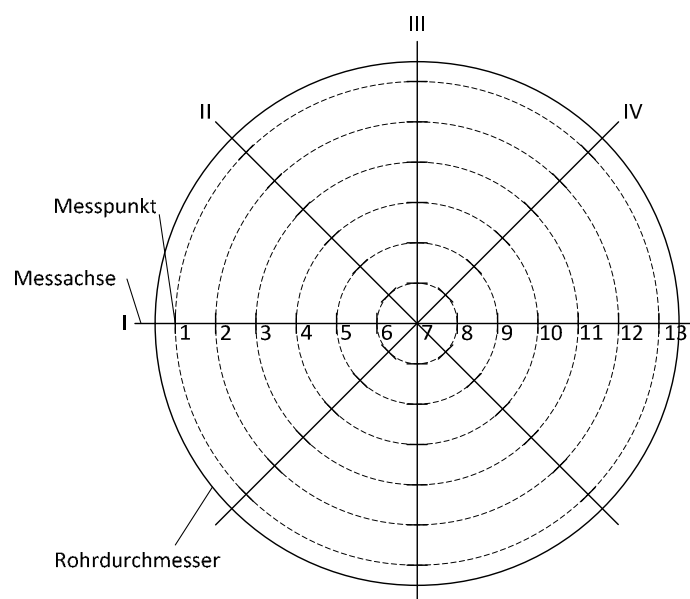


Abb. 5.35: Messpunkte für die Vermessung des Strömungsquerschnitts am Austrittsrohr

Der Querschnitt des oberen Siebrohrs wurde in 4 Messachsen (I - IV) mit 13 Messpunkten unterteilt, welche jeweils um 45° zueinander verdreht sind. Ausgehend von dem Versuchsaufbau im Bereich ③ (siehe Abb. 5.33) wurde das Strömungsprofil ohne Einbauten, mit Siehboden sowie mit Siehboden und Gleichrichter am oberen Rohrquerschnitt aufgenommen (Abb. 5.36). Hier zeigte sich deutlich wie durch gezielte Einbauten die Luftströmung beruhigt und ein typisches Strömungsprofil im Rohrquerschnitt erzeugt wird. Dabei ist in der Rohrmitte die höchste Strömungsgeschwindigkeit, welche zur Rohrwand abnimmt.

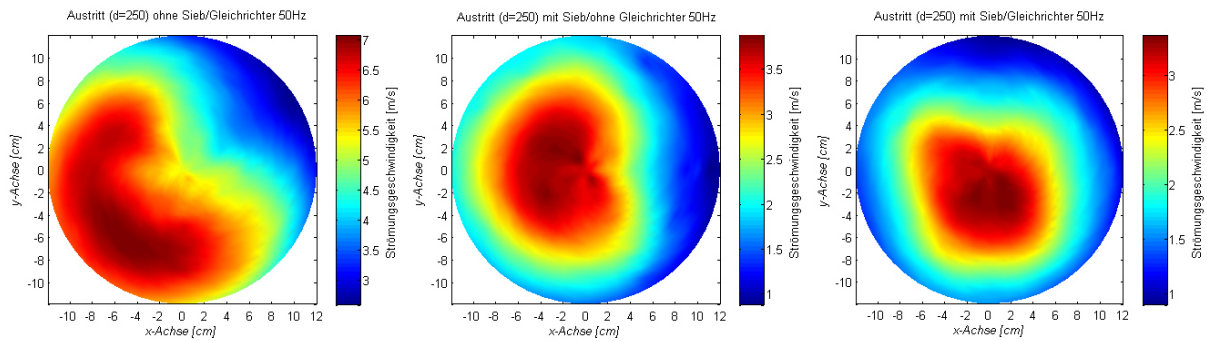


Abb. 5.36: Strömungsprofile am Austritt mit unterschiedlichen Einbauten bei einer Lüfterfrequenz von 50 Hz (von links nach rechts: ohne Sieb/Gleichrichter, mit Sieb/ohne Gleichrichter, mit Sieb/Gleichrichter)

Da die Schwebegeschwindigkeit von den zu untersuchenden Schäben eine große Bandbreite abdecken kann, wurde ebenfalls über die Frequenzsteuerung des Radiallüfters das Strömungsprofil bei unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten aufgenommen (Abb. 5.37). So zeigte sich für fünf verschiedene Lüfterdrehzahlen (Frequenzsteuerung Motor) in dem Bereich von 1,0 bis 5,0 m s^{-1} als Maximalgeschwindigkeit ein gewünschtes Strömungsprofil mit der höchsten Geschwindigkeit in der Rohrmitte.

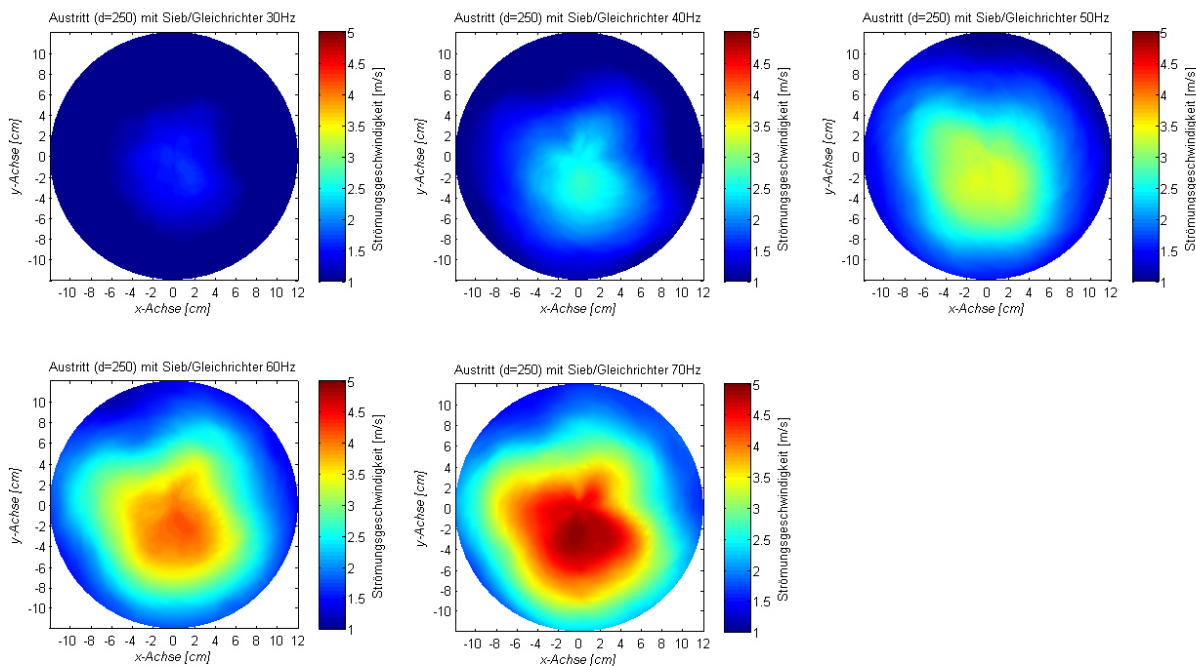


Abb. 5.37: Strömungsprofile am Austritt bei unterschiedlichen Lüfterfrequenzen (von oben links nach rechts: 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz; von unten links nach rechts: 60 Hz, 70 Hz)

Aus diesem Grund wird die Rohrmitte als Bezugsmesspunkt zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass alle Partikel, die eine geringere Sinkgeschwindigkeit als diese entsprechende Strömungsgeschwindigkeit aufweisen, diesen Bereich passieren und in einem bestimmten Zeitintervall ausgetragen werden. Für ein Aufgabegut von 5 g einer vorgesiebten Schäbenfraktion wurde experimentell eine maximale Zeitspanne von 25 min bis zur Gewichtskonstanz der ausgetragenen Partikelfraktion ermittelt. Für die durchzuführenden Versuche wurde diese Zeitspanne um weitere 5 min als Sicherheit zur vollständigen Austragung aller entsprechenden Partikel auf 30 min erhöht.

5.7.4 Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit

Um möglichst viele Schäben mit einer ähnlichen Schwebegeschwindigkeit pro Aufgabemenge im Sichterrohr zu haben wurde ein typisches SFG mittels eines Schwingsiebes vorfraktioniert. Die enthaltenen Fasern wurden dabei entfernt. Durch die verwendeten Siebmaschenweiten konnte das Gemisch in folgende Siebfractionen unterteilt werden:

- 0 - 0,5 mm
- >0,5 - 1,0 mm
- >1,0 - 2,5 mm
- >2,5 - 4,0 mm
- >4,0 - 8,0 mm

Die nun erhaltenen Fraktionen werden getrennt voneinander dem Sichterboden zugeführt. Über die Frequenzsteuerung vom Radiallüfter wird die Strömungsgeschwindigkeit langsam erhöht, bis sich die Partikel vom Sichterboden abheben. Durch die Verwendung eines durchsichtigen Rohrmaterials und einer visuellen Betrachtung kann die Strömungsgeschwindigkeit exakt eingestellt werden, ohne ein Austragen der Partikel aus dem Sichterrohr zu verursachen. Eine weitere Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bewegt die ersten Partikel in den oberen Bereich des konisch verlaufenden Rohrstücks. Dieser Zustand muss sehr langsam angefahren werden, damit die Startgeschwindigkeit für die Partikel mit der geringsten zum Austragen notwendigen Schwebegeschwindigkeit gefunden wird und nicht frühzeitig Partikel das Rohr verlassen. Gleichzeitig vollzieht sich im Bereich des konisch verlaufenden Rohrteilstücks, durch die sich verändernde Strömungsgeschwindigkeit, eine Vorseparierung der Partikel. Mit der ermittelten Startgeschwindigkeit beginnt der eigentliche Austragungsvorgang der Partikel aus dem Sichterrohr. Nach Ablauf der experimentell bestimmten Sichtszeit werden die ausgetragenen Partikel in dem Auffangbehälter entnommen und gewogen. In möglichst kleinen Intervallen wird nun die Strömungsgeschwindigkeit sukzessive erhöht und nach Ablauf der Sichtszeit werden ebenfalls für jedes Intervall analog zur Startgeschwindigkeit die ausgetragenen Partikel entnommen und gewogen. Dies erfolgt solange bis alle Partikel in dem Sichterrohr ausgetragen sind. Das Intervall für die Strömungsgeschwindigkeit wurde mit $0,2 \text{ m s}^{-1}$ festgelegt. Als Beispiel weisen Partikel, die mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $2,6 \text{ m s}^{-1}$ ausgetragen wurden, eine Schwebegeschwindigkeit von mehr als $2,4$ bis maximal $2,6 \text{ m s}^{-1}$ auf. Die spätere Zuordnung erfolgt immer der oberen Intervallgrenze, da mit dieser Strömungsgeschwindigkeit die jeweilige komplette Austragsfraktion abgedeckt wird (ähnlich der Summenbetrachtung einer Analysesiebung).

5.7.5 Versuchsergebnisse

Die Abb. 5.38 zeigt beispielhaft für zwei Siebfraktionen entsprechend ihrer Schwebgeschwindigkeit separierten Schäbenfraktionen. Dabei wurde für die Siebfraktion >1,0 - 2,5 mm ein Geschwindigkeitsbereich von 1,0 bis 3,8 m s⁻¹ und für die Siebfraktion >2,0 - 4,0 mm ein Geschwindigkeitsbereich von 2,0 bis 4,2 m s⁻¹ durchfahren.



Abb. 5.38: ausgetragene Schäben zweier Siebfraktionen nach einem Versuchsdurchlauf
(links: >1,0 - 2,5 mm, rechts: >2,0 - 4,0 mm)

Die so erhaltenen Partikelfraktionen wurden anschließend eingescannt und mit der institutseigenen Software „partikel.exe“ ausgewertet. Das ermöglichte die Bestimmung der Querschnittsfläche sowie die Anzahl der Partikel für jede Fraktion. Die Abb. 5.39 zeigt zwei typische Scanneraufnahmen der Schäbenpartikel von einer konkreten Siebfraktion bei unterschiedlichen Schwebgeschwindigkeiten. Zum Teil mussten mehrere Aufnahmen von einer Fraktion gemacht werden, da die Scannerfläche für die zu untersuchenden Partikel sonst überfrachtet gewesen wäre.

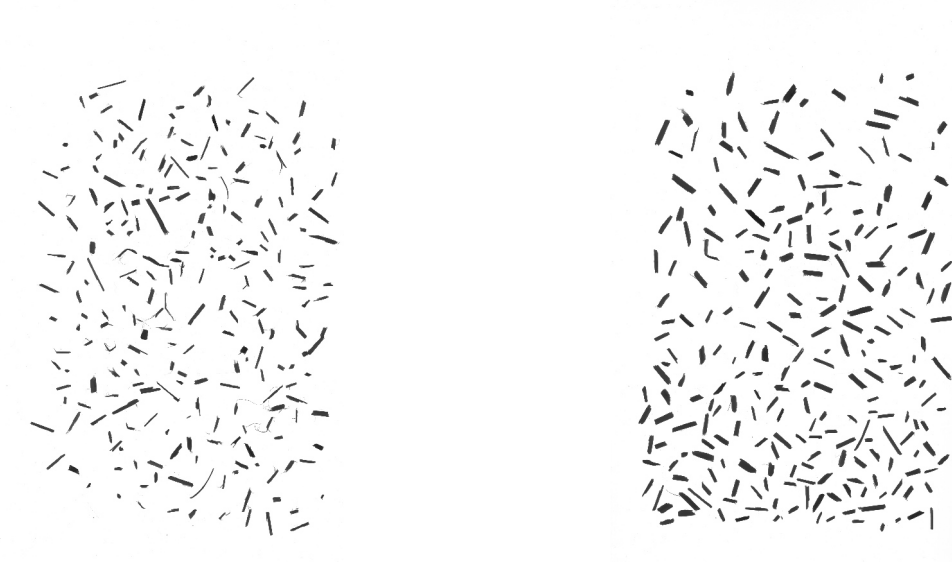


Abb. 5.39: Scanneraufnahme von den ausgetragenen Schäben der Siebfraktion >1,0 - 2,5 mm
(links: Schwebegeschwindigkeit 2,0 m s⁻¹, rechts: Schwebegeschwindigkeit 3,0 m s⁻¹)

Anhand der ermittelten Daten werden in den folgenden Diagrammen verschiedene Zusammenhänge dargestellt. In der Abb. 5.40 sieht man die Masseverteilungsdichte bezogen auf die Schwebgeschwindigkeit für jede einzelne Siebfraktion.

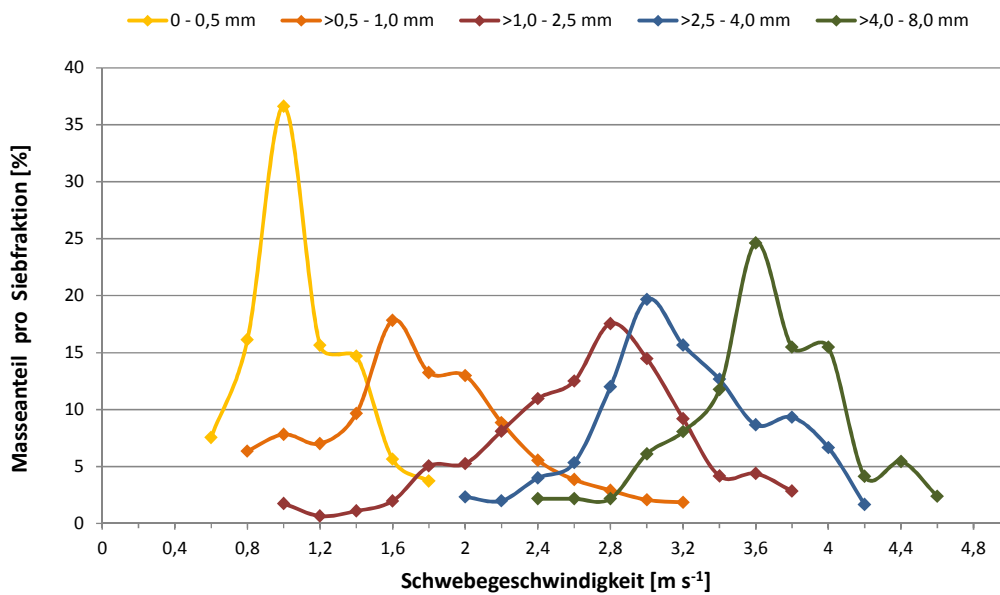


Abb. 5.40: Masseverteilungsdichte bei unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeiten von vorgeseibten Schäben

So zeigt sich mit einer größer werdenden Siebfraktion eine Verschiebung der Verteilungsdichten in Richtung der höheren Schwebegeschwindigkeiten. Die kleinste Siebfraktion (0 - 0,5 mm), welche vor allem Staubpartikel beinhaltet, zeigt im Vergleich zu den anderen Siebfraktionen den geringsten Schwebegeschwindigkeitsbereich mit einer deutlichen Konzentrierung bei 1 m s^{-1} .

Betrachtet man nun die einzelnen Siebfraktionen als gesamte Probenfraktion zeigt sich eine bimodale Verteilung (Abb. 5.41). Dies liegt vor allem an der unterschiedlichen Zusammensetzung des Gemisches aus Staub- und Schäbenpartikel.

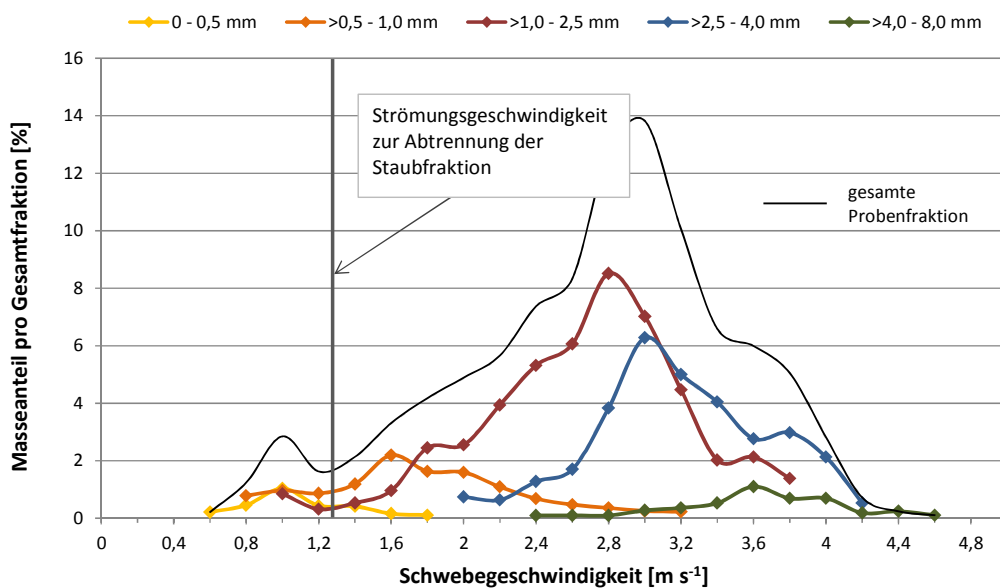


Abb. 5.41: Masseverteilungsdichte bei unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeiten von vorgeseibten Schäben

Eine Abtrennung von besonders kleiner Schäben- bzw. Staubpartikel ist bei einer Luftabsauggeschwindigkeit von ca. $1,2 \text{ m s}^{-1}$ möglich.

In den nächsten Betrachtungen wurde sich nur noch auf die Schäbenfraktionen konzentriert. Die mittlere Masse einer Hanfschäbe zeigt einen exponentiellen Anstieg entlang der Schwebegeschwindigkeit (Abb. 5.42). Besonders deutlich wird dies bei der Sichtung der größeren Siebfraktionen.

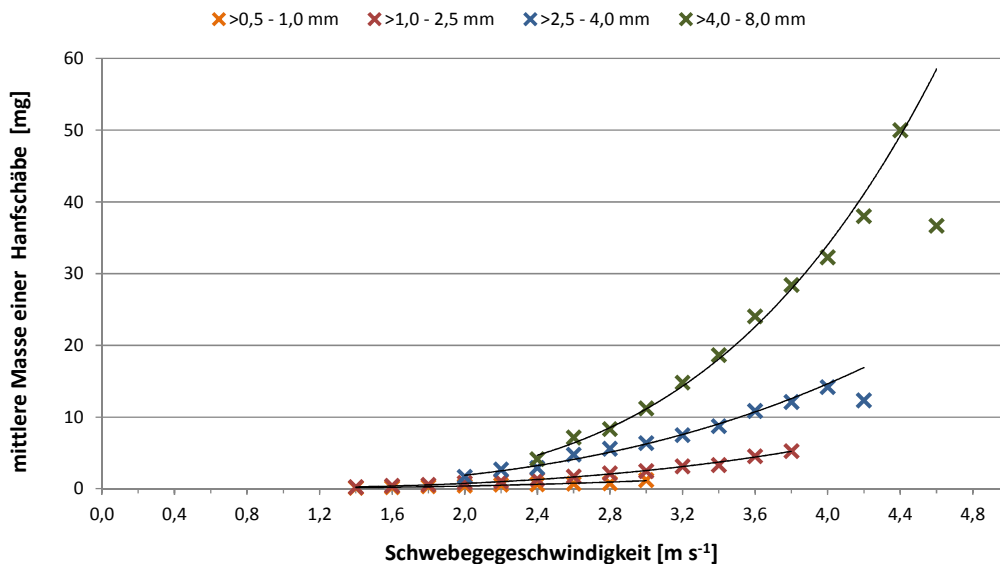


Abb. 5.42: Masse eines Partikels bei unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeiten von vorgeseibten Schäben

Schäben mit unterschiedlicher Masse können gleiche Schwebegeschwindigkeiten aufweisen. Dies liegt in ihrer Schäbenform bzw. der Querschnittsfläche begründet, die der Luftströmung entgegengebracht wird. Dabei richten sich bewegte Partikel immer so aus, dass sie ihr den maximalen Widerstand entgegensetzen [Müller, 2008]. In der Abb. 5.43 ist ein linearer Verlauf der mittleren Fläche einer Schäbe in Abhängigkeit von der Schwebegeschwindigkeit zu erkennen.

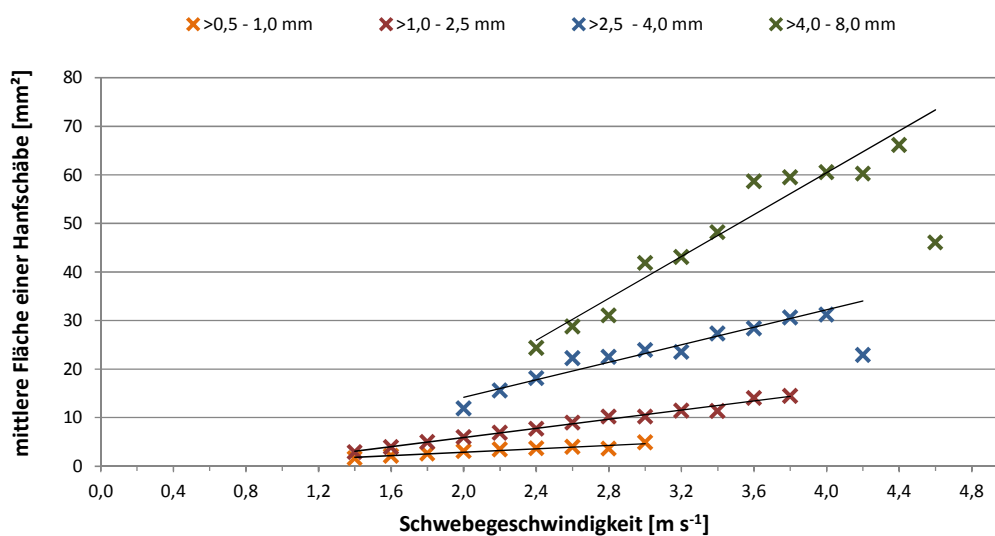


Abb. 5.43: Fläche eines Partikels bei unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeiten von vorgeseibten Hanfschäben

Aus der durchschnittlichen Masse und der mittleren Fläche eines Partikels lässt sich nun für jede Schwebegeschwindigkeit innerhalb der jeweiligen Korngrößenfraktion der c_w -Wert nach Gleichung

5.27 berechnen. Der massengewichtete Mittelwert für die vier untersuchten Korngrößenfraktionen einer Schäbenmischung liegt bei einer Schwebegeschwindigkeit von $2,8 \text{ m s}^{-1}$ und einem Anteil von über 50 Masse-% der Schäben in einem engen Bereich von $2,4$ bis $3,2 \text{ m s}^{-1}$ (Abb. 5.44).

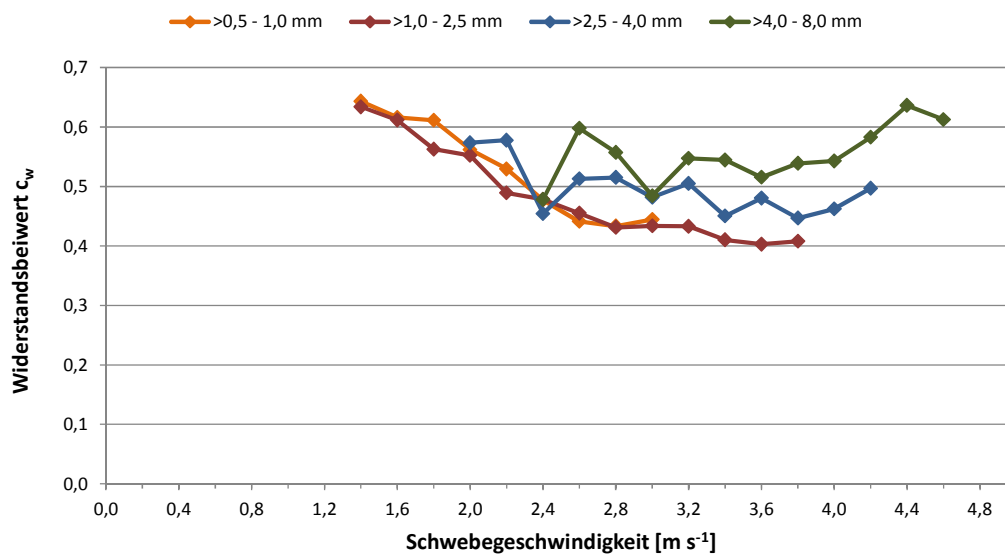


Abb. 5.44: Widerstandsbeiwert einer Hanfschäbe bei konkreter Schwebegeschwindigkeit für verschiedene Siebfraktionen

Die ermittelten Widerstandsbeiwerte gelten für den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich. Für den hier vorliegenden Newtonbereich mit quadratischem Einfluss der Luftgeschwindigkeit, können diese Werte für einen großen Bereich als konstant angenommen werden.

In den Arbeiten von [Stieß, 2009] und [Zlatev, 2005] wird näher auf die Kornformbeschreibung und die verschiedenen möglichen Kornformfaktoren eingegangen. Als eine der ältesten Möglichkeiten zur Formkennzeichnung ist die Kennzeichnung der Partikelform nach [Walz, 1936]. Er schlägt vor, die Größtabmessungen von drei senkrecht zueinander stehenden Raumkoordinaten zu bestimmen. Aus den Verhältnissen von X_x/X_z und X_y/X_z lassen sich dann die Partikel zwar nur grob klassifizieren, es zeigt sich aber für Hanfschäben ein Formenbereich, zu dem sie gezählt werden können und warum diese Darstellung gewählt wurde. Im Gegensatz zu [Stieß, 2009] wo die Abmessungen mit den Bezeichnungen X_x als kleinsten Wert und mit X_z der größte Wert zugeordnet werden, muss die korrekte Bezeichnung aber mit X_x als größten Wert, also der Länge des Partikels und mit X_z der kleinste Wert des Partikels (Dicke) lauten. Damit ergibt sich für X_y , der mittlere Wert der dann als Breite des Partikels bezeichnet werden kann. Mit dieser Bezeichnung von Länge, Breite und Dicke lässt sich die Darstellung nach Walz nun eindeutig erklären. Die Einordnung der Schäben in das Formendiagramm nach Walz ergibt die Form eines langgestreckten Partikels (Abb. 5.45).

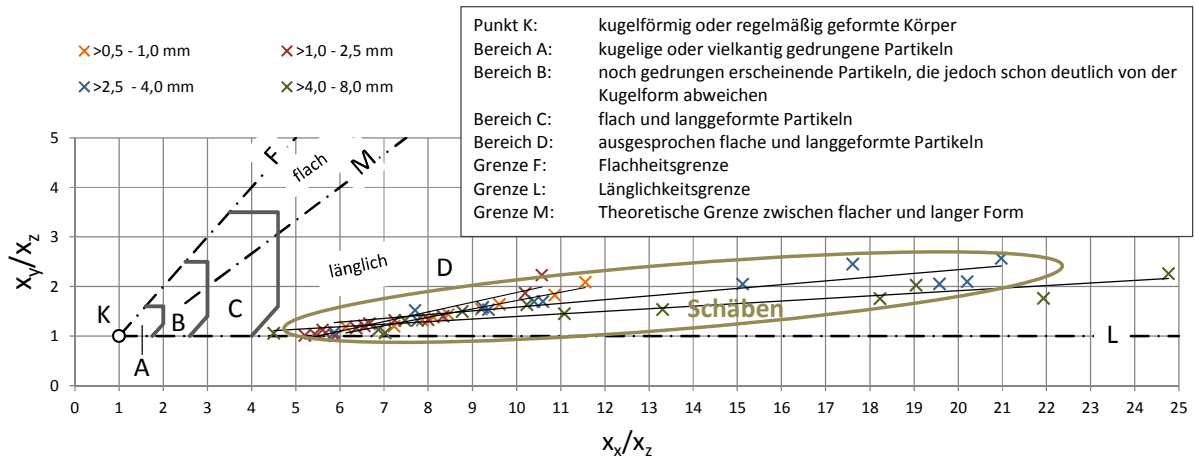


Abb. 5.45: Einordnung der Mittelwerte von den Größenabmessungen der Schäben in das Formendiagramm nach [Walz, 1936]

Das oft verwendete Längen-Breiten-Verhältnis (Aspect ratio) kann mit Werten zwischen 5 bis 10 angegeben werden. Für das Verhältnis von Breite zu Dicke liegen die Werte zum größten Teil unter 2 und weisen nur für ausgesprochen lange Partikel Werte über 2 auf. Zu beachten ist, dass die Partikel in den jeweiligen Korngrößenklassen eine Zunahme der Schwebegeschwindigkeit aufweisen, je näher sie dem Bereich C kommen. Dies hängt mit der Zunahme einer eher gedrunenen Partikelform zusammen.

Die Übertragung dieser Partikelform in eine geometrische Form, für die es in der Literatur beschriebene Widerstandsbeiwerte existieren, zeigt bei einem zylindrischen Stab noch die meiste Ähnlichkeit. So wird in für einen quer angeströmten zylindrischen Stab bei einem Durchmesser zu Längenverhältnis von 1:5 einen Widerstandsbeiwert von 0,74 und bei einem Verhältnis von 1:10 einen Widerstandsbeiwert von 0,82 angegeben [Beitz, 1990]. Je höher die Schwebegeschwindigkeit bei den Schäben ist, umso mehr weisen sie eine gedrunene Form auf. Hier kann als Anhaltspunkt die geometrische Form einer Kugel genommen werden, die einen c_w Wert von 0,4 aufweist [Wagner, 2001], [Stieß, 2009]. Damit liegen die ermittelten Werte von 0,42 bis 0,65 für die Schäben im realistischen Bereich im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen Werten für exakte geometrische Formen.

5.8 Schlussfolgerungen für die Modellierung

Für die weitere Arbeit gilt es als Ziel, den Materialtransport sowie die Separierung der Schäben von den anderen Bestandteilen des SFG's in einem Modell festzuhalten. Die Form, der Steigungswinkel und der Flugkreisradius vom Paddel sowie Paddelanordnung und -drehzahl beeinflussen den zu transportierenden Massestrom sowie die Separierung und zählen zu den modellbildenden Parametern. Von Bedeutung sind die Materialparameter, insbesondere die Flugeigenschaften der Schäben. Die Analyse hat gezeigt, wie die Parameter alle miteinander zusammenhängen und welche Wirkung sie auf Materialtransport und -reinigung ausüben. So ist die Drehzahl der Paddelschnecke für die Geschwindigkeit des Gutstroms in axiale Richtung sowie die Abwurfbewegung des Materials vom

Paddel und der Zerschlagung von Agglomeraten verantwortlich. Gleichzeitig reduziert sich aber mit einer erhöhten Wellendrehzahl und der gesteigerten axialen Gutstrombewegung die zum Passieren der Schäben durch die Siebfläche zur Verfügung stehende Zeit. Dies würde der Ausdehnung der Schäben entgegen wirken. Die Steigung des Paddels steht im Zusammenhang mit der Abwurfbewegung vom Paddel, dem Ableiten am Paddel sowie der axialen Vorschubbewegung. Je steiler ein Paddel gestellt ist (niedriger Steigungswinkel), umso geringer ist die Abwurfbewegung durch ein erhöhtes Abrutschen am Paddel. Zu flach gestellte Paddel (hoher Steigungswinkel) begünstigen das Abwerfen vom Paddel bei gleichzeitigem reduziertem Vorschub. Die Anordnung der Paddel auf der Welle hat Einfluss auf die Vorschubgeschwindigkeit, Zerschlagung der Agglomerate sowie den Massestrom. Zwei ineinander gewickelte Paddelschnecken können mehr Material bewegen als eine Paddelschnecke. Der Verdrehungswinkel von einem nachfolgenden Paddel entscheidet über die Zerschlagung von abgeworfenen Agglomeraten, was wiederum die Ausdehnung der Schäben beeinflusst. Eine Zusammenfassung der Konstruktions- und Betriebsparameter und deren Einfluss auf die Arbeitsweise der neu zu entwickelnden Reinigungsmaschine stellt die Tab. 5.4 dar.

Tab. 5.4: Einfluss der Konstruktions- und Betriebsparameter

Einfluss auf Parameter	Massestrom	Verweilzeit	Abwurf- wahrschein- lichkeit	Zeitdifferenz zw. zwei Paddel	Impuls bei Ma- terialkontakt
Erhöhung der Dreh- zahl	↑	↓	↑	↓	↑
Paddelanordnung	↑↓	↑ → ↓	→	↑ → ↓	→
Erhöhung des Stei- gungswinkels	↑↓	↑↓	↑	→	→
Vergrößerung der Paddelhöhe	↑	→	↑	→	→
Vergrößerung des Paddelflugkreisradius	↑	→	↑	→	↑

Das Modell soll die optimierende Konstruktion des Axialfraktionierers unterstützen. Die folgende Frage ist dabei zu beantworten: Welcher Paddelaufbau muss gewählt und bei welchen Parametern muss diese Paddelschnecke betrieben werden, um eine optimale Reinigung des SFG's bei gleichzeitig hohem Massestrom zu gewährleisten?

6 Modellentwicklung für Wurf- und Gutbewegungen in einem Axialfraktionierer

In der vorliegenden Arbeit sollen vorrangig zwei Hauptziele mit der Modellierung des Massestroms in einem Axialfraktionierer verfolgt werden:

- ① ein prinzipielles Verständnis über eine Paddelschnecke und den damit verbundenen Transportvorgängen
- ② Vorhersagen grundlegender Betriebsparameter unter Verwendung konkreter Konstruktionsparameter für ein optimales Aussiebungsverhalten der Schäben entlang der Reinigungsstrecke

In der Literatur werden Transportvorgänge mit Paddelschnecken nur sehr wenig betrachtet, was die Notwendigkeit einer Beschreibung der Zusammenhänge und der Entwicklung eines eigenen Modells auch in Hinblick auf das Aussiebungsverhalten besonders erstrebenswert macht.

6.1 Modellierung von Partikelbewegungen in Schneckenförderern

Die bisher beschriebenen Fördervorgänge beziehen sich vordergründig auf die Verwendung von Vollschnecken. Neben waagerechten Schnecken werden auch geneigte Schnecken untersucht. Ausgehend von der Arbeit von [Vierling et al., 1957] zur Untersuchung von Bewegungsvorgängen eines Fördergutes im Schneckenrotor, werden unter anderem die Umfangsgeschwindigkeit und die translatorische Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schneckenradius und der Ganghöhe analysiert. In der Arbeit von [Böttcher, 1963] geht es um eine kinematische Betrachtung der Bewegung eines Einzelkörpers (Abb. 6.1). Während der von der Schnecke überstrichene Winkel φ_s hat der Einzelkörper dabei die absolute Bahn b von A_1 über A_2 nach A_3 zurückgelegt und ist gekennzeichnet durch den Winkel φ_a . Seine relative Bahnkurve verläuft dabei von A_1^* über A_2^* nach A_3^* und ist gekennzeichnet durch den Winkel φ_r . In dieser Zeit gelangte der Punkt B_1 über B_2 nach B_3 und der Körper hat sich damit relativ aufwärts bewegt. Voraussetzung soll dafür sein, dass der Körper stets in Berührung mit der Schraubenlinie und der Zylinderwand ist.

- Flugkreisradius des Paddels
- Paddelanordnung
- Luftwiderstand von Schäben und Faserflocken
- Reibungsverhältnisse am Paddel

Die einwirkenden Kräfte auf ein Partikel am Paddel unter konkreten geometrischen Rahmenbedingungen sind in der Abb. 6.2 dargestellt. Diese Rahmenbedingungen wurden bereits im Kapitel 5.6.2 ausführlich gezeigt und bestehende Winkelbeziehungen hergeleitet. Zu beachten ist, dass es sich um eine Einzelpartikelbetrachtung handelt und es nicht zu einer Interaktion zwischen den einzelnen Partikeln kommt.

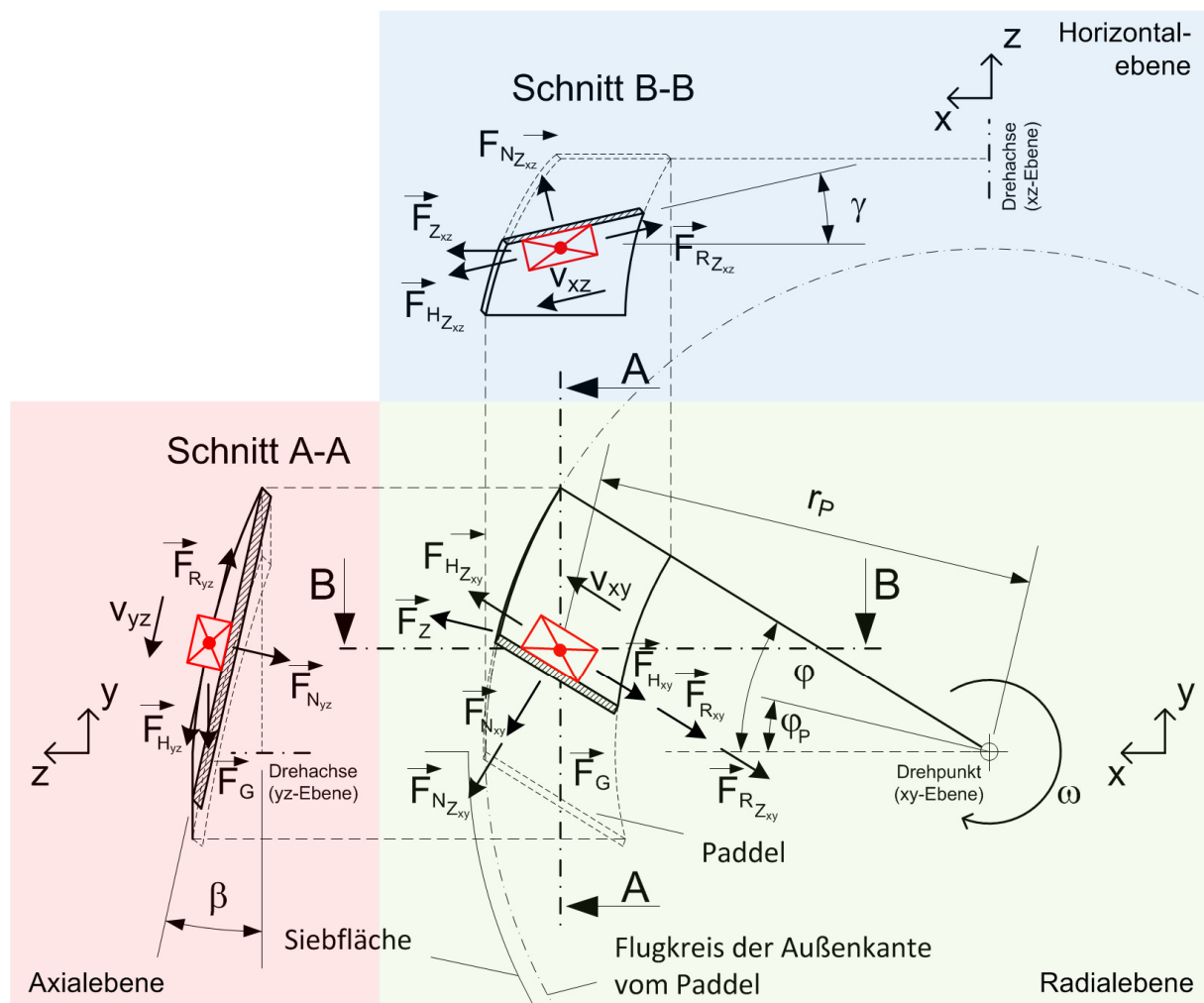


Abb. 6.2: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte in den freigeschnittenen Ebenen

Da es sich um eine dreidimensionale Bewegung handelt, wird die Bewegung des Partikels jeweils in den drei Hauptebenen betrachtet. Die dabei entstehenden Schnitte am Paddel mit ihren geometrischen Winkelverhältnissen können in Abhängigkeit vom Laufwinkel φ unter Berücksichtigung des Steigungswinkels α nach den Gleichungen 5.13 und 5.20 berechnet werden. Zu beachten ist, dass das Partikel durch das Abrutschen am Paddel einen vom Laufwinkel φ abweichenden Positionswinkel φ_P aufweist. Diese Differenz kann auch als Schlupf bezeichnet werden und hat wiederum Einfluss auf die Zentrifugalkraft. In dem Modell wird davon ausgegangen, dass sich die Partikel erst ab Erreichung der horizontalen Paddelposition nach außen bewegen können, da sie vorher noch von der im unteren Bereich befindlichen halbreisförmigen Siebfläche gehalten werden. Unbeachtet bleibt durch die nach

außen gerichtete Partikelbewegung bei einer Kreisbewegung auftretende Corioliskraft, da sie im Vergleich zu den anderen vorherrschenden Kräften nur einen geringen Einfluss ausübt.

Unter Beachtung der theoretischen Grundlagen aus dem Kapitel 5.6.4 kann in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung des Partikels das Kräftegleichgewicht in den drei Hauptebenen aufgestellt werden:

- Kräftegleichgewicht in der Radialebene (xy-Ebene) nach Gleichung 6.1:

$$m * a_{xy} = F_{H_{zxy}} - F_{H_{xy}} - F_{R_{xy}} - F_{R_{zxy}} \quad (6.1)$$

Die entsprechenden Kraftkomponenten lassen sich nach den Gleichungen 6.2 bis 6.5 berechnen.

$$F_{H_{xy}} = F_G * \sin(\varphi) \quad \text{mit} \quad F_G = m * g \quad (6.2)$$

$$F_{R_{xy}} = \mu * F_{N_{xy}} \quad \text{mit} \quad F_{N_{xy}} = F_G * \cos(\varphi) \quad (6.3)$$

$$F_{H_{zxy}} = F_Z * \cos(\varphi - \varphi_P) \quad \text{mit} \quad F_Z = \omega^2 * m * r_P \quad (6.4)$$

$$\text{und} \quad \omega = \frac{\Delta\varphi}{t_{\text{Schritt}}} ; \omega_0 = 2 * \pi * n$$

$$F_{R_{zxy}} = \mu * F_{N_{zxy}} \quad \text{mit} \quad F_{N_{zxy}} = F_Z * \sin(\varphi - \varphi_P) \quad (6.5)$$

- Kräftegleichgewicht in der Axialebene (yz-Ebene) nach Gleichung 6.6:

$$m * a_{yz} = F_{H_{yz}} - F_{R_{yz}} \quad (6.6)$$

Die entsprechenden Kraftkomponenten lassen sich nach den Gleichungen 6.7 und 6.8 berechnen.

$$F_{H_{yz}} = F_G * \cos(\beta) \quad \text{mit} \quad F_G = m * g \quad (6.7)$$

$$F_{R_{yz}} = \mu * F_{N_{yz}} \quad \text{mit} \quad F_{N_{yz}} = F_G * \sin(\beta) \quad (6.8)$$

- Kräftegleichgewicht in der Horizontalebene (xz-Ebene) nach Gleichung 6.9:

$$m * a_{xz} = F_{H_{Zxz}} - F_{R_{Zxz}} \quad (6.9)$$

Die entsprechenden Kraftkomponenten lassen sich nach den Gleichungen 6.10 und 6.11 berechnen.

$$F_{H_{Zxz}} = F_{Zxz} * \cos(\gamma) \quad \text{mit} \quad F_{Zxz} = F_Z * \frac{\sin(\varphi - \varphi_P)}{\sin(\varphi)} \quad (6.10)$$

$$F_{R_{Zxz}} = \mu * F_{N_{Zxz}} \quad \text{mit} \quad F_{N_{Zxz}} = F_{Zxz} * \sin(\gamma) \quad (6.11)$$

Die in allen drei Ebenen aufgestellten Kräftegleichgewichte beinhalten noch nicht eine durch die Luftreibung verursachte Kraft bei der Bewegung eines Partikels. Bedingt durch das Prinzip und den Aufbau des Axialfraktionierers sollen im Wellenabschnitt 1 vorwiegend die Schäben und im Wellenabschnitt 2 vorwiegend die Faserflocken betrachtet werden. Für Schäben und Faserflocken muss mit einer anderen durch die Luftreibung verursachten Kraft gerechnet werden. Damit ergeben sich in den zwei Wellenabschnitten unterschiedliche Konstruktions- und Betriebsparameter.

Für die Faserflocken konnten in der Arbeit von [Pecenka, 2008] sowie in Bezug auf [Radosavljevic, 2002] sehr gute Ergebnisse mit der vereinfachten Gleichung 6.12 bei der Verwendung eines materialspezifischen Faktors von $q = 2,5 \text{ m}^{-1}$ für die Bestimmung der durch die Luftreibung erzeugten Kraft F_W erzielt werden. Die Gleichung beruht auf dem Verhältnis der Kräfte von Luftreibung und Gewichtskraft im Vergleich zu dem Verhältnis aus ihren entsprechenden quadratischen Geschwindigkeiten.

$$F_W = m * q * v^2 \quad (6.12)$$

Für eine Vereinfachung des Modells wird auch für die Schäben nach dieser Formel gerechnet. Ein Großteil der Schäben liegt mit der Schwebegeschwindigkeit im Bereich von $2,8 \text{ m s}^{-1}$ (siehe Kapitel 5.7.5) und ist weitestgehend von Form und Größe unabhängig. Da im Schwebezustand eines Partikels die durch die Luftreibung verursachte Kraft gleich der eigenen Gewichtskraft ist, kann für die Schäben mit einem materialspezifischen Faktor von $q = 1,2 \text{ m}^{-1}$ gerechnet werden.

Unter Beachtung des verwendeten kartesischen Koordinatensystems ist die vektorielle Kraft mit dem Ausdruck der Art nach Gleichung 6.13 allgemein gültig beschreibbar [Hagedorn, 2008].

$$\vec{F}_W = m * q * v^2 * \left(\frac{\vec{v}}{v} \right) \quad (6.13)$$

Für den Betrag der Geschwindigkeit kann folgender Ausdruck (Gleichung 6.14) verwendet werden:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (6.14)$$

Nach der Bestimmung der jeweiligen Beschleunigung a in den beschriebenen Ebenen xy , yz und xz lässt sich nun die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg eines Partikels bei der Bewegung des Paddels unter Berücksichtigung einer Luftreibung iterativ nach Gleichung 6.15 sowie 6.16 bestimmen. Dabei werden die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg wieder in das kartesische Bezugssystem zerlegt. Eine Verwendung der Luftreibung F_w erfolgt nach dem jeweiligen Betrachtungsfall (Schäbenpartikel bzw. Faserflocke).

$$\vec{v}_{n+1} = (\vec{a}_n - q * v_n * \vec{v}_n) * t_{\text{Schritt}} + \vec{v}_n \quad (6.15)$$

$$\vec{s}_{n+1} = \frac{\vec{a}_n - q * v_n * \vec{v}_n}{2} * t_{\text{Schritt}}^2 + \vec{v}_n * t_{\text{Schritt}} + \vec{s}_n \quad (6.16)$$

6.2.2 Schräger Wurf

Die Bewegung eines Partikels auf dem Paddel wurde im vorherigen Kapitel ausführlich beschrieben. Erreicht das Partikel den äußeren Rand des Paddels hat es die bis dahin erreichte Geschwindigkeit v_0 . Nach dem Verlassen des Paddelflugkreises wirken nur noch die Gewichtskraft F_G und die durch die Luftreibung verursachte Kraft F_w auf das Partikel. Der Zusammenhang der wirkenden Kräfte auf das Partikel beim Verlassen des Paddels ist in der Abb. 6.3 dargestellt.

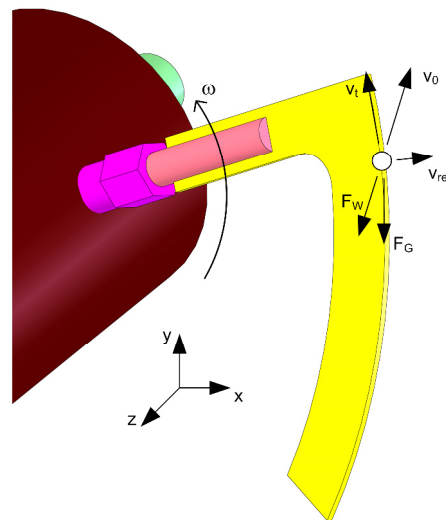


Abb. 6.3: Abwurfvorgang vom Paddel im Arbeitsraum des Axialfraktionierers

Aus dem Zusammenhang der Kräfte lässt sich nun die Wurfparabel eines schrägen Wurfs unter Beachtung der vorherrschenden Luftreibung des entsprechenden Partikels iterativ in den drei Hauptebenen bestimmen.

In x -Richtung, der waagerechten Wurfbewegung ist keine Erdanziehung vorhanden. Somit reduzieren sich die wirkenden Kräfte auf eine Luftreibung. Diese wirkt der Bewegung des Partikels entgegen und

verursacht eine Abbremsung des Partikels in diese Richtung. Die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg lassen sich iterativ nach den Gleichungen 6.17 und 6.18 bestimmen.

$$v_{x_{n+1}} = v_{x_n} - q * \sqrt{v_{x_n}^2 + v_{y_n}^2 + v_{z_n}^2} * v_{x_n} * t_{Schritt} \quad (6.17)$$

$$x_{n+1} = v_{x_n} * t_{Schritt} - \frac{q * \sqrt{v_{x_n}^2 + v_{y_n}^2 + v_{z_n}^2} * v_{x_n}}{2} * t_{Schritt}^2 + x_n \quad (6.18)$$

In y-Richtung, der senkrechten Wurfbewegung wirken nun Erdbeschleunigung und Luftreibung auf das Partikel. Außerdem muss eine Fallunterscheidung durchgeführt werden, ob sich das Partikel in der Steigphase ($v_y > 0$) oder der Sinkphase ($v_y < 0$) befindet. In der Steigphase wirken die Luftreibung und die Erdbeschleunigung gemeinsam entgegen der Bewegungsrichtung. In der Sinkphase wirkt die Luftreibung wiederum entgegen der Bewegungsrichtung, aber die Erdbeschleunigung nun in die Bewegungsrichtung. Die Berechnung der Geschwindigkeit sowie des zurückgelegten Weges erfolgen in Abhängigkeit des jeweiligen Betrachtungsfalls nach folgenden Gleichungen (6.19 sowie 6.20):

$$v_{y_{n+1}} = v_{y_n} - \left(g \pm q * \sqrt{v_{x_n}^2 + v_{y_n}^2 + v_{z_n}^2} * v_{y_n} \right) * t_{Schritt} \quad (6.19)$$

$$s_{y_{n+1}} = v_{y_n} * t_{Schritt} - \left(\frac{g \pm q * \sqrt{v_{x_n}^2 + v_{y_n}^2 + v_{z_n}^2} * v_{y_n}}{2} \right) * t_{Schritt}^2 + s_{y_n} \quad (6.20)$$

In z-Richtung, wiederum eine waagerechte Wurfbewegung ist die Geschwindigkeitsgleichung 6.21 und die Weggleichung 6.22 analog zu der Bewegung in x-Richtung.

$$v_{z_{n+1}} = v_{z_n} - q * \sqrt{v_{x_n}^2 + v_{y_n}^2 + v_{z_n}^2} * v_{z_n} * t_{Schritt} \quad (6.21)$$

$$s_{z_{n+1}} = v_{z_n} * t_{Schritt} - \frac{q * \sqrt{v_{x_n}^2 + v_{y_n}^2 + v_{z_n}^2} * v_{z_n}}{2} * t_{Schritt}^2 + s_{z_n} \quad (6.22)$$

6.2.3 Numerische Umsetzung der entwickelten Bewegungsgleichungen

Für die Visualisierung der dreidimensionalen Partikelbewegung auf dem Paddel und dem anschließendem Abwerfen vom Paddel musste eine geeignete Darstellungsform entwickelt werden, in der die Abwurf-paddel- sowie die Partikelposition und die mögliche Kollision zwischen Partikel und nachfolgendem Paddel (in Vorschubrichtung) in Abhängigkeit von Konstruktions- und Maschinenparamete-

tern ersichtlich wird. Die entwickelte Darstellungsform beruht auf zwei Abbildungseinheiten, die in der Kombination Rückschlüsse auf das Arbeitsverhalten der Paddelschnecke zulassen. In der ersten Abbildungseinheit (Abb. 6.4) sind der Querschnitt (xy -Ebene) sowie die Seitenansicht (xz -Ebene) als Prinzipzeichnung vom Axialfraktionierer zu erkennen. Die Bewegungsbahnen der Partikel, ausgehend von unterschiedlichen Startpositionen entlang des Radius, sind auf dem Paddel blau und die anschließende Wurfbewegung rot dargestellt.

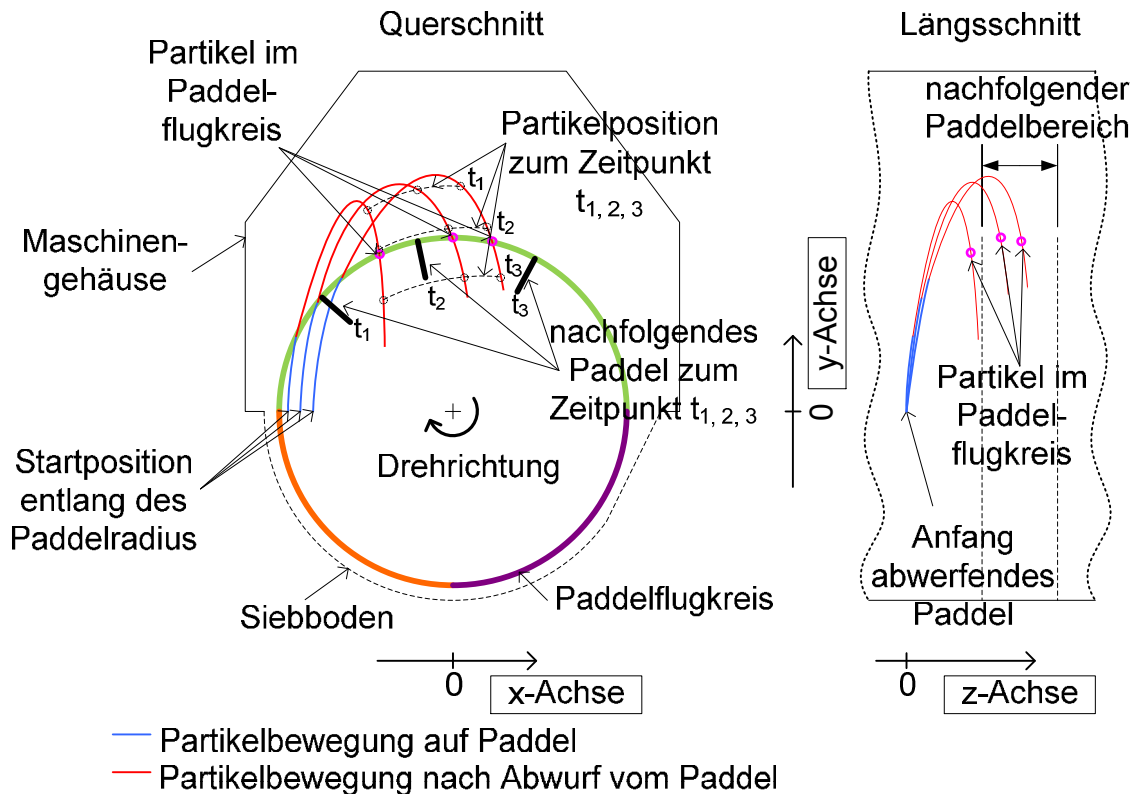


Abb. 6.4: Darstellungsvariante für die numerische Berechnung der Abwurfbewegung vom Paddel

Weiterhin erkennt man die Paddelposition des nachfolgenden Paddels in Vorschubrichtung zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Zu denselben Zeitpunkten werden die Positionen der Partikel auf ihrer Wurfbahn gekennzeichnet. Die Seitenansicht liefert die notwendige Information zur axialen Vorschubbewegung und die Eintrittsbahnen der Partikel in den nachfolgenden Paddelbereich. Die farbliche Unterscheidung des Paddelflugkreises findet sich in der zweiten Abbildungseinheit in einem Zeit-Weg Diagramm für die zeitabhängige Positionsbestimmung für Partikel und Paddel wieder (Abb. 6.5). Hier ist als Kosinus- bzw. Sinusfunktion die Position des abwerfenden Paddels und des nachfolgenden Paddels in Vorschubrichtung dargestellt. Dabei wurde für die Angabe der Position des Paddels auf dem Flugkreis die x-Koordinate herangezogen. Für den relevanten Bereich einer Kollision zwischen Paddel und Partikel ist im Fall $y > 0$ die Position eindeutig beschrieben.

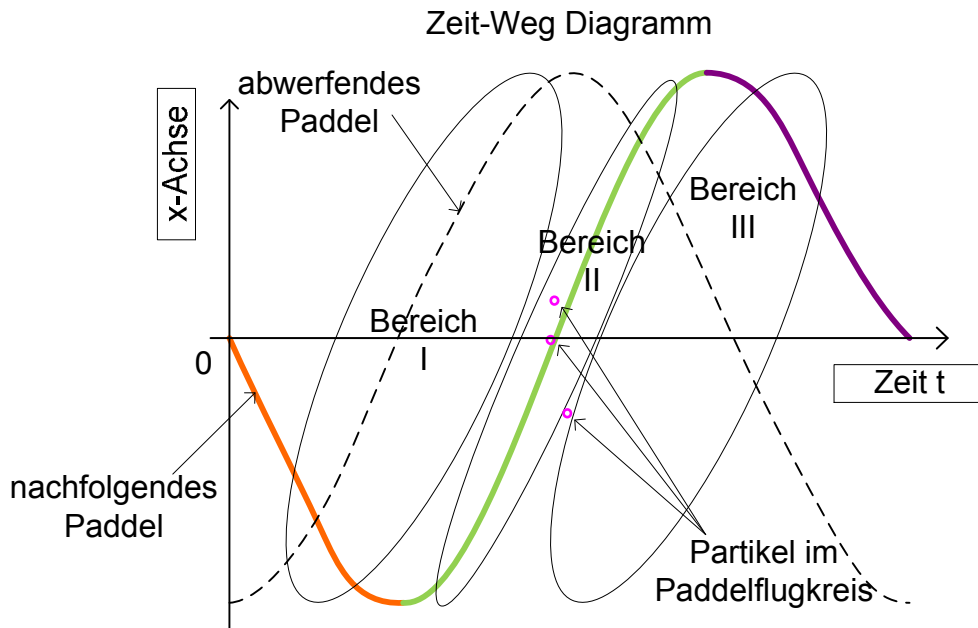


Abb. 6.5: Paddel- und Partikelposition entlang der x-Achse in Abhängigkeit von der Zeit

Vergleicht man die farbigen Bereiche der Funktion vom nachfolgenden Paddel mit denen aus der Abb. 6.4, ist die Position des Paddels auf dem Flugkreis erkennbar. Somit lassen sich drei Bereiche definieren, die für eine potentielle Partikel-Paddel Kollision in Frage kommen.

- Bereich I: Partikel haben Paddelflugkreis bereits erreicht bevor das Paddel an dieser Position ist ($t_{\text{Paddel}} > t_{\text{Partikel}}$)
- Bereich II: Partikel und Paddel befinden sich zum gleichen Zeitpunkt an derselben Stelle, eine Kollision ist wahrscheinlich ($t_{\text{Paddel}} = t_{\text{Partikel}}$)
- Bereich III: Partikel erreichen Paddelflugkreis nachdem das Paddel den für eine Kollision relevanten Bereich bereits passiert hat ($t_{\text{Paddel}} < t_{\text{Partikel}}$)

Aus diesen Zusammenhängen können Rückschlüsse auf die Konstruktions- und Betriebsparameter für eine optimale Arbeitsweise der Paddelschnecke gezogen werden.

Die Umsetzung und Darstellung erfolgten mit der Software MATLAB® in einer Parameterstudie. Es wurden dabei die Drehzahl der Paddelschnecke, der Steigungswinkel des Paddels und die Paddelbreite variiert. Die Darstellung erfolgt gleichzeitig für die nacheilende und die vorauseilende Anordnung, welche zusammen betrachtet der doppelten Paddelanordnung entsprechen würden. Es erfolgte eine separate Berechnung der Wurfbahnen für Schäben und Faserflocken.

Die dazu notwendigen Materialparameter beschränken sich auf den Reibungswert μ und dem materialspezifischen Faktor q zur Berechnung der Luftreibung (Tab. 6.1).

Tab. 6.1: Materialparameter für die numerische Umsetzung der Wurfbahnen

	Schäbe	Faserflocke	Messmethode
Materialspezifische Faktor q	1,2	2,8*	Gegenstromsichtung/ Sedimentationsversuch
Reibungswert μ	0,6	0,5*	geneigte Ebene

* [Pecenka, 2008]

6.2.3.1 Simulation der Wurfbewegung von Schäbenpartikeln

Ausgehend von einem festen Steigungswinkel des Paddels $\alpha = 25^\circ$ wurden zunächst die Wurfbahnen in Abhängigkeit von der Drehzahl der Paddelschnecke für drei Varianten berechnet (Abb. 6.6, Abb. 6.7 und Abb. 6.8). Dabei zeigt sich, wie mit steigender Drehzahl die Wurfhöhe vergrößert werden kann. Ausgehend von einer Drehzahl $n_{w1} = 50 \text{ min}^{-1}$ kommt es zu einem Abwerfen der Partikel vom Paddel sowie einem teilweise Abrutschen der Partikel entlang des Paddels. Dies bedeutet, dass es eine Grenzdrehzahl gibt, die erreicht werden muss, damit die Partikel überhaupt nach außen abgeworfen werden. Die Drehzahl n_{w1} wurde sukzessive um 10 min^{-1} von 50 min^{-1} auf 60 min^{-1} und 70 min^{-1} erhöht.

Durch die unterschiedlichen Wurfhöhen und der damit verbundenen Wurfdauer erreichen die Partikel beim Wiedereintritt in den Paddelflugkreis unterschiedliche Vorschubwege in z-Richtung. Ein weiterer Faktor in diese Richtung ist die erlangte Beschleunigung durch Abrutschen und Nachaußenbewegen des Partikels am Paddel. In der Seitenansicht ist die Vorschubbewegung in z-Richtung und das eventuelle Erreichens des nächsten Paddelabschnitts gut zu erkennen. Bedingt durch die unterschiedlichen Drehzahlen und der damit verbundenen Wurfbahn bzw. Wurfdauer der Partikel, ergeben sich unterschiedliche Trefferwahrscheinlichkeiten von einem Paddel im nächsten Paddelabschnitt in Vorschubrichtung. Im Zeit-Weg Diagramm ergibt sich für die nachfolgende Paddelanordnung bei einer Drehzahl $n_{w1} = 60 \text{ min}^{-1}$ die höchste Wahrscheinlichkeit für ein Partikel-Paddel Kontakt. Die vorausseilende Anordnung ist aufgrund ihres hohen Nachlaufwinkels von $\delta = 270^\circ$ eher nicht für die angestrebte Konstellation geeignet.

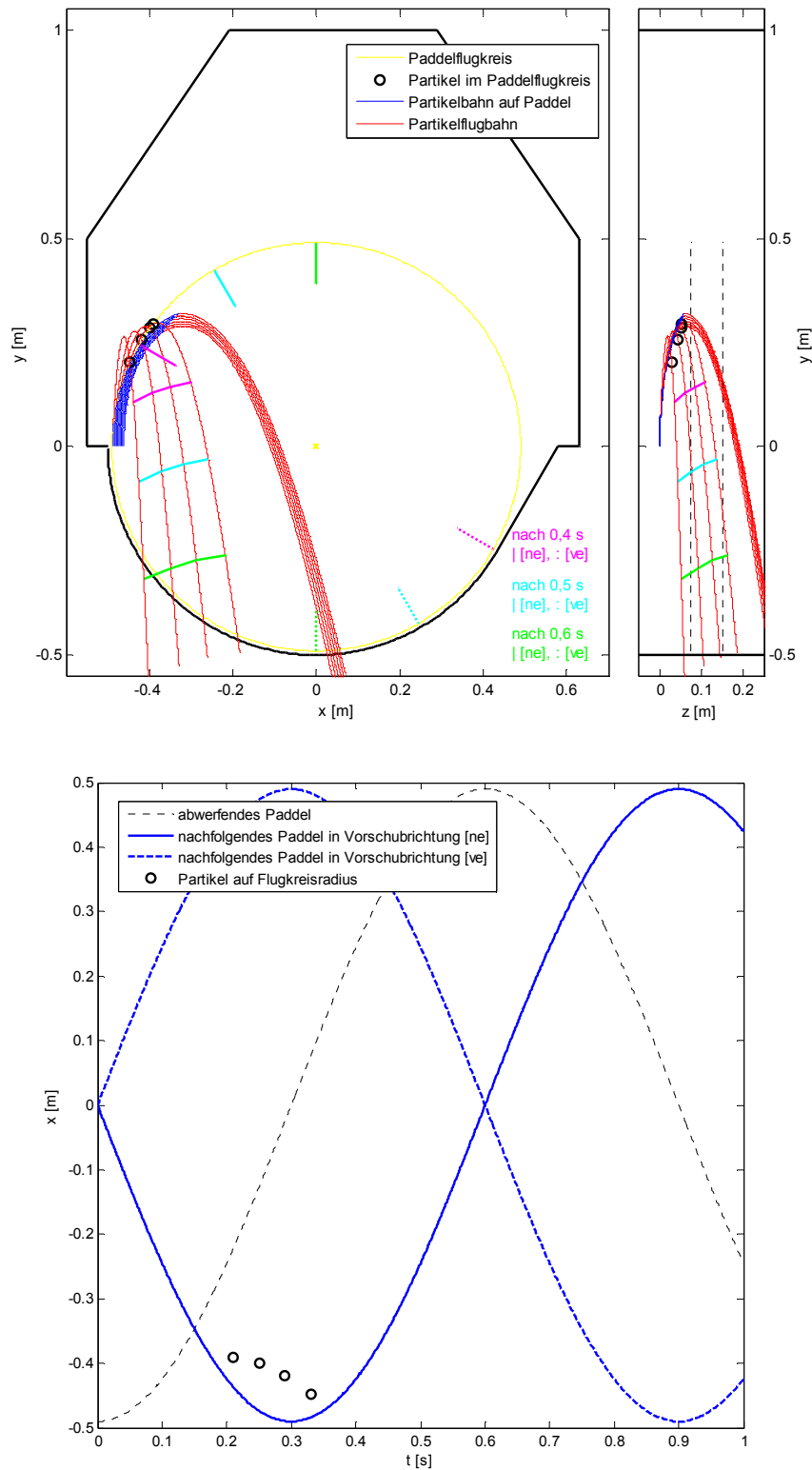


Abb. 6.6: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w1} = 50 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 25^\circ$

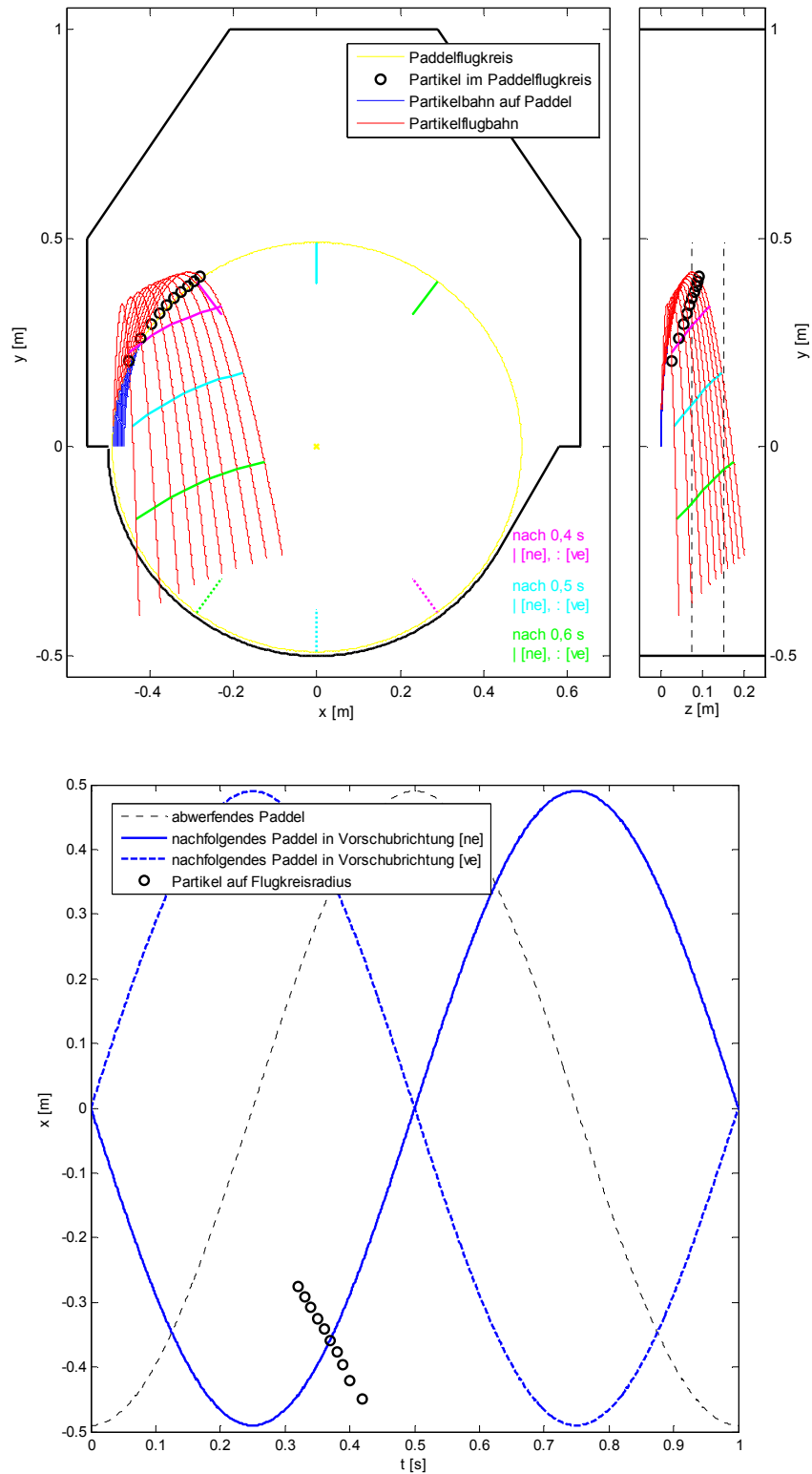


Abb. 6.7: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 25^\circ$

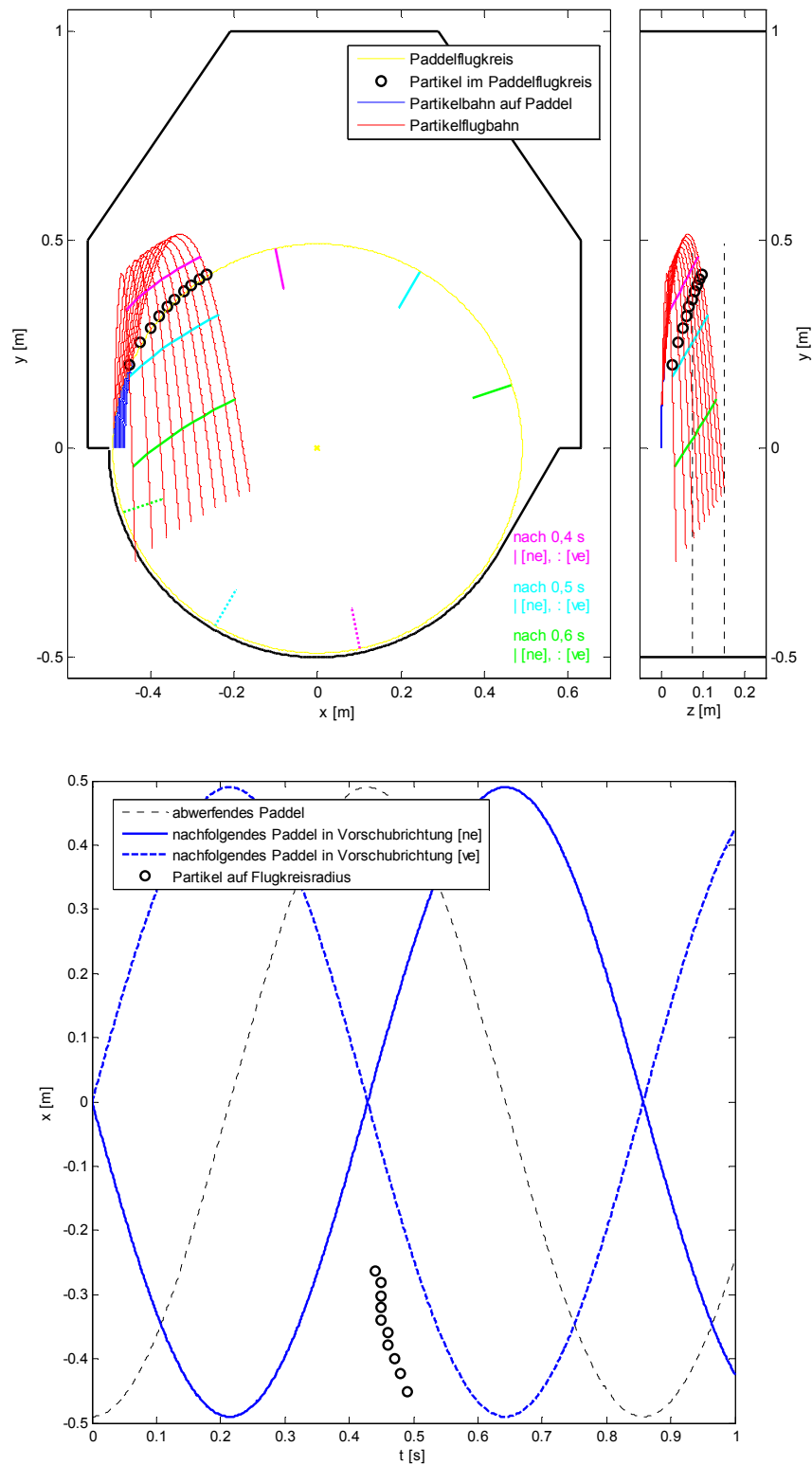


Abb. 6.8: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w1} = 70 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 25^\circ$

Für die Drehzahl $n_{w1} = 60 \text{ min}^{-1}$ wurden neben dem Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$ noch zwei weitere Steigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 40^\circ$ als variable Parameter für die Berechnung herangezogen (Abb. 6.9 und Abb. 6.10). Bei einem Steigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ rutschen die Partikel schneller vom Paddel, womit sich die Wurfweite verringert. Eine theoretische Kollision wäre laut Zeit-Weg Diagramm möglich, ist aber durch den geringen Vorschub in z-Richtung und das Nichterreichen des nachfolgenden Paddel-

bereichs ausgeschlossen. Bei der Verwendung des größeren Steigungswinkels $\alpha = 40^\circ$ reduziert sich das Abrutschen am Paddel und die Partikel werden stärker vom Paddel mitgenommen, was einen höheren Abwurf bedingt. Durch die längere Wurfphase erreichen auch bei dieser Konfiguration die Partikel den nachfolgenden Paddelbereich. Die Wahrscheinlichkeit einer Partikel-Paddel Kollision verschlechtert sich aber durch die längere Wurfphase, da das Paddel bis zum Eintreffen der Partikel im Paddelflugkreis diesen bereits unter den Partikeln passiert hat.

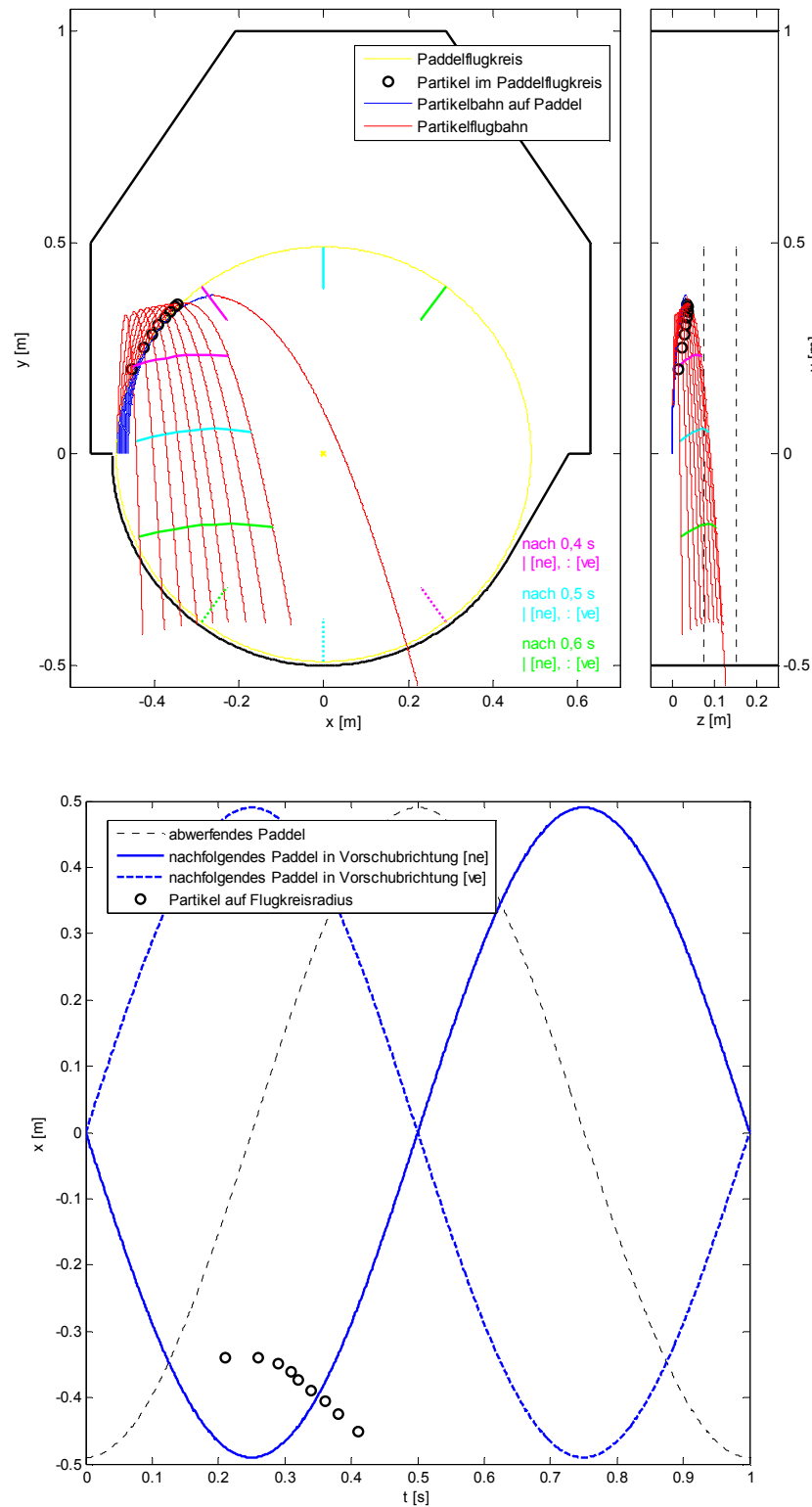


Abb. 6.9: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 10^\circ$

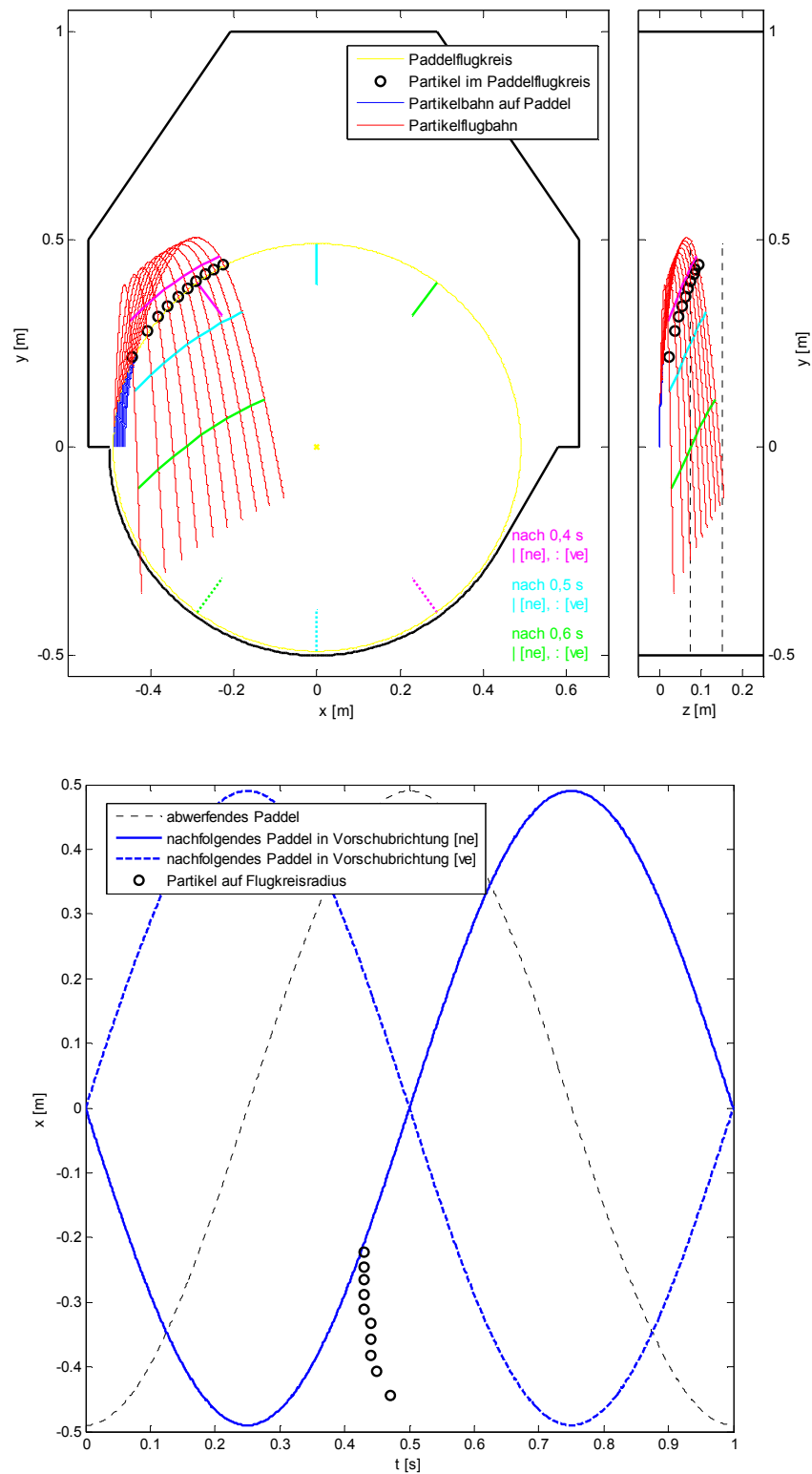


Abb. 6.10: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w1} = 60 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 40^\circ$

Die gezeigte Parameterstudie macht den Einfluss auf die Partikelbewegung der Schäben beim Abwurf deutlich und gibt erste Erkenntnisse für die optimale Ausrichtung sowie den Betrieb der Paddelschnecke vom Wellenbereich 1.

6.2.3.2 Simulation der Wurfbewegung von Faserflocken

Analog zum schrägen Wurf der Schäben wurde auch die Wurfbewegung der Faserflocken, welche besonders für den Wellenabschnitt 2 relevant ist in einer Parameterstudie abgeglichen. Aufgrund der erhöhten Luftreibung ist für die Faserflocken eine höhere Drehzahl der Paddelschnecke überhaupt notwendig, damit es zu einem Abwurf vom Paddel kommt. In der Abb. 6.11, Abb. 6.12 und Abb. 6.13 werden drei verschiedene Drehzahlen n_{w2} bei einem konstanten Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$ betrachtet. Hier fällt auf, dass für eine wahrscheinliche Kollision von abgeworfener Faserflocke und nachfolgendem Paddel, die vorausgehende Paddelanordnung besser geeignet ist. Bei einer Drehzahl $n_{w2} = 110 \text{ min}^{-1}$ entsteht eine Wurfbahn bis zum nächsten Paddelbereich mit einer wahrscheinlichen Faserflocke-Paddel Kollision wie sie im Zeit-Weg Diagramm erkenntlich ist (Abb. 6.12).

Das Zusammenspiel vom Abrutschen und Mitnehmen der Faserflocke am Paddel bedingt die resultierende Wurfbahn. Bei einer zu hohen Drehzahl n_{w2} erfolgt der Abwurf schon bei einem kleinen Laufwinkel. Dadurch ist der Vorschubwinkel γ ebenfalls noch klein (siehe Abb. 5.24), was einer geringen Vorschubbewegung in z-Richtung gleichkommt. Hinzu kommt noch aufgrund der geringen Verweilzeit sowie dem damit verringerten Abrutschen der Faserflocke auf dem Paddel, die axiale Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung reduziert ist.

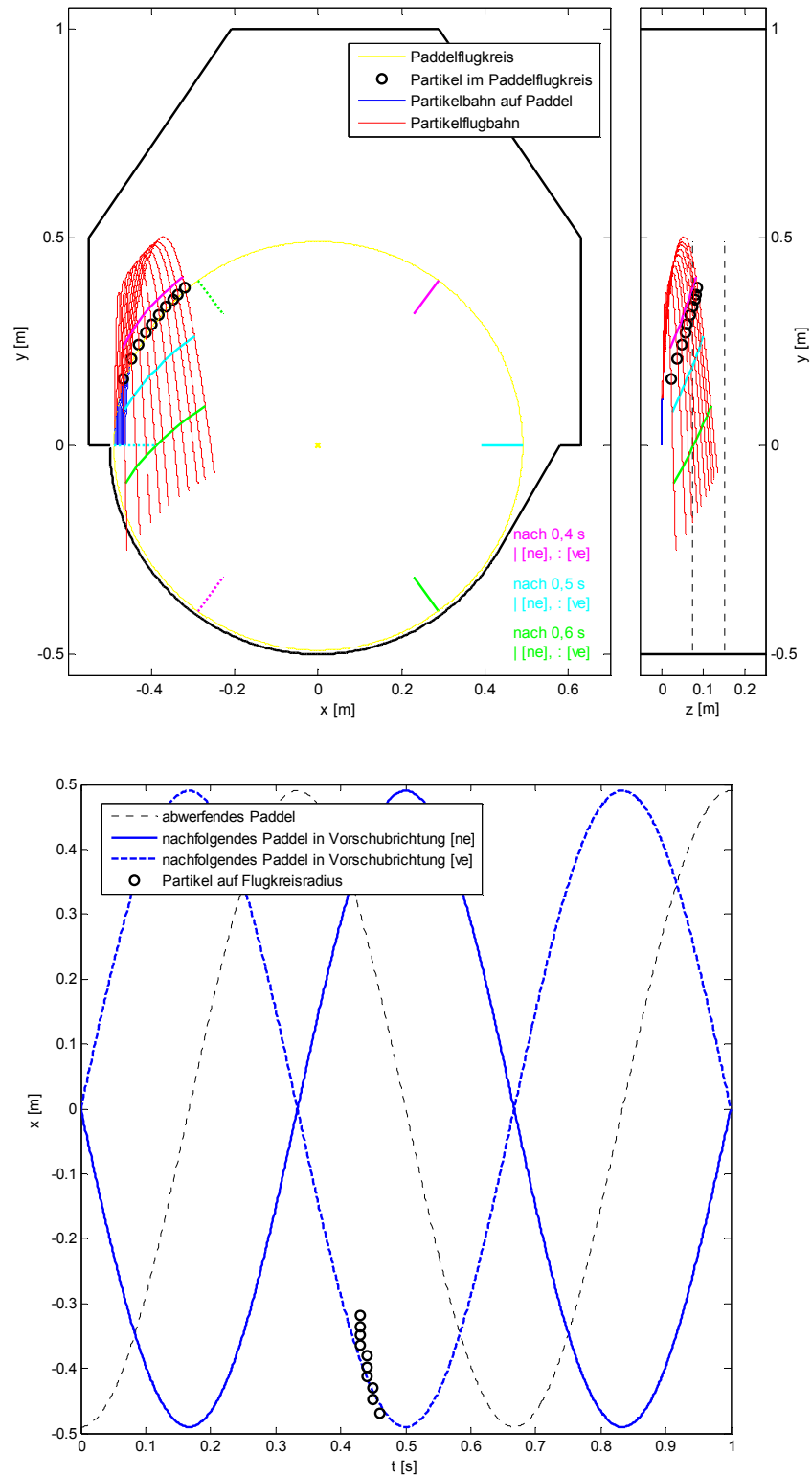


Abb. 6.11: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w2} = 90 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 25^\circ$

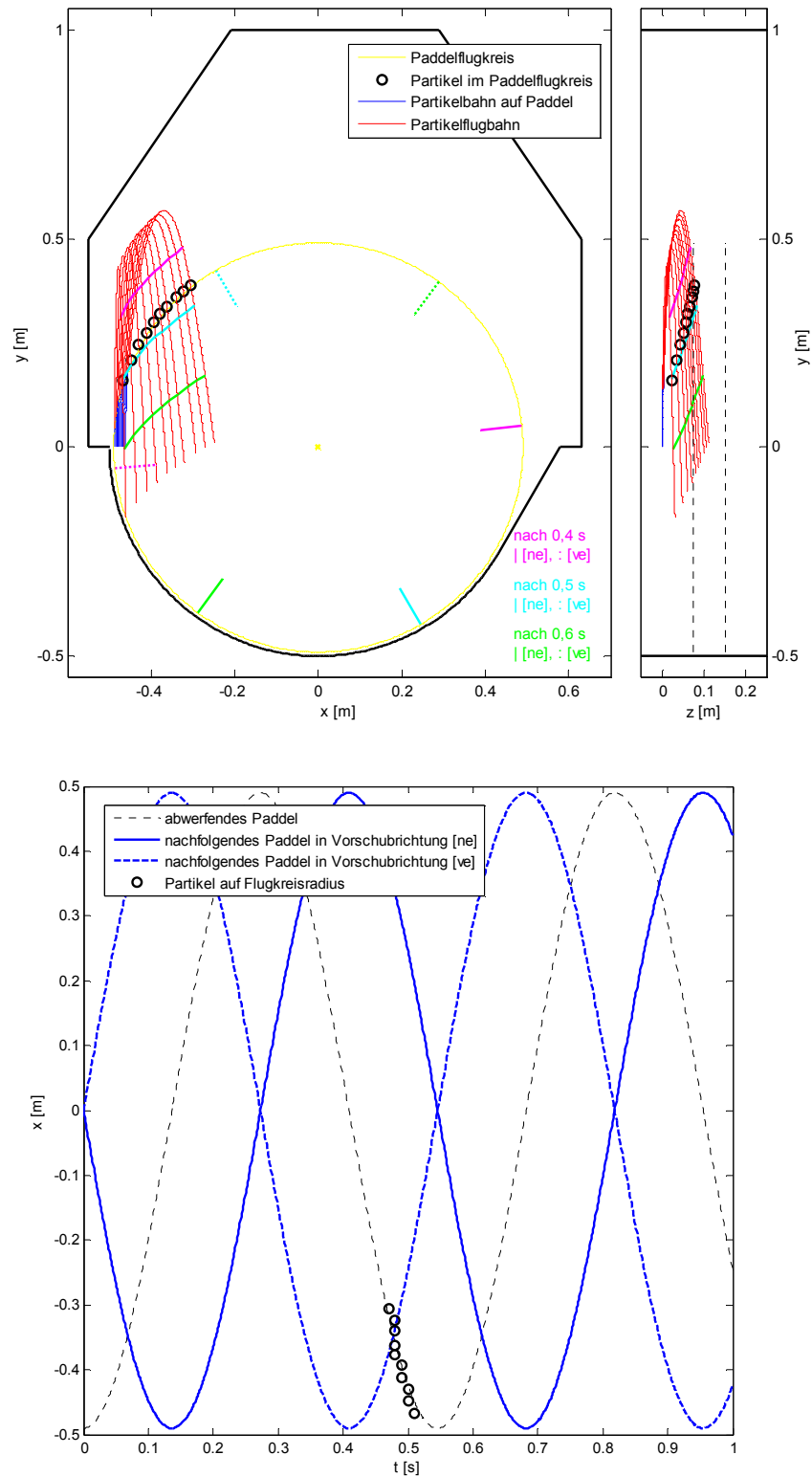


Abb. 6.12: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w2} = 110 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 25^\circ$

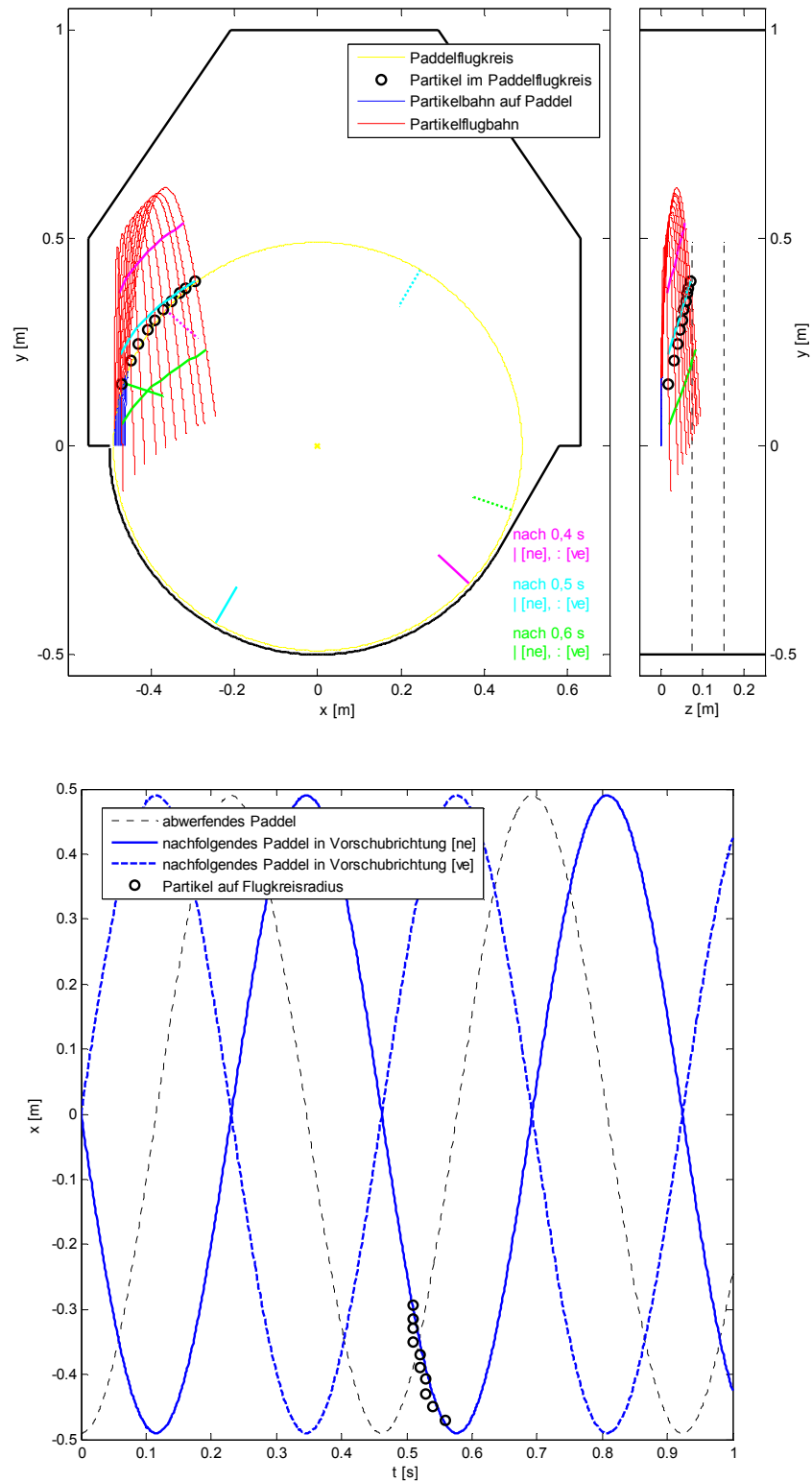


Abb. 6.13: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{W2} = 130 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 25^\circ$

Eine Reduzierung des Steigungswinkels α auf 10° bei einer Drehzahl $n_{W2} = 110 \text{ min}^{-1}$ verursacht eine noch geringere Vorschubbewegung in z -Richtung, so dass die Faserflocken nicht mehr in den nachfolgenden Paddelbereich geworfen werden (Abb. 6.14). Eine Erhöhung des Steigungswinkels α auf 40° bei einer Drehzahl $n_{W2} = 110 \text{ min}^{-1}$ bringt ebenfalls keine Erhöhung der Vorschubbewegung in z -Richtung (Abb. 6.12). Die Faserflocken werden zwar durch eine verbesserte Mitnahme höher abge-

worfen, erhalten aber durch ein verringertes Abrutschen eine reduzierte Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung, wodurch die Wurfweite in diese Richtung nicht erhöht werden kann.

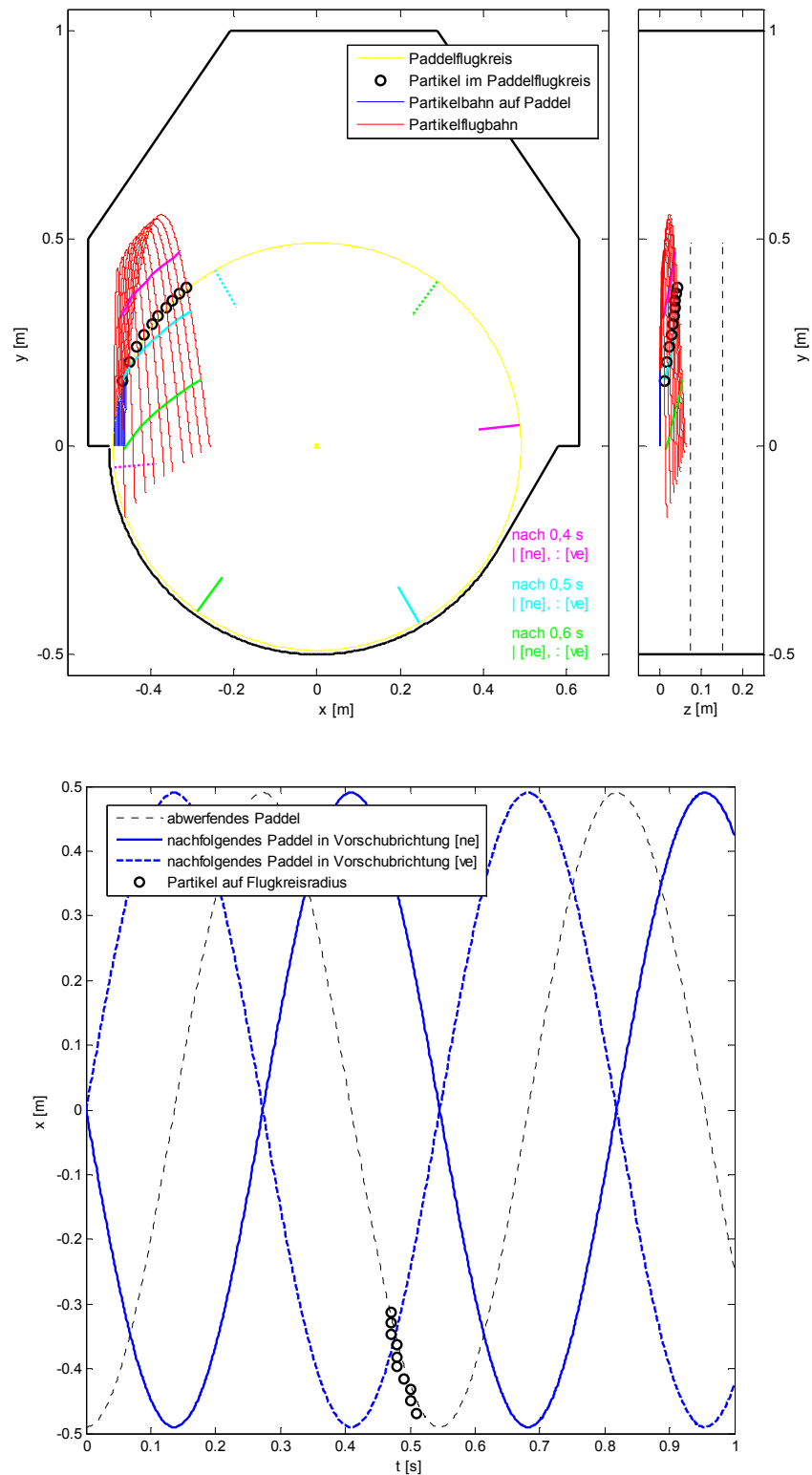


Abb. 6.14: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{W2} = 110 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 10^\circ$

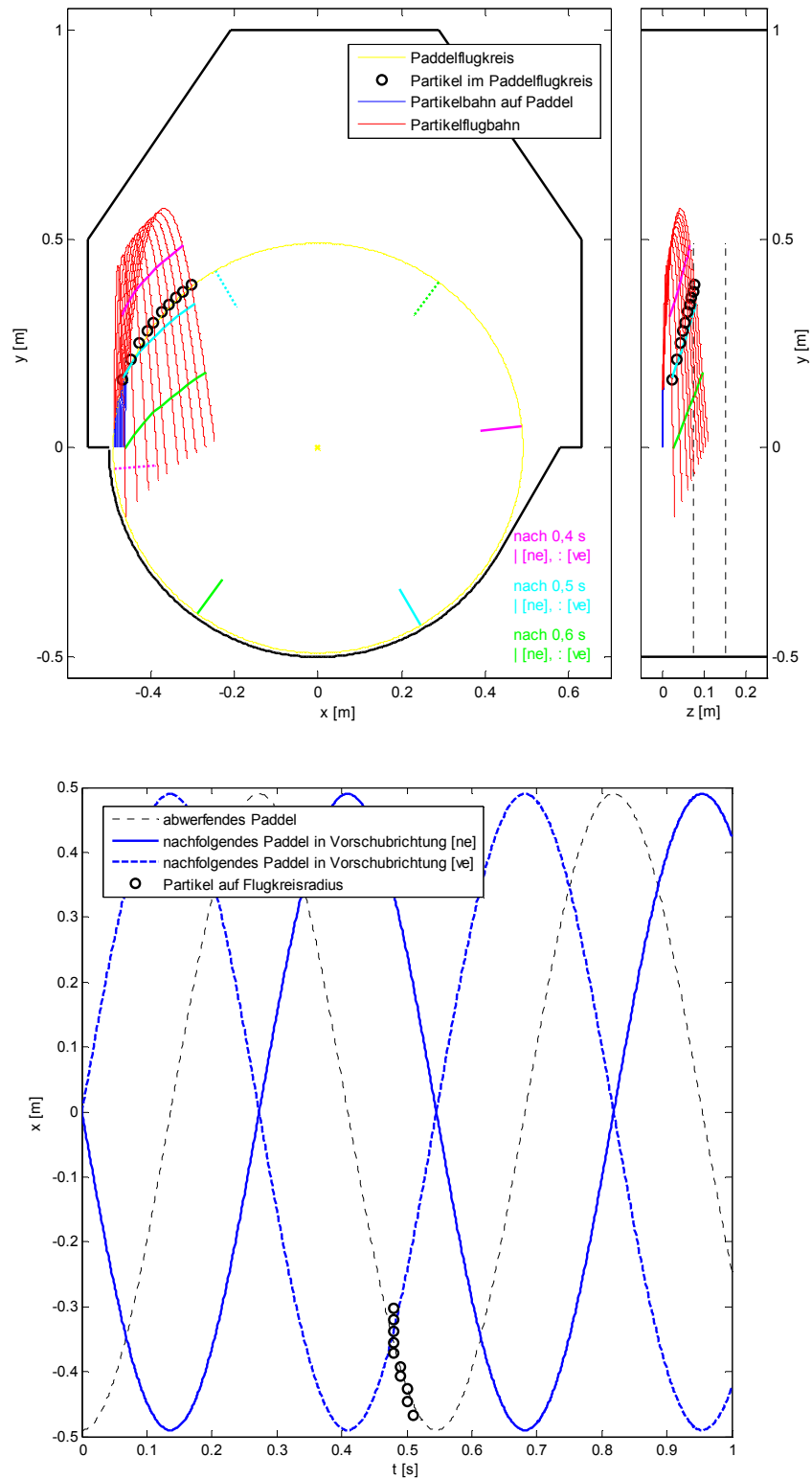


Abb. 6.15: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w2} = 110 \text{ min}^{-1}$ und $\alpha = 40^\circ$

6.2.3.3 Zusammenfassung der Parameterstudie

Für die zwei auszulegenden Wellenabschnitte liefert uns die numerische Berechnung der Abwurfbewegung wichtige Erkenntnisse. So konnte für den Wellenabschnitt 1, der für die Abscheidung der losen Schäben ausgelegt ist, eine Drehzahl $n_{w1} = 60 \text{ min}^{-1}$ für die nachfolgende Paddelanordnung mit einem Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$ berechnet werden. Mit diesen Parametern lässt sich die Wurfbewegung so steuern, dass Schäben vom Paddel abgeworfen und von einem nachfolgenden Paddel getroffen werden. Durch dieses Hochwerfen und dem anschließendem Schlagimpuls sollen Schäbenagglomerate aufgelockert und vereinzelt werden, damit die losen Schäben das Sieb passieren können. Für das Auflösen der Faserflocken mit einer Kollision eines nachfolgenden Paddels im Wellenabschnitt 2 konnte eine Drehzahl $n_{w2} = 110 \text{ min}^{-1}$ für die vorausseilende Paddelanordnung, ebenfalls mit einem Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$ berechnet werden. Durch diesen Schlagimpuls sollen die hochgeworfenen Faserflocken auseinandergezogen und eingeschlossene Schäben freigelegt werden, damit die losen Schäben den Siebboden passieren können.

Ausgehend von der aus der Parameterstudie ermittelten Drehzahlen für die zwei Wellenabschnitte lassen sich weitere physikalische Größen ableiten, welche in den Gleichungen 6.23 bis 6.26 beschrieben und in der Tab. 6.2 zusammengefasst sind.

Die Frequenz der Wellendrehung wird wie folgt berechnet:

$$f = n/60 \quad (6.23)$$

Die Zeit für eine Umdrehung ergibt sich damit zu:

$$t_u = f^{-1} \quad (6.24)$$

Die Winkelgeschwindigkeit wird wie folgt berechnet:

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (6.25)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit wird nach folgender Formel berechnet:

$$v_u = 2 * \pi * r * f \quad (6.26)$$

Tab. 6.2: Zusammenstellung der Parameter an den zwei Wellenabschnitten

	Wellenabschnitt 1	Wellenabschnitt 2
Radius r [mm]	500	
Wellendrehzahl n [min^{-1}]	60	110
Frequenz f [s^{-1}]	1,00	1,83
Winkelgeschwindigkeit ω [s^{-1}]	6,28	11,52
Umfangsgeschwindigkeit v_u [m s^{-1}]	3,14	5,76
Zeit für eine Umdrehung t_u [s]	1	0,55

Ausgehend von den in der Parameterstudie ermittelten optimalen Konstruktions- und Betriebsparameter für ein bestes Reinigungsergebnis, bilden diese Werte die Basisdaten für die Versuchsmaschine. Darauf aufbauend sind besonders die Daten für Wellenabschnitt 1 die Grundlage für die Ermittlung des Massestroms.

6.2.4 Berechnung des Massestroms

Der Aufbau einer Paddelschnecke und deren verschiedene Paddelanordnungen wurden bereits im Abschnitt 5.6.2 beschrieben. Für die konstruktionstechnische Umsetzung der entsprechenden Paddelanordnung wurden Schellen mit jeweils zwei Aufnahmepunkten für die Paddel um 180° versetzt angebracht. Jede Schelle ist im vorgesehenen Abstand um jeweils 90° versetzt zueinander entlang der Welle fixiert. Damit lassen sich durch einfaches Umstecken bzw. Ergänzen von Paddeln die gewünschten Anordnungen realisieren (Abb. 6.16, Abb. 6.17 und Abb. 6.18). Zusätzlich ist in diesen Abbildungen für die entsprechende Paddelanordnung ein erarbeitetes Modell für die Gutstrombewegung entlang des Abscheidewegs (in axialer Richtung) gekennzeichnet.

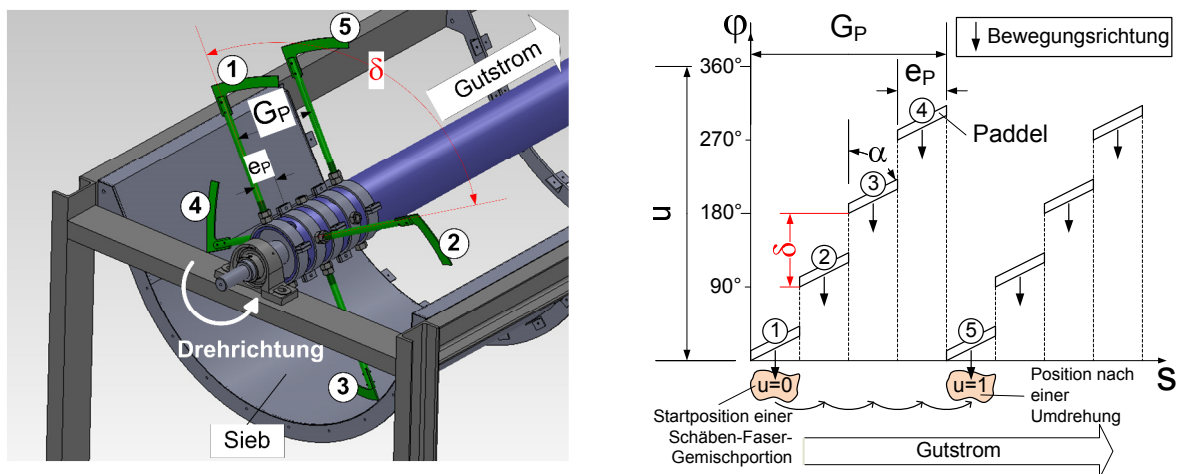


Abb. 6.16: Schematische Darstellung der nacheilenden Paddelanordnung [ne] in der Versuchsmaschine und deren Gutstrombewegung

Für die nacheilende Paddelanordnung wird bei einer kompletten Paddelumdrehung eine SFG-Portion um die Ganghöhe G_P in axialer Richtung vorwärts bewegt. Dabei wird das Gemisch jeweils bei einem Verdrehungswinkel $\delta = 90^\circ$ um die Eingriffsbreite e_p vorwärts geschoben.

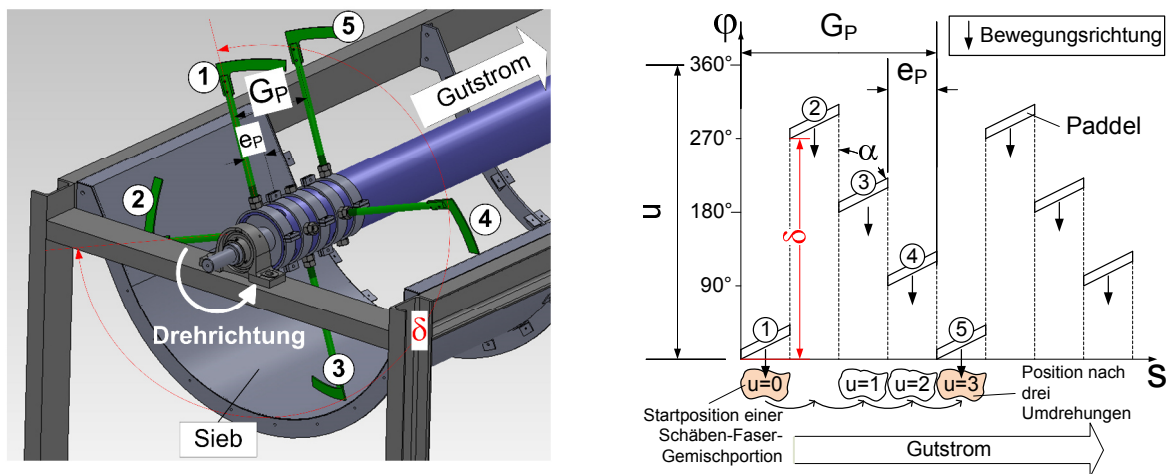


Abb. 6.17: Schematische Darstellung der nacheilenden Paddelanordnung [ve] in der Versuchsmaschine und deren Gutstrombewegung

Bei der vorseilenden Paddelanordnung werden für die gleiche axiale Vorschubbewegung von einer Ganghöhe G_P für die SFG-Portion drei Umdrehungen von der Paddelschnecke benötigt. Das Verschieben um die Eingriffsbreite e_p erfolgt hier erst bei einem Verdrehungswinkel $\delta = 270^\circ$.

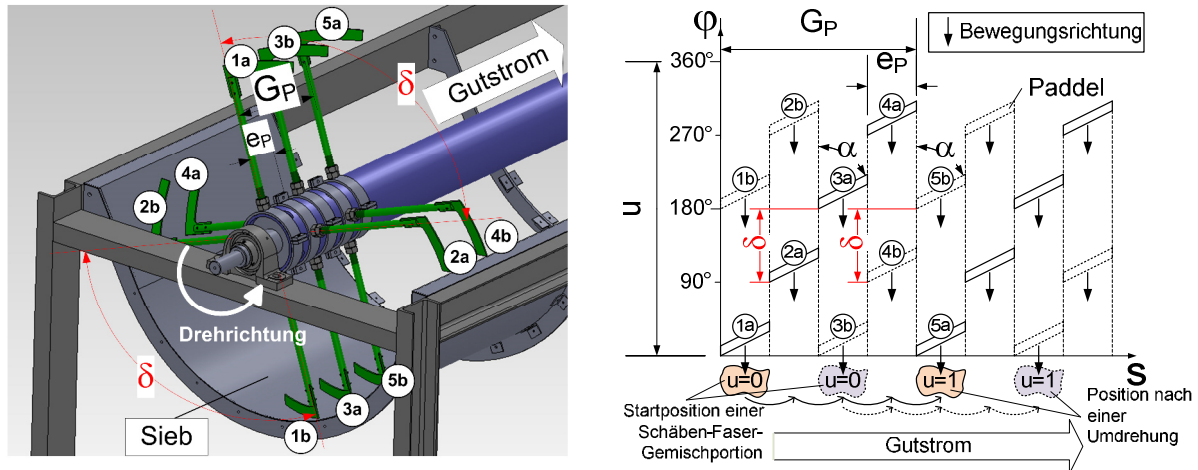


Abb. 6.18: Schematische Darstellung der doppelten Paddelanordnung [dp] in der Versuchsmaschine und deren Gutstrombewegung

Für die doppelte Paddelanordnung ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die nacheilende Paddelanordnung, nur dass zum gleichen Zeitpunkt innerhalb einer Ganghöhe G_P , zwei Paddel aktiv am Weitertransport der SFG-Portion beteiligt sind. Für die axiale Vorschubbewegung um die Ganghöhe G_P wird dementsprechend auch hier eine Wellenumdrehung benötigt. Deutlich wird aber, dass zwei SFG-Portionen innerhalb einer Umdrehung diesen Weg zurücklegen können.

Aus diesen Zusammenhängen lässt sich die mittlere axiale Fördergeschwindigkeit v_a des SFG im Axialfraktionierer auf Basis der Verschiebewegung einer SFG-Portion und in Abhängigkeit der entsprechenden Drehzahl sowie der eingesetzten Paddelanordnung ableiten (Gleichung 6.27):

$$v_a = n * e_p * \frac{360^\circ}{\delta} \quad \text{mit} \quad e_p = \frac{G_p}{a_p} \quad (6.27)$$

Für die Berechnung des Massestroms ist noch die Angabe der Querschnittsfläche des zu transportierenden SFG's notwendig. Dazu wurden Ergebnisse aus Vorversuchen, die mit einer kleinen Laboranlage erzielt werden konnten, genutzt [Fürl et al., 2008a], [Fürl et al., 2008b], [ATB, 2014]. Bei Verwendung des sichelförmigen Paddels konnte dort ein maximaler Massestrom von bis zu 1200 kg h^{-1} gewährleistet werden. Ein optimaler Arbeitsbereich lag aber im Bereich von nur 700 kg h^{-1} . Bei der Berechnung der Querschnittsfläche vom SFG, welches von einem Paddel mit einer Höhe von 3 cm in axialer Richtung vorwärts bewegt werden kann, wird von dem maximalen Massestrom ausgegangen, der zunächst noch unabhängig vom Aussiebungsergebnis ist. In der Tab. 6.3 sind die von der Labormaschine genutzten Parameter zusammengestellt.

Tab. 6.3: Zusammenstellung der verwendeten Parameter für die Labormaschine (siehe Abb. 4.19)

	Parameter
Radius r [mm]	250
Schüttdichte ρ_{SFG} [kg m^{-3}]	85
Drehzahl n_{W1} [min^{-1}]	125
Steigung Paddelschnecke G_p [mm]	300
Verdrehungswinkel δ [°]	90
Anzahl Paddel pro Steigungshöhe a_p	4
Anzahl Paddelschnecken a_s	1
Fördermenge (Massestrom) \dot{m}_{SFG} [t h^{-1}]	1,2
mittlere axiale Fördergeschwindigkeit v_a [m s^{-1}]	0,625
Füllungsfläche A_f pro Paddelschnecke [cm^2]	63
Füllungsgrad Φ [%]	3,2

Für die Berechnung der Füllungshöhe von der Labormaschine im unteren Siebbereich wurde für die Verteilung der Füllungsfläche folgende Annahme, wie in der Abb. 6.19 dargestellt, getroffen. Dabei verteilt sich das Gut auf einen Öffnungswinkel von 120° . Dies bedeutet einen Randwinkel von 60° , da darüber hinaus das Gut abrutschen würde. Die obere Begrenzung der Füllungsfläche wurde mit einem Radius r' definiert. Die Bestimmung der Füllungshöhe l erbrachte für die Labormaschine im unteren Bereich eine Höhe von 19 mm.

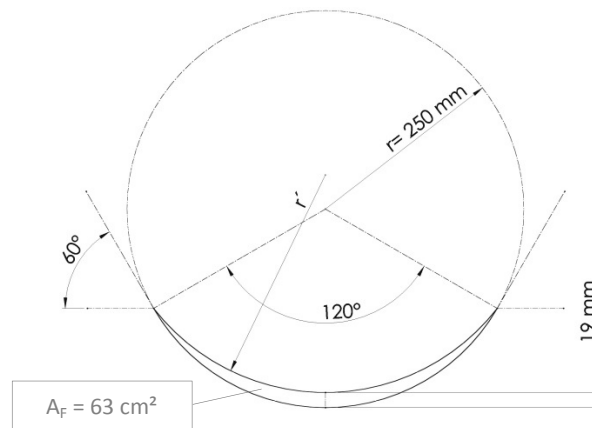


Abb. 6.19: maximale Füllungsfläche der Laborsiebmaschine im Querschnitt

Für die neue Maschine soll mit einem optimierten Paddel, welches aber die gleiche Höhe von der Labormaschine (30 mm) aufweist, gearbeitet werden. Damit wird die Füllungshöhe in Anlehnung auf das Paddel von der Labormaschine im unteren Siebbereich auch auf maximal 30 mm begrenzt. Für eine entsprechende Berechnung der Füllungsfläche für die neue Maschine mit einem Siebradius r von 500 mm lässt sich nach Abb. 6.20 folgender mathematischer Zusammenhang aufstellen.

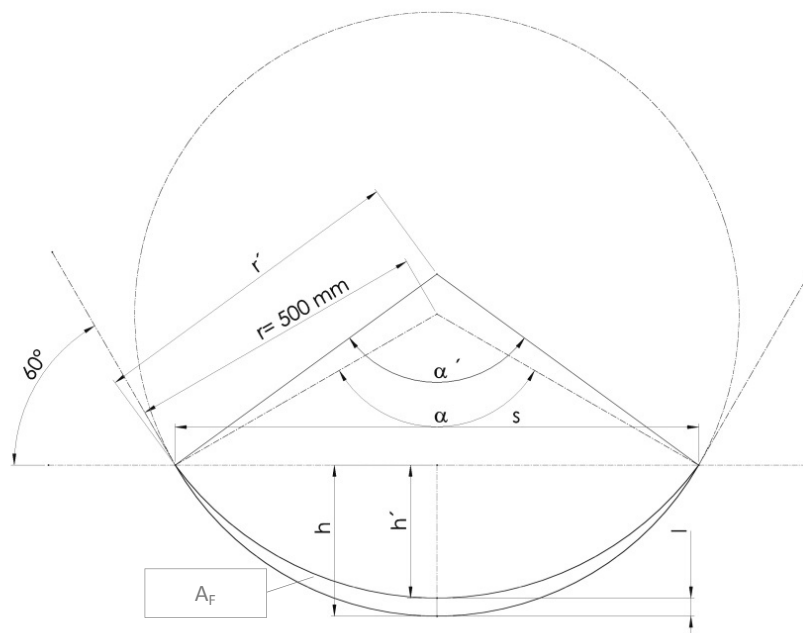


Abb. 6.20: Darstellung zur Berechnung der Füllungsfläche in Abhängigkeit vom Radius und der Füllungshöhe

Für die folgenden Formeln von 6.28 bis 6.33 sind alle Winkel im Bogenmaß anzugeben. Für den Winkel $\alpha = 120^\circ$ kann somit $\frac{2}{3}\pi$ geschrieben werden.

Die Kreissehne s lässt sich nach Gleichung 6.28 berechnen:

$$s = 2 * r * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \sqrt{3} * r \quad (6.28)$$

Die Segmenthöhe h wird nach Gleichung 6.29 berechnet:

$$h = r * (1 - \cos(\alpha/2)) = \frac{r}{2} \quad (6.29)$$

Den Zusammenhang mit der Segmenthöhe h' zeigt die Gleichung 6.30:

$$h' = h - l \quad (6.30)$$

Damit lässt sich nun der Radius r' für die obere Begrenzung der Füllungsfläche nach Gleichung 6.31 bzw. der Öffnungswinkel α' nach Gleichung 6.32 berechnen:

$$r' = \frac{4 * h'^2 + s^2}{8 * h'} = \frac{\left(\frac{r}{2} - l\right)^2 + \frac{(\sqrt{3} * r)^2}{4}}{r - 2 * l} \quad (6.31)$$

$$\alpha' = 2 * \sin^{-1}\left(\frac{s}{2 * r'}\right) = 2 * \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{3} * r}{2 * r'}\right) \quad (6.32)$$

Die gesuchte Füllungsfläche für eine Paddelschnecke bildet die Differenz aus der Segmentfläche mit dem Radius r sowie der Segmentfläche mit dem Radius r' . In Abhängigkeit von der angestrebten Füllungshöhe l kann die Füllungsfläche nach Gleichung 6.33 berechnet werden.

$$A_F = \frac{r^2}{2} * (\alpha - \sin \alpha) - \frac{r'^2}{2} * (\alpha' - \sin \alpha') \quad (6.33)$$

Mit der berechneten axialen Fördergeschwindigkeit sowie der Füllungsfläche und der verwendeten Anzahl an Paddelschnecken auf einer Welle lässt sich der Volumenstrom (Gleichung 6.34) und für eine konkrete Schüttdichte der Massestrom bestimmen (Gleichung 6.35).

$$\dot{V} = v_a * A_F * a_S \quad (6.34)$$

$$\dot{m}_{SFG} = v_a * \rho_{SFG} * A_F * a_S \quad (6.35)$$

Der Füllungsgrad lässt sich ebenfalls über die Füllungsfläche und der Anzahl verwendeter Paddelschnecken auf einer Welle bestimmen (Gleichung 6.36).

$$\Phi = \frac{A_F}{\pi * r^2} * 100 \% * a_S \quad (6.36)$$

Die Tab. 6.4 enthält wichtige Kennzahlen sowie die berechneten Fördergeschwindigkeiten, Fördermenge und Füllungsgrad im Vergleich für die drei unterschiedlichen Paddelanordnungen.

Tab. 6.4: Kennzahlen für die drei verschiedenen Paddelanordnungen

	[ne]	[ve]	[dp]
Füllungsfläche A_F pro Paddelschnecke [cm^2]		201,95	
Schüttdichte ρ_{SFG} [kg m^{-3}]		85	
Wellendrehzahl im Wellenabschnitt 1 n_{W1} [min^{-1}]		60	
Steigung Paddelschnecke G_p [mm]		300	
Winkelabstand zwischen zwei Paddel δ [°]	90	270	90
Anzahl Paddel pro Steigungshöhe a_p		4	
Anzahl Paddelschnecken a_s	1	1	2
mittlere axiale Fördergeschwindigkeit v_a [m s^{-1}]	0,30	0,10	0,30
Fördermenge (Massestrom) \dot{m}_{SFG} [t h^{-1}]	1,85	0,62	3,71
Fördermenge (Volumenstrom) \dot{V} [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	21,81	7,27	43,62
Füllungsgrad Φ [%]	2,57	2,57	5,14

7 Modellentwicklung für den Aussiebungsverlauf

Für den Bereich der Schäbenabscheidung wird davon ausgegangen, dass im Wellenabschnitt 1 alle abscheidbaren Schäben auf dem Siebboden vorliegen. In der vorgelagerten Staubabscheidung wurde das SFG bereits so aufgelockert, dass das Gut bereits entmischt ist. Die noch in den Faserflocken eingeschlossenen Schäben werden aufgrund der geringen Drehzahl in diesem Bereich nicht weiter herausgelöst, sondern gemeinsam mit den Fasern über dem Siebboden transportiert und stehen somit für ein Siebereignis nicht zur Verfügung.

7.1 Ansatz für das Abscheideverhalten der Schäben

Die in Kapitel 5.5.2 bereits getroffene Annahme einer exponentiellen Abnahme des Massestroms über dem Sieb, konnte auch in Versuchen bestätigt werden [Wessel, 1967], [Ferrara et al., 1975]. In Anlehnung an die Arbeit von [Beck, 1999] wird hier der exponentielle Ansatz für die Restschäben R nach Gleichung 7.1 übernommen. Dabei beschreibt T_A eine Zeitkonstante.

$$R = e^{-\frac{t}{T_A}} \quad (7.1)$$

Auf dieselbe Gleichung führt der empirisch verwendete Ansatz von [Huynh et al., 1978]. Dieser baut auf der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf und für die Berechnung wird die theoretische Durchtrittswahrscheinlichkeit von der eingesetzten Siebgeometrie verwendet [Stieß, 2009]. In Anlehnung an die Normbezeichnung für ein Lamellensieb nach ISO 7806-1983 (für Deutschland: DIN 24041) sieht die Durchtrittswahrscheinlichkeit p , wie in Abb. 7.1 dargestellt, dann wie folgt aus (Gleichung 7.2):

$$p = \frac{(w - d_K) * (l - d_K)}{t_1 * t_2} \quad (7.2)$$

Dabei hängt die Durchtrittswahrscheinlichkeit vom Verhältnis der Partikelgröße zur Siebmaschenweite ab. Damit das Partikel die Sieböffnung passieren kann, muss es im vollen Partikelumfang auf die Freifläche des Siebes treffen. Ausgehend vom Partikelmittelpunkt reduziert sich die eigentliche Freifläche auf eine Durchtrittsfläche, die im Verhältnis zur Maschenfläche steht.

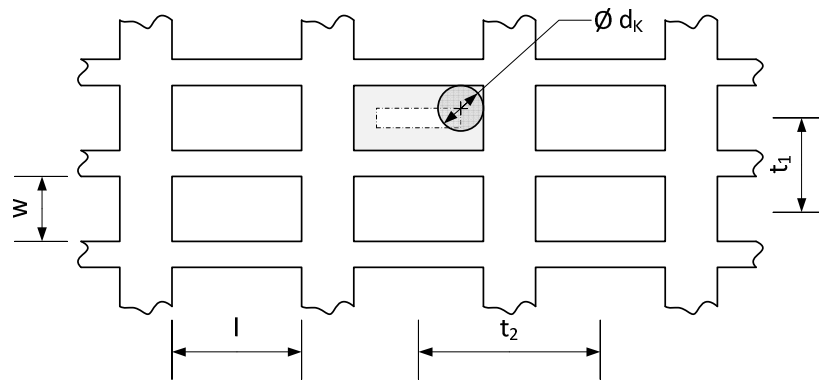


Abb. 7.1: Geometrie einer Sieböffnung

In dem für die Versuche verwendeten Fall einer Quadratlochung, vereinfacht sich die Berechnung zur Gleichung 7.3:

$$p = \frac{(w - d_K)^2}{t_1^2} \quad (7.3)$$

Die Schäben weisen gegenüber einer Kugel eine stark veränderte und unregelmäßige Form auf, was die Vorhersage eines theoretischen Siebereignisses erschwert. Als Äquivalentdurchmesser für die Partikelgröße wird die Maschenweite der Analysesiebung mit dem Medianwert d_{50} herangezogen (siehe Kapitel 4.2). Bei sich wiederholenden Siebberührungen ergibt sich die Abscheidewahrscheinlichkeit zu (7.4):

$$p_{n_s} = 1 - (1 - p)^{n_s} \quad (7.4)$$

Damit ist der verbleibende Rest auf dem Sieb (Gleichung 7.5):

$$R = (1 - p)^{n_s} \quad (7.5)$$

Durch Anwenden der Logarithmengesetze kann dies auch als Exponentialfunktion zur Basis e geschrieben werden (Gleichung 7.6):

$$R = e^{n_s \cdot \ln(1-p)} \quad (7.6)$$

Die Anzahl der Siebberührungen kann aus der Winkelgeschwindigkeit ω und der Siebzeit t_s bestimmt werden (Gleichung 7.7):

$$n_s = \frac{\omega * t_s}{2 * \pi} \quad (7.7)$$

Wird die Gleichung 7.7 in Gleichung 7.6 eingesetzt, ergibt sich der Rest über dem Sieb somit zur Gleichung 7.8:

$$R = e^{\frac{\omega \cdot \ln(1-p)}{2 \cdot \pi} \cdot t} \quad (7.8)$$

Im Vergleich vom exponentiellen Ansatz mit dem Wahrscheinlichkeitsansatz erhält man für die Zeitkonstante T_A die Gleichung 7.9:

$$T_A = -\frac{2 \cdot \pi}{\omega \cdot \ln(1-p)} \quad (7.9)$$

Da der Restschäbenverlauf wiederum massestromabhängig ist, wird das Abscheidemodell noch um eine Abscheidekonstante C_A erweitert (Gleichung 7.10).

$$R = e^{C_A \cdot \frac{\omega \cdot \ln(1-p)}{2 \cdot \pi} \cdot t} \quad (7.10)$$

7.2 Bestimmung der Modellparameter

Der Aussiebungverlauf wurde entlang des Weges aufgenommen. Dies bedeutet, dass am Ende jedes Siebfaches zum Auffangen des Siebdurchgangs mit definierter Breite, der Restschäbengehalt über dem Sieb bestimmt werden kann. Bei Verwendung der Abscheidfunktion muss nun an diesen Wegstellen s_k die Zeit mittels der axialen Vorschubgeschwindigkeit berechnet werden. Dies kann durch Gleichung 7.11 erfolgen:

$$t_k = \frac{s_k}{v_a} \quad (7.11)$$

Die Frage ist noch wie der Modellparameter C_A bestimmt werden kann. Die Lösung besteht hier in der Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate zur optimalen Anpassung des Restschäbenverlaufs von Versuch und Simulation. Dementsprechend wird der Modellparameter C_A aus den Versuchsergebnissen so bestimmt, dass der Fehler zur Abscheidfunktion minimal wird. Hierbei handelt es sich um eine klassische Optimierungsaufgabe, die wiederum in einem numerischen Iterationsverfahren bestimmt werden kann. Zur Berechnung der kleinsten Fehlerquadrate nach Gleichung 7.12 kommt die Software MATLAB® zum Einsatz.

$$(F(C_A))^2 = \sum_{k=0}^{10} (R(t = t_k) - R_{th}(t = t_k))^2 \quad (7.12)$$

Den prinzipiellen Einfluss des Modellparameters C_A auf die Restschäben über dem Siebboden zeigt die Abb. 7.2.

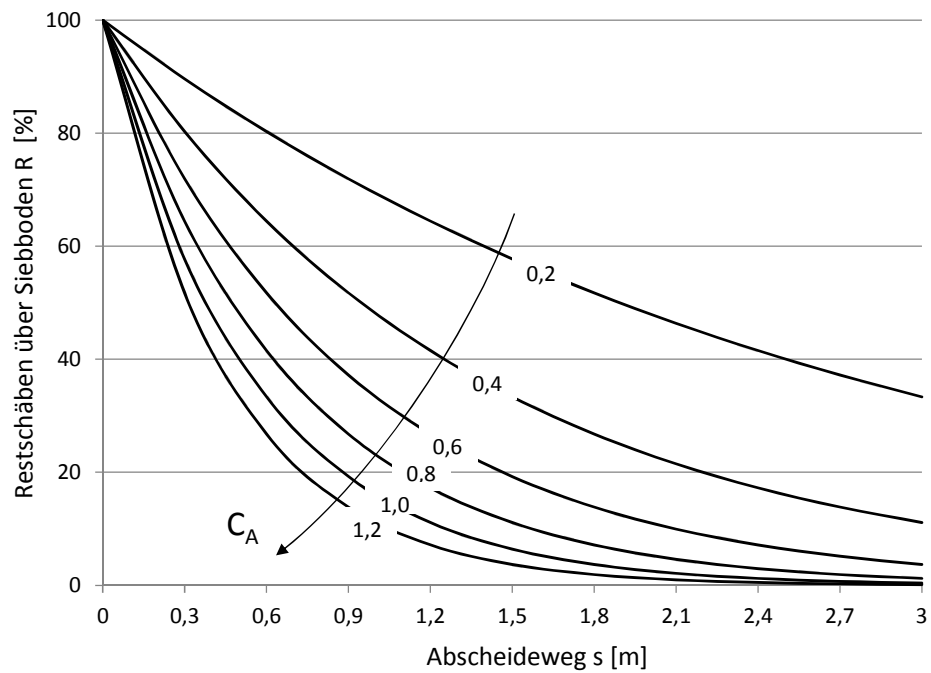


Abb. 7.2: Einfluss unterschiedlicher Abscheidekonstanten auf den Verlauf der Restschäben

Es wird deutlich, wie sich mit kleiner werdender Abscheidekonstante der Aussiebungsvorlauf verschlechtert. Dies würde auch einem höheren Massestrom entsprechen. Dabei nähert sich die Funktion immer näher einem linearen Verlauf. Dies liegt an einem Erreichen des maximalen Abscheidevermögens, da die Öffnungen vom Sieb voll ausgenutzt sind und der Abscheidestrom nicht mehr gesteigert werden kann [Beck, 1999].

8 Bewertung des Massestrommodells sowie des Aussiebungsverlaufs

8.1 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Die Versuchsdurchführung erfolgte nach der im Kapitel 5.5 beschriebenen Verfahrensweise. Im ersten Siebabschnitt zur Abscheidung des Staubes wurde prinzipiell die doppelte Paddelanordnung für alle Versuche eingesetzt. Damit konnte ein maximaler Vorschub auch bei hohen Masseströmen gewährleistet werden, da in diesem Bereich der Masseanteil über dem Sieb entlang der Bearbeitungsstrecke noch nicht nennenswert abnimmt. Gleichzeitig war es durch die intensive Bearbeitung des Gutes möglich das SFG soweit zu entmischen, dass die frei liegenden Schäben unabhängig von den Faserflocken über das Sieb geschoben werden konnten.

In den nachfolgenden Siebabschnitten wurden die Paddelanordnungen entsprechend der Versuchseinstellung variiert. Im Bereich der Schäbenabscheidung konnte beim Einsatz der vorausseilenden Anordnung kein zufriedenstellender Materialfluss über dem Sieb erreicht werden. Dies lag vor allem an einer ungenügenden axialen Vorschubbewegung der Faserflocken, was sich an einem Anstauen der Flocken entlang der Reinigungsstrecke bemerkbar machte. Aus diesem Grunde wurde entschieden, die vorausseilende Anordnung in diesem Siebabschnitt zur Schäbenabscheidung nicht weiter für die Untersuchungen einzusetzen. Die Tab. 12.1 im Anhang zeigt eine Zusammenstellung aller durchgeführten Versuche, die im weiteren Verlauf kurz nur noch mit einem V und der entsprechenden Versuchsnummer bezeichnet werden. Den prinzipiellen Aussiebungsverlauf für ausgewählte Versuchsvarianten zeigt die Abb. 8.1.

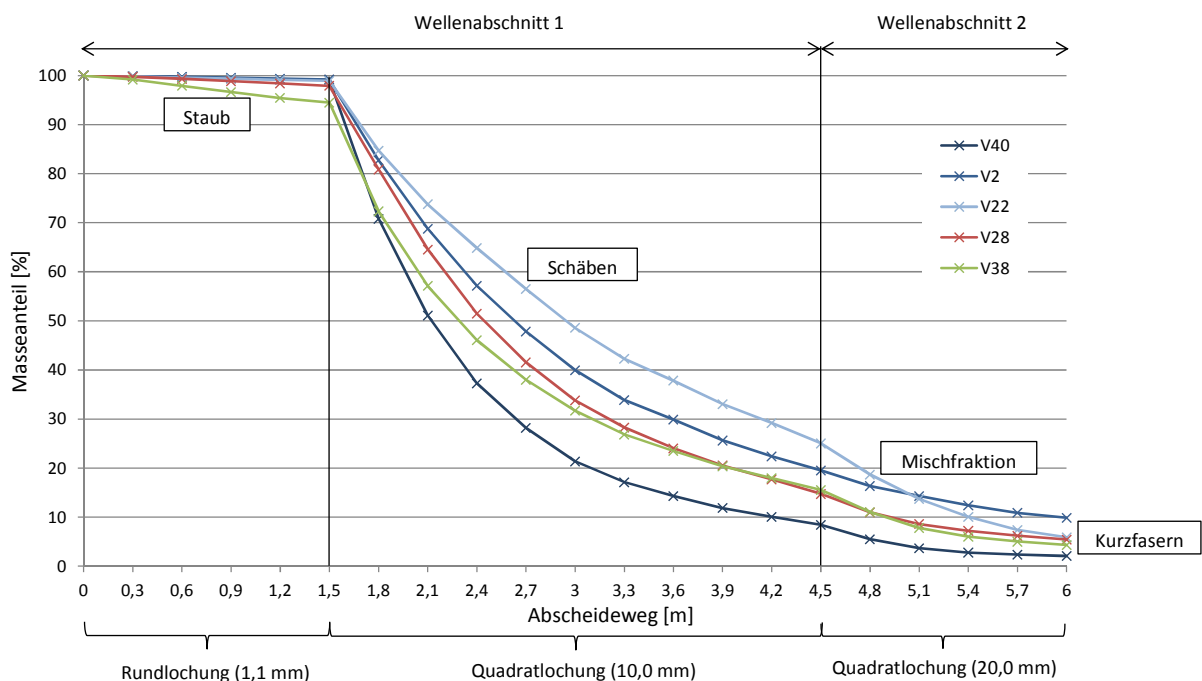


Abb. 8.1: Aussiebungsverlauf für ausgewählte Versuchsvarianten

(Winterhanf: **V40**/ $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$ [dp]/ $n_{W2} = 100 \text{ min}^{-1}$ [ve]/ $1,01 \text{ t h}^{-1}$, **V2**/ $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$ [ne]/ $n_{W2} = 120 \text{ min}^{-1}$ [ne]/ $1,57 \text{ t h}^{-1}$, **V22**/ $n_{W1} = 40 \text{ min}^{-1}$ [ne]/ $n_{W2} = 100 \text{ min}^{-1}$ [ve]/ $2,20 \text{ t h}^{-1}$; stark geröstet: **V28**/ $n_{W1} = 80 \text{ min}^{-1}$ [dp]/ $n_{W2} = 120 \text{ min}^{-1}$ [dp]/ $2,35 \text{ t h}^{-1}$; leicht geröstet: **V38**/ $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$ [dp]/ $n_{W2} = 120 \text{ min}^{-1}$ [ve]/ $2,49 \text{ t h}^{-1}$)

Die gewählte Darstellung zeigt einen guten Überblick über die komplette Reinigungsstrecke. Ein direkter Vergleich zwischen den einzelnen Versuchen gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Maschinenparameter, Paddelanordnungen und Versuchsmaterialien als sehr schwierig. Aus diesem Grund wird sich bei einer weiteren vergleichenden Betrachtung auf bestimmte Siebabschnitte konzentriert. Deutlich zu erkennen sind aber die unterschiedlichen Masseanteile bei der Abscheidung der Staubfraktion für die verschiedenen Materialkategorien. Auch deutet sich schon hier der Einfluss des Massestroms und der Paddelanordnung auf das Abscheideverhalten entlang des Abscheidewegs in den Bereichen Schäben und Mischfraktion an. Eine auf bestimmte Siebbereiche konzentrierte Betrachtung erfolgt in den nächsten Kapiteln.

8.1.1 Einfluss des Massestroms

Der zweite Siebabschnitt zur Abscheidung der Schäben (siehe Abb. 5.11) stellt die längste Reinigungsstrecke innerhalb des kompletten Aussiebungsverlaufs. Zur Beurteilung des Einflusses vom Massestrom auf den Aussiebungsverlauf wurde dieser Bereich für die Materialkategorie Winterhanf herangezogen. Um die Variation der Maschinenparameter im Wellenabschnitt 2 für die einzelnen Versuche nicht betrachten zu müssen, wurde die Misch- und Faserfraktion als eine Gesamtfraktion angegeben.

Für die nacheilende Paddelanordnung, wie in Abb. 8.2 dargestellt, zeigt sich mit der Zunahme des Massestroms eine Verschiebung des Masseanteils in die hinteren Siebfraktionen. Dies zeigt sich deutlich in einer Abnahme des ausgesiebten Masseanteils an Schäben und einer Zunahme der Fraktionen Misch/Fasern. Da der Staubanteil im Verhältnis nur einen geringen Anteil ausmacht, ist diese Verschiebung nicht so deutlich ausgeprägt. Zu beachten ist hier die bereits erwähnte doppelte Paddelanordnung im Bereich Staub von Wellenabschnitt 1, die auch bei hohen Masseströmen noch effektiv ausreingt. Die Verschiebung der Masseanteile von den Fraktionen zueinander zeigt sich auch anhand einer flacher werdenden Aussiebungskurve im Bereich der Schäbenabscheidung von Wellenabschnitt 1 (Abb. 8.2).

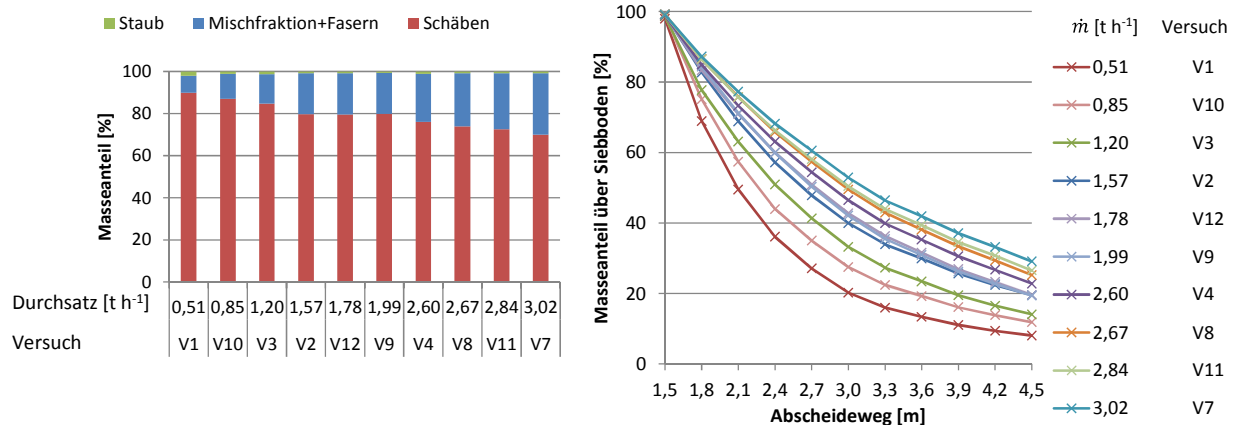


Abb. 8.2: Masseanteil der Austragsstellen sowie Aussiebungsverlauf im Bereich Schäben bei der nacheilenden Paddelanordnung mit einer Drehzahl $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$ im Wellenabschnitt 1 für unterschiedliche Masseströme (Materialkategorie: Winterhanf)

Für die doppelte Paddelanordnung in Abb. 8.3 zeigt sich ein ähnliches Bild wie für die nacheilende Paddelanordnung. Auch hier findet mit einer Steigerung des Massestroms eine Abnahme des ausgesiebten Schäbenanteils bei gleichzeitiger Zunahme der Gesamtfraktion Misch/Fasern statt. Zu erkennen ist aber auch der im Vergleich zur nacheilenden Paddelanordnung steilere Aussiebungsverlauf bei ähnlichen Masseströmen im Bereich der Schäbenabscheidung von Wellenabschnitt 1.

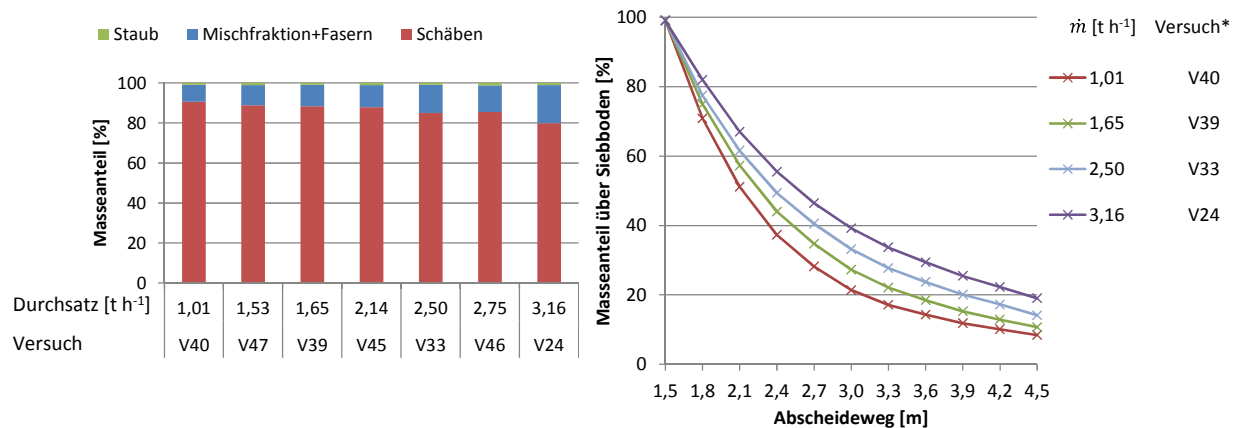


Abb. 8.3: Masseanteil der Austragsstellen sowie Aussiebungsverlauf im Bereich Schäben bei der doppelten Paddelanordnung mit einer Drehzahl $n_{w1} = 60 \text{ min}^{-1}$ im Wellenabschnitt 1 für unterschiedliche Masseströme (Materialkategorie: Winterhanf), * für die Versuche 45, 46 und 47 wurden keine Aussiebungsverläufe aufgenommen

Ein Vergleich beider Paddelanordnungen auf ihren Aussiebungsverlauf in Abhängigkeit von Ihrem Massestrom soll im nächsten Kapitel gezeigt werden.

8.1.2 Einfluss der Paddelanordnung auf den Aussiebungsverlauf

Für eine Bewertung der Paddelanordnungen auf den Aussiebungsverlauf sollen zunächst die nacheilende und die doppelte Paddelanordnung im Bereich der Schäben miteinander verglichen werden. Dazu wurde der bis zum Beginn der Schäbenabscheidung abgeschiedene Staubanteil ermittelt und in der Auswertung berücksichtigt, so dass der Aussiebungsverlauf für die herangezogenen Versuche wieder auf dem gleichen Niveau von 100 % beginnt. Eine exakte Verdopplung des Massestroms ist in diesen Größenordnungen (Massestrom) und bei Verwendung des beschriebenen Versuchsaufbaus nicht möglich. Die für einen Vergleich der Paddelanordnungen herangezogenen Masseströme liegen aber eng zusammen und können gut für einen Vergleich herangezogen werden (Abb. 8.4).

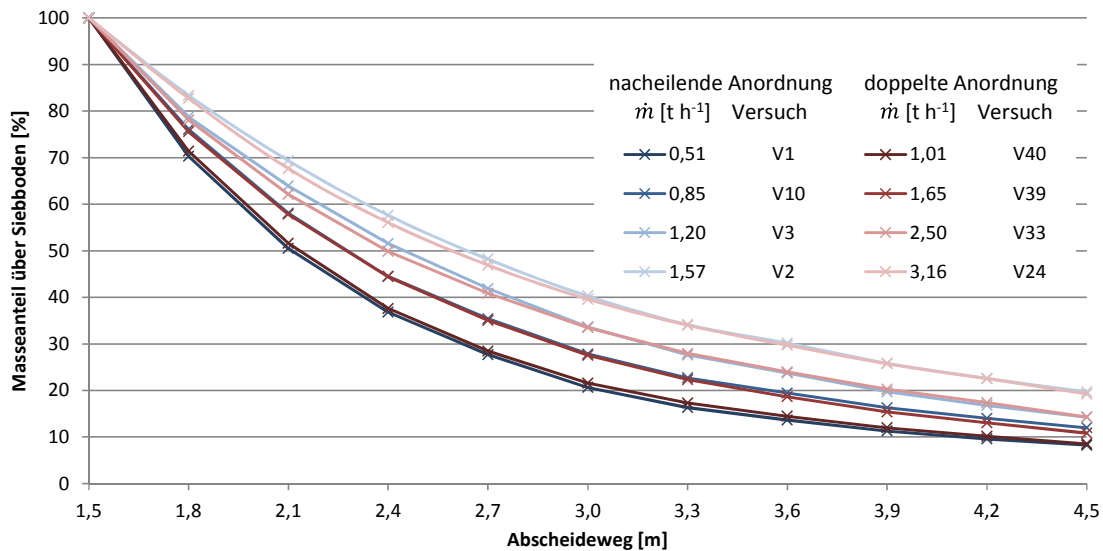


Abb. 8.4: Vergleich des Aussiebungsverlaufs der nacheilenden und der doppelten Paddelanordnung bei einer Drehzahl $n_{w1} = 60 \text{ min}^{-1}$ im Wellenabschnitt 1 für unterschiedliche Masseströme (Materialkategorie: Winterhanf)

Der mit zunehmendem Massestrom flacher werdende Aussiebungsverlauf wurde bereits erörtert. Die Gegenüberstellung der beiden genannten Paddelanordnungen bei sich ungefähr verdoppelnden Masseströmen zeigt einen sich sehr stark ähnelnden Aussiebungsverlauf. Dies bedeutet, dass mit dem Einsatz einer zweiten ineinander gewickelten Paddelanordnung (mehrgängig) die Aussiebung der Schäben effizienter wird. Somit kann im Vergleich zur eingängigen Paddelanordnung, bei gleichem Abscheideweg und einem doppelt so hohen Massestrom, der gleiche Aussiebungsverlauf erreicht werden.

Die Beurteilung der Paddelanordnung im Wellenabschnitt 2 gestaltet sich aufgrund der Aussiebungsreihenfolge von Staub, Schäben, Mischfraktion weitaus schwieriger. Für eine vergleichende Betrachtung ist zunächst der Masseanteil über dem Siebboden am Ende der Schäbenreinigungsstrecke entscheidend. Dieser definiert das Verhältnis von Restschäben und Fasern zum Beginn der Aussiebung im Bereich der Mischfraktion. Weiterhin ist der Eingangsmassestrom wichtig, damit auch nach der Schäbenabscheidung der nachfolgende hintere Bereich der Reinigungsstrecke einen ähnlichen Massestrom aufweist.

In der Abb. 8.5 sind alle drei untersuchten Paddelanordnungen dargestellt. Es wurde sich auf zwei Bereiche für den Masseanteil über Siebboden zum Beginn dieses Siebabschnitts konzentriert. Der ursprüngliche Massestrom variiert in den beiden Betrachtungsfällen.

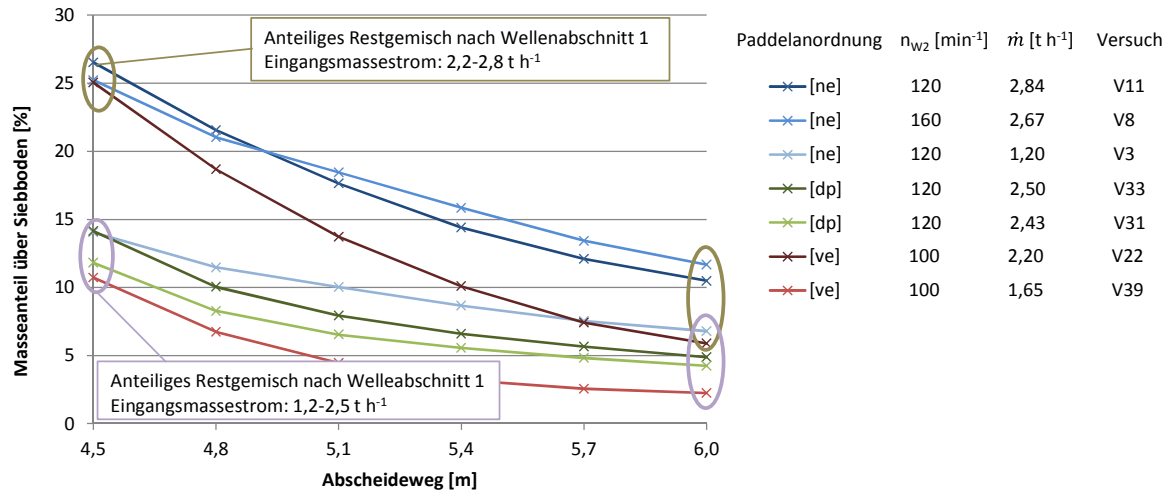


Abb. 8.5: Aussiebungsverlauf im Wellenabschnitt 2 (Materialkategorie: Winterhanf)

Es zeigt sich bei Verwendung der vorausseilenden Paddelanordnung der effektivste Aussiebungsverlauf. Es werden dementsprechend bei der gewählten Anordnung die Faserflocken gezielt aufgelöst, so dass Schäben frei gelegt werden und ausfallen können. Die nacheilende Paddelanordnung zeigt auch bei einem geringen Massestrom den ungünstigsten Aussiebungsverlauf. So können bei dieser Anordnung die Faserflocken weniger gut aufgelöst und Schäben frei gelegt werden. Der Aussiebungsverlauf ist flacher und führt am Ende der Reinigungsstrecke zu einem höheren Restmasseanteil, welcher sich in einem höheren Restschäbengehalt in den zurückgewonnenen Kurzfasern begründet. Auch die doppelte Paddelanordnung erreicht nicht die Effektivität der vorausseilenden Anordnung.

8.1.3 Einfluss der Drehzahl auf den Aussiebungsverlauf

Für den Einfluss der Drehzahl auf den Aussiebungsverlauf im Bereich der Schäbenabscheidung werden drei verschiedene Materialkategorien (Winterhanf, leicht geröstet und stark geröstet) herangezogen. Dies soll sicherstellen, dass es nicht zu unerwarteten Interaktionen innerhalb einer Materialkategorie in Abhängigkeit von der Drehzahl kommt und den Aussiebungsverlauf verändert. Die untersuchten Wellendrehzahlen n_{w1} lagen bei 40, 60 und 80 min⁻¹, was einer Verdopplung des Drehzahlbereichs entspricht.

Die Abb. 8.6 zeigt die Aussiebungsverläufe für die nacheilende und die doppelte Paddelanordnung. Auch hier ist wieder festzuhalten, dass der Massestrom innerhalb der Materialkategorien nicht exakt gleich realisierbar war. Für alle Materialkategorien und die beiden Paddelanordnungen lässt sich kein eindeutiger Trend beim Aussiebungsverlauf in Abhängigkeit von der Drehzahl feststellen.

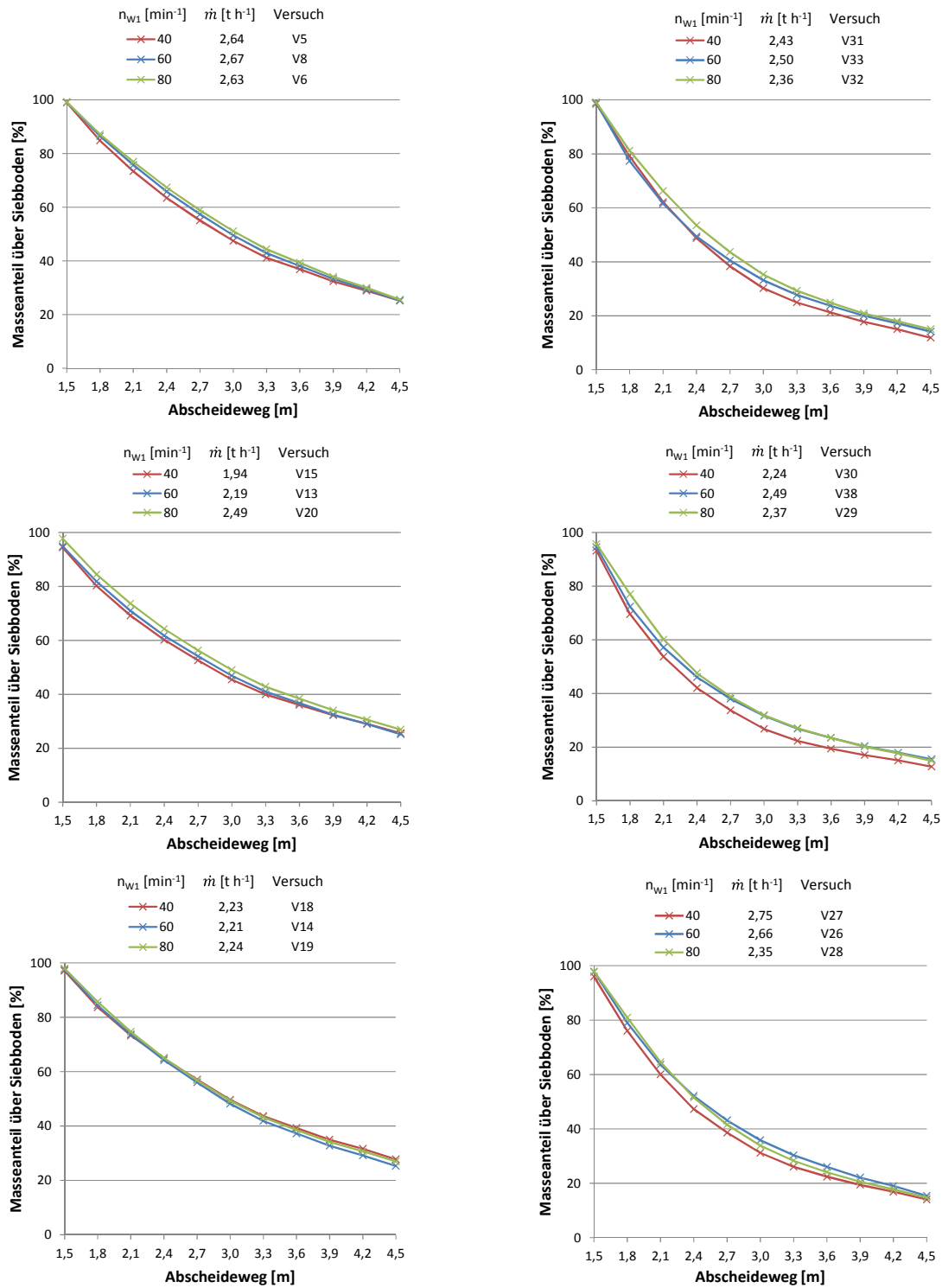


Abb. 8.6: Aussiebungsverlauf bei Variation der Drehzahl n_{W1} von der nacheilenden Paddelanordnung (links) und der doppelten Paddelanordnung (rechts) für die Materialkategorie Winterhanf, leicht geröstet und stark geröstet (von oben nach unten)

Mit steigender Drehzahl erhöht sich auch die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Gutstroms. Bei einem unveränderten Massestrom muss damit die Füllungshöhe über dem Siebboden abnehmen. Dies würde bedeuten, dass die voneinander abhängigen Parameter Füllungshöhe und Verweilzeit in dem untersuchten Drehzahlbereich keinen Einfluss auf den Aussiebungsverlauf haben. Somit ist nur die Anzahl der Paddeleingriffe und der damit verbundenen Anzahl der Siebereignisse für den Aussiebungsverlauf von Bedeutung.

8.1.4 Qualität der Austragsfraktionen

Für die Beantwortung der Frage nach der Zusammensetzung der zu separierenden Fraktionen aus dem SFG wurde der Versuchsaufbau der Variante 2 herangezogen (siehe Abb. 5.10). Die Abb. 8.7 zeigt einen Überblick ausgewählter Versuche für verschiedene Materialkategorien mit ihren separierten Fraktionen und deren Masseanteilen. Zum Einsatz kamen die sich in der Versuchsanordnung Variante 1 als günstig herausgestellten Paddelanordnungen. So wurde der Wellenabschnitt 1 im Bereich der Schäbenabscheidung mit der doppelten Paddelanordnung und der Wellenabschnitt 2 im Bereich der Mischfraktion mit der vorseilenden Paddelanordnung bestückt.

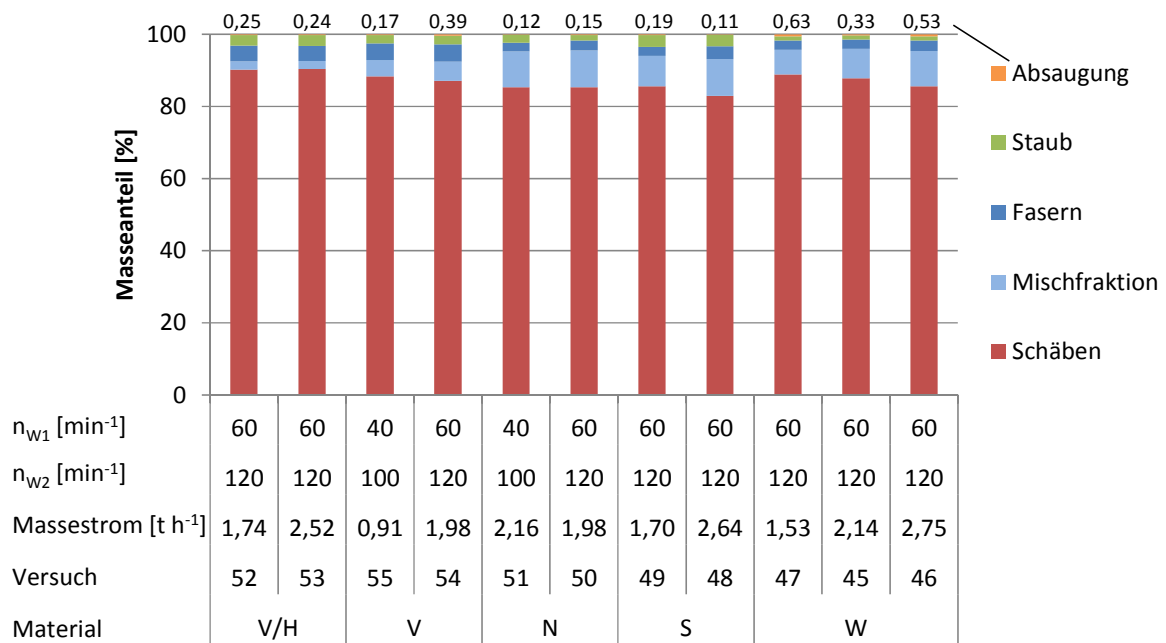


Abb. 8.7: Masseanteile der einzelnen Fraktionen bei der Versuchsdurchführung nach der Versuchsanordnung Variante 2 (Material siehe Tab. 5.2)

Für alle verwendeten Materialkategorien konnte ein Masseanteil von über 80 % aus dem SFG separiert werden. Die zurückgewonnenen Fasern betragen bis zu 5 Masse-% mit noch enthaltenen Restschäben. Eine genaue Betrachtung der Zusammensetzung der gereinigten Schäben zeigt die Abb. 8.8.

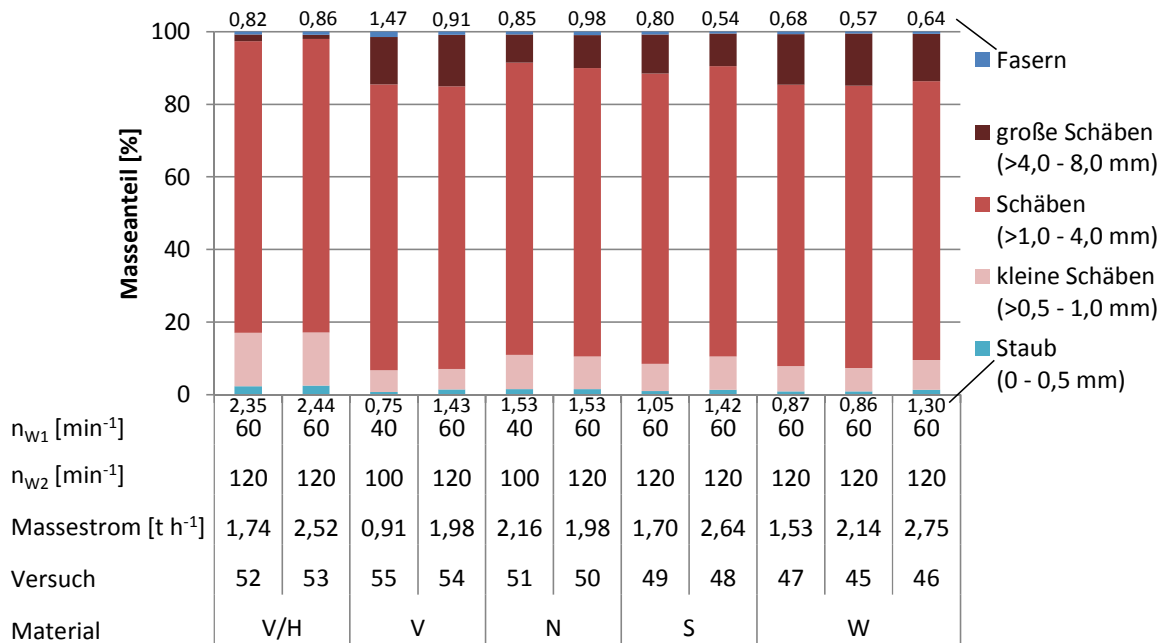


Abb. 8.8: Zusammensetzung der gereinigten Schäbenfraktion nach Versuchsanordnung Variante 2 (Material siehe Tab. 5.2)

Prinzipiell gibt die Größenverteilung der Schäben die Tendenz vom Ausgangsmaterial SFG wieder. Der Masseanteil der Schäben im Bereich von >1,0 - 4,0 mm ist dabei am größten. Deutlich zu erkennen ist bei der Materialkategorie V/H im Vergleich zur Materialkategorie V die Verschiebung des Masseanteils der großen Schäben (>4,0 - 8,0 mm) in Richtung der kleinen Schäben (>0,5 - 1,0 mm) durch die vorherige Bearbeitung des SFG's mit einer Hammermühle. Zu beachten ist, dass der Staubanteil durch die zusätzliche Bearbeitungsstufe ebenfalls deutlich erhöht ist. Der in den Schäben enthaltene Faseranteil beträgt bis auf einen Versuch deutlich unter 1 Masse-%. Dabei handelt es sich vor allem um Ultrakurzfasern, Faserfragmenten die fest an den Schäben haften und Bastbestandteile. Beim Staubanteil in den gereinigten Schäben konnte der geforderte Wert von < 2 Masse-%, bis auf die eine bereits genannte Materialkategorie V/H, erreicht werden. Für ausgewählte Versuchseinstellungen und Materialkategorien liegt der Staubanteil in den gereinigten Schäben bei einem Wert von < 1 Masse-%.

Die zurückgewonnene Faserfraktion zeigt einen deutlichen Unterschied in ihrem Masseanteil an darin enthaltenen Restschäben (Abb. 8.9). Dies liegt zum einem an der verwendeten Materialkategorie und ihrem Entholzungsverhalten sowie der eingesetzten Entholzungstechnologie in der vorgelagerten Aufschlussanlage.

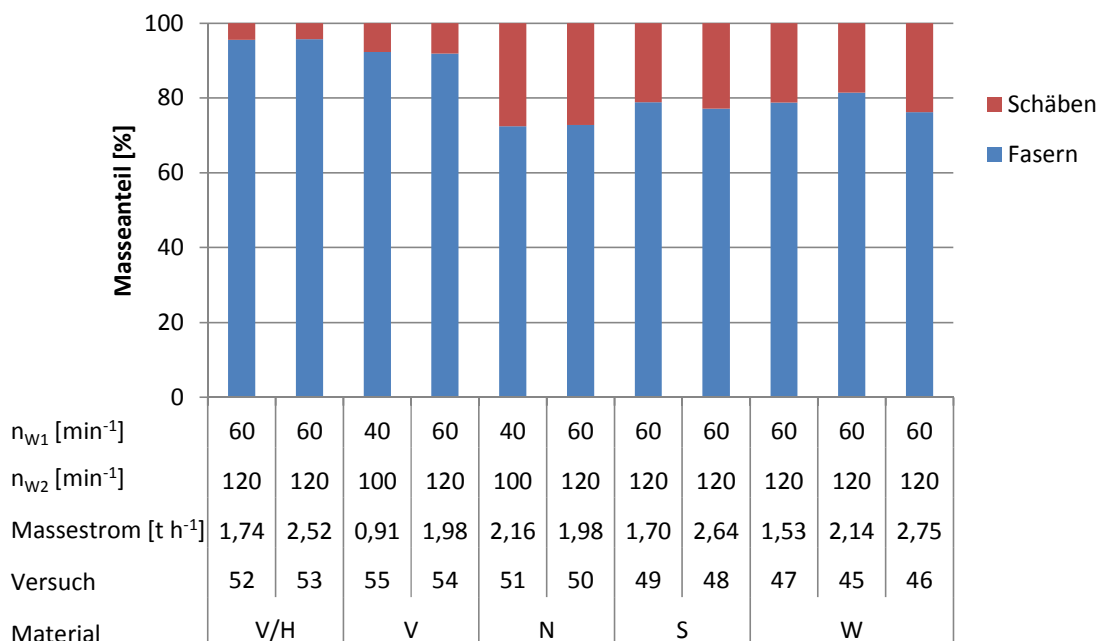


Abb. 8.9: Zusammensetzung der Faserfraktion nach Versuchsanordnung Variante 2 (Material siehe Tab. 5.2)

Für die Materialkategorie V bzw. V/H konnte der höchste Reinheitsgrad bei den Fasern erzielt werden. Diese Kategorie ist auch im Vergleich zu den anderen Versuchsmaterialien in einer anderen Faseraufschlussanlage unter anderen Aufschlussbedingungen als Nebenprodukt erzeugt worden. So konnte für die Materialkategorie V/H (SFG mit Hammermühle nachbereitet) ein zurückgewonnener Faseranteil aus dem SFG von 5 Masse-% mit einem Restschäbengehalt von 4 Masse-% erzielt werden. In der Tab. 8.1 sind die erzielten Reinigungswerte aus den Versuchen mit den Werten aus der Anforderungsliste gegenübergestellt.

Tab. 8.1: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der ursprünglichen Anforderungsliste

	Ergebnis	Forderung
Masseanteil Schäben	> 80 %	> 80 %
Restfasergehalt:	< 1,47 %*	< 1 %
Staub: (Feinanteil < 0,5 mm)	0,8 - 2,4 %**	< 2 % (siehe Tab. 4.2) Produktklasse F1[< 1 %] bzw. F2[< 2 %]
Masseanteil Fasern	bis 5 %	-
Restschäbengehalt:	4 - 25 %***	< 10 %

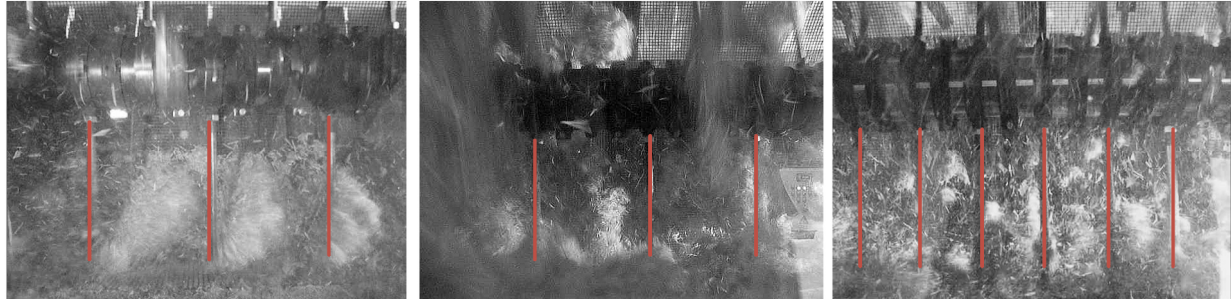
* nur Versuch 55 aus der Materialkategorie V liegt über der geforderten Grenze von < 1 %

** nur Materialkategorie V/H liegt über der geforderten Grenze von < 2 %

*** stark abhängig vom Entholungsgrad des Strohs in der Faseraufschlussanlage

8.2 Modellvalidierung

Die auf Basis der Modellierung angenommene Verschiebebewegung einer SFG-Portion wurde auch in den Praxisversuchen bestätigt (Abb. 8.10).



Paddelposition beim Guteingriff für die jeweilige auf der Welle installierte Paddelanordnung

Abb. 8.10: Materialtransport in den Praxisversuchen für 3 unterschiedliche Paddelanordnungen (von links nach rechts: [ne], [ve], [dp])

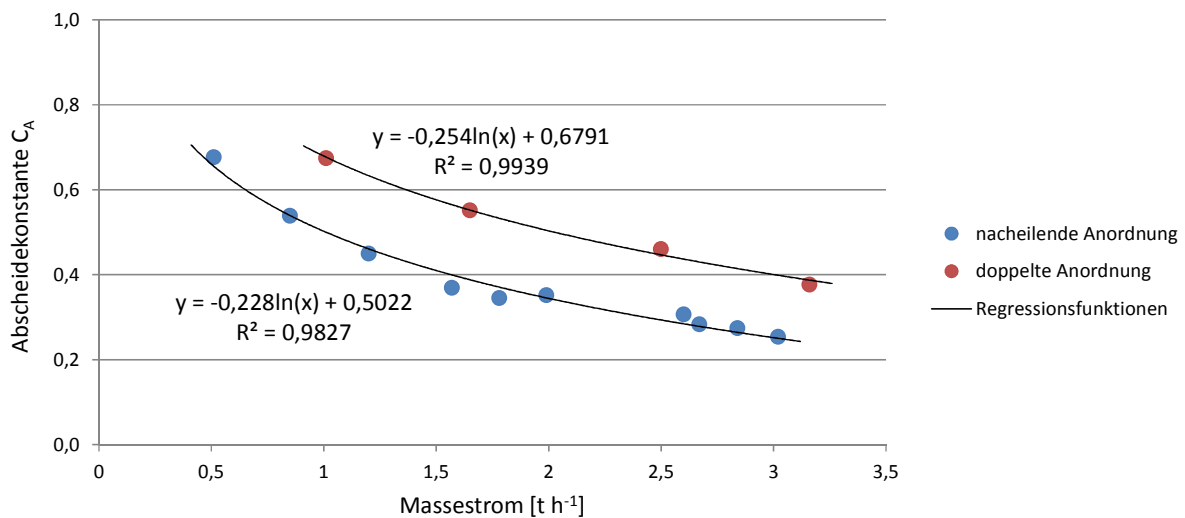
Innerhalb einer Steigungshöhe bildet sich in der nacheilenden Paddelanordnung eine SFG-Portion aus, die bei einer Wellenumdrehung von 90° in axialer Richtung vorwärts geschoben wird. Bei der vorseilenden Paddelanordnung kann man erkennen, dass innerhalb einer Steigungshöhe der Bereich in dem das Gut in axialer Richtung vorwärts geschoben wird, bereits 90° zuvor von dem nachfolgenden Paddel geräumt wurde. Die Weiterverschiebung der SFG-Portion erfolgt erst bei einer Wellenumdrehung von 270° . Bei gleichem Massestrom bilden sich bei der doppelten Paddelanordnung durch die sich überlappenden Steigungshöhen kleinere Haufwerke aus. Die Weiterverschiebung der SFG-Portion erfolgt bei einer Wellenumdrehung von 90° in einen Siebbereich der wiederum 90° zuvor von einem nachfolgenden Paddel geräumt wurde.

Für die Validierung des Modells zur Schäbenabscheidung muss der experimentell bestimmte Aussiebungsverlauf auf die in diesem Siebbereich abscheidbare Schäbenmasse umgerechnet werden. Damit beginnt der Anteil der Restschäben über Sieb wieder bei 100 % am Abscheideweg $s = 0$ m. Die Abscheidekonstante C_A lässt sich aus den Praxisversuchen nach Gleichung 7.12 bestimmen. Die Tab. 8.2 zeigt die numerisch ermittelten Werte für C_A und dessen Fehlerquadrat, die Varianz $(F(C_A))^2$ bzw. Fehler, die Standardabweichung $F(C_A)$ für die nacheilende und doppelte Paddelanordnung in Abhängigkeit vom Massestrom.

Tab. 8.2: Ergebnisse des numerischen Iterationsverfahrens mit MATLAB® zur Bestimmung des Modellparameters C_A

Versuch	Paddelanordnung	\dot{m}_{SFG}	C_A	$(F(C_A))^2$	$F(C_A)$
V1	[ne]	0,51	0,677	1,153	1,074
V10	[ne]	0,85	0,538	2,696	1,642
V3	[ne]	1,20	0,450	1,795	1,340
V2	[ne]	1,57	0,370	1,735	1,317
V12	[ne]	1,78	0,345	5,074	2,252
V9	[ne]	1,99	0,352	9,259	3,043
V4	[ne]	2,60	0,307	3,881	1,970
V8	[ne]	2,67	0,283	6,842	2,616
V11	[ne]	2,84	0,275	2,534	1,592
V7	[ne]	3,02	0,254	2,479	1,574
V40	[dp]	1,01	0,674	1,374	1,172
V39	[dp]	1,65	0,551	1,071	1,035
V33	[dp]	2,50	0,460	6,325	2,515
V24	[dp]	3,16	0,377	6,027	2,455

Die Abscheidekonstante nimmt mit zunehmendem Massestrom ab, wobei die Werte für die doppelte Anordnung über den Werten der nacheilenden Anordnung liegen. Der prinzipielle Verlauf der Regressionsfunktion für C_A gilt aber für beide Paddelanordnungen (Abb. 8.11).

**Abb. 8.11:** Einfluss der Paddelanordnung und des Massestroms auf den Modellparameter C_A (Materialkategorie: Winterhanf)

Mit der massestromabhängigen Abscheidekonstante lässt sich nun das Abscheideverhalten der Schäben entsprechend der gewählten Paddelanordnung ([ne] bzw. [dp]) modellieren. Die Abb. 8.12 und Abb. 8.13 zeigen eine gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Aussiebungsverlauf für eine große Bandbreite an unterschiedlichen Masseströmen.

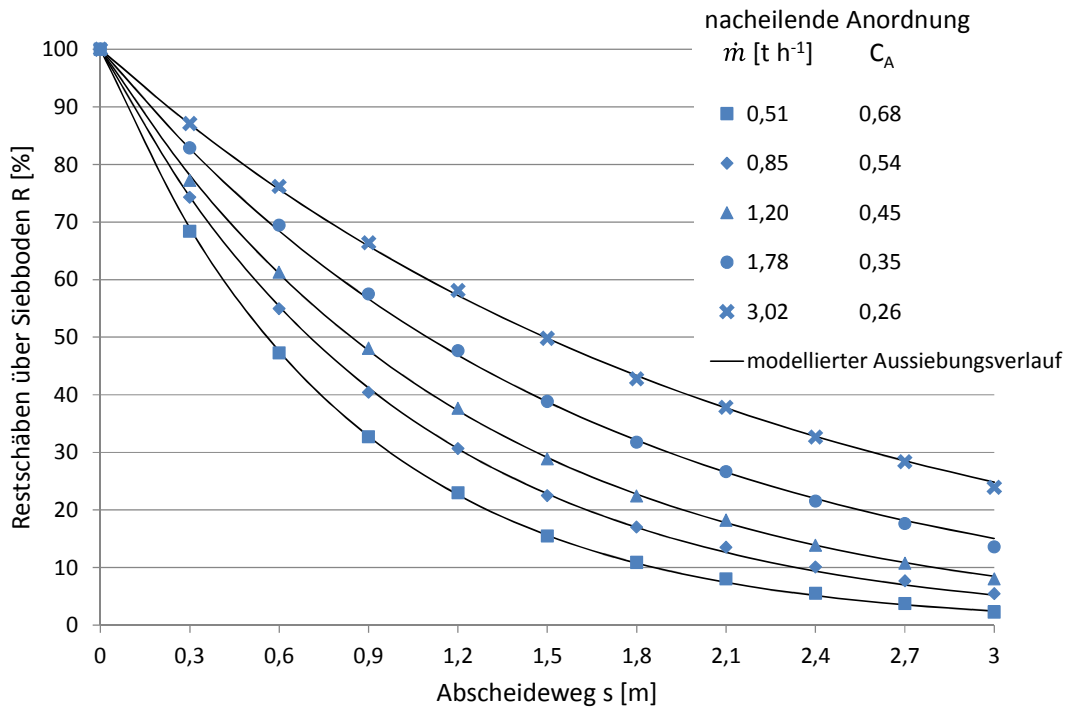


Abb. 8.12: Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Ausiebungsverlauf von Hanfschäben bei der nacheilenden Paddelanordnung in Abhängigkeit vom Massestrom (Versuch V1, V10, V3, V12 und V7 aus der Materialkategorie Winterhanf mit einer Drehzahl $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$)

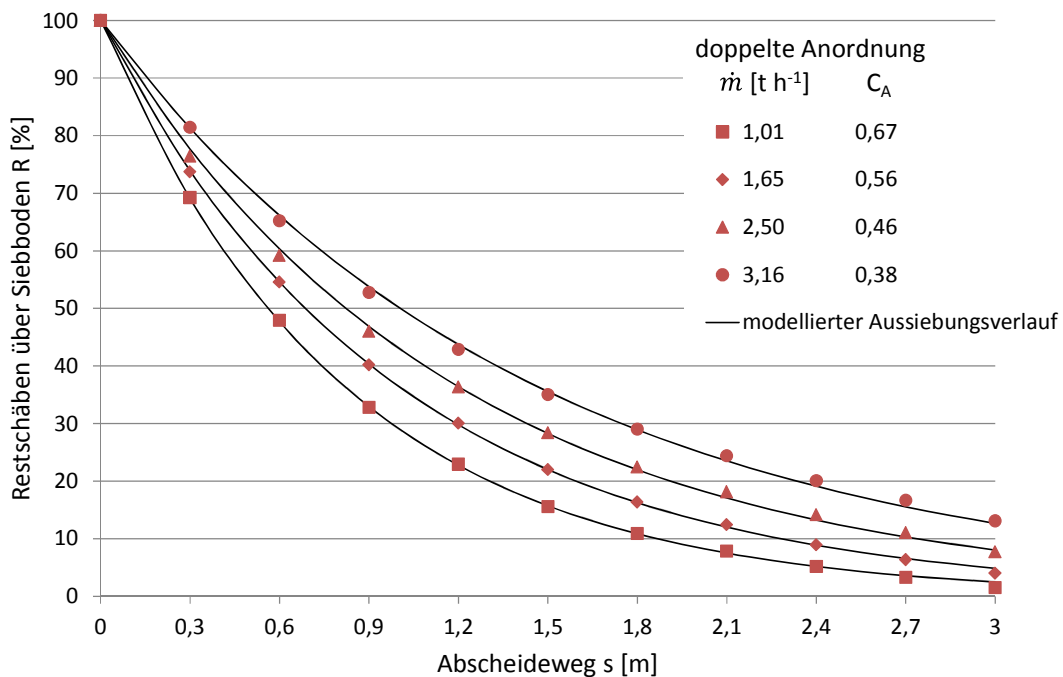


Abb. 8.13: Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Ausiebungsverlauf von Hanfschäben bei der doppelten Paddelanordnung in Abhängigkeit vom Massestrom (Versuch V40, V39, V33 und V24 aus der Materialkategorie Winterhanf mit einer Drehzahl $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$)

Die im Modell modellierten maximalen Masseströme konnten in den Versuchen erreicht und zum Teil übertroffen werden. So zeigte sich für die nacheilende Paddelanordnung ein höherer Massestrom als mit dem Massestrommodell abgebildet werden konnte. Dies deutet darauf hin, dass mit einer größeren zulässigen Füllhöhe im Modell zur Auslegung des Axialfraktionierers bei Verwen-

derung der in den Versuchen eingesetzten Paddelgeometrie gerechnet werden könnte. Zu beachten ist aber die geringe Zeitspanne eines einzelnen durchgeführten Versuchs. Materialaufstauungen oberhalb des Abscheidewegs konnten nicht beobachtet werden, können sich aber möglicherweise bei einem längeren zeitlichen Betrieb einstellen. Für die vorauseilende Paddelanordnung kann aufgrund des schlechten Vorschubverhaltens im Bereich der Schäbenabscheidung und der wenigen durchgeführten Praxisuntersuchungen keine Aussage getroffen werden. Wahrscheinlich wurde in den Versuchen der Massestrom zu hoch gewählt, was ein Vergleich mit dem Massestrommodell auch nahe legt.

In der Parameterstudie zum Wurfverhalten der Schäben und Fasern konnten Vorhersagen zu den Paddelanordnungen und den zu verwendenden Drehzahlen in den beiden Wellenabschnitten getroffen werden. So zeigt das Modell zur Wurfbewegung den Einsatz der vorauseilenden Paddelanordnung mit einer wahrscheinlichen Kollision zwischen Faserflocke und nachfolgendem Paddel im Bereich der Mischfraktion zur Ausreinigung der Schäben von den Fasern als vorteilhaft. Dies konnte in den Versuchen bei Verwendung dieser Paddelanordnung anhand des effektiveren Ausiebungsverlaufs, der in einer Zerschlagung der Faserflocken und dem Herauslösen von eingeschlossenen Schäben begründet liegt, bestätigt werden. Die berechneten Drehzahlen für die beiden Wellenabschnitte liegen in dem Bereich, in dem auch in den Praxisversuchen gute Ergebnisse für das Abscheide- und Auflöseverhalten des SFG erzielt werden konnten.

Eine Betrachtung der tatsächlich genutzten Siebfläche kann am sich ausbildenden Querschnitt des ausgesiebten Schäbenhaufwerks in den Auffangbehältern unter dem Sieb beurteilt werden (Abb. 8.14). So werden bei kleineren Masseströmen die Schäben vorwiegend im Steigungsbereich der halbkreisförmigen Siebfläche abgeschieden. Erst bei höheren Masseströmen kommt es im unteren Siebbereich zu einem vermehrten Austrag an Schäben aufgrund der erhöhten Füllhöhe und dem Materialfluss über das Paddel mit anschließender Siebpassage. Dies zeigt sich in einer gleichmäßigeren Verteilung des Querschnitts vom Schäbenhaufwerk unter dem Sieb.




 Drehrichtung der Paddelschnecke über dem Sieb

Abb. 8.14: Querschnitt vom Austrag unter dem Sieb bei Einsatz der doppelten Paddelanordnung
(Versuch/Massestrom von links nach rechts: V40/1,01 t h⁻¹, V39/1,65 t h⁻¹, V38/2,49 t h⁻¹)

Auffällig ist jedoch die geringe Ausnutzung der Siebfläche auf der Wurfseite, gegenüber der Steigungsseite. Dies hängt mit der Drehrichtung der Paddelschnecke zusammen, die das Gut immer versucht, auf die Steigungsseite zu schieben. Weiterhin fehlt die vorteilhafte Wurfbewegung über die Welle auf die gegenüberliegende Seite. Damit könnte die Siebfläche auch in diesem Bereich effektiver für eine Schäbenabscheidung ausgenutzt werden. Betrachtet man die simulierten Wurfweiten aus dem Modell zur Wurfbewegung der Schäben, so bestätigt sich die Annahme einer zu geringen Wurfbewegung auf die gegenüberliegende Siebfläche.

9 Einsatz des Axialfraktionierer-Gesamtmodells im Konstruktions- und Entwicklungsprozess

9.1 Konstruktionstechnische Überarbeitung des Axialfraktionierers

Für eine konstruktionstechnische Überarbeitung des Reinigungssystems kann das Modell des Axialfraktionierers herangezogen werden. Es stellt für den Konstrukteur ein einfaches Werkzeug zur Auslegung der Reinigungsmaschine bei geforderten Maschinenparametern dar. Diese sind insbesondere der zu verarbeitende Massestrom mit einem gewünschten Masseanteil an gereinigten Schäben. Durch den Einsatz des Modells kann zunächst ein prinzipieller Aufbau der Paddelschnecke und der damit verbundenen Wurfbewegung von Schäben und Faserflocken und der Interaktion mit einem nachfolgenden Paddel simuliert werden. Daraus leiten sich Konstruktionsparameter der Paddelschnecke, wie der Verdrehungswinkel zwischen zwei benachbarten Paddeln, der Steigungswinkel sowie auch die Paddelbreite oder als Betriebsparameter die Wellendrehzahl ab. Diese haben alle Einfluss auf einen theoretisch zu verarbeitenden Massestrom, der damit abgeschätzt werden kann. Die Auswirkungen auf die Reinigungsleistung im Bereich der Schäbenabscheidung lassen sich unter Anwendung Abscheidemodells für ausgewählte Paddelanordnungen in Abhängigkeit vom Massestrom simulieren.

Beim Einsatz der Reinigungsmaschine in einer Faseraufschlussanlage ist für den wirtschaftlichen Betrieb des Axialfraktionierers der Massestrom der Gesamtanlage mit dem daraus resultierenden Massestrom an SFG von entscheidender Bedeutung. Der Konstrukteur kann die Auswirkungen der variablen Parameter beurteilen und die Reinigungsmaschine auf eine konkrete Reinigungsleistung mit einem bestimmten Massestrom einstellen.

Die Funktions- und Systemstruktur vom Maschinenkonzept sollen erhalten bleiben, da sie sich in der Versuchsmaschine bei Verwendung unterschiedlicher Materialkategorien bewährt haben.

9.2 Auslegung eines anforderungsgerechten Axialfraktionierers

Die Auslegung der Reinigungsmaschine soll für ein typisches in den Faseraufschlussanlagen anfallendes SFG vorgenommen werden. Es wird dafür die Materialkategorie Winterhanf ausgewählt, da die in den Versuchen ermittelte Datenbasis am besten gesichert ist. Die Beschickung des Axialfraktionierers kann über ein Förderband oder wie in den Versuchen über einen Kondenser erfolgen. Die Austragsbreite eines Kondensers liegt bei ca. 1 m und eignet sich damit hervorragend für die stirnseitige Zuführung in den Arbeitsraum des Axialfraktionierers. Weiterhin lassen sich damit SFGs bis zu einem Massestrom von 3 t h^{-1} fördern, was auch dem angestrebten Bereich für den Massestrom der Reinigung entsprechen würde. Die Schwerpunkte liegen in der Auslegung der Sieblängen für die Schäbenabscheidung sowie den Paddelanordnungen mit ihren Betriebsparametern. Die Sieblängen für die Abscheidung von Staub und Mischfraktion werden von der Versuchsmaschine vorerst so übernommen. Besteht kein Bedarf nach einer Aufbereitung möglichst schäbenarmer Kurzfasern, kann der

Wellenabschnitt 2 komplett entfallen. Dieser dann zur Verfügung stehende Abscheideweg könnte bei einer Verlängerung des Wellenabschnitts 1 für eine höhere Ausbeute an gereinigten Schäben genutzt werden. Die Anforderungen an einen Axialfraktionierer für den industriellen Einsatz mit bereits in der Versuchsmaschine enthaltener Forderungen/Wünschen sind der Tab. 9.1 zu entnehmen. Die Angabe der Daten basieren auf den Versuchserfahrungen und worden mit drei verschiedenen Bewertungsstufen gekennzeichnet. Für eine Umsetzung von noch unbefriedigend gelöster Forderungen/Wünsche sind die im Folgenden durchgeführten Simulationsrechnungen zur Ermittlung von Konstruktions- und Betriebsparametern notwendig, die zu Änderungen/Ergänzungen der Anforderungsliste führen können.

Tab. 9.1: Anforderungsliste an einen Axialfraktionierer unter Berücksichtigung der Praxiserfahrungen der Versuchsmaschine (+ gute Lösung, o Lösung gerade tragbar, - unbefriedigende Lösung)

Merkmal		Ausprägung	Forderung/ Wunsch	Erfüllung	Modifikation
Ökonomie	Preis	1) 100.000 € 1a) 60.000 €	F W	+ o	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung fester Pad- delpositionen / -neigung • feste Siebeinbauten
	Geometrie	3) kompakt 3a) 7000 x 1100 x 4000 mm (Länge x Breite x Höhe) 3b) Sieblänge Staub/Schäben/Misch (1,5 m/3,0 m/1,5 m)	F W W	+ + +	<ul style="list-style-type: none"> • Verzicht auf Kurzfaserver- neigung (Wellenabschnitt 2 entfällt)
Energie	Massestrom	4) 3,0 t h ⁻¹ SFG	F	+	<ul style="list-style-type: none"> • Sieblänge der Schäbenab- scheidung an Massestrom angepasst • Paddelbreite > 30 mm
	Leistung	5) Welle 1: 2,2 kW 6) Welle 2: 1,5 kW 7) Austragsschnecke: 0,37 kW	F F F	+ o +	<ul style="list-style-type: none"> • Im Rahmen der Elektro- motorenabstufungen
Stoffe	Luftvolumenstrom der Stau- absaugung im Bereich der Schäbenabscheidung	8) 3900 m ³ h ⁻¹ (1300 m ³ h ⁻¹ pro Meter Arbeitslänge mit einer max. Luftge- schwindigkeit in der Absaugöffnung von 1,2 m s ⁻¹)	F	+	<ul style="list-style-type: none"> • Kann entsprechend des zulässigen Feinstaubge- halts im Endprodukt ent- fallen
	Eingang	SFG	F F	+ -	<ul style="list-style-type: none"> • Stirnseitige Eintragsöff- nung
		9) Nebenprodukt aus der Bastfaser- gewinnung (geröstet/ungeröstet) 10) materialflussgerechte Eintragung in den Siebraum			

Fortsetzung von Tab. 9.1

Merkmal		Ausprägung	Forderung/ Wunsch	Erfüllung	Modifikation
Stoffe	Ausgang	11) weitestgehende Entfernung von Sand und Staubbestandteilen	F	+	• Verlängerung der Siebstrecke
		12) Reinigung der abscheidbaren Schäben von 94 % 12a) Reinigung der abscheidbaren Schäben von 97 % 13) Faseranteil < 1,0 % 13a) Faseranteil < 0,5 %	F W F W	0 - + 0	• Verlängerung der Siebstrecke • verbessertes Wurfverhalten der Schäben • Leistung der Absaugung erhöhen
		14) Masseanteil < 10 %	F	+	• Verlängerung der Siebstrecke
		15) Schäbenanteil < 20 % 15a) Schäbenanteil < 10 %	F W	+/ o/-	• Verbesserung des vorge-lagerten Faseraufschlusses • verbessertes Wurfverhalten der Faserflocken
		16) weitestgehende Entfernung von Schwebepartikeln (keine Schäben)	F	+	• Leistung der Absaugung erhöhen
Betrieb	Betriebssicherheit	17) Wicklungen an rotierenden Teilen gut zu entfernen	F	+	• materialflussgerechte Formgebung
		17a) keine Wicklungen an rotierenden Teilen 18) Einhaltung gültiger Arbeits-, Sicherheits- und Umweltvorschriften	W F	- +	• festes Paddel ohne Einstellmöglichkeiten
		19) Ausrichtung/Festigkeit Paddel und La-gerspiel und überprüfen	F	+	• gut zu erreichende Bauteile
	Reinigung	20) 1 x wöchentlich	F	+	• Ablagerungs- und Wick-lungsstellen konstruktions-technisch vermeiden

9.3 Bestimmung der Material- und Betriebsparameter für die Simulation

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

- Schüttdichte vom SFG
- Aussiebbare Schäbenanteil aus dem SFG
- Partikelgrößenverteilung der Schäben mit ihrem mittleren Schäbendurchmesser

Für eine Berechnung des Aussiebungsverlaufs wird die Abscheidekonstante C_A benötigt. Für ein SFG welches in einer nach dem ATB-Prinzip arbeitende Faseraufschlussanlage anfällt, wurde der Verlauf für zwei verschiedene Paddelanordnungen in Abhängigkeit vom Massestrom aufgenommen. Hier kann der für die Simulation zu verwendende Wert direkt für einen bestimmten Massestrom aus der Abb. 8.11 entnommen werden. Sollte sich das Material stark von der verwendeten Materialkategorie Winterhanf oder der zum Einsatz kommenden Faseraufschlusstechnologie unterscheiden, lässt sich die Abscheidekonstante durch Tests ermitteln:

- Reinigungstest bei mindestens 3 verschiedenen Masseströmen mit dem Versuch axialfraktionierer
- Anpassung der Abscheidekonstante an den aufgenommen Aussiebungsverlauf
- Ermittlung des Verlaufs der Abscheidekonstante in Abhängigkeit des Massestroms für die gewählte Paddelanordnung

9.3.1 Simulationsergebnisse

Die Auswirkungen auf die Wurfbewegung der Schäben und Faserflocken vom Paddel können bei einer Variation der Paddelbreite mit dem Modell beantwortet werden. Die Ergebnisse aus den Praxisversuchen zeigen eine noch zu geringe Wurfweite der Schäben auf die gegenüberliegende Siebfläche. Mit einer Vergrößerung der Paddelbreite soll eventuell der Effekt des Werfens über die Welle verstärkt werden. Bei einer Verdopplung der Paddelbreite liegen bereits in der Startposition vom Modell ein Teil der Partikel näher am Drehpunkt. So kommt es bei Verwendung der Drehzahl $n_{W1} = 60 \text{ min}^{-1}$ im Wellenabschnitt 1 und dem Steigungswinkel des Paddels $\alpha = 25^\circ$ zu einem verstärkten Abrutschen der Partikel am Paddel und einem direkten Wurf auf die gegenüberliegende Siebfläche (Abb. 9.1).

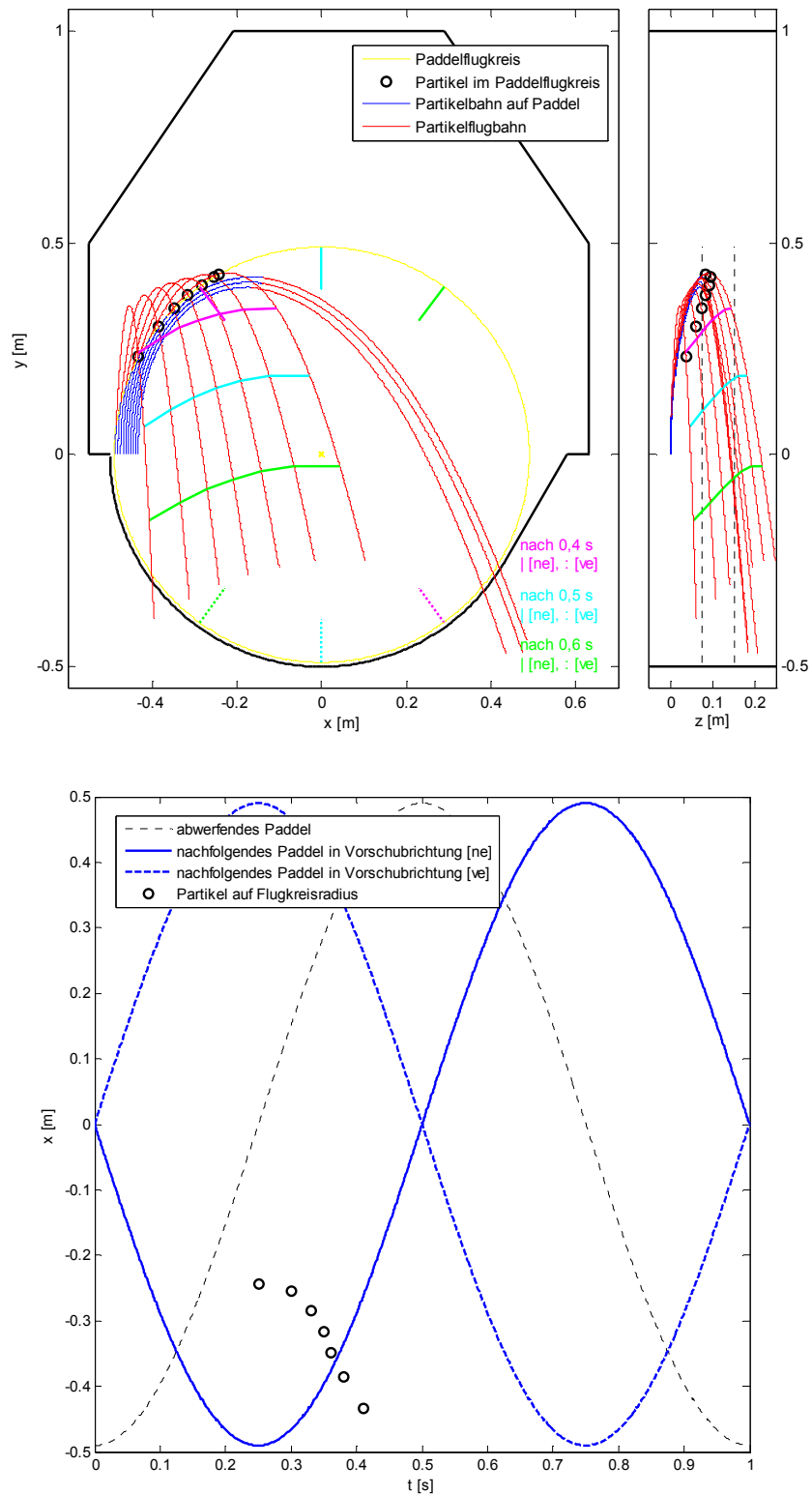


Abb. 9.1: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w2} = 60 \text{ min}^{-1}$, $\alpha = 25^\circ$ und doppelter Paddelbreite

So reicht die Zentrifugalbeschleunigung der näher zum Drehpunkt liegenden Partikel für eine schnelle Bewegung nach außen und damit frühzeitigen Abwurf nicht aus. Die Partikel werden also länger vom Paddel mitgenommen, was die anschließende Wurfbewegung in x-Richtung verstärkt.

Eine Verdopplung der Paddelbreite für eine Drehzahl von 110 min^{-1} sowie einem Steigungswinkel $\alpha = 25^\circ$ zeigt auch für die Faserflocken ein positives Ergebnis. Aufgrund der höheren Drehzahl kommt

es im Vergleich zu den Schäben zu einem vollständigen Abwerfen nach außen mit einer größeren Wurfweite in x-Richtung von den näher zum Drehpunkt liegenden Faserflocken.

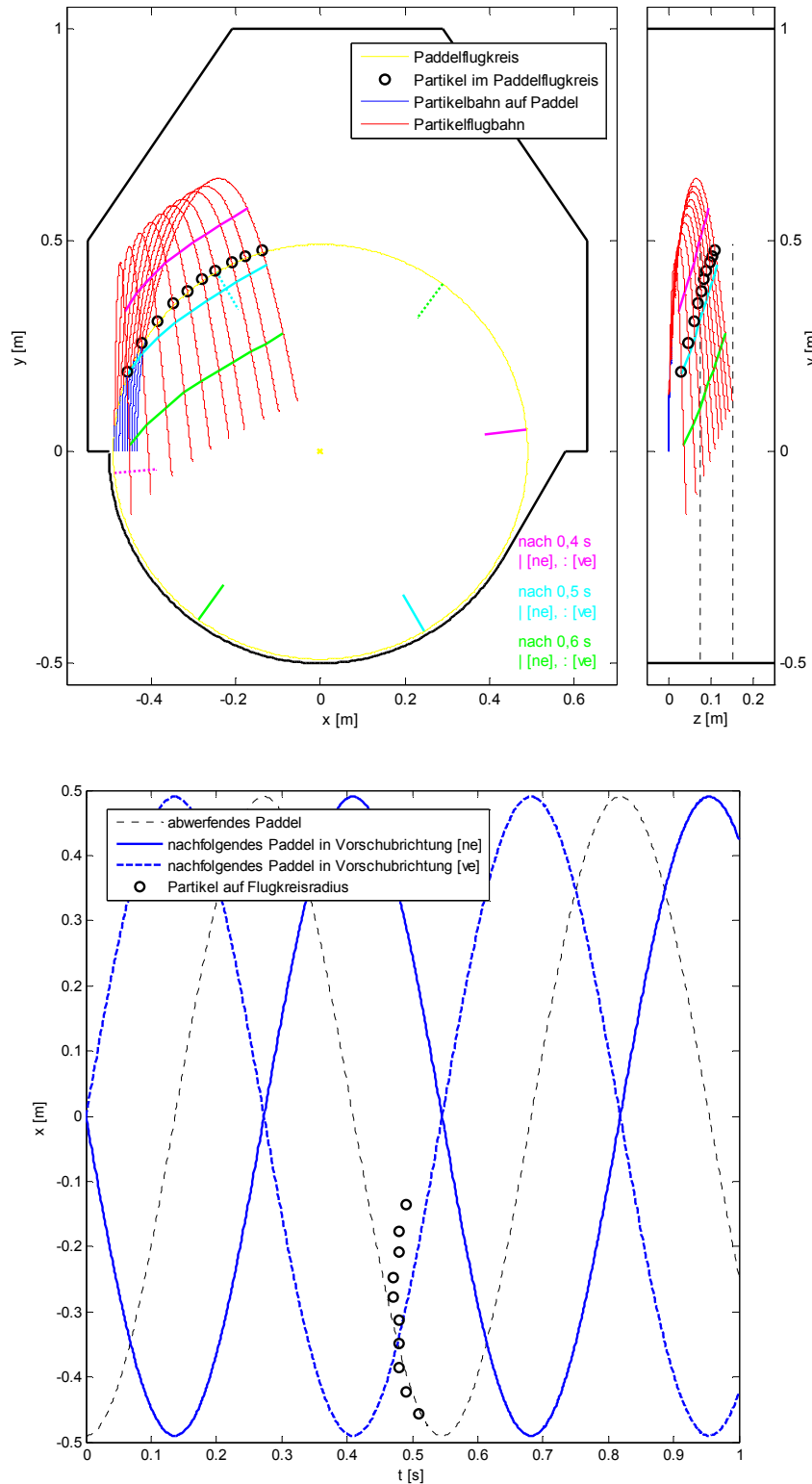


Abb. 9.2: Parameterstudie zur Wurfbahn und Kollision für $n_{w2} = 110 \text{ min}^{-1}$, $\alpha = 25^\circ$ und doppelter Paddelbreite

Eine mögliche Kollision zwischen Faserflocke und Paddel bei ausreichenden Wurfweiten in den nachfolgenden Paddelbereich ist weiterhin gegeben.

Der Aussiebungsverlauf für die Schäben kann mit dem Modell simuliert werden. Für die Simulationsrechnung werden zwei Szenarien betrachtet. Von denen im Wellenabschnitt 1 für eine Abscheidung zur Verfügung stehenden Schäben sollen einmal 94 % und einmal 97 % abgesiebt werden. Die Berechnung erfolgt auf Basis der Materialkategorie [W] mit einem abscheidbaren Schäbenanteil von 92 %. Dies würde dementsprechend einem Masseanteil an gereinigten Schäben von 86,5 % bzw. 89,2 % entsprechen. Der in einer Reinigungsmaschine zu installierende Abscheideweg für gereinigte Schäben im Wellenabschnitt 1 ist der Abb. 9.3 zu entnehmen. Es wurden drei verschiedene Aussiebungsverläufe simuliert. Die für die Simulation notwendigen Abscheidekonstanten in Abhängigkeit vom Massestrom und der Paddelanordnung wurden nach den ermittelten Regressionsfunktionen in Abb. 8.11 berechnet und sind in der Tab. 9.2 zusammengefasst.

Tab. 9.2: Berechnete Abscheidekonstanten für die Simulation des Aussiebungsverlaufs der Schäben

Paddelanordnung	Massestrom [$t h^{-1}$]	Abscheidekonstante C_A
[ne]	2,0	0,344
[dp]	2,0	0,503
[dp]	3,0	0,400

Es zeigt sich, dass eine Steigerung der Reinigungsleistung um 3 % auf 97 % mit einem verlängerten Abscheideweg von ca. 1 m erkauf werden muss.

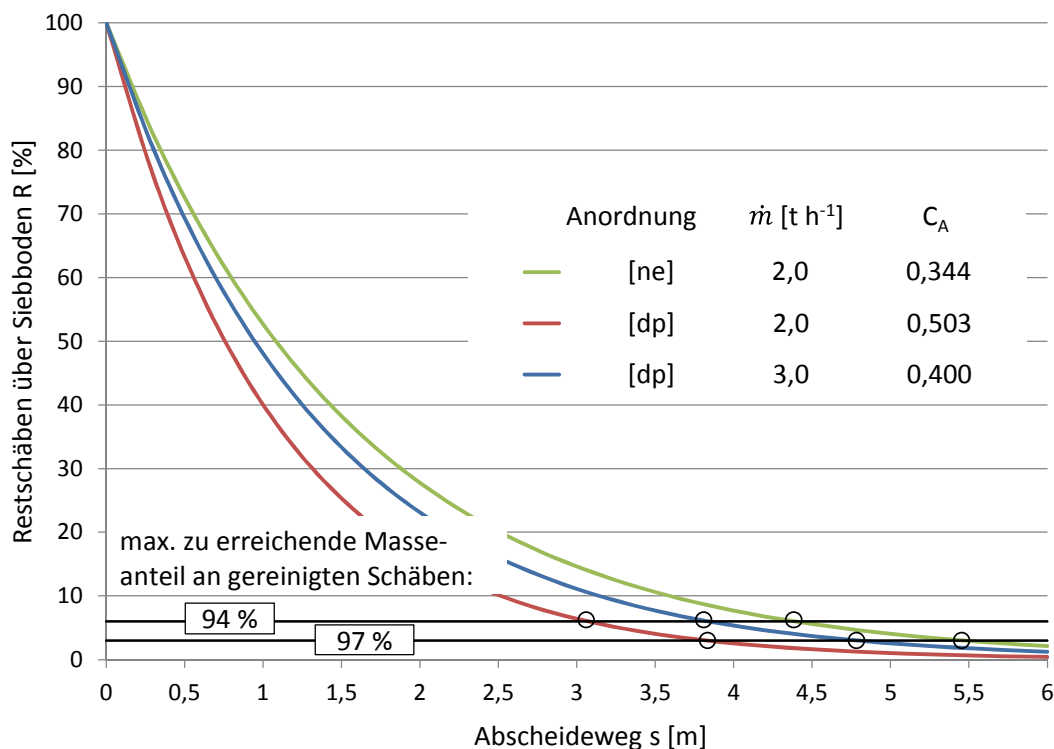


Abb. 9.3: Simulation der Abnahme der abscheidbaren Schäben über Siebboden entlang des Abscheidewegs in Abhängigkeit von der Paddelanordnung und des Massestroms

Vom Einsatz einer nacheilenden Paddelanordnung für große Masseströme sollte abgesehen werden. Die Mehrkosten für eine Installation der zusätzlichen Paddel bei der doppelten Paddelanordnung halten sich im Vergleich zu einer erheblichen Verkürzung des Abscheidewegs in Grenzen. Bei einem

Reinigungsniveau von 94 % für einen Massestrom von 2 t h^{-1} kann beim Einsatz der doppelten Paddelanordnung ein Abscheideweg von über 1,3 m gegenüber der nacheilenden Paddelanordnung eingespart werden. Wird ein höheres Reinigungsniveau von 97 % angesetzt, ließen sich sogar 1,5 m Abscheideweg einsparen.

Für eine Steigerung des Massestroms von 2 t h^{-1} auf 3 t h^{-1} bei Verwendung der doppelten Paddelanordnung und gewünschtem gleichbleibenden Reinigungsniveau von 94 % muss ein zusätzlicher Abscheideweg von ca. 0,7 m installiert werden.

9.4 Umsetzung der Konstruktionsvorgaben in einem Prototypen

Die Umsetzung der Konstruktionsvorgaben sollte nicht nur auf einem eigenständigen Prototyp beschränkt werden, sondern gleichzeitig auf eine geschickte Einbindung in ein Gesamtsystem einer Faseraufschlussanlage ausgerichtet sein.

Die Beschickung des Axialfraktionierers kann über ein Förderband oder wie in den Versuchen über einen Kondenser erfolgen. Kondenser werden in vielfältiger Art und Weise in Faseraufschlussanlagen eingesetzt und haben den Vorteil einer sauberen Übergabe von Materialflüssen zwischen zwei Maschineneinheiten. Im Vergleich zu Transportbändern ist eine Materialübergabe weitestgehend staubfrei und nicht mit Fehlaustragsstellen verbunden. Abweichend von der Versuchsmaschine erfolgt eine Beschickung nicht seitlich in den Siebraum sondern stirnseitig. Damit wird einer Materialflussgerechten Gestaltung nachgekommen, die dem axialen Vorschub entspricht. Die Austragsbreite eines Kondensers liegt bei ca. 1 m und eignet sich damit hervorragend für die stirnseitige Zuführung. Weiterhin lassen sich mit einem Kondenser SFGe bis zu einem Massestrom von 3 t h^{-1} fördern, was auch dem angestrebten Bereich für den Massestrom der Reinigung vom Prototyp entsprechen würde. Die Absaugung von Feinstaub im Bereich der Schäben erfolgt im oberen Bereich. Sie lässt sich direkt in das vorhandene Filtersystem der Faseraufschlussanlage einbinden. Die Zuführung von nachströmender Luft in den Arbeitsraum der Reinigungsmaschine erfolgt über seitliche Klappen am Gehäuse. Der Antrieb der Wellen wird jeweils stirnseitig realisiert mit einer von oben abgehangenen Wellenlagerung an der Verbindungsstelle. Damit wird ein ungehinderter Materialfluss über dem Sieb gewährleistet. Die Abb. 9.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Axialfraktionierers als Prototyp.

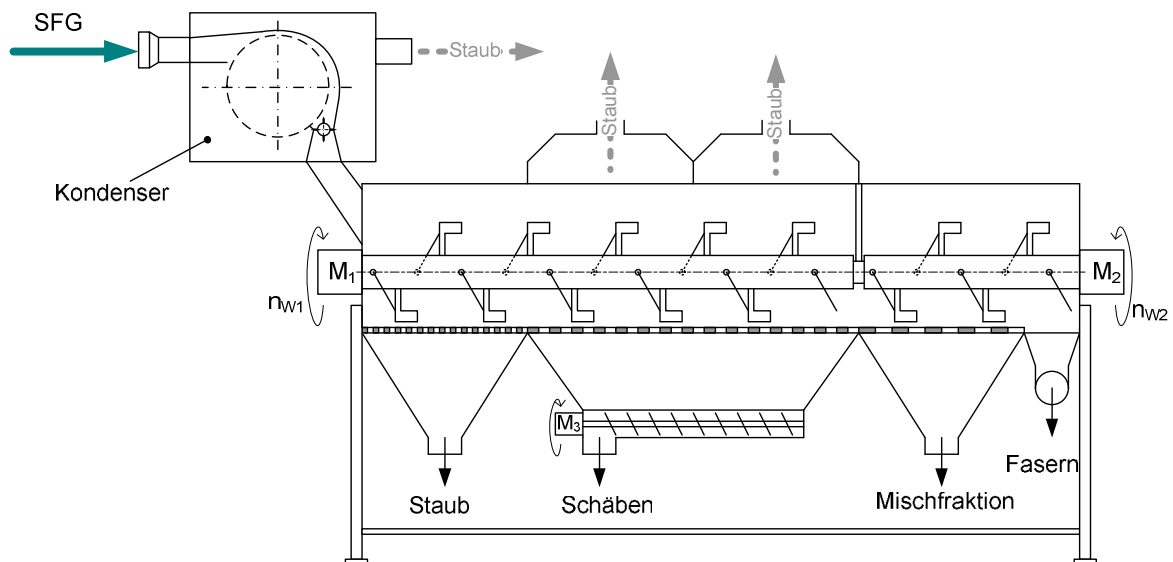


Abb. 9.4: Prinzipieller Aufbau der Reinigungsmaschine zur Aufbereitung von SFGen

Simulation und Praxisversuche zeigten bei Verwendung des optimierten Paddels einen möglichen Massestrom von bis zu 3 t h^{-1} an SFG. Wie außerdem in der Simulationsrechnung gezeigt, empfiehlt es sich aufgrund der verbesserten Wurfbewegung von Schäben und Faserflocken ein Paddel mit einer größeren Breite zu verwenden. Damit würde sich auch der maximal zu transportierende Massestrom erhöhen. Dies ist in diesem Fall, aufgrund eines zurzeit im Bereich der Faseraufbereitung noch nicht nachgefragten hohen Massestroms für eine Schäbenreinigung, aber nicht notwendig und wird deshalb bei den veranschlagten 3 t h^{-1} belassen. Weiterhin würde sich auch bei einer Erhöhung des Massestroms der Abscheideweg für den zu erreichenden prozentualen Masseanteil an gereinigten Schäben wiederum verlängern.

Für den in den Konstruktionsvorgaben festgelegten Reinigungsgrad von 94 % kann für den maximal festgelegten Massestrom ab einem Abscheideweg von 3,8 m entsprochen werden. Abweichend von der geforderten Sieblänge im Bereich der Schäbenabscheidung, wird eine mit einer Sicherheitsreserve beaufschlagten Länge von 4 m festgelegt. Damit kann auch der Wunsch der Reinigungsleistung von 97 % abscheidbarer Schäbenmasse für einen geringeren Massestrom von 2 t h^{-1} gewährleistet werden. Zu beachten ist, dass die Luftabsaugung entsprechend angepasst werden muss. Bei einem spezifischen Luftvolumenstrom von $1300 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ pro Meter Arbeitslänge, im Bereich der Schäbenabscheidung, erhöht sich damit die benötigte Luftmenge von $3900 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ auf $5200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Eine Verlängerung der Welle ist bei Wahl eines geeigneten Wellenquerschnitts durchaus möglich. Auch besteht die Möglichkeit die Welle vom oberen Rahmen in der Mitte zusätzlich abzufangen.

Die Sieblängen von jeweils 1,5 m zur Staubabscheidung und Ausreinigung der Kurzfasern (Mischfraktion) werden von der Versuchsmaschine übernommen und könnten bei Bedarf ebenfalls angepasst werden.

Die einzelnen Fraktionen sind über Trichter auszutragen. Im Bereich der Schäbenabscheidung, wird aufgrund des im Verhältnis zu den anderen Fraktionen sehr langen Abscheidewegs, das Gut zusätzlich mit einer Transportschnecke zusammengeführt. Die Anschlüsse der Austragsfraktionen lassen sich ebenfalls an den Anforderungen einer modernen Faseraufschlussanlage anpassen. Empfohlen wird für die Staubfraktion eine direkte Abfüllung in Big Bags. Die Schäben- und Mischfraktion sollte mit einem Förderband, eventuell auch im Luftstrom zur Abpackung transportiert werden. Die zu-

rückgewonnenen Fasern können entweder im Luftstrom einem Nachaufschluss in der Entholungsmaschine oder einer Nachreinigung im Horizontalöffner oder direkt einer Faserballenpresse zugeführt werden. Für den Prototyp wird sich für einen pneumatischen Transport der zurückgewonnen Fasern entschieden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das Anschlussrohrstück rückseitig eine Öffnung aufweist, damit die benötigte nachströmende Luft nicht über den Maschinenraum entnommen wird.

Die Abb. 9.5 zeigt die anfallenden Stoffströme bei der Reinigung von Schäben-Faser-Gemischen am Beispiel des Prototyps. So wird der Eingangsmassestrom bei der Verwendung von drei unterschiedlichen Siebmaschenweiten und zwei sich in der Drehzahl unterscheidenden Wellenabschnitten in 5 verschiedene Fraktionen separiert:

- Staub / Sand
- Schäben
- Mischfraktion
- Kurzfasern
- Feinstaub

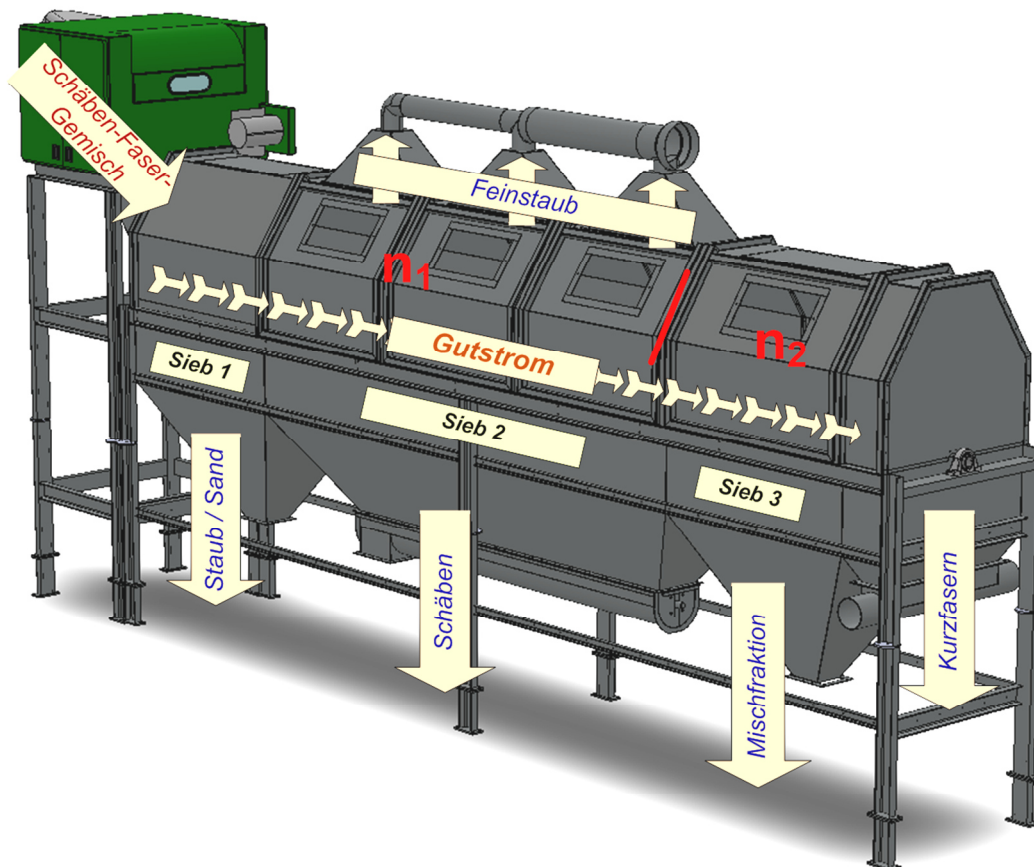


Abb. 9.5: Schematische Darstellung der Stoffflüsse in einem Axialfraktionierer

Die Überarbeitung des Gesamtsystems nach den anforderungsgerechten Konstruktionsvorgaben erbrachte für die Reinigungsmaschine eine Länge von ca. 9 m, eine Höhe von ca. 4,3 m und eine Breite von ca. 1,2 m (Abb. 9.6). In der Höhe kann die Maschine über obligatorisch zu verwendende Stützen bedarfsgerecht angepasst werden. Dies hängt von der vor Ort zur Verfügung stehenden Bauhöhe bzw. der unter den Trichtern benötigten Anschlussstellenhöhe ab.

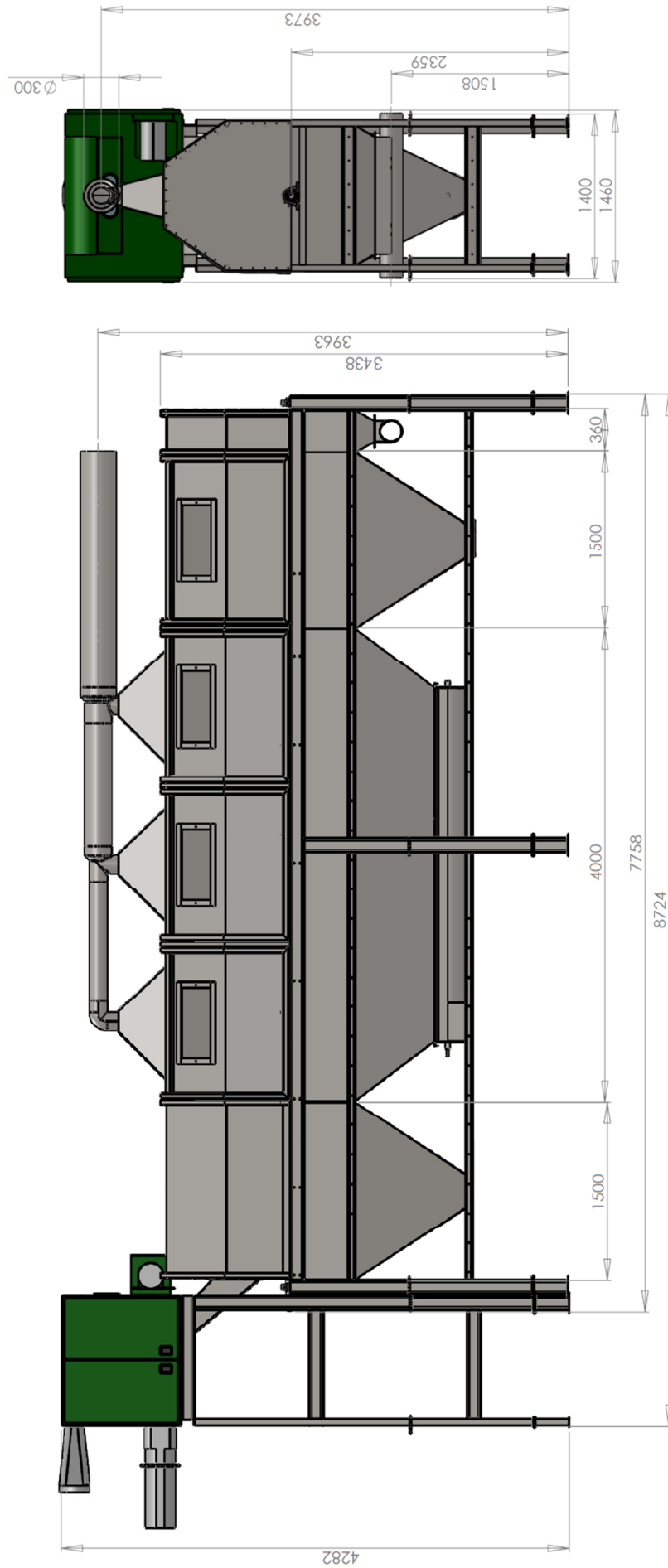


Abb. 9.6: Maße des Axialfraktionierers als Gesamtsystem mit seiner Beschickungseinheit (Kondenser) und seinen Anschlussstellen als Prototyp zum Einsatz in Faseraufschlussanlagen

9.5 Fazit

Durch die gezeigten Simulationsrechnungen konnten Konstruktions- und Betriebsparameter wie Steigungswinkel, Drehzahl, Paddelanordnung, Paddelbreite und Sieblänge gezielt festgelegt werden. So wurde das patentierte Konzept eines im Labormaßstab befindlichen Axialfraktionierers auf der Grundlage der Variation praxisrelevanter Parameter weiterentwickelt und optimiert. Eine den Anforderungen entsprechende Industriemaschine zur Verarbeitung hoher Masseströme an SFGen steht damit im Bereich der Naturfasergewinnung zur Verfügung. Die hier im Ergebnis vorgestellte Konstruktion umfasst neben der eigentlichen Reinigungsmaschine, eine mit geeigneten Anschlussstellen versehene Ausführung zum Einsatz in vorhandenen oder auch neu aufzubauenden Faseraufschlussanlagen.

10 Fehlerquellen

Großen Wert wurde auf eine einheitliche Bereitstellung des für die Versuche eingesetzten Ausgangsmaterials gelegt. So wurden die bei der Fasergewinnung anfallenden SFGs direkt beim Produktionsprozess in Big Bags abgefüllt. Einer Entmischung des SFG's bei einer Zwischenlagerung und einer verfälschenden Zusammensetzung bei einer nachträglichen Abfüllung in Big Bags sollte damit verhindert werden. Dennoch konnten Schwankungen in der Zusammensetzung des SFG durch variierende Parameter im Faseraufschlussprozess nicht ausgeschlossen werden. Einer Entmischung innerhalb der Big Bags beim Transport vom Verarbeitungs- zum Versuchsstandort konnte durch Verwendung eines kompletten Big Bag je Versuchsdurchlauf, erneuten Durchmischung und Dosierung deutlich vermindert werden. Insgesamt wurden nach definierten Vorgaben (siehe Kapitel 4) aus 4,5 t über Winter gestandenen Hanfstroh [W] 2,8 t SFG, aus 1,9 t stark geröstetem Hanfstroh [S] 1,1 t SFG, aus 1,8 t leicht gerösteten Hanfstroh [L] 1,0 t SFG und aus 2,0 t Fasernesselstroh [N] 1,4 t SFG in der Faseraufschlussanlage der NFC GmbH Nettle Fibre Company (ehemalige ATB-Versuchsanlage) produziert. Bei Zuführung von zu kleinen Chargen an Strohmaterial in den Produktionsprozess könnte es sonst zu einer Momentaufnahme mit verfälschenden Ergebnissen kommen. Vielmehr kann man hier von einer sehr praxisnahen Verarbeitung von Stroh mit einem typischen SFG, wie es auch der Realität entsprechen würde, ausgehen.

Trotz des Einsatzes einer Dosiereinrichtung konnte nicht immer von einem gleichbleibenden Massestrom über einen kompletten Versuchsdurchlauf ausgegangen werden. Durch Agglomerationen und Brückenbindungen innerhalb des SFG, die von einer Versuchsperson an der Dosiereinrichtung händisch beseitigt werden musste, kam es zu kurzzeitigen Schwankungen im Massestrom. Gemessen wurde aber nur der durchschnittliche Massestrom aus der Zeitdifferenz von Beginn und Ende des SFGaustrags aus dem Dosierbehälter mit der für den Versuch eingesetzten Masse. Dabei ist es unwichtig, an welcher Stelle entlang des Versuchsaufbaus die Zeit gemessen wird. Wichtig ist nur, dass jeweils an der gleichen Position für Start und Ende die Zeitdifferenz notiert wird, da sonst die Verweildauer des Gutstroms entlang der Versuchsstrecke einen verfälschenden Einfluss auf die Massestrombestimmung ausübt. Die Versuche zeigten einen massestromabhängigen Aussieburgsverlauf. In den Versuchsdurchläufen führten kurzzeitige Schwankungen des momentanen Massestroms vom berechneten mittleren Massestrom zu Abweichungen in der Aussieburg.

Weiterhin ist eine Analyse der verschiedenen Fraktionen wie SFG, Schäben und Faserproben mit Fehlern behaftet. Vordergründig sind diese von der Probennahme aber auch von der Messperson abhängig. Durch die Neigung zur Bildung von Agglomeraten bzw. auch zum Entmischen kommt es zu Abweichungen bei der Auswahl einer repräsentativen Probe. Oft müssen die analysierten Proben von Hand nachgereinigt werden, was wieder von der Sorgfalt der Messperson abhängt. So müssen zum Beispiel aus den Siebfraktionen einer Schäbenanalyse die noch darin enthaltenen Kurzfasern in einem arbeitsintensiven Vorgang von Hand aussortiert werden. Auch Faserproben lassen sich nur durch mühsames Aussortieren von noch anhaftenden Schäben an den Fasern bzw. in den Faserflocken eingeschlossenen Schäben analysieren.

Die Erarbeitung des Modells hatte den Anspruch, die Wirklichkeit möglichst genau wiederzugeben. Das Modell sollte weitestgehend einfach aufgebaut sein, damit es leicht händelbar ist und in der Praxis auch Anwendung finden kann. Durch die Anpassung des Modells an die Wirklichkeit über eine

Abscheidekonstante, kann sich nur auf eine geringe Anzahl an zu bestimmende Parameter konzentriert werden. So berechnet sich die Durchtrittswahrscheinlichkeit der Schäben durch das Sieb anhand einer mittleren Schäbengröße. Die Validierung der Modellierung mit den experimentellen Ergebnissen zeigt jedoch eine sehr gute Übereinstimmung und rechtfertigt dieses Vorgehen. Eine mühevoll betrachte einzelner Partikelgrößenklassen bleibt damit erspart. Die numerische Berechnung der Partikelbewegung auf dem Paddel von Schäben und Faserflocken beginnt erst bei einer waagerechten Paddelposition und vernachlässigt die Corioliskraft. Auch hier zeigen die Ergebnisse, dass das Modell mit seiner Vereinfachung auf die Reinigungsmaschine anwendbar ist und wichtige Erkenntnisse für die Konstruktions- und Betriebsparameter einer Paddelschnecke liefert.

Nicht betrachtet wird eine durch die Staubabsaugung indizierte Luftströmung quer zur Förderrichtung. Durch den konstruktiven Aufbau des Axialfraktionierers ist eine nennenswerte Strömungsgeschwindigkeit nur im oberen Bereich des Arbeitsraums wirksam. Durch den sich danach weit öffnenden Querschnitt des Arbeitsraumes reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit, so dass sie im Bereich der Materialbewegung nur noch einen geringen Einfluss hat.

Dennoch ließe sich das Modell zur Wurfbewegung um eine zusätzliche Kraftkomponente in vertikaler Richtung erweitern. Erschwerend kommt bei dieser Betrachtung hinzu, dass durch die Ausprägung der rotierenden Paddel sich Luftverwirbelungen im Arbeitsraum ausbilden. In einer weitergehenden Analyse der Strömungsverhältnisse ließe sich das Modell durchaus noch weiterentwickeln. Auswirkungen auf den Materialstrom bzw. auf die Staubabsaugung könnten dadurch gezielt für eine Modifikation des Axialfraktionierers genutzt werden.

11 Ausblick

Die in der Literatur oftmals nur als eine Ausführungsvariante genannte Paddelschnecke wurde in dieser Arbeit erstmals detailliert beschrieben, diverse Paddelanordnungen aufgezeigt und die Auswirkung beim Einsatz dieses Prinzips auf ein SFG anhand eines Massestrommodells gezeigt. Durchgeführte Simulationsrechnungen zum Abscheiden von Schäben beim Einsatz der Paddelschnecke über einer Siebfläche verkürzen in Zukunft die Entwicklungszeiten und reduzieren die Entwicklungskosten. Die Maschinenparameter lassen sich mit der Wurfmodell praxistauglich vorhersagen. Die Ausreinigung der Fasern im Wellenabschnitt 2 könnte noch mit einem kombinierten Entmischungs- und Abscheidemodell erweitert werden.

Der Anbau von Hanf erlebt zurzeit in Deutschland und auch Europa einer gesteigerten Nachfrage. Wahrscheinlich liegt sie in dem Interesse der Gewinnung von Blatt- und Blütenmaterial begründet. Damit ergibt sich aber für die Faseraufschlussanlagen mit der dadurch zur Verfügung stehenden Stängelmasse zur Faser- und Schäbengewinnung ein enormes Potential zu deren Weiterentwicklung. Im Herbst 2015 konnte eine neu aufgebaute Faseraufschlussanlage von der Firma HempFlax in Rumänien eingeweiht werden, die laut einer Pressemitteilung [HempFlax, 2015] langfristig das Ziel hat, für die Ausschöpfung der bereitgestellten Anlagenkapazität den Hanfanbau in dieser Region bis auf 5.000 ha zu steigern. Rumänien zählte mit einer Hanfanbaufläche von ca. 46.100 ha im Jahr 1989 [FAO, 2016] neben der ehemaligen UdSSR und China zu den größten Anbauländern weltweit. Nach dieser Zeit war mit dem politischen und wirtschaftlichen Umbruch der Hanfanbau in Rumänien rückläufig und liegt momentan bei einer Fläche von 750 ha (2014) [Carus, 2015]. Bei einer steigenden Anbaufläche besteht für Rumänien die Möglichkeit, den Industriebereich der Aufbereitung des Hanfstrohs bis zur Verarbeitung der produzierten Hanffractionen, neu zu entwickeln. In diesem Zusammenhang ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach einer effizienten Reinigungstechnologie von Schäben steigen wird.

Neben der bereits in dieser Arbeit gezeigten Möglichkeit zur Aufbereitung von Nesselstroh in einem Axialfraktionierer besteht zunehmend die Frage nach einer Reinigung von Leinenstroh. Auch die Aufbereitung eines Stroh-Spreu-Korngemisches aus der Getreideernte wäre mit diesem Prinzip denkbar. Die Siebmaschenweiten und Maschinenparameter müssten an das jeweilige Gemisch neu angepasst werden. Der Einsatzbereich der Maschine ließe sich noch auf viele weitere Möglichkeiten erweitern. Eine völlig andere Herangehensweise wäre der Einsatz des Axialfraktionierers zur Faser- und Schäbenreinigung direkt nach dem Faseraufschluss. Eine Nachentholzung ist mit diesem Reinigungssystem nicht möglich. Daher ist es sinnvoll, bereits beim Einsatz der Sichtertermühlentechnologie, das Ziel einer völligen Ablösung der holzartigen Bestandteile von den Fasern umzusetzen. Eine Separierung des aufgelösten und vollständig entholzten Hanfstrohs im Axialfraktionierer könnte dann durchaus erreicht werden. Durch die völlig neue Zusammensetzung dieses Gemisches im Vergleich zu einem SFG kann es aber zu Wicklungen von Fasern an den rotierenden Teilen kommen. So nimmt nicht nur der Faseranteil auf ca. 30 Masse-% zu, sondern auch die Faserlänge wäre tendenziell in diesem Gemisch länger, was ebenfalls die Wickelneigung fördert. Hiermit könnte zu bestehenden Faserreinigungssystemen eine Alternative aufgezeigt werden und sich die Schäben-/Faserreinigung in einem Prozessschritt vereinen lassen. Eine Nachreinigung der zurückgewonnenen Fasern, zum Beispiel in einem Horizontalöffner (ursprünglich für die Verfeinerung konzipiert, zunehmend auch für die Faserreinigung genutzt), wäre auch bei diesem System unabdingbar.

12 Anhang

Tab. 12.1: Versuche zur Optimierung der neuen Reinigungsmaschine

Code	Versuch	Material	Big Bag	Masse [kg]	n_{w1} [min ⁻¹] Anordnung	n_{w2} [min ⁻¹] Anordnung	Massestrom [t h ⁻¹]
[W]	1	Winterhanf	4	70,9	60 [ne]	120 [ne]	0,51
[W]	2	Winterhanf	12	53,0	60 [ne]	120 [ne]	1,57
[W]	3	Winterhanf	12+1	90,0	60 [ne]	120 [ne]	1,20
[W]	4	Winterhanf	1+20	130,0	60 [ne]	120 [ne]	2,60
[W]	5	Winterhanf	2	102,5	40 [ne]	120 [ne]	2,64
[W]	6	Winterhanf	26	98,5	80 [ne]	120 [ne]	2,63
[W]	7	Winterhanf	25	109,0	60 [ne]	100 [ne]	3,02
[W]	8	Winterhanf	15	118,5	60 [ne]	160 [ne]	2,67
[W]	9	Winterhanf	6	121,5	60 [ne]	120 [ne]	1,99
[W]	10	Winterhanf	23	99,5	60 [ne]	120 [ne]	0,85
[W]	11	Winterhanf	9	115,0	60 [ne]	120 [ne]	2,84
[W]	12	Winterhanf	5	108,0	60 [ne]	120 [ne]	1,78
[L]	13	leicht geröstet	45	109,5	60 [ne]	120 [ve]	2,19
[S]	14	stark geröstet	52	126,0	60 [ne]	120 [ve]	2,21
[L]	15	leicht geröstet	46	121,0	40 [ne]	120 [ve]	1,94
[N]	16	Nessel	31	154,0	40 [ne]	120 [ve]	1,95
[N]	17	Nessel	35	126,5	40 [ne]	120 [ve]	1,05
[S]	18	stark geröstet	51	121,0	40 [ne]	120 [ve]	2,23
[S]	19	stark geröstet	53	122,5	80 [ne]	120 [ve]	2,24
[L]	20	leicht geröstet	47	94,0	80 [ne]	100 [ve]	2,49
[N]	21	Nessel	33	133,0	80 [ne]	100 [ve]	0,90
[W]	22	Winterhanf	18	107,0	40 [ne]	100 [ve]	2,20
[L]	23	leicht geröstet	49	151,5	60 [ve]	100 [ve]	2,27
[W]	24	Winterhanf	3	112,5	60 [dp]	100 [dp]	3,16
[L]	25	leicht geröstet	48	106,0	60 [dp]	100 [dp]	2,22
[S]	26	stark geröstet	58	103,5	60 [dp]	100 [dp]	2,66
[S]	27	stark geröstet	60	98,5	40 [dp]	120 [dp]	2,75
[S]	28	stark geröstet	59	109,0	80 [dp]	120 [dp]	2,35
[L]	29	leicht geröstet	44	101,5	80 [dp]	100 [dp]	2,37
[L]	30	leicht geröstet	43	86,0	40 [dp]	120 [dp]	2,24
[W]	31	Winterhanf	8	121,0	40 [dp]	120 [dp]	2,43
[W]	32	Winterhanf	22	116,0	80 [dp]	120 [dp]	2,36
[W]	33	Winterhanf	21	107,5	60 [dp]	120 [dp]	2,50
[N]	34	Nessel	30	156,5	40 [dp]	120 [dp]	1,34
[N]	35	Nessel	38	129,0	80 [dp]	120 [dp]	1,22
[N]	36	Nessel	32	131,5	60 [dp]	80 [dp]	1,21
[S]	37	stark geröstet	55	99,5	60 [dp]	120 [ve]	2,40
[L]	38	leicht geröstet	42	112,0	60 [dp]	120 [ve]	2,49
[W]	39	Winterhanf	11	119,5	60 [dp]	100 [ve]	1,65
[W]	40	Winterhanf	13	106,5	60 [dp]	100 [ve]	1,01

Code	Versuch	Material	Big Bag	Masse [kg]	n_{w1} [min ⁻¹] Anordnung	n_{w2} [min ⁻¹] Anordnung	Massestrom [t h ⁻¹]
[W]	41	Winterhanf	17	105,0	60 [ve]	100 [ve]	2,42
[W]	42	Winterhanf	7	117,0	40 [ve]	100 [ve]	2,41
[W]	43	Winterhanf	19	108,0	80 [ve]	100 [ve]	2,30
[L]	44	leicht geröstet	41	112,0	60 [dp]	120 [ve]	2,19
[W]	45	Winterhanf	16	113,0	60 [dp]	120 [ve]	2,14
[W]	46	Winterhanf	24	107,0	60 [dp]	120 [ve]	2,75
[W]	47	Winterhanf	10	106,5	60 [dp]	120 [ve]	1,53
[S]	48	stark geröstet	54	121,0	60 [dp]	120 [ve]	2,64
[S]	49	stark geröstet	56	105,0	60 [dp]	120 [ve]	1,70
[N]	50	Nessel	36	134,5	60 [dp]	120 [ve]	1,98
[N]	51	Nessel	34	136,0	40 [dp]	100 [ve]	2,16
[V/H]	52	VOFA mit Hammermühle	0	75,0	60 [dp]	120 [ve]	1,74
[V/H]	53	VOFA mit Hammermühle	0	104,2	60 [dp]	120 [ve]	2,52
[V]	54	VOFA	0	108,0	60 [dp]	120 [ve]	1,98
[V]	55	VOFA	0	84,0	40 [dp]	100 [ve]	0,91

13 Literaturverzeichnis

Agriculture and Agri-Food Canada (2016). Canada: Outlook For Principal Field Crops. [Hrsg.] Market Analysis Group/Grains and Oilseeds Division, Sector Development and Analysis Directorate/Market and Industry Services Branch. 2016

Alberta Agriculture and Forestry (2015). Industrial Hemp Enterprise. [Hrsg.] Government Alberta (CA). 2015

Ankal Pty Limited (1991). *Apparatus for grading fibrous material, Patent. US5019248* Dover Heights (AU), 1991, Erfinder: Kaldor, A. F.

ATB (2014). *Axialfraktionierer, Patent. EP2145988* Potsdam-Bornim (DE), 2014. Erfinder: Füll, C., Pecenka, R., Bojdzinski, B.

Bag, R., Beaugrand, J., Dole, P. und Kurek, B. (2011). Viscoelastic properties of woody hemp core. *Holzforschung*. 65, 2011, S. 239-247

Beck, F. (1999). Simulation der Trennprozesse im Mähdrescher. *Fortschritt-Berichte VDI*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1999, Reihe 14 (92)

Bedetti, R. und Ciaralli, N. (1976). Variazione del contenuto della cellulosa durante il periodo vegetativo della canapa. *Cell. Carta*. 1976, 26, S. 27-30

Beitz, W. (1990). *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1990

BLE (2015). *Merkblatt für Landwirte, die im Jahr 2015 Nutzhanf anbauen, Anlage 4*. Bonn : Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2015

Bluhm, C. (1998). *Untersuchungen mikrobieller Abbauprozesse an Faserpflanzen mittels chemischer und spektroskopischer Methoden, Diplomarbeit*. Bremen : Universität Bremen, 1998

BM-online (2005). Weltpremiere bei Resopal: Leichtbauplatte aus Hanf. [Online] 5. April 2005, [Zitat vom: 30. 10. 2015.] <http://www.bm-online.de/allgemein/leichtbauplatte-aus-hanf/>

Bócsa, I., Karus, M. und Lohmeyer, D. (2000). *Der Hanfanbau: Botanik, Sorten, Anbau und Ernte, Märkte und Produktlinien*. Münster-Hiltrup : Landwirtschaftsverlag, 2000

Borchert, A. (2015). Landwirt im "Faserrausch". *top agrar*. 2015, 5, S. 68-71

Böttcher, S. (1963). Eine allgemeine Analyse der Aufwärtsbewegung eines Einzelkörpers in Schneckenförderern beliebiger Neigung. *Verein Deutscher Ingenieure*. 1963, Bd. 105

Bouloc, P., Allegret, S. und Arnaud, L. (2013). *HEMP Industrial Production and Uses*. Croydon (UK) : CPi Group Ltd, 2013

- Brazdauskas, P., Tupciauskas, R., Andzs, M., Rizhikovs, J., Puke, M., Paze, A., Meile, K. und Vedernikovs, N. (2014).** Preliminary study of the biorefinery concept to obtain furfural and binderless panels from hemp (*Cannabis Sativa* L.) shives. *International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies – CONECT 2014"*. 2014
- Cappelletto, P., Brizzi, M., Mongardini, F., Barberi, B., Sannibale, M., Nenci, G., Poli, M., Corsi, G., Grassi, G. und Pasini, P. (2001).** Italy-grown hemp: yield, composition and cannabinoid content. *Industrial Crops and Products*. 2001, 13, S. 101-113
- Cargill Limited (2003).** *Animal Bedding and method for making same, Patent. US6612258* Winnipeg (CA), 2003, Erfinder: Isman, B., Mowbray, J., Tokarchuk, E., Khavkine, M.
- Carus, M. und Sarmiento, L. (2016).** The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs, seeds and flowers. *European Industrial Hemp Association (EIHA)*. 2016
- Carus, M. (2015).** World-wide market data on hemp and other bast fibres - status and outlook. *12.th International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA)*. 20.-21.05. 2015, Wesseling (DE)
- Carus, M., Eder, A., Dammer, L., Hans, K., Lena, S., Essel, R. und Breitmayer, E. (2014).** WPC/NFC Market Study. [Hrsg.] Nova-Institut GmbH. *European and Global Markets 2012*. 2014
- Carus, M., Karst, S., Kauffmann, A., Hobson, J. und Bertucelli, S. (2013).** The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds. *European Industrial Hemp Association (EIHA)*. 2013
- Christen, O. und Schulze, B. (2007).** Produktionstechnik der Hanferzeugung I. in: Wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema "Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf", Teil 2. *Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe*. Münster : Landwirtschaftsverlag GmbH, 2007, Bd. 7
- Cierpucha, W. (2013).** *Industrial hemp cultivation and processing technology*. Poznan : Institut of Natural Fibres & Medicinal Plants, 2013
- Claas OHG (1995).** *Method of decorticating flax and a flax dressing machine for carrying out this method, Patent. US5466188* Harsewinkel (DE), 1995, Erfinder: Schaal, W., Weigelt, H.
- Dewey, L. H. und Merrill, J. L. (1916).** Hemp Hurds as Paper-Making Material. [Hrsg.] United States Department of Agriculture, Bureau of Plant Industry. 1916, Bulletin No. 404
- Dicke, C., Lühr, C., Ellerbrock, R., Mumme, J. und Kern, J. (2015).** Effect of hydrothermally carbonized hemp dust on the soil emissions of CO₂ and N₂O. *BioResources*. 10(2), 2015, S. 3210-3223
- DIN 53803 Teil 1 (1991).** DIN 53803-1:1991-03. *Probenahme – Statistische Grundlagen der Probenahme bei einfacher Aufteilung*. 1991
- DIN 53803 Teil 2 (1994).** DIN 53803-2:1994-03. *DIN 53803 Probenahme – Praktische Durchführung*. 1994
- DIN 53803 Teil 3 (1984).** DIN 53803-3:1984-06. *Probenahme – Statistische Grundlagen der Probenahme bei zweifacher Aufteilung nach zwei gleichberechtigten Gesichtspunkten*. 1984

- DIN 53803 Teil 4 (1984).** DIN 53803-4:1984-06. *Probenahme – Statistische Grundlagen der Probenahme bei zweifacher Aufteilung nach zwei einander nachgeordneten Gesichtspunkten.* 1984
- DIN 66165 Teil 1 (1987).** DIN 66165-1:1987-04. *Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse – Grundlagen.* 1987
- DIN 66165 Teil 2 (1987).** DIN 66165-2:1987-04. *Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse – Durchführung.* 1987
- Dressler, M. (2006).** *Abschlussbericht Grundlagenuntersuchung zum Späneflug bei der Trockenbearbeitung metallischer Werkstoffe zur optimierten Auslegung von Späneerfassungselementen und Werkzeugen durch Simulationsrechnung.* Universität Stuttgart, Lehrstuhl und Institut für Werkzeugmaschinen. 2006
- Dun, A. und Declerck, S. (2009).** -DUN AGRO- A New Approach to Hemp Processing, Tagungsbericht. *6.th International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA).* 27.-28.05. 2009, Wesseling (DE)
- EIHA (2015).** Total Hemp cultivated area in Europe 2015. [Online] 2015, [Zitat vom: 16. Juni 2016.] <http://eiha.org/media/2014/10/15-08-24-Industrial-Hemp-Cultivation-Area-2015-EIHA1.pdf>
- EU-CRAFT PROJECT (2002).** Technischer Endbericht. [Hrsg.] Technische Universität Graz. *Hanf als Baumaterial für Energiesparhäuser aus Holz.* 2002
- Europäische Union (2000a).** Verordnung (EG) Nr. 1672/2000 des Rates vom 27. Juli 2000 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1251/1999 zur Einführung einer Stützungsregelung für Erzeuger bestimmter landwirtschaftlicher Kulturpflanzen zur Einbeziehung von Faserflachs und -hanf. *Amtsblatt Nr. L 193 vom 29.07.2000.* 2000, S. 13
- **(2000b).** Verordnung (EG) Nr. 1673/2000 des Rates vom 27. Juli 2000 über die gemeinsame Marktorganisation für Faserflachs und -hanf. *Amtsblatt Nr. L 193 vom 29.07.2000.* 2000, S. 16
- FAO (2016).** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistics Division (FAOSTAT). [Online] 2016, [Zitat vom: 26. 07. 2016.] <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>
- Ferrara, G. und Preti, U. (1975).** A Contribution to Screening Kinetics, Tagungsband. *XI-th International Mineral Processing Congress.* 1975, Cagliari (IT), S. 183-217
- FNR (1997).** Hanf, Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema "Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf". [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. *Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe".* Münster : Landwirtschaftsverlag, 1997, Bd. 7, Teil 1 und 2
- **(2008).** Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaserwerkstoffen (Deutschland und EU). *Gülzower Fachgespräche Bd. 26.* 2008, Gülzow
- Francken-Welz, H. v. und Léon, J. (2003).** *Faserqualität einheimischer Faserpflanzen (Hanf) - Bewertung von Rohstoff und Endprodukt -.* Bonn : Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, 2003

- Fürll, C., Munder, F. und Hempel, H. (2003).** Untersuchungsergebnisse zur Erprobung der Faseraufschluss-Pilotanlage des Institutes für Agrartechnik Bornim. In *Tagungsband: 4. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. 2003, Erfurt
- Fürll, C., Pecenka, R., Idler, C. und Grundmann, P. (2007).** Verfahren zur Gewinnung und Verarbeitung von Naturfasern. In: *Tagungsband zum 15. Arbeitswissenschaftlichen Seminar, VDI-MEG-Arbeitskreis: Arbeitswissenschaften im Landbau*. 2007, Universität für Bodenkultur Wien (AT)
- Fürll, C., Pecenka, R. und Bojdzinski, B. (2008a).** Ein neues System zur Reinigung und Fraktionierung von Naturfaserschäben in einem Axialfraktionierer. *VDI-Berichte, 2045*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2008, S. 475-480
- **(2008b).** The Potsdam-Bornim plant for separation of natural fibre with a new technology for cleaning and sizing of shives, Tagungsbericht. *International Conference on Flax and other Bast Fibres*. 21.-23.07. 2008, Saskatoon (CA), S. 40-46
- Gahle, C. (2007).** Flachs- und Hanfschäben – Alternative im Leichtbau. *Holz-Zentralblatt*. 2, 2007, S. 70.
- Gonell, H. W. (1928).** Ein Windsichtverfahren zur Bestimmung der Kornzusammensetzung staubförmiger Stoffe. *Mitteilung aus dem Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem*. 1928, Bd. 72, Nr. 27
- Grotenhermen, Franjo. (2015).** The therapeutic potential of CBD - An overview of the state of scientific knowledge from basic research and clinical trials. *12.th International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA)*. 20.-21.05. 2015, Wesseling (DE)
- Gusovius, H.-J. (2002).** Stoffwandlungen und Umwelteinflüsse in Verfahrensketten für Faserhanf, Dissertation. *Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG 390*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2002
- Gusovius, H.-J., Pecenka, R., Hoffmann, T., Radosavljevic, L. und Fürll, C. (2009).** Biologische Bindemittel für die Herstellung von Faserwerkstoffplatten aus feucht konserviertem Hanf. *Landtechnik*. 64 (4), 2009, S. 281-283
- Gusovius, H.-J., Hoffmann, T., Budde, J. und Lühr, C. (2016).** Still special? Harvesting procedures for industrial hemp. *Landtechnik*. 71 (1), 2016, S. 14-24
- Hagedorn, P. (2008).** *Technische Mechanik*. Frankfurt am Main : Harri Deutsch GmbH, 2008, Bd. 3 Dynamik
- HempFlax (2015).** HempFlax invests €5,000,000 in Romanian hemp market. [Online] Pressemitteilung, 13. Oktober 2015, [Zitat vom: 22. 07. 2016.] <https://sensiseeds.com/en/blog/hempflax-invests-e5000000-in-romanian-hemp-market/>
- Hempro Int. (2015).** New Data on Hemp Food Market. *12.th International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA)*. 20.-21.05. 2015, Wesseling (DE)
- Hesch, R., Meyer, A., Beckmann, F. und Hesch, K. (1996).** *HANF Perspektiven für eine ökologische Zukunft*. Lemgo : TAOASIS Verlag GmbH, 1996
- Heuser, O. (1924).** *Der deutsche Hanf*. Leipzig : S. Hirzel, 1924

- Höppner, F. und Menge-Hartmann, U. (2000).** Cultivation strategies of hemp for the use of fibres and oil. *Bioresource Hemp*. 2000, Wolfsburg
- Huynh, V.M. und Powell, T. E. (1978).** Cleaning Shoe Performance Prediction. *ASAE Paper 78-1565*. 1978, St. Joseph, Michigan (US)
- ISO 3301 Teil 1 (2001).** ISO 3310-1:2001-09. *Analysensiebe – Technische Anforderung und Prüfung; Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe*. 2001
- ISO 3310 Teil 2 (2001).** ISO 3310-2:2001-09. *Analysensiebe – Technische Anforderung und Prüfung; Teil 2: Analysensiebe mit Lochblechen*. 2001
- ISO 7806 (1983).** ISO 7806:1983-12. *Industrial plate screens – Codification for designating perforations*. 1983
- Kosche-Group (2005).** Light furniture-board „Hemp“ with fine surface made from hemp-shives. *Produktdatenblatt*. 2005
- Löwe, R. (1998).** *Abschlussbericht Inbetriebnahme der Flachsfaseraufbereitungsanlage "Flaksy"*. Institut für Umweltforschung Schlieben. 1998
- Lühr, C., Pecenka, R., Gusovius, H.-J., Wallot, G., Rinberg, R. und Tech, S. (2013).** Development of an Axial Fractionator for Hemp Shive Cleaning and Industrial Applications of Shives. *Journal of Agricultural Science*. Vol. 5, No. 1, 2013
- Masi, T. (2013).** Hemp straw processing lines, Tagungsbericht. *10.th International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA)*. 22.-23.05. 2013, Wesseling (DE)
- Morgner, F. W. (1999).** Aufbereitung nachwachsender Rohstoffe für den Einsatz in technischen Produkten, Tagungsbericht. *2. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. 1999, Erfurt
- Müller, W. (2008).** *Mechanische Grundoperationen und ihre Gesetzmäßigkeiten*. München Wien : Oldenbourg Verlag, 2008
- Munder, F., Füll, C. und Hempel, H. (2003).** Advanced Decortication Technology for not retted Bast Fibres. *Journal of Natural Fibres* 1. 2003
- Munder, F., Füll, C. und Hempel, H. (2004).** Results of an Advanced Technology for Decortication of Hemp, Flax and Linseed. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2004, 418: 1, S. 165-179
- Müssig, J. (2010).** *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. Chichester, West Sussex (UK) : John Wiley & Sons, Ltd, 2010
- Nonninger, K., Wagenführ, A., Tech, S., Kharazipour, A. und Nix, S. (2010).** Abschlussbericht Herstellung von Verbundwerkstoffen unter Verwendung von Holz, Hanf und Gewebeeinlage auf Hanfbasis. 2010
- Nötzold, H.-D. (1969).** *Spinnereitechnische Grundlagen*. Leipzig : VEB Fachbuchverlag, 1969

- NOVA (1996).** Das Hanf-Produktlinien-Projekt (HPLP). [Hrsg.] NOVA-Institut. *Erarbeitung von Produktlinien auf Basis von einheimischen Hanf aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht.* Hürth : s.n., 1996
- ÖNORM S 1030 (2008).** ÖNORM S 1030:2008-01-01. *Tiereinstreu aus nachwachsenden Rohstoffen.* 2008
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. und Grote, K.-H. (2003).** *Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung-Methoden und Anwendung.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2003
- Pajer, G. und Kurth, F. (1967).** *Stetigförderer.* Berlin : VEB Verlag Technik Berlin, 1967
- Pecenka, R. (2008).** *Optimieren der Reinigung von Hanffasern auf Kammschütteln, Dissertation.* Cottbus : Brandenburgische Technische Universität, 2008
- Pecenka, R., Gusovius, H.-J., Schemel, H., Tech, S., Nix, S., Euring, M. und Kharazipour, A. (2010).** Herstellung leichter Spanplatten unter Einsatz von Hanfschäben. *naro.tech - 8.th International Symposium "Materials made of Renewable resources".* 2010, Erfurt
- Pecenka, R., Lühr, C. und Gusovius, H.-J. (2012).** Design of Competitive Processing Plants for Hemp. *International Scholarly Research Network (ISRN) Agronomy.* Artikel ID 647867: 5 Seiten, 2012, doi: 10.5402/2012/647867
- Radosavljevic, L. (2002).** *Experimental test and development of the hemp fibres cleaning machine, Diplomarbeit.* Novi Sad : University of Novi Sad, 2002
- RMIG GmbH (2010).** *Produkt und Leistungsübersicht, Katalog.* Neuried : FIBO Druck und Verlags GmbH, 2010
- Salzer, G. (1968).** *Schüttgutförderer.* Mainz : Krausskopf-Verlag, 1968
- Sam-Brew, S. und Smith, G. (2015).** Flax and Hemp fiber-reinforced particleboard. *Industrial Crops and Products.* 2015, 77, S. 940-948
- Schubert, H. (1975).** *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe.* Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1975, Bd. 1
- Smith, J. N. (1893).** *Cotton-cleaner, Patent.* US497219 Gilmer (US), 1893
- Stieß, M. (2009).** *Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1.* Berlin : Springer-Verlag, 2009
- Thermopal (2010).** Leicht, stabil und ökologisch: Thermopal bringt neuartige Platte aus Hanf auf den Markt. [Hrsg.] Thermopal GmbH / Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH. *Pressemitteilung.* 2010
- Van der Werf, H.M.G., Harsveld van der Veen, J.E., Bouma, A.T.M. und Cate, M. (1994).** Quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) stems as raw material for paper. *Industrial Crops and Products.* 1994, 2, S. 219-227
- Vierling, A. und Ephremidis, C. (1957).** Untersuchungen zum Fördervorgang beim waagerechten Schneckenförderer. *Fördern und Heben.* 1957, 7

-
- Vollmann, A. (2000).** *Untersuchung der Schüttgutförderung in geneigten Schneckenförderern.* München : Herbert Utz Verlag GmbH, 2000
- Wagner, W. (2001).** *Strömung und Druckverlust.* Würzburg : Vogel Buchverlag, 2001
- Wallot, G., Gusovius, H.-J., Pecenka, R. und Hoffmann, T. (2011).** Herstellung von Faserwerkstoff aus pflanzlichen Rohstoffen in einer Scheibenmühle. *Landtechnik.* 66 (2), 2011, S. 100-102
- Wallot, G., Gusovius, H.-J., Pecenka, R., Schierl, S., Rinberg, R. und Nendel, W. (2012).** Developments in the use of fibres from wet-preserved hemp for composite production. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal.* 14 (1), 2012, S. 218-223
- Walz, K. (1936).** *Die Bestimmung der Kornform der Zuschlagstoffe.* Betonstraße 11, 1936, S. 27-32
- Wessel, J. (1967).** Grundlagen des Siebens und Sichtens. Teil II: Das Siebklassieren. *Aufbereitungs-Technik.* 1967, 13 (4), S. 167-180
- Zlatev, M. (2005).** *Beitrag zur quantitativen Kornformcharakterisierung unter besonderer Berücksichtigung der digitalen Bildaufnahmetechnik, Dissertation.* Freiberg : Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2005