

Umweltforschungsplan
des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Aufgabenschwerpunkt Luftreinhaltung

Forschungskennzahl (UFOPLAN) 371244346

**Validierung einer Methode zur Holzsiebung nach TA Luft Nr. 5.4.6.3 unter der
Durchführung einer qualitativen und quantitativen Fehlerbetrachtung**

von

Dipl. -Ing. Maik Orth

Dipl.-Ing. Anne Wollert

Karen Moeck

Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.V.

Bützower Str. 1a

18239 Hohen Luckow

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

März 2013

Kurzbeschreibung

Die TA Luft konkretisiert unter Nr. 5.4.6.3 Anforderungen an Anlagen zur Herstellung von Holzspanplatten, Holzfaserplatten und Holzfasermatten. Unter anderem werden für Industrieresthölzer, deren Feinanteil einen bestimmten Wert überschreitet, weitere Maßnahmen zur Luftreinhaltung gefordert. Ziel des Projektes war die Überprüfung der Validität der von Herrn Dr. Vogel beschriebenen Methode zur Holzsiebung [8] durch die Erstellung einer qualitativen und quantitativen Fehlerbetrachtung. Die von Herrn Dr. Vogel entwickelte Methode liefert reproduzierbare Ergebnisse, die Belastbarkeit der Ergebnisse konnte jedoch aufgrund einer zu geringen Datenbasis nicht beurteilt werden. Um eine entsprechende Basis zu gestalten, wurde der Feingutanteil von Frischholz- und Altholz hackschnitzeln durch die beschriebene Methode zur Holzsiebung durchgeführt. Basierend auf den aus den Untersuchungsergebnissen bestimmten Parametern Mittelwert, Varianz und Standardabweichung erfolgte eine qualitative und quantitative Fehlerbetrachtung sowie eine Einordnung systematischer und zufälliger Fehlerquellen (z. B. Maschinenfehler, Bedien- oder Handhabungsfehler) der Methode. Es wurde abgeschätzt, welche Relevanz die identifizierten Fehlerquellen für die Validität der Methode besitzen. Die Ergebnisse wurden abschließend in Hinblick auf die Validität der Methode zusammengefasst.

Abstract

The Technical Instructions on Air Quality Control specifies in point 5.4.6.3 requirements for plants for the production of chipboard, wood fibreboard and wood fiber mats. Among others, for industrial scrap wood, whose fines fraction exceeds a certain value, further action on air pollution control are demanded. The aim of the project was to verify the validity of the wood screening method described by Dr. Vogel [8] by carrying out a qualitative and quantitative error analysis. The method developed by Dr. Vogel provides reproducible results, but the reliability of the results could not be assessed because of few data. To create an appropriate basis, the fines of fresh woodchips and waste woodchips was determined by using the method described for screening wood. The results were used for a qualitative and quantitative error analysis. For this purpose, the parameters mean value, variance and standard deviation were determined. Furthermore possible systematic and random errors of the method have been identified. It was checked which sources of error (e.g. machine error, operation- or handling error) lead to systematic or random errors. For the validity of the method the relevance of the identified sources of error was estimated. Finally, in regard to the validity of the method a summary evaluation of the results was created.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Aufgabenstellung.....	1
2 Untersuchungen zur Siebanalyse von Holzhackschnitzeln nach dem Methodenentwurf	2
2.1 Methodisches Vorgehen	
2.2 Probenahme	4
2.3 Probenvorbereitung.....	7
2.3.1 Sichten	7
2.3.2 Teilen	7
2.3.3 Siebmenge.....	9
2.3.4 Trocknung	10
2.4 Siebung	11
2.4.1 Maschineneinstellung	11
2.4.2 Siebsatz	12
2.4.3 Siebzeiten	13
2.5 Dokumentation.....	15
3 Qualitative und quantitative Fehleranalyse zur Methode der Siebanalyse	16
3.1 Fehleranalyse der Siebanalyse.....	16
3.1.1. Ergebnisse der Siebanalyse der untersuchten Hackschnitzelproben.....	16
3.1.2 Bewertung der Ergebnisse der Siebanalyse	19
3.2 Zusammenstellung und qualitative Bewertung möglicher Fehler der Gesamtmethode.....	24
4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	25
Quellenverzeichnis	28
Anhang	29

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Methodisches Vorgehen bei der Auswertung der einzelnen Arbeitsschritte des Methodenentwurfs	3
Abb. 2: 1. Phase im Teilungsverfahren: Aufschütten des Kegels über dem Teilungskreuz (Seiten- und Draufsicht)	8
Abb. 3: 2. Phase im Teilungsverfahren: Abflachen des Kegels durch spiralförmige Kreisbewegung mit der Hand von innen nach außen (Seiten- und Draufsicht)	8
Abb. 4: Vorschlag zur Zusammenstellung der Nennöffnungen für die Gestaltung eines einheitlichen Siebsatzes.....	13
Abb. 5: Bestimmung der Siebzeit auf Basis des Mittelwertes von 4 Analyseproben.....	14
Abb. 6: Die ermittelten Masseanteile <1mm für die drei Proben A1, B2 und B3 durch 3 unterschiedliche Bearbeiter (jeweils Mittel aus 4 Einzelanalysen) und als Mittelwert aller Proben	20
Abb. 7: Ergebnisse der Siebanalysen aus dem Vorbericht [8] und den eigenen Untersuchungen als Mittelwert der Einzelanalysen und den bei den Untersuchungen aufgetretenen maximalen und minimalen Einzelwerten.....	21
Abb. A 1: Siebrückstände des Probenmaterials A1	32
Abb. A 2: Siebrückstände des Probenmaterials B2.....	35
Abb. A 3: Siebrückstände des Probenmaterials B3.....	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geometrische Darstellung der verschiedenen Haufenwerksformen	5
Tabelle 2: Segmenteinteilung anhand der Untergliederung der Volumenklasse	6
Tabelle 3: Volumen der Gesamtmenge der Mischproben in Abhängigkeit vom Haufenvolumen	7
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Mindestvolumen und vorgeschlagener Mindestmasse.....	9
Tabelle 5: Mittelwerte, Standardabweichung und Varianzen der Trockensubstanzgehalte der Proben A1, B2 und B3 bei jeweils 12 Analysen.....	11
Tabelle 6: Probenahmeprotokoll der verschiedenen Holzhackschnitzel	16
Tabelle 7: Zusammenfassung der festgelegten Parameter für die Probenvorbereitung und Siebanalyse	17
Tabelle 8: Zusammenfassung des Analyseprotokolls der 3 Mitarbeiter	18
Tabelle 9: Abschätzung der maximal möglichen Abweichung aufgrund der Messunsicherheit der Waage	19
Tabelle 10: Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der Proben A1, B2 und B3 (12 Einzelanalysen) sowie der Proben 2_1;2_2 und 3 (8 Einzelanalysen) aus [8].....	22
Tabelle A 1: Ergebnis der Trocknung der Proben A1 1-12	30
Tabelle A 2: Ergebnisse der Siebanalyse A1 1-12	31
Tabelle A 3: Ergebnis der Trocknung der Proben B2 1-12	33
Tabelle A 4: Ergebnisse der Siebanalyse B2 1-12	34
Tabelle A 5: Ergebnis der Trocknung der Proben B3 1-12	36
Tabelle A 6: Ergebnis der Siebanalyse B3 1-12	37
Tabelle A 7: Zusammenstellung möglicher Fehler bei der Durchführung der Gesamtmethode	39

Abkürzungsverzeichnis

AISV:	Anlagenbezogener Immissionsschutz / Störfallvorsorge
DIN:	Deutsches Institut für Normung e. V.
DIN EN:	Norm nach europäische Qualitätsstandard
i.E.:	im Einzelnen
LAI:	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
OSB:	Grobspanplatten, (englisch: oriented strand board bzw. oriented structural board)
TA Luft:	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
UBA:	Umweltbundesamt

1 Aufgabenstellung

Die TA Luft konkretisiert unter Nr. 5.4.6.3 Anforderungen an Anlagen zur Herstellung von Holzspanplatten, Holzfasernplatten und Holzfasermatten [7]. Unter anderem werden für Industrieresthölzer, deren Feinanteil einen bestimmten Wert überschreitet, weitere Maßnahmen zur Luftreinhaltung gefordert. Das derzeit beschriebene Kriterium zur Bestimmung des Feinanteils ergibt keine reproduzierbaren und repräsentativen Ergebnisse, besitzt jedoch aufgrund der Vielzahl der betroffenen Anlagen eine hohe Relevanz.

Das Umweltbundesamt ließ deshalb auf Bitten des Ausschusses Anlagenbezogener Immissionsschutz / Störfallvorsorge (AISV) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) einen Methodenvorschlag zur Bestimmung des Feinanteils durch Herrn Dr. Vogel erarbeiten. Die Methodenentwicklung wird in der Studie „Beschreibung und Verifizierung einer Methode zur Holzsiebung“ [8] dargestellt.

Der neue Methodenvorschlag liefert zwar reproduzierbare Ergebnisse, die Belastbarkeit der Ergebnisse konnte jedoch bisher auf Grund einer zu geringen Datenbasis nicht beurteilt werden. Daher wurde das UBA vom AISV gebeten, ein Forschungsvorhaben zur Überprüfung der Validität der Methode zur Holzsiebung durch die Erstellung einer Fehlerbetrachtung durchzuführen. Vor diesem Hintergrund bestand die Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens in der Validierung der von Herrn Dr. Vogel beschriebenen Methode unter Durchführung einer qualitativen und quantitativen Fehlerbetrachtung. Entsprechend Leistungsbeschreibung erfolgte dies im Rahmen von 2 Arbeitspaketen.

Das erste Arbeitspaket beinhaltete die Probenahme von Holzhackschnitzeln bei verschiedenen Herstellern, die Vorbereitung der Proben zur Siebung (inkl. Trocknung), die Siebanalyse sowie die Ergebnisdokumentation.

Innerhalb des zweiten Arbeitspaketes wurden die Ergebnisse des ersten Arbeitspaketes mit den Siebdaten von Herrn Dr. Vogel verglichen und einer Fehlerbewertung unterzogen.

Bei der Projektbearbeitung wurde insbesondere Augenmerk auf eine exakte und reproduzierbare Holzsiebung unter dem Gesichtspunkt der täglichen Anwendung in staatlichen und privaten Untersuchungseinrichtungen gelegt. Im Ergebnis wurden für identifizierte potentielle Fehlerquellen der Methode Lösungsansätze und Verbesserungsvorschläge aufgezeigt. Der folgende Forschungsbericht fasst die Ergebnisse der Untersuchung zusammen.

Da die Holzhackschnitzelproben nicht von Anlagen nach Nr. 5.4.6.3 TA Luft stammen (i.E. Anlagen zur Herstellung von Spanplatten, Faserplatten und OSB) sind die Untersuchungsergebnisse, d.h. die Einteilung in „staubend“ und „nicht staubend“, nur als beispielhaft für verschiedene Holzhackschnitzelsortimente anzusehen. Rückschlüsse auf die Staubemissionen, die von einem Holzhackschnitzelhaufwerk der Anlagen nach Nr. 5.4.6.3 TA Luft ausgehen, können nicht gezogen werden.

2 Untersuchungen zur Siebanalyse von Holzhackschnitzeln nach dem Methodenentwurf

2.1 Methodisches Vorgehen

Der Anspruch einer repräsentativen Probenahme für die Holzindustrie wird nicht erhoben und ist für die Projektbearbeitung auch nicht erforderlich, da entsprechend Aufgabenstellung die Validierung der Holzsiebung im Mittelpunkt stand. Deshalb wurden auf Grund der besseren Verfügbarkeit für die Untersuchungen Probenmaterial von 2 verschiedenen Standorten verwendet, die nicht Anlagen nach Nr. 5.4.6.3 TA Luft (i.E. Anlagen zur Herstellung von Spanplatten, Faserplatten und OSB) zuzuordnen sind. Die nachfolgend aufgeführten Firmen stellten die von ihnen hergestellten Holzhackschnitzel für die Untersuchungen zur Verfügung:

- Hanseatische Umwelt GmbH, Waldstraße 10, 18233 Sandhagen
- Holzpellets-mv, Dorfstraße 11, 18249 Penzin

Die Proben bei den Untersuchungen wurden wie folgt gekennzeichnet:

1. Der Großbuchstabe bezeichnet das Werk oder Unternehmen und ist im Alphabet fortlaufend.
 - Hanseatische Umwelt GmbH erhielt die Werksbezeichnung A
 - Holzpellets-mv erhielt die Werksbezeichnung B
2. Das Probenmaterial wird mit einer Ziffer versehen und beginnt weiterführend mit 1.

Es ergaben sich die Kombinationen:

Werk A Probenmaterial 1 (A1)

Werk B Probenmaterial 2 (B2)

Werk B Probenmaterial 3 (B3)

Die Untersuchungen zur Siebanalyse von Holzhackschnitzeln nach dem Methodenentwurf erfolgten nach der in Abb. 1 dargestellten Methode. Das Vorgehen war dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen notwendigen Arbeitsschritte erst entsprechend Methodenvorschlag durchgeführt und anschließend hinsichtlich Handhabung potentiellen Fehlerquellen ausgewertet wurden, um dann auf dieser Grundlage eventuell notwendige Ergänzungen bzw. Verbesserungsvorschläge abzuleiten. Die abschließende Fehlerbetrachtung schließt dann die eventuell ergänzten Verbesserungsvorschläge ein.

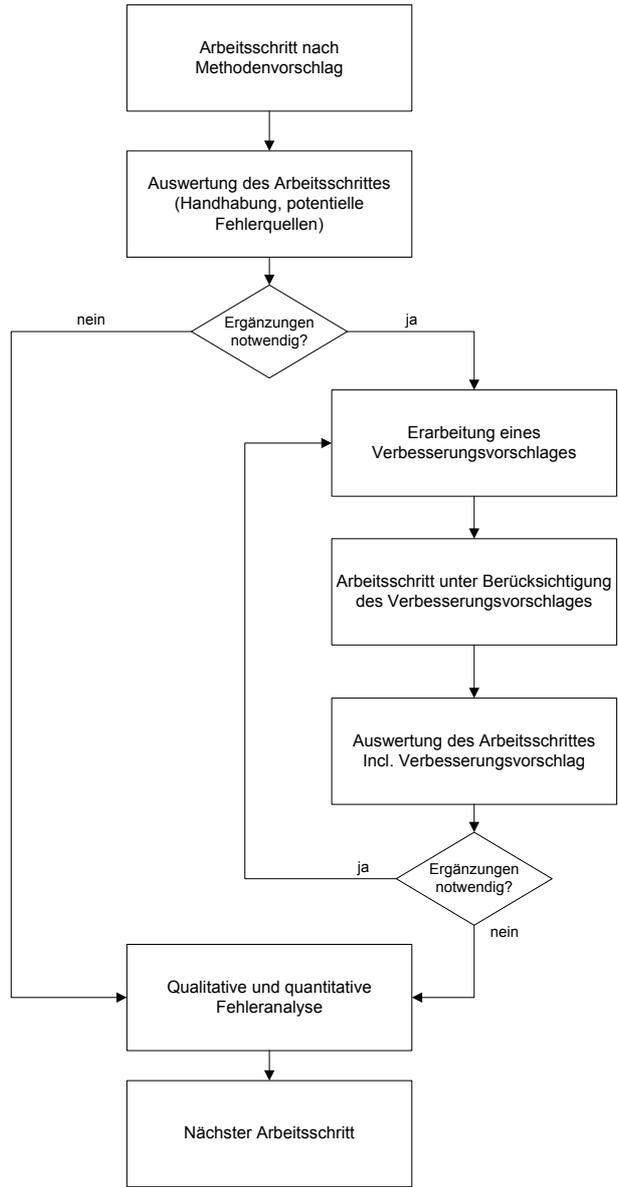


Abb. 1: Methodisches Vorgehen bei der Auswertung der einzelnen Arbeitsschritte des Methodenentwurfs

Im Folgenden werden die Durchführung, Ergebnisse und Auswertungen zu den einzelnen durchgeführten Arbeitsschritten beschrieben.

2.2 Probenahme

In der Methode „Beschreibung und Verifizierung einer Methode zur Holzsiebung“ [8] werden die nachfolgend aufgeführten Arbeitsschritte im Abschnitt “Probennahme“ durchgeführt.

- Die Probenabgrenzung und Volumenbestimmung der Grundmenge,
- Die Anzahl und Verteilung der Entnahmestellen und
- Die Größe und Menge der Einzelprobe.

2.2.1.1 Abgrenzung und Volumenbestimmung der Grundmenge

Die Abgrenzung nach [8] erfolgt durch die Sichtung der Grundmenge anhand vorgegebener Kriterien:

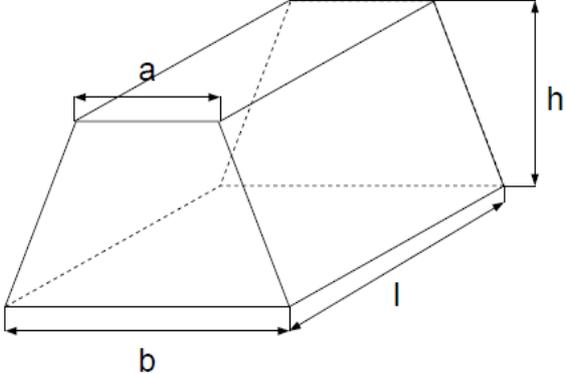
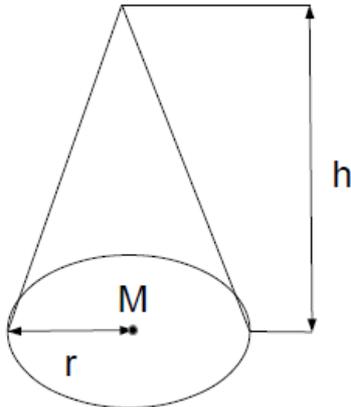
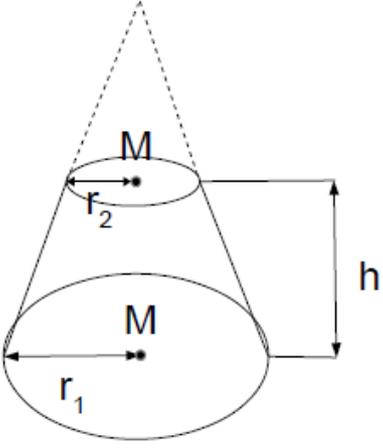
- Rohstoffquelle
- Holzart
- Rindenanteil
- Form und Größe der Holzhackschnitzel

Dies ist nach Dr. Vogels Angaben durchgeführt worden und hat sich als praktikabel und anwenderfreundlich herausgestellt.

Voraussetzung für die Volumenbestimmung ist die Formbestimmung des Holzhacklagers. Entsprechend der Form des Holzhacklagers kommen die im Vorbericht aufgeführten Formeln ([8]S.11) zur Berechnung des Volumens zur Anwendung. Zur besseren Aufnahme der relevanten Maße vor Ort und fehlerfreien Berechnung des Volumens des Holzhacklagers wurde im Rahmen des Projektes nachfolgendes Formblatt zur Bestimmung der Form sowie zur Vermessung des Holzhacklagers erarbeitet (Tabelle 1). Die notwendigen Maße zur Volumenberechnung sind, wie durch Dr. Vogel auf Seite 11 in Fußnote 8 kurz angeführt, mittels bekanntem Schrittmaß, mit einer Messlatte oder mit einem Laserdistanzmessgerät zu bestimmen.

Mit dieser Methodik kann generell konform gegangen werden. Die Volumenbestimmung dient bei der Holzsiebung zum Festlegen der Anzahl der notwendigen Einzelproben sowie der Anzahl und Verteilung der Entnahmestellen. Die Volumenbestimmung mit Schrittmaß ist unter diesem Gesichtspunkt hinreichend genau. Zu beachten ist die klare Abgrenzung der jeweiligen Grundmenge nach den oben genannten Kriterien. Die ermittelten, abgegrenzten Grundmengen z.B. mit unterschiedlichen Holzarten oder verschiedenen Rindenanteilen lassen auch andere Ergebnisse bei der Siebanalyse erwarten. Eine fehlerhafte Abgrenzung der Grundmengen kann somit zu nicht repräsentativen Mischproben und in Folge zu einer falschen Interpretation der Siebanalysen führen.

Tabelle 1: Geometrische Darstellung der verschiedenen Haufenwerksformen

Verschiedene Haufenformen	
	<p>Trapezform</p> $V = \frac{a + b}{2} \times h \times l$
	<p>Kegelform</p> $V = \frac{1}{3} \times h \times \pi \times r^2$
	<p>Kegelstumpfform</p> $V = \frac{1}{3} \times h \times \pi \times r^2 (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)$

2.2.1.2 Die Anzahl und Verteilung der Entnahmestellen

Die Probenentnahmehöhe ist anhand der Skizze ([8] Abbildung 7) nachvollziehbar dargestellt und enthält keine möglichen Fehlerquellen. Die Berechnung der Segmente erfolgte anhand der Formel in Kapitel 5.1 des Vorberichts von Dr. Vogel [8]. Zur Vereinfachung der Arbeiten vor Ort wurden die Segmentanzahlen berechnet und können der Tabelle 2 entnommen werden. Das Volumen des Haufenwerks, wird in 3 Volumenklassen untergliedert. Hieraus ergibt sich anhand der angeführten Formeln [8] die entsprechende Segmentanzahl. Durch die tabellarische Darstellung (Tabelle 2) kann die Segmentanzahl entsprechend dem bestimmten Volumen einfach ermittelt werden. Dies vermindert fehlerhafte Segmentteilungen und damit eine fehlerhafte Bestimmung der Anzahl zu entnehmender Einzelproben bei den Probenahmen vor Ort.

Tabelle 2: Segmenteinteilung anhand der Untergliederung der Volumenklasse

Volumen des Haufenwerks in m ³	Segmentanzahl	Segmentanzahl	Anzahl der Einzelproben	Anzahl der Einzelproben
	Haufenwerk umlaufend beprobbar	Haufenwerk nicht umlaufend beprobbar	Haufenwerk umlaufend beprobbar	Haufenwerk nicht umlaufend beprobbar
Bis 6.000	6	9	24	36
> 6.00 bis 12.000	9	12	36	48
> 12.000	12	15	48	60

2.2.1.3 Größe und Entnahme der Einzelproben

Die Angaben über Grundfläche und Volumen des Gefäßes zur Probenahme und der Ablauf zur Entnahme der Einzelproben sind eindeutig beschrieben.

Durch die Festlegung der Größe des Probenahmegefäßes und der Anzahl der Einzelproben ist es möglich, dass in Tabelle 3 aufgeführte Volumen der Mischprobe abzuschätzen (Tabelle 3). Die Tabelle dient als Hilfestellung, um die Transportbehältnisse für die Mischprobe in ihrer Größe richtig festlegen zu können. Die Masse der Mischproben ist damit nur bedingt zu bestimmen, da hierzu die Schüttdichte der verschiedenen Holzhackschnitzel bekannt sein muss.

Tabelle 3: Volumen der Gesamtmenge der Mischproben in Abhängigkeit vom Haufenvolumen

Volumen des Haufenwerks in m ³	Anzahl der Einzelproben	Anzahl der Einzelproben	Volumen der Gesamtprobe in dm ³	Volumen der Gesamtprobe in dm ³
	Haufenwerk umlaufend beprobbar	Haufenwerk umlaufend beprobbar	Haufenwerk umlaufend beprobbar	Haufenwerk nicht umlaufend beprobbar
Bis 6.000	24	36	72	108
> 6.00 bis 12.000	36	48	108	144
> 12.000	48	60	144	180

2.3 Probenvorbereitung

2.3.1 Sichten

Das Sichten der Mischprobe, kann anhand der beschriebenen Methode [8] gut nachvollzogen werden. Potentielle Fehlerquellen wurden nicht identifiziert.

2.3.2 Teilen

Im Bericht von Dr. Vogel [8] erfolgt das Mischen und Teilen zur Homogenisierung der Probe in Anlehnung an DIN 51701-3(2006) nach dem Kegelfverfahren. Alternativ zum Kegelfverfahren können nach Fußnote 12 (S.15) mindestens gleichwertige händische oder maschinelle Verfahren zur Anwendung kommen. Die Untersuchungen bestätigen grundsätzlich dieses Vorgehen.

Laut Handbuch der mechanischen Fest- Flüssig-Trennung [1] ist das Kegelfverfahren jedoch für Partikel mit einer Größe über >12 mm Größe ungeeignet. Im Rahmen der Untersuchungen hat sich folgendes an das Kegelfverfahren angepasstes Vorgehen für eine Teilung auch bei Partikelgrößen über 12mm als praktikabel erwiesen und wird zur Konkretisierung der Methode vorgeschlagen:

In Abänderung zum Kegelfverfahren wird erst das Teilungskreuz aufgestellt und dann über dieses Kreuz die gesichtete Mischprobe geschüttet. Dadurch werden Veränderungen des Schüttkegels und damit eine Veränderung der Partikelverteilung beim nachträglichen Teilen durch Teilungsbleche bzw. Teilungskreuze vermieden. Beim Aufschütten der Probenteilmenge ist darauf zu achten, dass sich der Schüttpunkt über der Kreuzmitte befindet (Abb. 2). Die Schüttung ist gleichmäßig 360° um die Kegelmittle auszuführen [1]. Der Kegel wird bei Bedarf von der Mitte aus spiralförmig abgeflacht (Abb. 3). Die diagonal gegenüberliegenden Teilproben werden erneut gemischt und wieder geteilt. Dieses Verfahren kann sooft wiederholt werden, bis die Proben auf die benötigte Analysemasse reduziert wurden.

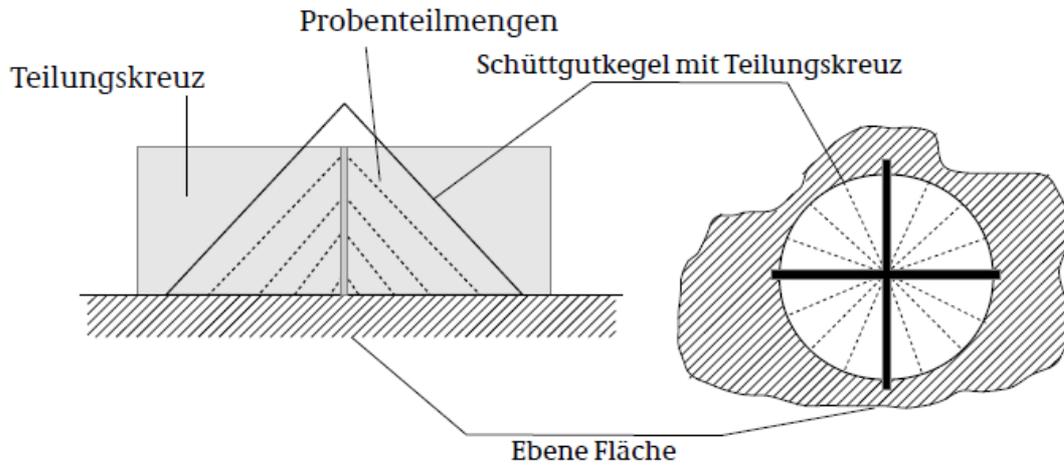


Abb. 2: 1. Phase im Teilungsverfahren: Aufschütten des Kegels über dem Teilungskreuz (Seiten- und Draufsicht)

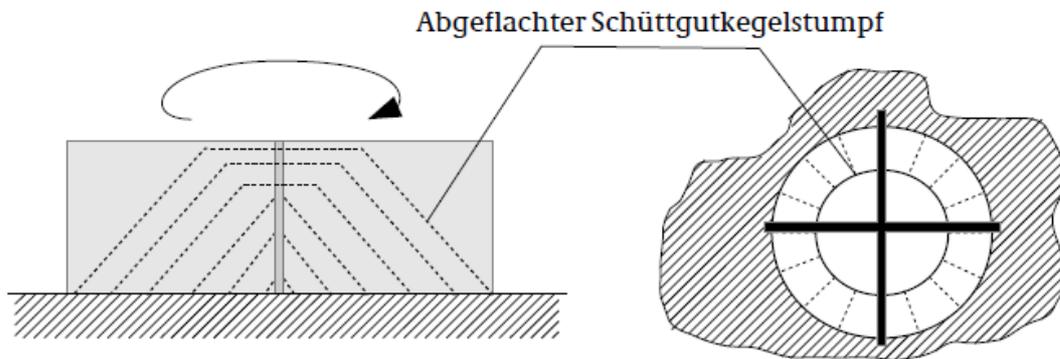


Abb. 3: 2. Phase im Teilungsverfahren: Abflachen des Kegels durch spiralförmige Kreisbewegung mit der Hand von innen nach außen (Seiten- und Draufsicht)

Die aus der Teilung erhaltende Analyseprobe soll repräsentativ für die gesamte Mischprobe sein und deshalb die gleiche Verteilung der Fraktionen aufweisen. Bei Verwendung eines ungeeigneten Alternativverfahrens oder einer ungenauen Probenteilung ist dies nicht gegeben. Damit können sich hohe Standardabweichungen und Varianzen bei der Siebanalyse ergeben, die unter Umständen zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse führen. Deswegen ist eine möglichst genaue Probenteilung von großer Bedeutung für die Vergleichbarkeit der Siebergebnisse.

2.3.3 Siebmenge

Nach dem Vorbericht von Dr. Vogel [8] sind für die Bewertung der Anforderungsgröße nach TA Luft mindestens 3000 cm³ geteiltes homogenisiertes Probenmaterial notwendig. Je nach Abmessung der Analysesiebe kann sich die maximal mögliche Siebmenge pro Analyse und damit die Anzahl der notwendigen Analysen bis zum Erreichen des Mindestvolumens ändern. Für die Handhabung und Reproduzierbarkeit der Methode wird die Angabe eines Volumens als nicht vorteilhaft angesehen. Die Schüttdichte und damit das Volumen der Holzhackschnitzelfraktion können sich beim Transportieren und Bewegen des schütffähigen Materials ändern. Bei der Verwendung von Messbehälter unterschiedlicher Abmessungen können sich bei gleicher Fraktion ebenfalls Unterschiede bei der Schüttdichte und Volumen ergeben. Deshalb wird vorgeschlagen, dass ausgehend von dem oben genannten Mindestvolumen und der möglichen Spannbreite der Schüttdichte eine Masse als Mindestmaß für das notwendige geteilte homogenisierte Probenmaterial angegeben wird. Die ermittelte Mindestmasse von 750g entsprechend Tabelle 4 sichert, dass auch bei einer hohen Schüttdichte von 250kg/m³ das Mindestvolumen nach TA Luft erreicht wird. Da auch in den folgenden Arbeitsgängen (Trocknung, Siebung) eine Auswaage der Analyseproben erfolgt, ist es konsequent, durchgehend die Masse als Parameter zu nehmen.

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Mindestvolumen und vorgeschlagener Mindestmasse

Größe	Maß
Mindestvolumen des Probenmaterials nach TA Luft	3000 cm ³
Schüttdichte Holzhackschnitzel nach [6]	210- 250 kg/m ³
Masse Holzhackschnitzel für Mindestvolumen nach TA Luft	0,63-0,75 kg
Vorschlag für Vorgabe Mindestmasse des Probenmaterials	0,75 kg

Das gesamte homogenisierte Probenmaterial ist aufzuteilen in Abhängigkeit von der Größe der Analysesiebe. Für die Siebanalysen wurden wie bei den Untersuchungen von Dr. Vogel [8] Analysesiebe mit einem Durchmesser von 20 cm verwendet. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde eine Siebmenge pro Analyse von ca. 150g gewählt. Dies entsprach etwa der Hälfte der maximal möglichen Füllung.

Um das gesamte Material zu analysieren wären somit 5 Siebdurchgänge notwendig. Aus den vorliegenden Untersuchungen würden wir die Angabe der Siebmenge wie folgt präzisieren:

- Das gesamte Probenmaterial (Mindestmasse 750g) ist auf 5 Analyseproben von jeweils ca. 150g aufzuteilen. Ist dies aufgrund der zur Anwendung kommenden Analysesiebe z.B. durch Vorgaben der Gerätehersteller nicht praktikabel bzw. sinnvoll, ist die Hälfte der max. möglichen Füllung zu wählen. Es sollten mindestens 3 Wiederholungen (Analyseproben) durchgeführt werden.

Wie auch Dr. Vogel ausführt, sind weiterhin Rückstellproben notwendig, so dass sich das gesamte homogenisierte Probenmaterial verdoppelt auf 1,5kg. Ferner ist nach dem Methodenvorschlag von Dr. Vogel drei bis vier Analyseproben zur Bestimmung der Siebparameter notwendig. Es wird vorgeschlagen feste Siebparameter vorzugeben (siehe Abschnitt 2.3), so dass diese Analyseproben nicht notwendig werden.

2.3.4 Trocknung

Die Siebung soll als Trockensiebung ausgeführt werden. Dies vermeidet, dass kleinere Partikel an den größeren Bestandteilen anhaften und eine Absiebung der Feinpartikel behindert wird. Damit hat die Trocknung eine hohe Bedeutung für die Reproduzierbarkeit der Untersuchungen.

Die Bestimmung des Trocknungszustandes der Analyseproben erfolgt nach DIN EN 13183-1 [5]. Hierzu wurde das Probematerial im Trockenschrank für 24 h bei 105 °C getrocknet. Laut Voruntersuchung ist keine Übertrocknung möglich. Der Trocknungsvorgang gilt als abgeschlossen, wenn nach 2- stündigen nochmaligem Trocknen die Massenveränderung $< 0,1\%$ ist. Vor dem Wiegen sind die Proben in einem Exsikkator auf Zimmertemperatur abzukühlen. Dieses verfahrenstechnische Vorgehen der Trocknung hat sich durch langfristige Anwendung nach den entsprechenden Normen bewährt.

Die Trocknungsdauer hängt von der Größe und dem Feuchtegehalt der Hackschnitzel ab. Dies zeigen beispielhaft die Untersuchungen von Dr. Vogel [8], bei denen die Fraktion bis 16mm 12 Stunden zur Trocknung benötigten. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen (Tabelle A 1, Tabelle A 3, Tabelle A 5) zeigen, dass nach 24h die Trocknung aller Analyseproben abgeschlossen ist. Dies trifft mit hoher Wahrscheinlichkeit generell zu und kann jeweils zur Sicherheit mit der 2-stündigen nochmaligen Trocknung bestätigt werden. Nach 26 h ist der Vorgang der Trocknung somit abgeschlossen, die Proben gelten als trocken.

Der Trocknungserfolg kann auch in einer kürzeren Zeit eintreten, was durch das Abbruchkriterium (Massenänderung $< 0,1\%$) zu bestätigen ist. Mit der generellen Trocknung über 24h (bzw. 26h) ist der innerbetriebliche Ablauf jedoch planbar und der Aufwand für eine mehrmalige Auswaage der Analyseproben bei ungenügender Trocknung, der bei kürzeren Zeiten entstehen kann, entfällt. Durch die vollständige Trocknung kann als zusätzliche Information der Feuchtegehalt des beprobten Haufwerks berechnet werden. Für die Siebanalyse ist dieser Wert nicht relevant, ermöglicht aber eine bessere Charakterisierung der gelagerten Holzhackschnitzel.

Die im Vorhaben beprobten Holzhackschnitzel weisen einen Trockensubstanzgehalt von >80% aus. Die Standardabweichung und Varianz der Probe A3 ist relativ hoch, was auf eine inhomogene Gesamtmenge mit Feuchtenestern hinweist (Tabelle 5). In diesem Fall handelt es sich um Hackschnitzel aus Landschaftspflegematerial, die feuchtes Blattmaterial enthielten. Die möglichen Unterschiede im Feuchtegehalt zwischen den Haufwerken aber auch innerhalb eines Haufwerks macht noch einmal die Notwendigkeit der Trocknung vor der Siebung deutlich für die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Siebergebnisse.

Tabelle 5: Mittelwerte, Standardabweichung und Varianzen der Trockensubstanzgehalte der Proben A1, B2 und B3 bei jeweils 12 Analysen

	Proben A1	Proben A2	Proben A3
Mittelwert nach 24h des Trockensubstanzgehalt in %	83,84	86,71	87,13
Standardabweichung	0,24	0,45	4,54
Varianz	0,05	0,18	18,91

2.4 Siebung

Die Siebung erfolgt in Form einer Trockensiebung. Nach dem Methodenvorschlag [8], sind für die Siebung:

- die Maschineneinstellung
- der Siebsatz
- die Siebdauer

festzulegen. Die Bestimmung und Einstellung der Siebparameter ist nachvollziehbar dargestellt.

In Anlehnung an die vorangegangenen Abschnitte (Siebmenge und Trocknung) wird vorgeschlagen die Siebparameter für die Siebanalysen vorzugeben. Nur im Zweifelsfall, z.B. bei einem Siebsatz mit deutlich anderen Durchmessern sind die Siebparameter nachvollziehbar entsprechend dem Methodenvorschlag zu bestimmen und zu dokumentieren. Es wurden im Rahmen der Untersuchungen folgende Vorschläge zur Präzisierung der Methode angeleitet:

2.4.1 Maschineneinstellung

Moderne Siebmaschinen arbeiten mit einem elektromagnetischen Antrieb, bei dem ein Feder-Masse-System in Bewegung gesetzt wird und die resultierenden Schwingungen an den Siebturm überträgt [3]. Hierbei überlagern sich vertikale Wurfbewegungen mit leichten Drehbewegungen. Dies führt dazu, dass sich das Probengut über die gesamte Fläche des Siebbodens verteilt und die Partikel gleichzeitig eine Beschleunigung in vertikale Richtung erfahren (hochgeworfen werden). In der Luft können sie freie Drehungen durchführen und werden beim Zurückfallen auf das Sieb mit den Maschen des Siebgewebes verglichen.

Sind die Partikel kleiner als diese, so passieren sie das Sieb, sind sie größer, werden sie erneut hochgeworfen. Die Drehbewegung stellt dabei sicher, dass sie beim nächsten Auftreffen auf

dem Siebgewebe eine andere Orientierung haben und so vielleicht doch durch eine Maschenöffnung gelangen.

Die Siebgeräte arbeiten in einer Grundfrequenz. Für das in diesem Fall verwendete Siebgerät FRITSCH ANALYSETTE 3 PRO liegt die Frequenz bei 50 -60 Hz. Diese Angabe beschreibt, mit welcher Geschwindigkeit sich der Boden des Siebgerätes hebt und senkt und somit den Siebturm in Schwingung versetzt. Die Amplitude beschreibt die Höhe der Auslenkung innerhalb der Frequenz des Siebgerätebodens. Bei zu großen Amplituden hüpfen die Partikel im Sieb und werden durch zu hohe Kräfteeinwirkung durch das Sieb "gepresst". Dies kann zur Verfälschung der Ergebnisse führen.

Im Vorbericht wurden zur Amplitudeneinstellung die Aussagen getroffen, dass die Partikel sich frei über das oberste Sieb bewegen sollen, um Einstellungen zu vermeiden, bei denen sich das Probenmaterial springend über den Siebboden bewegt [8]. Auf Grundlage dieser Vorgabe wurde in den durchgeführten Untersuchungen eine Amplitude von 0,3 mm ermittelt. Ausgehend von den Annahmen, dass vollständig trockenes Material, vergleichbare Siebmengen zum Einsatz kommen und Holz hackschnitzel generell über ähnliche Eigenschaften verfügen, wird vorgeschlagen, einheitliche eine Amplitude von 0,3 mm für die Holzsiebung zu wählen. Die Krafteinwirkung ist mit dieser einheitlichen Einstellung auf alle Analyseproben gleich und die unterschiedlichen Holz hackschnitzelfraktionen sind untereinander besser zu vergleichen. Da bei einer einheitlich festgelegten Amplitude die Voruntersuchung für die Amplitudenbestimmung entfällt, verringert sich der Zeitbedarf für die Durchführung.

2.4.2 Siebsatz

Die Siebwahl wurde anhand der Vorgaben des Vorberichts getroffen [8]. Hier wurde darauf verwiesen, dass auf eine Verteilung von rund 25% des Siebmateriale je Sieb zu achten ist. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um eine Überlastung der einzelnen Siebe im Siebturm zu vermeiden und einen optimalen Siebvorgang zu gewährleisten [8]. Eine Festlegung des Siebsatzes bringt mehrere Vorteile: Zum einen fallen die damit verbundenen zeitintensiven Voruntersuchungen für die Siebwahl weg, zum anderen ist es für die ausführenden Labore nicht notwendig, einen umfangreichen Siebsatz zu besitzen, um je nach Untersuchung den Siebturm zusammenzustellen. Ein weiterer Vorteil besteht in der Möglichkeit bei Bedarf sämtliche untersuchten Hackschnitzelproben hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung zu vergleichen. Dies ist für die Siebanalyse selbst nur bedingt notwendig, kann als Datensatz für weitergehende Untersuchungen interessant sein. Daher wird vorgeschlagen, eine einheitliche Festlegung des Siebsatzes vorzunehmen. Die getroffene Festlegung des Siebsatzes orientiert sich an den durch Herrn Dr. Vogel gewählten Siebsätzen und bewegt sich unabhängig vom Siebgut in dem Massenbereich, bei dem es zu keiner Überlastung der gewählten Siebe und damit zu Verfälschung der Siebergebnisse kommt. In Abb. 4 ist der vorgeschlagene einheitliche Siebsatz mit seinen Nennöffnungen dargestellt.

Sollte sich bei der Durchführung der Siebanalyse rausstellen, dass ein Sieb überdurchschnittlich belastet war (deutlich mehr >25% Siebanteil), ist eine Korrektur des Siebsatzes nach den Vorgaben des Methodenvorschlags im Nachgang möglich und die Analyse zu wiederholen.

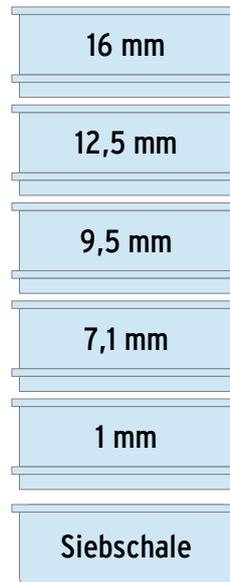


Abb. 4: Vorschlag zur Zusammenstellung der Nennöffnungen für die Gestaltung eines einheitlichen Siebsatzes

2.4.3 Siebzeiten

Zur Bestimmung der Siebzeiten wurde entsprechend Methodenentwurf der Siebturm aufgebaut, mit den oben genannten Maschineneinstellungen 1 Minute gesiebt und dann das Siebgut unter 1 mm gewogen. Anschließend wurde der Siebturm mit dem Probenmaterial im Sieb in ursprünglicher Reihenfolge wieder zusammengesetzt und eine weitere 1 Minute gesiebt. Dieses Vorgehen wurde 15-mal wiederholt. Ist die Massenänderung <1% kann die Siebung beendet werden. Die ermittelte Siebzeit wäre dann für die Analyseproben zu verwenden. Diese Gesamtprozedur wurde 4-mal wiederholt, um die Streuung der Einzelwerte herausrechnen zu können. Die Abb. 5 zeigt beispielhaft anhand der durchgeführten Untersuchung die Auswertung des Mittelwertes von 4 Analyseproben zur Bestimmung der Siebzeit. Nach Methodenvorschlag würden für die folgenden Analysen eine Siebzeit von 8 min gewählt werden.

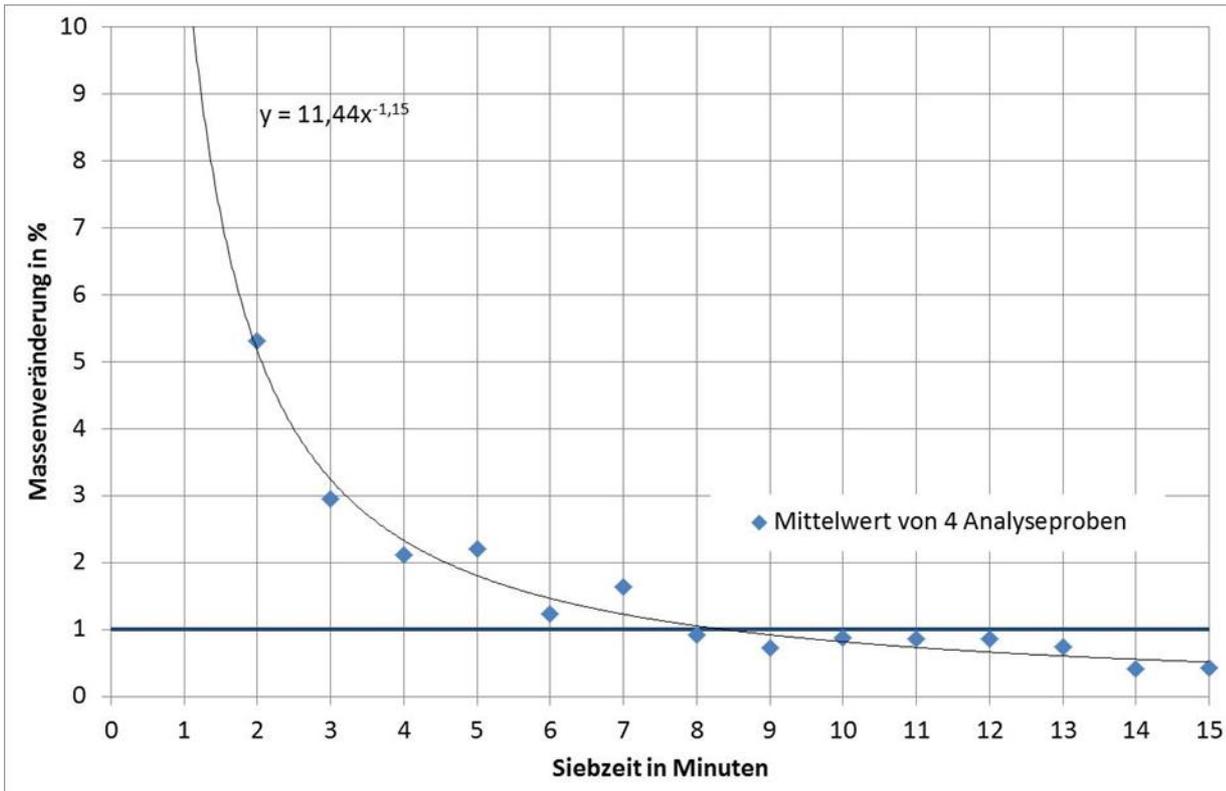


Abb. 5: Bestimmung der Siebzeit auf Basis des Mittelwertes von 4 Analyseproben

Zur Reduzierung des Untersuchungsaufwands wird vorgeschlagen eine Siebzeit vorzugeben. Hierzu ist es vorteilhaft, wenn wie vorgeschlagen auch die Siebmenge vorgegeben ist. Im Vorbericht [8] ist in der Abbildung 4 zu erkennen, dass unabhängig von der Trocknungsdauer alle Massenveränderungen der Partikel unter 1 mm Größe bei 12 min unter 1%, lagen. Die in dieser Studie ermittelten Werte zeigen, dass bei 26 h Trocknungsdauer bereits nach 8 Minuten der Siebvorgang als abgeschlossen angesehen werden kann (Masseveränderung <1%). Es wird davon ausgegangen, dass eine vollständige Siebung nach 8 bis 12 Minuten vorliegt. In den vorliegenden Untersuchungen wurde die Siebzeit auf 12 min festgelegt, da dies aus den Untersuchungen die obere Zeitgrenze darstellte.

Es wird vorgeschlagen die Siebzeit auf 12 min festzulegen und die Siebung zu beenden, wenn nach 1 Minute weiterer Siebung die Massenänderung <1% ist. In einer Folgeuntersuchung zur Methode kann dann geklärt werden, ob die 12 min generell ausgereicht haben oder ob die festgelegte Siebzeit z.B. auf 15 min zu erhöhen ist.

2.5 Dokumentation

Im Vorgängervorhaben wurde die Dokumentation in Kapitel 5.4 [8] beschrieben. Welche sich in das Probennahmeprotokoll, dem Probenvorbereitungsprotokoll und das Siebanalyseprotokoll untergliedert. Auf der Grundlage der Untersuchungen werden folgende Ergänzungen bei den Mindestangaben vorgeschlagen:

1. Probenahme: keine Ergänzungen

2. Probenvorbereitung:

Zu den einzelnen Schritten der Probenvorbereitung (Sichtung, Teilung, Trocknung) sollten Angaben erfolgen bzw. Besonderheiten angegeben werden können. Beispiele sind:

- **Sichtung**- Foto oder Besonderheiten
- **Teilung**- Teilungsverfahren, Volumen bzw. Masse des Probenmaterials (>3000ml bzw. >750g)
- **Trocknung**- Trocknungsdauer, mittlere Gutfeuchte (hohe Feuchte z.B. Hinweis auf mögliche Sporenbildung), Einzelwerte zur Trocknung in Ergebnistabelle

3. Siebanalyse

Die Siebergebnisse (Tabelle) stehen nicht als Anforderung im Punkt 5.4 „Dokumentation“ der Methodenbeschreibung, sind jedoch der Dokumentation anzufügen. In den ausgeführten Beispielen sind diese dann aufgeführt. Die Bestimmung der Siebzeit kann ggf. wegfallen, falls diese festgelegt wird.

3 Qualitative und quantitative Fehleranalyse zur Methode der Siebanalyse

3.1 Fehleranalyse der Siebanalyse

3.1.1 Ergebnisse der Siebanalyse der untersuchten Hackschnitzelproben

Für die Untersuchung wurden wie in der Beschreibung des methodischen Vorgehens (Abschnitt 2.1) aufgeführt 3 unterschiedliche Probenmaterialien von 2 Standorten analysiert. Die Tabelle 6 fasst die Probenahmeprotokolle der 3 Proben zusammen.

Tabelle 6: Probenahmeprotokoll der verschiedenen Holzhackschnitzel

Probenkennzeichnung	A1	B2	B3
Ort, Straße	18233 Sandhagen, Waldstraße 10	18249 Penzin, Dorfstraße 11	18249 Penzin, Dorfstraße 11
Datum/ Uhrzeit	09.08.12 9:30-10:10	13.08.12 9:30-10:20	13.08.12 9:00-9:45
Foto			
Teilnehmer	Frau Anne Wollert Frau Karen Moeck	Frau Anne Wollert Frau Jessica Hudde	Frau Anne Wollert Frau Jessica Hudde
Witterung	Sonnig	sonnig	sonnig
Holzarten, Rindenanteil,	Fichte(Stammholz), Abfallholz aus dem	Landschaftspflegematerial mit Grünenteil (Blatt)	Verschnitt von Baumaterial und Altmöbeln
Rohstoffquelle	Rostock Überseehafen	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Form und Größe des Haufens	Kegel Volumen: 99,87 m ³ Umfang: rund 32,8 m Höhe: 3,5 m	Kegelstumpf Volumen: 187,36 m ³ Umfang: rund 40 m Höhe: 2,9 m	-
Lagerdauer	3 Wochen	2 Jahre	-
Anzahl der Einzelproben	24 Proben von 28 möglichen	24 Proben von 28 möglichen	-
Anzahl der Segmente	6 von 7 beprobbar	6 von 7 beprobbar	-

Probenvorbereitung vor Ort	keine	keine	-
Besonderheiten	Haufen nicht umlaufend zu beproben 30-iger Korb, nicht gesiebt	Haufen nicht umlaufend zu beproben	Das Material wurde frisch für die Untersuchung gehäckseln direkt in den Probenbeutel hinein. Keine Probennahme nach Versuchsablauf möglich.

Um die Methode zur Holzsiebung nach systematischen Fehlern zu untersuchen, die durch den einzelnen Bearbeiter auftreten können, wurde die Methode durch 3 Mitarbeiter des Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.V. unabhängig voneinander durchgeführt. Die Probenvorbereitung und Siebanalyse erfolgte mit den im Abschnitt 2 festgelegten Parametern. Die Tabelle 7 fasst diese Parameter noch einmal als Übersicht zusammen.

Tabelle 7: Zusammenfassung der festgelegten Parameter für die Probenvorbereitung und Siebanalyse

Parameter	Festlegung für die Untersuchungen
Teilungsverfahren	Angepasstes Kegelfverfahren
Trocknungsdauer	26h (24h+2h Nachtrocknung)
Siebsatz	16mm/12,5mm/9,5mm/7,1mm/1mm/Siebschale
Maschineneinstellung	50-60 Hz, Amplitude 0,3mm
Siebzeit	12 min

Die Proben wurden, wie in Abschnitt 2.1 dieses Berichtes bereits erläutert, gekennzeichnet und die Anzahl der Wiederholungen mit den Zahlen von 1 bis 12 fortlaufend nummeriert. Jeder der drei Mitarbeiter führte 4 Siebanalysen pro Probenmaterial durch. Die Tabelle 8 fasst die Ergebnisse der Siebanalysen der Mitarbeiter zusammen. Nach den Ergebnissen der Siebanalysen liegt der Massenanteil des Siebrückstandes in der Siebschale bei den Proben B2 und B3 bei allen 3 Mitarbeitern deutlich über der Grenze von 0,5%. Bei der Probe A1 wurde durch den Mitarbeiter 1 mit einem Massenanteil von 0,25% ein Wert unterhalb dieser Grenze gemessen, während die Mitarbeiter 2 und 3 einen Wert oberhalb von 0,5% bestimmten. Der Mittelwert über alle Analysen der Mitarbeiter zur Probe A1 ergeben einen Wert über 0,5%. Damit erfüllt keine Fraktion die Anforderungen der in der TA-Luft aufgeführten Grenze von 0,5% (5g,atro/kg,atro).

Tabelle 8: Zusammenfassung des Analyseprotokolls der 3 Mitarbeiter

Bearbeiter	Anne Wollert	Karen Moeck	Peter Laurat
Probenkennzeichnung	A1 1-4 B2 1-4 B3 1-4	A1 5-8 B2 5-8 B3 5-8	A1 9-12 B2 9-12 B3 9-12
Datum	14., 15.08.2012	21., 22.08.2012	03.09.2012
Trocknungsdauer	26 Stunden	26 Stunden	26 Stunden
Trocknungsergebnis	siehe Tabelle A 1, Tabelle A 3, Tabelle A 5		
Siebmaschine	FRITSCH ANALYSETTE 3 PRO	FRITSCH ANALYSETTE 3 PRO	FRITSCH ANALYSETTE 3 PRO
Maschineneinstellung	Amplitude 0,3 Siebzeit 12 min	Amplitude 0,3 Siebzeit 12 min	Amplitude 0,3 Siebzeit 12 min
Anzahl der Analyse Proben	4 Proben je Holzhackschnitzelart Summe 12	4 Proben je Holzhackschnitzelart Summe 12	4 Proben je Holzhackschnitzelart Summe 12
Siebergergebnisse	siehe Tabelle A 2, Tabelle A 4, Tabelle A 6		
Summe der Einwaagen aller Wiederholungen	A1 1-4: 602,3 g B2 1-4: 601,80 g B3 1-4: 601,58 g	A1 5-8: 507,58 g B2 5-8: 520,47 g B3 5-8: 506,6 9g	A1 9-12: 509,84 g B2 9-12: 523,12 g B3 9-12: 434,61 g
Massenanteil in % des 1mm Siebs (Mittelwert)	A1 1-4: 0,25 % B2 1-4: 6,13 % B3 1-4: 1,86 %	A1 5-8: 1,5 % B2 5-8: 8,04 % B3 5-8: 3,8 %	A1 9-12: 1,26 % B2 9-12: 5,51 % B3 9-12: 4,37 %

3.1.2 Bewertung der Ergebnisse der Siebanalyse

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt unter den Gesichtspunkten:

1. Wie groß kann der Einfluss der Messgeräte (Waage) auf das Ergebnis der Siebanalyse sein?
2. Sind mögliche systematisch Fehler erkennbar?
3. Welche Aussage kann zu den zufälligen Fehlern, also zum Schwanken der Ergebnisse bei den Wiederholungen der Messungen unter gleichen Bedingungen, getroffen werden.

Betrachtet wird hier nur die Siebanalyse. Die Bewertung des Einflusses möglicher Fehler bei den anderen Arbeitsschritten wird im folgenden Abschnitt separat betrachtet.

3.1.2.1 Abschätzung des Einflusses des Messgerätes

Folgende einfache Annahmen sollen dazu beitragen den möglichen Fehler aufgrund der Messgenauigkeit der Waage abzuschätzen. Grundlage bildet die Gleichung zur Bestimmung des Massenanteils des Siebrückstandes (<1mm).

$$\text{Massenanteil} < 1\text{mm} = \frac{\text{Masse Siebrückstand} < 1\text{mm}}{\text{Masse Einwaage Analyseprobe}} \times 100\%$$

Entsprechend dieser Gleichung sind zur Bestimmung des Masseanteils nur das Auswiegen des Siebrückstandes und der Analyseprobe notwendig. Der max. Fehler tritt auf, wenn beim Auswiegen die max. Messunsicherheit von z.B. 0,01g beim Siebrückstand zu viel und gleichzeitig bei der Einwaage zu gering oder beim Siebrückstand zu gering und gleichzeitig bei der Einwaage zu viel gemessen wurde. Die Tabelle 9 zeigt eine Abschätzung der max. möglichen Abweichung, wenn die Auswaage des Siebrückstandes genau dem Grenzwert nach TA Luft (Massenanteil von 0,5%) entspricht. Für typische Analysemengen (100 bis 150g) liegt demnach bei einer Messunsicherheit der Waage von 0,01g der max. Fehler bei 1,34-2,01%. Dies bedeutet bei einem Fehler von 2,01%, dass der ermittelte Wert aufgrund der Messunsicherheit in einem Bereich von:

$$\text{Masseanteil} < 1\text{mm} = (0,5 \pm 0,01)\%$$

liegt. Damit kann der Einfluss des Messfehlers der Waage auf das Ergebnis der Siebanalyse bei sachgerechtem Gebrauch als sehr gering eingeschätzt werden.

Tabelle 9: Abschätzung der maximal möglichen Abweichung aufgrund der Messunsicherheit der Waage

Messunsicherheit in g	±0,01		±0,001	
	150	100	150	100
Einwaage Analysenprobe in g	150	100	150	100
Auswaage des Siebrückstandes bei Massenanteil v0,5% in g	0,75	0,50	0,75	0,50
Maximal mögliche Abweichung aufgrund der Messunsicherheit in %	1,34	2,01	0,13	0,20

3.1.2.2 Bewertung des Einflusses möglicher systematischer Fehler

Systematische Fehler wiederholen sich regelmäßig bei wiederholten Messungen. Sie sind nicht immer vermeidbar und sind z.B. auf Umwelteinflüsse oder auf die Eigenschaften der Messgeräte zurückzuführen.

Bei der Auswertung der Siebanalysen wurde festgestellt, dass es bei der Siebung zu einer Anhaftung des Feinstaubes an die Siebe kommen kann. Ursache könnte eine gewisse statische Aufladung der Teilchen sein. Dies kann zur Folge haben, dass die Siebschale (Siebrückstand) nicht alle Teile <1mm enthält. Es würde systematisch ein zu kleiner Wert gemessen. Eine quantitative Beurteilung war im Rahmen der Untersuchungen nicht möglich. Deshalb erfolgte nur eine qualitative Bewertung (siehe Abschnitt 3.2)

3.1.2.3 Bewertung des Einflusses der zufälligen Fehler

Zufällige Fehler sind nicht beeinflussbar und sind dadurch gekennzeichnet, dass die Ergebnisse bei wiederholten Messungen unter gleichen Bedingungen unregelmäßig schwanken. Je größer die Anzahl der Wiederholungen sind, desto besser lassen sich diese Fehler durch Statistik abschätzen.

Zur Beurteilung des zufälligen Fehlers bei der Siebanalyse werden für die Proben A1, B2 und B3 zum einen die ermittelten Mittelwerte der 3 Mitarbeiter und zum anderen alle 12 Einzelwerte verglichen. Die Abb. 6 stellt die ermittelten Masseanteile der 3 Mitarbeiter (jeweils Mittelwert aus 4 Analysen) sowie den Mittelwert aller Analysen dar.

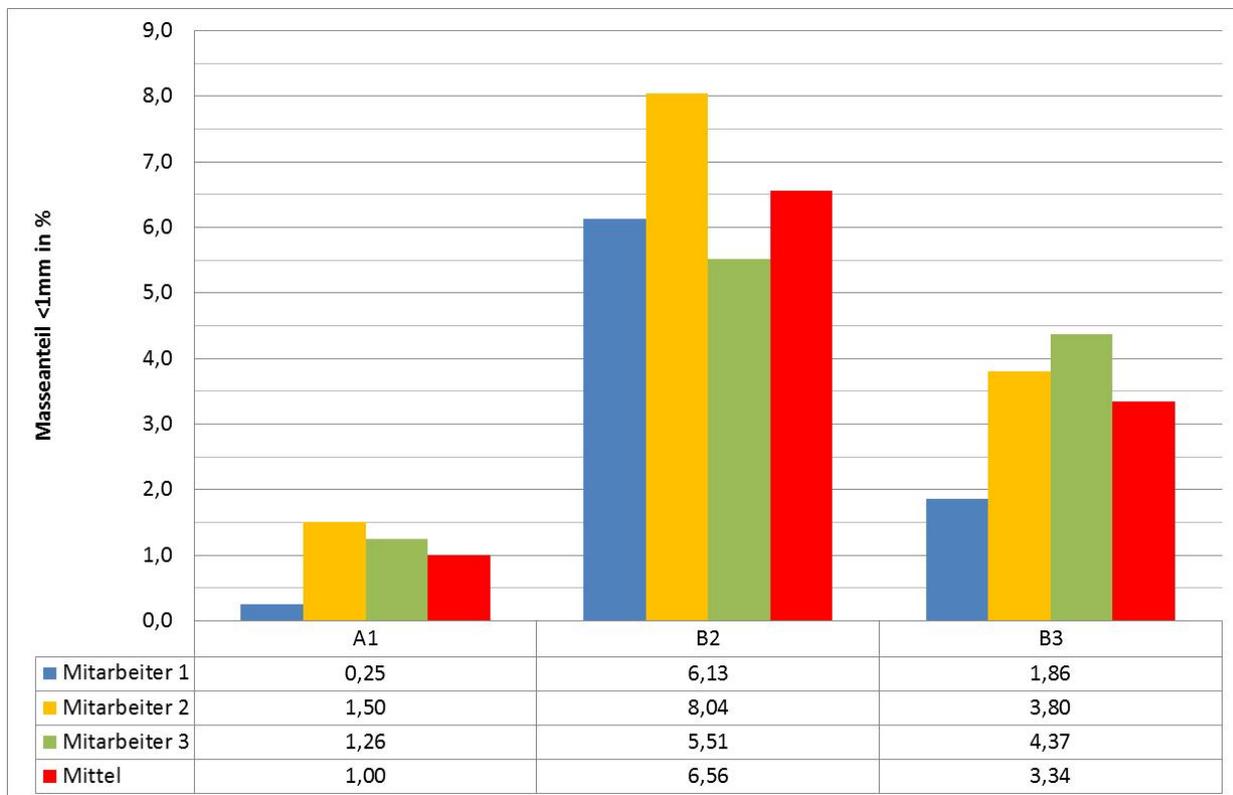


Abb. 6: Die ermittelten Masseanteile <1mm für die drei Proben A1, B2 und B3 durch 3 unterschiedliche Bearbeiter (jeweils Mittel aus 4 Einzelanalysen) und als Mittelwert aller Proben

Es zeigen sich deutliche Differenzen bei den ermittelten Masseanteilen der 3 Mitarbeiter. Die max. Abweichungen eines Mitarbeiters vom Mittelwert liegt bei den Proben zwischen 22% (Probe B2) und 75% (Probe A1) und sind damit sehr groß. Da keiner der 3 Mitarbeiter immer den kleinsten bzw. immer den größten Wert aufweist, liegt ein vermeidbarer bzw. systematischer Fehler eines Mitarbeiters nicht vor. Dies lässt darauf schließen, dass bei der Siebanalyse mit einem relativ großen zufälligen Fehler zu rechnen ist. Für eine weitergehende Analyse wurden auch die Siebergebnisse des Vorberichtes [8] genutzt. In der Abb. 7 sind zusammenfassend die Ergebnisse für die Untersuchten Proben als Mittelwert aller Einzelanalysen sowie die bei den Untersuchungen aufgetretenen maximalen und minimalen Einzelwerte aufgeführt. Deutlich werden hier noch einmal die möglichen Schwankungsbreiten der Einzelanalysen.

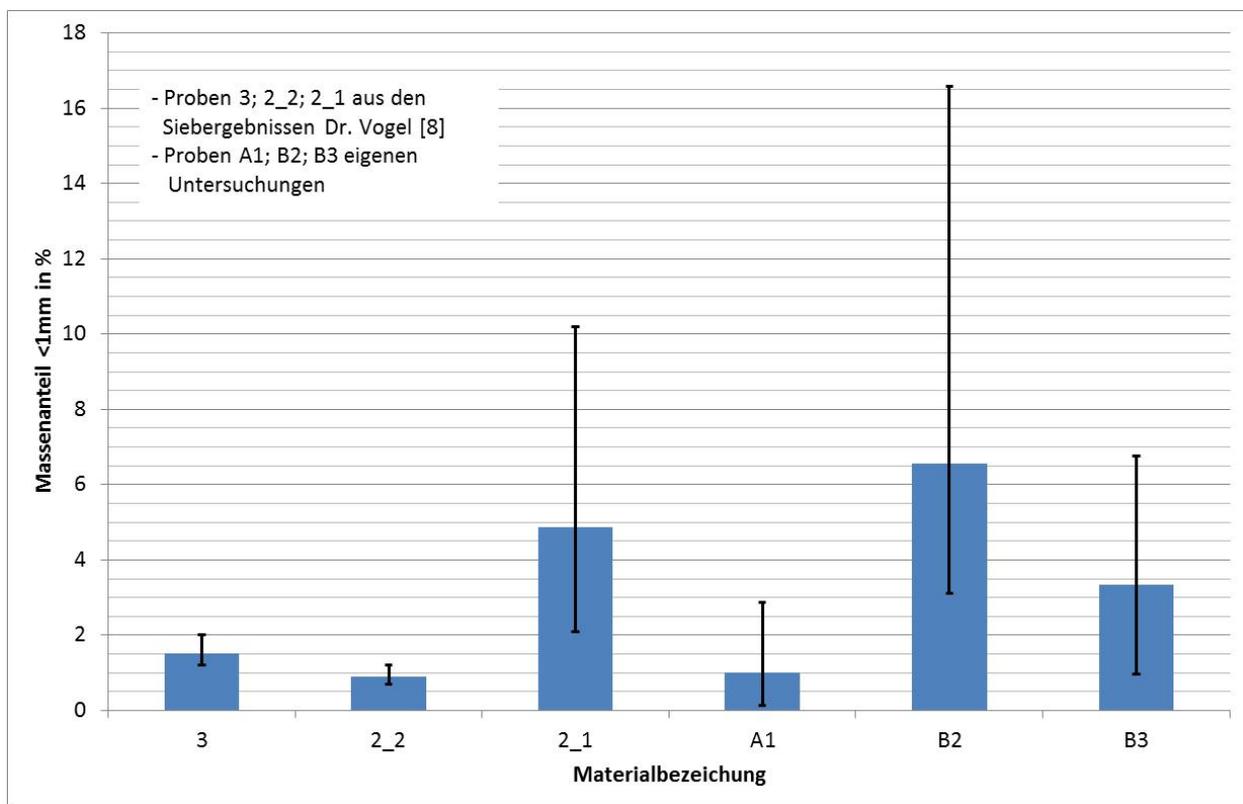


Abb. 7: Ergebnisse der Siebanalysen aus dem Vorbericht [8] und den eigenen Untersuchungen als Mittelwert der Einzelanalysen und den bei den Untersuchungen aufgetretenen maximalen und minimalen Einzelwerten

Die für die Einzelanalysen ermittelte Standardabweichung und Varianz unterstreichen diese Aussage (Tabelle 10).

Tabelle 10: Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der Proben A1, B2 und B3 (12 Einzelanalysen) sowie der Proben 2_1; 2_2 und 3 (8 Einzelanalysen) aus [8]

Materialbezeichnung	A1	B2	B3	3	2_2	2_1
Mittelwert Massenanteil <1mm in %	1,00	6,56	3,34	1,53	0,90	4,88
Standardabweichung	0,85	3,71	1,85	0,29	0,19	2,60
Varianz	0,66	12,64	3,13	0,09	0,04	6,73
Vertrauensbereich des Mittelwertes 95%	0,48	2,10	1,05	0,20	0,13	1,80

Aufgeführt ist auch der Vertrauensbereich des Mittelwertes. Dieser gibt an, in welchen Bereich um den Mittelwert sich der Einzelwert mit welcher Sicherheit bzw. Wahrscheinlichkeit (hier 95%) befindet. Einfluss auf den Vertrauensbereich hat die ermittelte Standardabweichung, die Anzahl der Messwerte und die Art der Verteilung der Messwerte. In diesem Fall wird eine Normalverteilung der ermittelten Messwerte unterstellt. Dies bedeutet beispielsweise für die Analyseergebnisse der Proben mit den geringsten bzw. meisten Massenanteilen <1mm folgendes

Probe 2_2: $\text{Massenanteil} < 1\text{mm} = (0,9 \pm 0,13)\text{M}\%$

bzw.:

$\text{Massenanteil} < 1\text{mm} = 0,9\text{M}\% \pm 14,9\%$

Probe B2: $\text{Massenanteil} < 1\text{mm} = (6,56 \pm 2,1)\text{M}\%$

bzw.:

$\text{Massenanteil} < 1\text{mm} = 6,56\text{M}\% \pm 32\%$

Holzhackschnitzel sind ein relativ inhomogenes Material, so dass Schwankungen der Einzelanalysen zu erwarten sind. Die ermittelten Schwankungen sind jedoch sehr groß und liegen zum Teil deutlich über dem einzuhaltenden Grenzwert von 0,5%. Die Beispiele zeigen, dass Abweichungen von mehr als 30% vom ermittelten Mittelwert möglich sind. Die eigenen Untersuchungen weisen darauf hin, dass unterschiedliche Mitarbeiter auf Grund dieser Schwankungen zu unterschiedlichen Aussagen kommen können, wie es bei der Probe A1 der Fall ist.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse lassen erwarten, dass im Bereich des Grenzwertes von 0,5% die Standardabweichungen geringer werden und sich auch der Bereich um den Mittelwert, in dem sich mit hoher Wahrscheinlichkeit der „wahre Wert“ befindet, verkleinert.

Werden die günstigsten Untersuchungsergebnisse (Probe 2_2) auf den Grenzwert von 0,5% übertragen sind folgende Aussagen unter Annahme einer Normalverteilung zu treffen:

- Bei 5 Einzelanalysen und falls die Standardabweichung im gleichen Verhältnis bleibt vergrößert sich der Vertrauensbereich auf $\pm 0,17M\%$ (entspricht 34%) aufgrund der geringeren Einzelanalyseanzahl
- Damit halten alle Proben mit einem Messwert von $0,33M\%$ den geforderten Grenzwert mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit (95%) ein
- Proben mit einem Messwert zwischen $0,33M\%$ und $0,67M\%$ können den Grenzwert einhalten oder nicht.
- Proben über $0,67\%$ halten mit hoher Wahrscheinlichkeit den Grenzwert nicht ein.

Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ist zum derzeitigen Zeitpunkt jedoch nicht möglich, da:

- alle untersuchten Proben über dem Grenzwert liegen und die bisherigen Ergebnisse auf Grund der geringen Anzahl von Proben und den großen Schwankungen keine Rückschlüsse auf andere Fraktionen zulassen
- für keine Untersuchung der Siebanalyse der „wahre Wert“ (z.B. über Referenzproben) bekannt ist, so dass eine weitergehende Fehleranalyse z.B. hinsichtlich der Verteilungsfunktion nicht möglich ist

Die Analyse der zufälligen Fehler lässt sich auf Grundlage der bisherigen Untersuchungen wie folgt zusammenfassen.

Die Schwankungen der Einzelanalysen und damit die zufälligen Fehler sind sehr groß. Von den vorliegenden Untersuchungsergebnissen, die im Mittel alle über dem geforderten Grenzwert der TA-Luft liegen, kann der Fehler für Messwerte unterhalb bzw. im Bereich des Grenzwertes nicht quantitativ bestimmt werden. Die ermittelten Vertrauensbereiche zeigen, dass der Messwert aufgrund der Schwankungen deutlich unterhalb des Grenzwertes liegen muss, damit die Probe mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderung erfüllt. Bevor im Bereich des Grenzwertes keine weiteren Untersuchungen zur Fehleranalyse vorliegen, sind die Ergebnisse der Siebanalyse der Holzhackschnitzelfraktion nicht interpretierbar. Es wird deshalb vorgeschlagen Untersuchungen in diesem Grenzbereich durchzuführen. Hierzu sollten gezielt Grundmengen mit definierter Korngrößenverteilung geschaffen werden, bei denen der Feinanteil $< 1\text{mm}$ unterhalb, innerhalb und oberhalb des Grenzwertes liegt. Ist der erwartete Mittelwert der Grundmenge bekannt und liegt in dem interessanten Bereich, kann eine Beprobung, Siebanalyse und Auswertung erfolgen, die interpretierbare und verallgemeinerbare Ergebnisse liefert.

3.2 Zusammenstellung und qualitative Bewertung möglicher Fehler der Gesamtmethode

Beim Ablauf der Gesamtmethode kann durch Fehler bei der Probenahme, Probenvorbereitung und Siebung das Ergebnis der Siebanalyse beeinflusst werden. Die Tabelle A 7 im Anhang fasst mögliche Fehler bei der Durchführung der einzelnen Arbeitsschritte zusammen. Neben einer kurzen Beschreibung der möglichen Auswirkung des Fehlers auf die Siebanalyse erfolgt eine einfache qualitative Bewertung.

Die Auswertung zeigt, dass einige Fehler (z.B. die ungenaue Volumenbestimmung des Haufwerks) keinen Einfluss auf das Siebergebnis erwarten lassen. Andere dagegen, wie die fehlerhafte Abgrenzung der Grundmenge, ein falsches bzw. ungenaues Teilen, eine ungenügende Trocknung oder zu geringe Siebzeiten, können zu falschen nicht interpretierbaren Siebanalysen führen.

Folgende Aussagen lassen sich zu der Fehleraufstellung machen:

- Durch die Einweisung des zuständigen Personals und deren Sensibilisierung für die mögliche Auswirkung für die Fehler können die Fehler weitestgehend vermieden bzw. deren Auswirkung minimiert werden.
- Insbesondere bei der Probenahme können durch eine gute Vorbereitung, der Verwendung der Datenblätter sowie einer sorgfältigen Dokumentation die hier möglichen Fehler vermieden werden.
- Generell sollten im Protokoll zu jedem Arbeitsschritt Aussagen erfolgen, damit der Bearbeiter sich mit dem Arbeitsschritt auseinandersetzen muss sowie bei nicht interpretierbaren Ergebnissen evtl. mögliche Ursachen zu identifizieren sind.
- Die Vorgabe von bestimmten Parametern bzw. Abbruchkriterien (z.B. bei der Trocknung oder der Siebzeit) sollte helfen Fehler zu vermeiden und die Ergebnisse besser untereinander zu vergleichen.

Besonders zu beachten sind Fehler die zu nicht repräsentativen Mischproben oder zu einer unvollständigen Siebung führen können. Dies trifft insbesondere auf die Teilung, Trocknung, Siebdauer sowie die mögliche statische Aufladung der Teilchen zu. Eine ungenügende Trocknung oder zu geringe Siebzeit kann durch die vorgegebenen Abbruchkriterien vermieden werden. Der mögliche Einfluss einer ungeeigneten Teilungsmethode ist derzeit dagegen noch nicht abschätzbar. Auch zur möglichen Verringerung des Siebdurchgangs durch das Aufladen der Teilchen liegen bisher noch keine Untersuchungen vor. Damit hier der Einfluss und damit der mögliche Fehler bestimmt werden kann, sind weitere Untersuchungen notwendig. Wie bei der Beurteilung der zufälligen Fehler bereits ausgeführt, wird vorgeschlagen diese Untersuchungen mit Referenzproben durchzuführen, bei denen die Partikelverteilung bekannt ist und der Feinanteil im Bereich des Grenzwerts liegt. Insbesondere eine mögliche unvollständige Absiebung durch eine Aufladung der Teilchen kann zu einem systematischen Fehler führen der quantitative abzuschätzen und bei der Fehlerbetrachtung zu berücksichtigen ist.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Aufgabe des Forschungsvorhabens bestand in der Validierung der von Herrn Dr. Vogel im Bericht „Beschreibung und Verifizierung einer Methode zur Holzsiebung“ [8] dargestellten Methode zur Bewertung des Feinanteils in Holzhackschnitzel nach TA Luft unter Durchführung einer qualitativen und quantitativen Fehlerbetrachtung.

Das Vorgehen bei der Bearbeitung war dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen notwendigen Arbeitsschritte erst entsprechend Methodenvorschlag durchgeführt und anschließend hinsichtlich Handhabung potentiellen Fehlerquellen ausgewertet wurden.

Daraufhin erfolgte die Ableitung ggf. notwendiger Ergänzungen bzw.

Konkretisierungsvorschläge. Die abschließende Fehlerbetrachtung schloss dann die eventuell ergänzten Konkretisierungsvorschläge mit ein. Folgende Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

- Die einzelnen Arbeitsschritte nach dem Methodenvorschlag waren nachvollziehbar und plausibel. Zu ausgewählten Arbeitsschritten wurden unter dem Gesichtspunkt der Handhabung und der Reduzierung des Untersuchungsaufwandes Vorschläge zur Präzisierung erarbeitet. Dies betrifft:
 1. Hilfestellungen zur Probenahme durch Formblätter für die Volumenbestimmung und zur Anzahl und Verteilung der Entnahmestellen,
 2. Einen Vorschlag für ein Teilungsverfahren in Anlehnung an das Kegelfverfahren für Proben mit Partikelgrößen <12mm,
 3. Die Festlegung konkreter Parameter für die Untersuchungen auf Grundlage der im Vorbericht aufgeführten bzw. eigenen Ergebnisse z.B. zur Siebmenge, der Trocknung, der Maschineneinstellung, Siebzusammensetzung und Siebzeit z.T. mit konkreten Abbruchkriterien. Ziel ist das Reduzieren des Untersuchungsaufwandes zur Siebanalyse sowie die bessere Vergleichbarkeit der Untersuchungen verschiedener Labore. Sind diese „Standardparameter“ für ausgewählte Hackschnitzelfractionen oder Siebmaschinen nicht sinnvoll bzw. realisierbar, können die Parameter entsprechend Methodenvorschlag bestimmt werden.
- Drei unterschiedliche Hackschnitzelproben wurden untersucht. Die Siebanalyse wurde durch drei Mitarbeiter unabhängig voneinander durchgeführt. Die Ergebnisse der Siebanalyse zeigten bei allen Proben, dass sie das Kriterium nach TA-Luft nicht erfüllten. Da die Holzhackschnitzelproben nicht von Anlagen nach Nr. 5.4.6.3 TA Luft stammen, sind sie jedoch nicht repräsentativ für die Holzwerkstoffindustrie.
- Die quantitative Fehleranalyse erfolgte anhand der Untersuchungen der Mitarbeiter sowie unter Nutzung der Ergebnisse aus dem Vorbericht. Folgende Aussagen lassen sich treffen:
 1. Der Einfluss der möglichen Messungenauigkeit der Waage auf das Ergebnis ist gering. Bei einer Messgenauigkeit von 0,01g liegt die max. Abweichung im Bereich des Grenzwertes bei $\pm 2\%$, bei eine Messungenauigkeit von 0,001g entsprechend bei $\pm 0,2\%$.

2. Die Schwankung der Analyseergebnisse aufgrund der zufälligen Fehler ist sehr groß. Dies ist insbesondere mit der Inhomogenität der Holzhackschnitzel zu erklären. Die Standardabweichungen und damit auch der Vertrauensbereich des Mittelwertes waren bei den untersuchten Proben sehr unterschiedlich. Im günstigsten Fall lag der Vertrauensbereich des ermittelten Mittelwertes bei $\pm 15\%$. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Standardabweichungen kleiner werden bei geringeren Siebrückständen. Die geringe Anzahl vorliegender Untersuchungen lassen diesbezüglich jedoch keine verallgemeinbare Aussagen zu.
 3. Bei allen untersuchten Proben lag der Feinanteil über dem Grenzwert. Ein Rückschluss auf Proben, deren Feinanteil den Grenzwert unterschreitet, lassen die bisherigen Ergebnisse auf Grund der geringen Anzahl von Proben und den großen Schwankungen nicht zu.
- Die möglichen Fehler bei den einzelnen Arbeitsschritten wurden erfasst und qualitativ bewertet. Die Analyse zeigt, dass durch die Einweisung und Sensibilisierung des Personals, sowie eine gute Vorbereitung auf die Probenahme die meisten Fehler vermieden werden können. Fehler, die zu einer nichtrepräsentativen Zusammensetzung der Mischprobe oder ungenügenden Absiebung führen können, können großen Einfluss auf das Siebergebnis haben. Dies trifft insbesondere auf die Teilung, Trocknung, Siebdauer sowie die mögliche statische Aufladung der Teilchen zu. Eine ungenügende Trocknung oder zu geringe Siebzeit kann durch die vorgegebenen Abbruchkriterien vermieden werden. Der mögliche Einfluss einer ungeeigneten Teilungsmethode ist derzeit dagegen noch nicht abschätzbar. Auch zur möglichen Verringerung des Siebdurchgangs durch das Aufladen der Teilchen, was ein möglicher systematischer Fehler ist, liegen bisher noch keine Untersuchungen vor.
 - Bei der qualitativen und quantitativen Beurteilung der Fehler ist als kritisch einzuschätzen, dass zum einen keine Probe den Grenzwert nach TA-Luft einhält und zum anderen, dass der „wahre Wert“ des Feinanteils für keine Probe bekannt war.

Aus der Zusammenfassung lässt sich folgende Schlussfolgerung ableiten.

Die Schwankungen der Einzelanalysen und damit die zufälligen Fehler sind sehr groß. Von den vorliegenden Untersuchungsergebnissen, die im Mittel alle über dem geforderten Grenzwert der TA-Luft liegen, kann der Fehler für Messwerte unterhalb bzw. im Bereich des Grenzwertes nicht quantitativ bestimmt werden. Bevor im Bereich des Grenzwertes keine weiteren Untersuchungen zur Fehleranalyse vorliegen, sind die Ergebnisse der Siebanalyse der Holzhackschnitzelfraktion nicht interpretierbar.

Es wird deshalb vorgeschlagen Untersuchungen in diesem Grenzbereich durchzuführen. Hierzu sollten gezielt Grundmengen mit definierter Korngrößenverteilung geschaffen werden, bei denen der Feinanteil $< 1\text{mm}$ unterhalb, innerhalb und oberhalb des Grenzwertes liegt. Ist der erwartete Mittelwert der Grundmenge bekannt und liegt in dem interessanten Bereich, kann eine Beprobung, Siebanalyse und Auswertung erfolgen, die interpretierbare und bessere verallgemeinbare Ergebnisse liefert.

So können auch der Einfluss des Teilungsverfahrens oder der mögliche systematische Fehler einer ungenügenden Siebung aufgrund einer statischen Aufladung der Teilchen qualitativ bestimmt werden.

Im Vorfeld möglicher Untersuchungen ist zu klären, welcher relative Fehler bzw. welcher Vertrauensbereich des ermittelten Mittelwerts im Bereich des Grenzwertes aus Sicht der Anforderungen der TA Luft tolerierbar ist.

5 Quellenverzeichnis

- [1] Luckert, Klaus, (2004): Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung. Vulkan-Verlag GmbH
- [2] anonym 1 (2012): Fachbericht Siebanalyse http://www.retsch.it/dltmp/www/5929-c18d9f9ec6df/af_sieving%20basics_2004_de.pdf
- [3] Dr.-Ing. Meinel, Achim (2004): Zur Rolle und Optimierung der Siebboden- und Siebgutbewegung auf Wurfsiebmaschinen. AUFBEREITUNGS TECHNIK 46 (2004) Nr. 7
- [4] Dr. Ing. Stark, Ursula(2004): Praktikumsanleitung ABW 2 Klassieren grobdispenser Schüttgüter Aufbereitung- und Recyclingpraktikum. Bauhaus- Universität Weimar
- [5] DIN EN13183-1 (002): Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz. Teil 1 Bestimmung durch Darrverfahren
- [6] Dr. Zelinski, Volker; Prof. Dr.Loewen, Achim (2008): Qualität von Holzhackschnitzeln - Analytik/ Klassifikation /Normierung, Schwarmstedt
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2002: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz(Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), Köhl
- [8] Umweltbundesamt, Dr. Vogel (2011): Beschreibung und Verifizierung einer Methode zur Holzsiebung, Texte 51/2011 Pflaumdorf

6 Anhang

Tabelle A 1: Ergebnis der Trocknung der Proben A1 1-12

Probe	Leergewicht Schale	Einwaage	Auswaage 24 Std.			Auswaage 26 Std.			Masseänderung
			mit Schale	ohne Schale	Trockensubstanz	mit Schale	ohne Schale	Trockensubstanz	zw. 24h und 26h
			in g	in g	in %	in g	in g	in %	in %
A1-1	26,31	250,31	234,96	208,65	83,36	235,06	208,75	83,40	-0,05
A1-2	25,34	250,19	235,28	209,94	83,91	235,25	209,91	83,90	0,01
A1-3	26,38	250,14	235,29	208,91	83,52	235,38	209,00	83,55	-0,04
A1-4	26,11	250,55	235,22	209,11	83,46	235,35	209,24	83,51	-0,06
A1-5	26,09	150,27	152,28	126,19	83,98	152,33	126,24	84,01	-0,04
A1-6	26,41	150,17	152,61	126,20	84,04	152,62	126,21	84,04	-0,01
A1-7	26,57	150,23	152,55	125,98	83,86	152,60	126,03	83,89	-0,04
A1-8	26,06	150,40	152,34	126,28	83,96	152,40	126,34	84,00	-0,05
A1-9	27,23	150,92	154,03	126,80	84,02	154,03	126,80	84,02	0,00
A1-10	26,90	150,57	153,39	126,49	84,01	153,43	126,53	84,03	-0,03
A1-11	26,99	150,62	153,49	126,50	83,99	153,44	126,45	83,95	0,04
A1-12	27,05	150,75	153,60	126,55	83,95	153,59	126,54	83,94	0,01
Mittelwert					83,84			83,85	-0,02
Standartabweichung					0,24			0,23	0,03
Varianz					0,05			0,05	0,001

Tabelle A 2: Ergebnisse der Siebanalyse A1 1-12

Materialbezeichnung	A1		Laborklima	23 °C /65 %rF						
Probenmenge	12 Teilproben a 150 g		Siebmaschine	FRITSCH-Siebmaschine „analysette 3“ PRO						
Trocknungszeit	24 h +2 h		Amplitude	0,3 mm						
			Frequenz	50-60 Hz						
			Siebdauer	12 min						
Wiederholung	Einwaage in g	Siebschale	m m	7,1 m m	9,5 m m	12,5 m m	16 m m	Auswaage in g	Massenänderung in g	
Leergewicht Siebsatz		358,25	348,01	489,86	516,11	515,66	558,10			
A1-1	Masse mit Sieb in g		358,68	405,31	515,57	546,56	532,71	578,07		
	Masse ohne Sieb in g	150,03	0,43	57,30	25,71	30,45	17,05	19,97	150,48	
	Massenanteil in %		0,29	38,19	17,14	20,30	11,36	13,31	0,30	
A1-2	Masse mit Sieb in g		358,46	386,21	516,80	546,77	537,42	591,04		
	Masse ohne Sieb in g	151,37	0,21	38,20	26,94	30,66	21,76	32,94	150,71	
	Massenanteil in %		0,14	25,24	17,80	20,26	14,38	21,76	-0,44	
A1-3	Masse mit Sieb in g		358,71	397,80	515,65	545,81	531,04	588,07		
	Masse ohne Sieb in g	150,81	0,46	49,79	25,79	29,70	15,38	29,97	151,09	
	Massenanteil in %		0,30	33,01	17,10	19,69	10,20	19,87	0,18	
A1-4	Masse mit Sieb in g		358,66	401,55	519,06	552,18	540,15	565,12		
	Masse ohne Sieb in g	150,12	0,41	53,54	29,20	36,07	24,49	7,02	150,73	
	Massenanteil in %		0,28	35,66	19,45	24,03	16,31	4,68	0,41	
A1-5	Masse mit Sieb in g		360,04	415,61	512,77	536,99	522,42	569,15		
	Masse ohne Sieb in g	126,72	1,79	67,60	22,91	20,88	6,76	11,05	129,20	
	Massenanteil in %		1,41	53,35	18,08	16,48	5,33	8,72	1,96	
A1-6	Masse mit Sieb in g		361,90	408,87	510,46	541,34	522,23	569,08		
	Masse ohne Sieb in g	127,32	3,65	60,86	20,60	25,23	6,57	10,98	127,89	
	Massenanteil in %		2,87	47,80	16,18	19,82	5,16	8,62	0,45	
A1-7	Masse mit Sieb in g		358,77	409,89	518,80	536,24	523,62	565,88		
	Masse ohne Sieb in g	126,98	0,52	61,88	28,94	20,13	7,96	7,78	127,21	
	Massenanteil in %		0,41	48,73	22,79	15,85	6,27	6,13	0,18	
A1-8	Masse mit Sieb in g		359,91	418,49	515,37	533,45	523,18	562,62		
	Masse ohne Sieb in g	126,55	1,66	70,48	25,51	17,34	7,52	4,52	127,03	
	Massenanteil in %		1,31	55,69	20,16	13,70	5,94	3,57	0,38	
A1-9	Masse mit Sieb in g		360,90	411,89	513,68	538,28	526,20	563,12		
	Masse ohne Sieb in g	127,21	2,65	63,88	23,82	22,17	10,54	5,02	128,08	
	Massenanteil in %		2,08	50,22	18,72	17,43	8,29	3,95	0,68	
A1-10	Masse mit Sieb in g		359,88	403,48	517,71	537,68	527,78	567,30		
	Masse ohne Sieb in g	127,18	1,63	55,47	27,85	21,57	12,12	9,20	127,84	
	Massenanteil in %		1,28	43,62	21,90	16,96	9,53	7,23	0,52	
A1-11	Masse mit Sieb in g		359,75	415,30	513,56	535,42	522,58	566,51		
	Masse ohne Sieb in g	127,47	1,50	67,29	23,70	19,31	6,92	8,41	127,13	
	Massenanteil in %		1,18	52,79	18,59	15,15	5,43	6,60	-0,27	
A1-12	Masse mit Sieb in g		358,87	407,67	520,43	538,61	521,31	566,74		
	Masse ohne Sieb in g	127,98	0,62	59,66	30,57	22,50	5,65	8,64	127,64	
	Massenanteil in %		0,48	46,62	23,89	17,58	4,41	6,75	-0,27	
Mittelwert in g	134,98	1,29	58,83	25,96	24,67	11,89	12,96	135,42	0,55	
Mittelwert in %		1,00	44,24	19,32	18,10	8,55	9,27	0,34		
Standartabweichung		0,85	9,34	2,42	2,83	3,89	5,99	0,62		
Varianz		0,66	79,92	5,38	7,32	13,88	32,91	0,35		

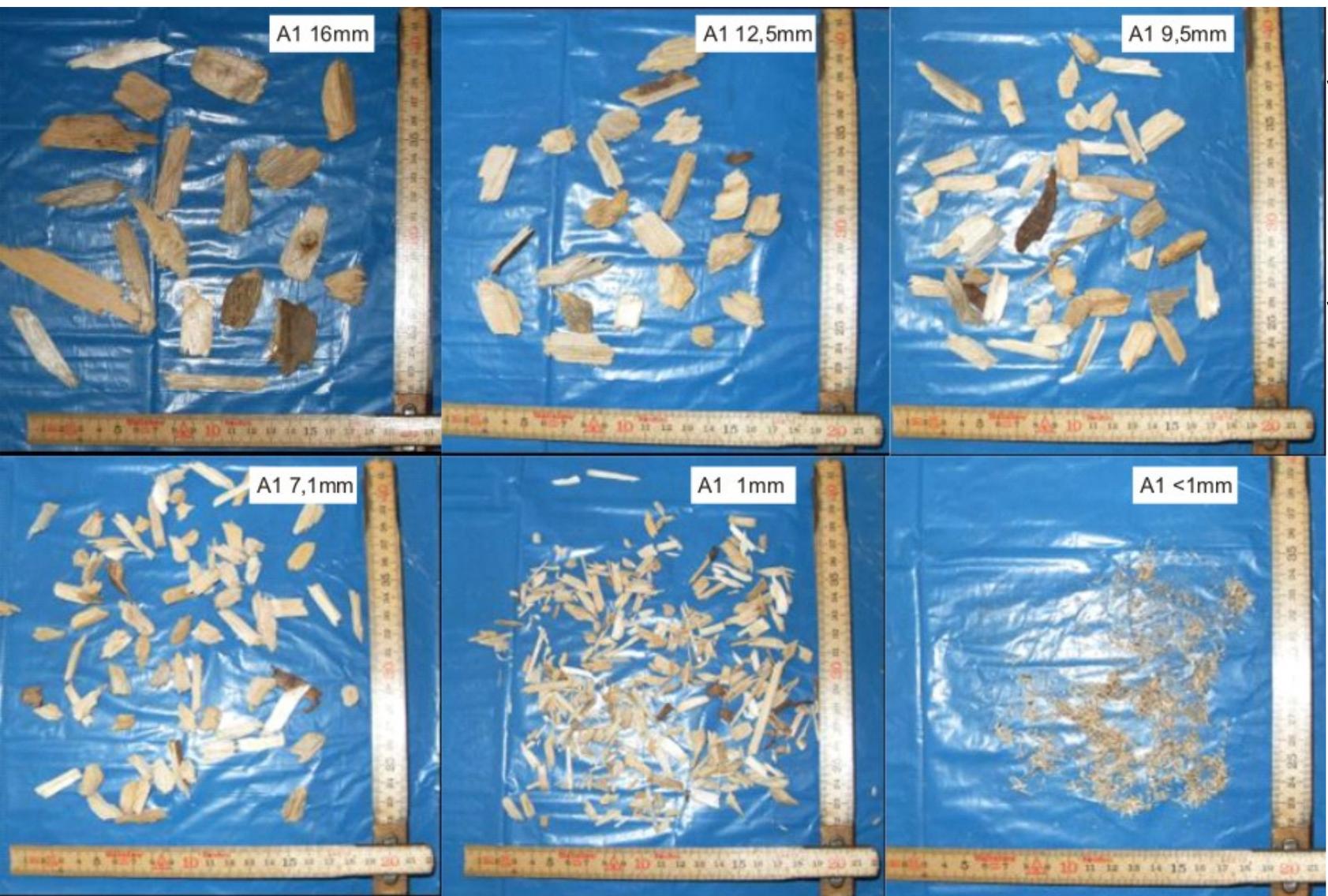


Abb. A 1: Siebrückstände des Probenmaterials A1

Tabelle A.3: Ergebnis der Trocknung der Proben B2 1-12

Probe	Leergewicht Schale	Einwaage	Auswaage 24 Std.			Auswaage 26 Std.			Masseänderung
			mit Schale	ohne Schale	Trockensubstanz	mit Schale	ohne Schale	Trockensubstanz	zw. 24h und 26h
			in g	in g	in %	in g	in g	in %	in %
B2-1	26,48	249,68	242,64	216,16	86,58	242,60	216,12	86,56	0,02
B2-2	26,95	250,08	243,09	216,14	86,43	242,99	216,04	86,39	0,05
B2-3	26,41	250,10	246,36	219,95	87,94	246,44	220,03	87,98	-0,04
B2-4	26,70	250,53	243,27	216,57	86,44	243,30	216,60	86,46	-0,01
B2-5	26,96	150,66	157,66	130,70	86,75	157,40	130,44	86,58	0,20
B2-6	26,85	150,70	157,64	130,79	86,79	157,40	130,55	86,63	0,18
B2-7	27,13	150,30	158,04	130,91	87,10	157,73	130,60	86,89	0,24
B2-8	27,26	150,15	157,56	130,30	86,78	157,35	130,09	86,64	0,16
B2-9	26,98	150,24	156,91	129,93	86,48	156,89	129,91	86,47	0,02
B2-10	26,82	150,33	156,71	129,89	86,40	156,75	129,93	86,43	-0,03
B2-11	26,84	150,72	157,01	130,17	86,37	156,99	130,15	86,35	0,02
B2-12	26,59	150,63	156,76	130,17	86,42	156,75	130,16	86,41	0,01
Mittelwert					86,71			86,65	0,07
Standartabweichung					0,45			0,44	0,10
Varianz					0,18			0,18	0,009

Tabelle A 4: Ergebnisse der Siebanalyse B2 1-12

Materialbezeichnung	B2		Laborklima	23 °C /65 %rF						
Probenmenge	12 Teilproben a 15 g		Siebmaschine	FRITSCH-Siebmaschine „analysette 3“ PRO						
Trocknungszeit	2 h +2 h		Amplitude	0,3 mm						
			Frequenz	50-60 Hz						
			Siebdauer	12 min						
Wiederholung	Einwaage in g	Siebschale	m m	7,1 m m	9,5 m m	12,5 m m	16 m m	Auswaage in g	Massenänderung in g	
Leergewicht Siebsatz in g		358,25	348,01	489,86	516,11	515,66	558,10			
B2-1	Masse mit Sieb in g		369,72	396,68	507,18	536,84	526,28	600,37		
	Masse ohne Sieb in g	150,47	11,47	48,67	17,32	20,73	10,62	42,27	151,08	
	Massenanteil in %		7,62	32,34	11,51	13,78	7,06	28,09	0,40	
B2-2	Masse mit Sieb in g		367,31	398,27	507,30	537,22	530,31	596,57		
	Masse ohne Sieb in g	150,07	9,06	50,26	17,44	21,11	14,65	38,47	150,99	
	Massenanteil in %		6,04	33,49	11,62	14,07	9,76	25,63	0,62	
B2-3	Masse mit Sieb in g		368,60	403,06	505,80	536,85	528,58	594,78		
	Masse ohne Sieb in g	150,41	10,35	55,05	15,94	20,74	12,92	36,68	151,68	
	Massenanteil in %		6,88	36,60	10,60	13,79	8,59	24,39	0,84	
B2-4	Masse mit Sieb in g		364,24	392,43	506,77	539,22	533,16	601,03		
	Masse ohne Sieb in g	150,85	5,99	44,42	16,91	23,11	17,50	42,93	150,86	
	Massenanteil in %		3,97	29,45	11,21	15,32	11,60	28,46	0,01	
B2-5	Masse mit Sieb in g		363,67	393,71	505,46	537,71	526,76	589,45		
	Masse ohne Sieb in g	130,38	5,42	45,70	15,60	21,60	11,10	31,35	125,35	
	Massenanteil in %		4,16	35,05	11,97	16,57	8,51	24,05	-3,86	
B2-6	Masse mit Sieb in g		364,28	393,24	504,51	534,14	527,60	592,35		
	Masse ohne Sieb in g	129,89	6,03	45,23	14,65	18,03	11,94	34,25	130,13	
	Massenanteil in %		4,64	34,82	11,28	13,88	9,19	26,37	0,18	
B2-7	Masse mit Sieb in g		379,83	404,85	506,74	529,71	521,50	574,00		
	Masse ohne Sieb in g	130,22	21,58	56,84	16,88	13,60	5,84	15,90	130,64	
	Massenanteil in %		16,57	43,65	12,96	10,44	4,48	12,21	0,32	
B2-8	Masse mit Sieb in g		367,05	399,51	510,10	535,29	530,18	574,21		
	Masse ohne Sieb in g	129,98	8,80	51,50	20,24	19,18	14,52	16,11	130,35	
	Massenanteil in %		6,77	39,62	15,57	14,76	11,17	12,39	0,28	
B2-9	Masse mit Sieb in g		365,85	399,69	505,63	533,33	526,54	585,83		
	Masse ohne Sieb in g	130,52	7,60	51,68	15,77	17,22	10,88	27,73	130,88	
	Massenanteil in %		5,82	39,60	12,08	13,19	8,34	21,25	0,28	
B2-10	Masse mit Sieb in g		371,07	408,54	510,16	537,63	524,77	564,71		
	Masse ohne Sieb in g	130,43	12,82	60,53	20,30	21,52	9,11	6,61	130,89	
	Massenanteil in %		9,83	46,41	15,56	16,50	6,98	5,07	0,35	
B2-11	Masse mit Sieb in g		362,56	390,40	509,53	534,32	529,16	590,84		
	Masse ohne Sieb in g	130,82	4,31	42,39	19,67	18,21	13,50	32,74	130,82	
	Massenanteil in %		3,29	32,40	15,04	13,92	10,32	25,03	0,00	
B2-12	Masse mit Sieb in g		362,35	385,07	508,39	535,32	532,90	593,01		
	Masse ohne Sieb in g	131,35	4,10	37,06	18,53	19,21	17,24	34,91	131,05	
	Massenanteil in %		3,12	28,21	14,11	14,63	13,13	26,58	-0,23	
Mittelwert in g		137,12	8,96	49,11	17,44	19,52	12,49	30,00	137,06	
Mittelwert in %			6,56	35,97	12,79	14,24	9,09	21,63	-0,07	
Standartabweichung			3,71	5,49	1,81	1,60	2,33	7,54	1,23	
Varianz			12,64	27,64	3,00	2,36	4,98	52,07	1,38	



Abb. A 2: Siebrückstände des Probenmaterials B2

Tabelle A 5: Ergebnis der Trocknung der Proben B3 1-12

Probe	Leergewicht Schale	Einwaage	Auswaage 24 Std.			Auswaage 26 Std.			Masseänderung
			mit Schale	ohne Schale	Trockensubstanz	mit Schale	ohne Schale	Trockensubstanz	zw. 24h und 26h
			in g	in g	in %	in g	in g	in %	in %
B3-1	26,68	250,07	246,58	219,90	87,93	246,66	219,98	87,97	-0,04
B3-2	26,88	250,04	246,96	220,08	88,02	247,12	220,24	88,08	-0,07
B3-3	22,52	250,17	242,43	219,91	87,90	242,50	219,98	87,93	-0,03
B3-4	22,05	250,18	244,93	222,88	89,09	245,04	222,99	89,13	-0,05
B3-5	27,32	150,06	136,50	109,18	72,76	135,80	108,48	72,29	0,65
B3-6	26,98	150,45	160,65	133,67	88,85	159,96	132,98	88,39	0,52
B3-7	22,93	150,38	156,49	133,56	88,82	155,76	132,83	88,33	0,55
B3-8	22,90	150,53	156,51	133,61	88,76	155,86	132,96	88,33	0,49
B3-9	26,60	150,34	159,54	132,94	88,43	159,44	132,84	88,36	0,08
B3-10	26,60	150,59	159,57	132,97	88,30	159,55	132,95	88,29	0,02
B3-11	22,47	150,57	155,36	132,89	88,26	155,33	132,86	88,24	0,02
B3-12	22,44	150,73	155,73	133,29	88,43	155,71	133,27	88,42	0,02
Mittelwert					87,13			86,98	0,18
Standartabweichung					4,54			4,64	0,28
Varianz					18,91			19,70	0,072

Tabelle A 6: Ergebnis der Siebanalyse B3 1-12

Materialbezeichnung	B3		Laborklima	23 °C /65 %rF						
Probenmenge	12 Teilproben a 15 g		Siebmaschine	FRITSCHE-Siebmaschine „analysette 3“ PRO						
Trocknungszeit	2 h +2 h		Amplitude	0,3 mm						
			Frequenz	50-60 Hz						
			Siebdauer	12 min						
Wiederholung	Einwaage in g	Siebschale	m m	7,1 m m	9,5 m m	12,5 m m	16 m m	Auswaage in g	Massenänderung in g	
Leergewicht Siebsatz in g		358,25	348,01	489,86	516,11	515,66	558,10			
B3-1	Masse mit Sieb in g	361,07	419,60	515,08	557,53	521,06	562,69			
	Masse ohne Sieb in g	150,21	2,82	71,59	25,22	41,42	5,40	4,59	151,04	0,83
	Massenanteil in %		1,88	47,66	16,79	27,57	3,59	3,06	0,55	
B3-2	Masse mit Sieb in g	362,31	423,12	517,42	548,51	521,18	563,87			
	Masse ohne Sieb in g	150,40	4,06	75,11	27,56	32,40	5,52	5,77	150,42	0,02
	Massenanteil in %		2,70	49,94	18,32	21,54	3,67	3,84	0,01	
B3-3	Masse mit Sieb in g	361,09	412,92	528,39	547,93	525,81	561,24			
	Masse ohne Sieb in g	150,28	2,84	64,91	38,53	31,82	10,15	3,14	151,39	1,11
	Massenanteil in %		1,89	43,19	25,64	21,17	6,75	2,09	0,74	
B3-4	Masse mit Sieb in g	359,70	414,74	514,86	566,16	522,33	559,45			
	Masse ohne Sieb in g	150,69	1,45	66,73	25,00	50,05	6,67	1,35	151,25	0,57
	Massenanteil in %		0,96	44,28	16,59	33,21	4,43	0,90	0,37	
B3-5	Masse mit Sieb in g	360,48	408,21	512,94	535,64	518,81	558,53			
	Masse ohne Sieb in g	108,30	2,23	60,20	23,08	19,53	3,15	0,43	106,39	-1,91
	Massenanteil in %		2,06	55,59	21,31	18,03	2,91	0,40	-1,76	
B3-6	Masse mit Sieb in g	366,29	423,18	516,36	533,20	521,45	558,85			
	Masse ohne Sieb in g	132,87	8,04	75,17	26,50	17,09	5,79	0,75	133,34	0,47
	Massenanteil in %		6,05	56,57	19,94	12,86	4,36	0,56	0,35	
B3-7	Masse mit Sieb in g	365,06	423,28	519,34	532,00	518,67	560,66			
	Masse ohne Sieb in g	132,65	6,81	75,27	29,48	15,89	3,01	2,56	133,02	0,37
	Massenanteil in %		5,13	56,74	22,22	11,98	2,27	1,93	0,28	
B3-8	Masse mit Sieb in g	360,84	413,47	525,53	537,65	522,96	558,75			
	Masse ohne Sieb in g	132,87	2,59	65,46	35,67	21,54	7,30	0,65	133,21	0,34
	Massenanteil in %		1,95	49,27	26,85	16,21	5,49	0,49	0,26	
B3-9	Masse mit Sieb in g	365,18	428,75	518,72	529,76	518,21	559,57			
	Masse ohne Sieb in g	133,30	4,11	80,74	28,86	13,65	2,55	1,47	131,38	-1,92
	Massenanteil in %		3,08	60,57	21,65	10,24	1,91	1,10	-1,44	
B3-10	Masse mit Sieb in g	367,25	423,88	515,49	533,82	519,63	559,57			
	Masse ohne Sieb in g	133,31	9,00	75,87	25,63	17,71	3,97	1,47	133,65	0,34
	Massenanteil in %		6,75	56,91	19,23	13,28	2,98	1,10	0,26	
B3-11	Masse mit Sieb in g	362,46	426,36	516,95	535,48	519,65	558,49			
	Masse ohne Sieb in g	133,58	4,21	78,35	27,09	19,37	3,99	0,39	133,40	-0,18
	Massenanteil in %		3,15	58,65	20,28	14,50	2,99	0,29	-0,13	
B3-12	Masse mit Sieb in g	364,31	425,59	518,86	530,72	519,91	560,70			
	Masse ohne Sieb in g	134,42	6,06	77,58	29,00	14,61	4,25	2,60	134,10	-0,32
	Massenanteil in %		4,51	57,71	21,57	10,87	3,16	1,93	-0,24	
Mittelwert in g		138,53	4,52	72,25	28,47	24,59	5,15	2,10	136,88	0,22
Mittelwert in %			3,34	53,09	20,87	17,62	3,71	1,47	-0,06	
Standartabweichung			1,85	5,91	3,12	7,11	1,37	1,12	0,77	
Varianz			3,13	32,01	8,91	46,29	1,73	1,15	0,55	

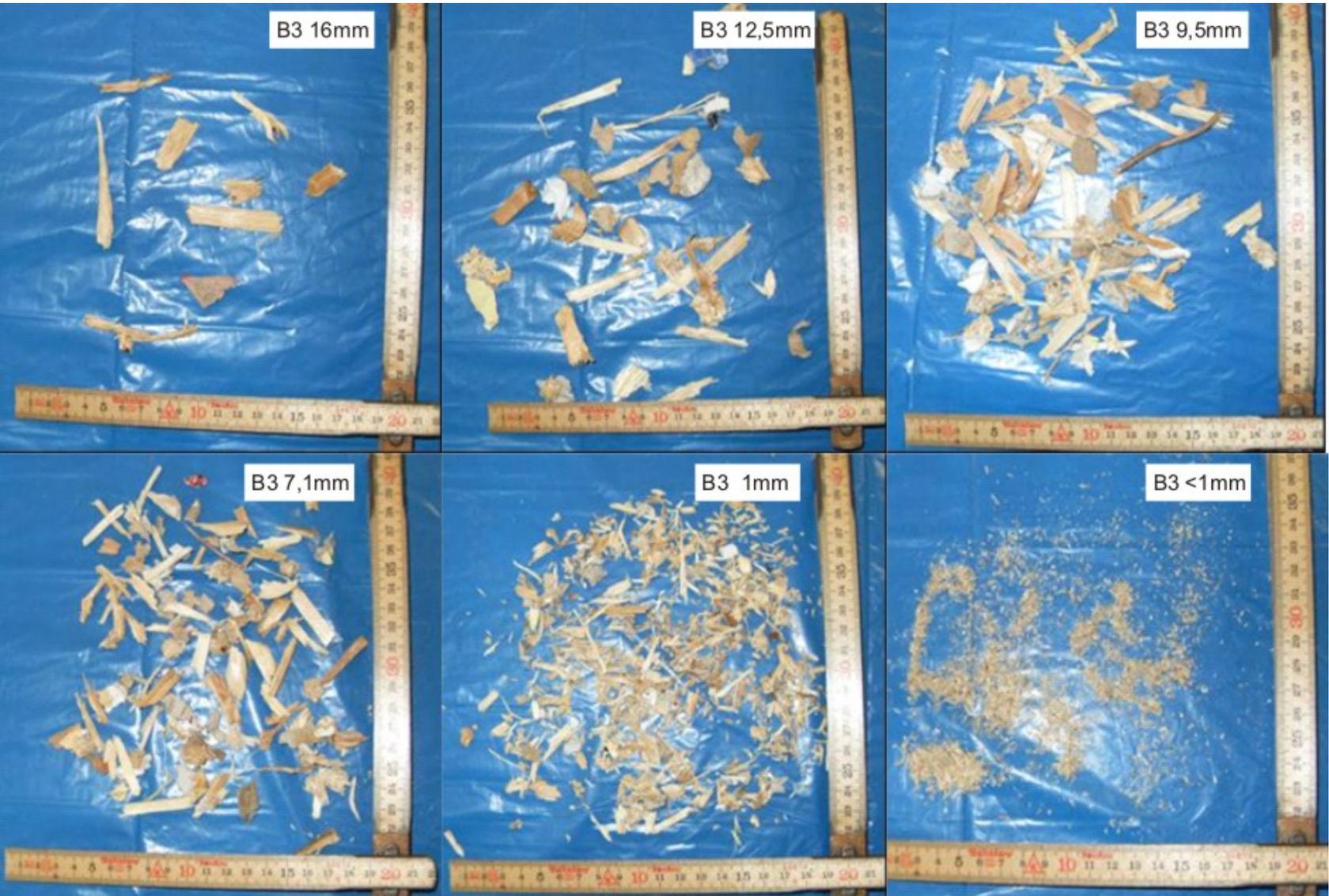


Abb. A 3: Siebrückstände des Probenmaterials B3

Tabelle A 7: Zusammenstellung möglicher Fehler bei der Durchführung der Gesamtmethode

Arbeitsschritt	Fehler	Bewertung des Fehlers	Begründung/ Vermeidung
Probenahme			
Abgrenzung und Volumenbestimmung der Grundmenge	Falsche bzw. ungenaue Volumenbestimmung	-	<ul style="list-style-type: none"> • nur 3 Volumenklassen für Bestimmung Segmentanzahl bzw. Probeanzahl, • Wahrscheinlichkeit der Einteilung in falsche Volumenklasse auf Grund ungenauer Volumenbestimmung gering • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung Personal • durch gute Vorbereitung der Probenahme (Nutzung Datenblätter) kann Personal unterstützt werden
	fehlerhafte Abgrenzung der Grundmenge	+ +	<ul style="list-style-type: none"> • führt zu nicht repräsentativen Mischproben und zur falschen Interpretation der Siebanalysen • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals
Anzahl und Verteilung der Entnahmestellen	Falsche Entnahmehöhe der Proben	0	<ul style="list-style-type: none"> • kann ggf. Zusammensetzung der Mischprobe beeinflussen • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals
	Falsche Anzahl bzw. falsche Verteilung der Entnahmestellen (Falsche Segmentierung)	+	<ul style="list-style-type: none"> • Beeinflusst die Zusammensetzung der Mischprobe Schulung des Personals • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals • durch gute Vorbereitung der Probenahme (Nutzung Datenblätter) kann Personal unterstützt werden
Größe und Entnahme der Einzelproben	Falsche Menge der Einzelprobe	-	<ul style="list-style-type: none"> • kann ggf. Zusammensetzung der Mischprobe beeinflussen • geringe Wahrscheinlichkeit durch Nutzung von Probenahmegefäß entsprechend Methodenvorschlag • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals und Einsatz Probenahmegefäß

Probenvorbereitung			
Sichten	Falsches Sichten (z.B. keine Entfernung von Störstoffen)	0	<ul style="list-style-type: none"> • Störstoffe können Folgeschritte (Mischen, Teilen, Sieben) ggf. beeinflussen • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals
Teilen	Falsches Teilen durch ungeeignete Alternativmethode	++	<ul style="list-style-type: none"> • führt zu nicht repräsentativen Mischproben und zur falschen Interpretation der Siebanalysen bzw. nicht mit anderen Untersuchungen vergleichbaren Ergebnissen • Vermeidbarer Fehler durch Nutzung des vorgeschlagenen Verfahrens • Evtl. konkrete Vorgabe von möglichen Alternativmethoden
	Ungenaueres Teilen	++	<ul style="list-style-type: none"> • führt zu nicht repräsentativen Mischproben und zur falschen Interpretation der Siebanalysen bzw. nicht mit anderen Untersuchungen vergleichbaren Ergebnissen • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals
Siebmenge	Zu geringe bzw. zu große Siebmenge ($\neq 3000\text{cm}^3$)	0	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss auf Siebergebnis gering, da nicht der absolute Wert sondern der Massenanteil bestimmt wird • je geringer die Siebmenge desto größer ist möglicher Einfluss der Messunsicherheit der Waage • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals • Vorteilhaft scheint Vorgabe einer Mindestmasse die sich an der max. Schüttdichte der Hackschnitzel orientiert
Trocknung	Ungenügende Trocknung des Probematerials	++	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Anhaftung der kleinen Partikel und damit Behinderung der Absiebung • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals • Abbruchkriterium der Trocknung (entsprechend DIN EN 12880) beachten

Siebung			
Maschinen-einstellung	Falsche Maschineneinstellung (Amplitude)	+	<ul style="list-style-type: none"> • evtl. Auswirkung auf Siebergebnis dadurch das sich die Holzpartikel springend über Siebboden bewegen (Einfluss schlecht abschätzbar) • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals • Vorschlag zur Festlegung einer konkreten Amplitude von 0,3mm • Evtl. Vergleich unterschiedlicher Siebgeräte notwendig
Siebsatz	Überlastung der Siebe durch falsche Siebwahl bzw. zu große Analysemenge	+	<ul style="list-style-type: none"> • evtl. Auswirkung auf Siebergebnis (ungenügende Absiebung) • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals • Vorschlag zur Festlegung eines konkreten Siebsatzes, der für die Mehrzahl der Analyseproben relevant ist • Vorschlag zur Festlegung einer konkreten Siebmenge in Abhängigkeit vom Siebdurchmesser
Siebzeit	zu geringe Siebzeit	++	<ul style="list-style-type: none"> • Unvollständige Siebung und damit Verfälschung des Ergebnisses • Vermeidbarer Fehler durch Einweisung des Personals • Vorschlag zur Festlegung einer konkreten, ausreichend lange Siebzeit (z.B. 12 Minute) für eine vollständig abgeschlossen Siebvorgang sowie eines Abbruchkriteriums
Siebanalyse	Statische Aufladungen der Siebe und Feinteile	(++)	<ul style="list-style-type: none"> • Evtl. unvollständige Siebung, da durch die statische Aufladung der Siebe und Teilchen der Feinstaub nicht abgesiebt wird • Nicht zu vermeidender Fehler • Möglicher Einfluss nicht genau bestimmbar, da diesbezüglichen keine vorliegenden Untersuchungen

+ + = sehr hoher Einfluss auf das Ergebnis der Siebanalyse

+ = hoher Einfluss auf das Ergebnis der Siebanalyse

o = geringer Einfluss auf das Ergebnis der Siebanalyse

- = kein Einfluss auf das Ergebnis der Siebanalyse