



Verbesserung der Überwachung von Holzabfällen im  
Kanton Zürich -  
Anforderungen an Probenahme und Sortierung

**Diplomarbeit**

Zum Erlangen des akademischen Grades

**DIPLOMINGENIEUR  
(Dipl.-Ing.)**

im Studiengang Abfallwirtschaft und Altlasten

Vorgelegt von: Tom Hofmann

Matrikel-Nr.: 3245983

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr. Rudolf Liedl

Betreuer TU Dresden: Dr. Daniel Schingnitz

Betreuer AWEL: Dr. Elmar Kuhn

Beat Hürlimann

Dresden, 05. Mai 2013



## **Aufgabenstellung für die Diplomarbeit**

**Diplomand:** Tom Hofmann **geb.:** 21.08.1985

**Thema:** **Verbesserung der Überwachung von Holzabfällen im Kanton Zürich – Anforderungen an Probenahme und Sortierung**

Holzabfälle werden im Kanton Zürich aktuell von 30 Bauabfallanlagen entgegengenommen, sortiert und in 11 Betrieben geshreddert. Hierbei können die notwendigen Qualitätsanforderungen für die stoffliche sowie thermische Verwertung nicht immer eingehalten werden. Ziel der Arbeit ist die Validierung eines praxisgerechten Probenahmeverfahrens mit optischer Sortieranalyse für Altholz (PIOSA) sowie die Erarbeitung einer „Anleitung für Bauabfallanlagen zur Qualitätsverbesserung der Holzabfälle“. Zudem soll eine Methode zur Selbstkontrolle des Shreddermaterials durch den Betrieb basierend auf optischen Grundsätzen entwickelt und geprüft werden. Die Vollzugserfahrungen von Österreich und Deutschland sind bei den Untersuchungen einzubeziehen.

**Zielstellung:**

**Betreuer:** Dr.-Ing. Daniel Schingnitz TU Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten

Dr. Elmar Kuhn,  
Beat Hürlimann Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich

**Ausgehändigt am:** 05.11.2012

**Einzureichen bis:** 05.05.2013 Prof. Dr. Rudolf Liedl

**Verantwortlicher  
Hochschullehrer**

## **Anlage zur Aufgabenstellung für die Diplomarbeit von Herrn Hofmann**

### ***Detaillierte Aufgabenstellung***

Um die Aufgabe zu realisieren, sollen die folgenden Schwerpunkte betrachtet werden:

- Literaturrecherche zu Erfahrungen in Österreich und Deutschland im Rahmen der Probenahme, Analytik und Vollzug von Altholz,
- Darstellung des Altholzaufkommens sowie dessen Charakterisierung für den Kanton Zürich,
- Wissenschaftliche Validierung des neuen Probenahmeverfahrens für Altholz und Gegenüberstellung zur bisherigen „BAFU-Methode“,
- Untersuchung geeigneter Sortier- und Kontrollverfahren für Altholz hinsichtlich optischer Eigenschaften, Herkunft sowie Praxistauglichkeit,
- Ausarbeitung einer „Anleitung zur Altholzcharakterisierung für Bauabfallanlagen“ sowie
- Methodenentwicklung und -prüfung zur Selbstkontrolle des Shreddermaterials durch den Betrieb basierend auf optischen Grundsätzen.

### ***Organisatorisches***

Organisatorisches wird im Fortgang der Arbeit in Abstimmung mit dem Diplomanden konkretisiert. Die Darstellungen und Untersuchungen sind in ihrem Umfang in Abhängigkeit von der zeitlichen Begrenzung der Arbeit so festzulegen, dass ein abgerundetes Ergebnis vorliegt. Die textliche Abfassung ist konsequent in neuer deutscher Rechtschreibung auszuführen. Die Arbeit ist (unbeschadet weiterer Exemplare, die mit den Betreuern vereinbart werden) in zweifacher Ausfertigung bei der TU Dresden einzureichen.

Zusätzlich sind der Diplomarbeit folgende Ergänzungen beizulegen: eine CD im Dateiformat, Autorenreferat inkl. 1 Passfoto im JPG-Format, Schlagwörter sowie ein Poster. Die Ergebnisse der Arbeit sind in Thesen zusammenzufassen. Der Arbeit ist ein Poster mit den Außenmaßen H = 100 cm, B = 70 cm beizufügen. Während der Bearbeitung sind Konsultationen mit den Betreuern unerlässlich. Die Abschlussverteidigung erfolgt nach Vereinbarung.



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern beim AWEL, Abteilung Abfallwirtschaft und Betriebe Beat Hürlimann und Elmar Kuhn für die Betreuung und das Gelingen meiner Diplomarbeit bedanken. Ich schätze die freundliche Aufnahme durch sie in der Schweiz, den fachlichen Austausch und die Zusammenarbeit sehr.

Mein Dank gilt ebenfalls meinem Betreuer der TU Dresden Daniel Schingnitz vom Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten für die fachliche und administrative Betreuung meiner Arbeit.

Ebenso gilt mein Dank Dr. Rainer Schrägle, Technologica GmbH für die fachliche Unterstützung und die Zusammenarbeit sowie hilfreichen Hinweise während der Durchführung des Projektes.

Für den Fachaustausch, die Zusammenarbeit und die zahlreichen Anregungen möchte ich mich bei Reto Murer von der Biorec AG, Stefan Skutan, Stefan Rubli und besonders bei Rolf Gloor und Michael Aegerter, Bachema AG bedanken.

Ich möchte mich bei meinen Eltern für die Unterstützung während des Studiums und der Bearbeitung meiner Diplomarbeit bedanken. Sie standen stets hinter mir und haben mir diesen Weg finanziell ermöglicht.

Mein abschließender Dank gilt meiner Freundin Marina, die mich während dieser anstrengenden Zeit unterstützt und motiviert hat.

## **Kurzfassung**

Ziel dieser Arbeit ist Untersuchung einer neuen praxisgerechten Methode der Probenahme von Holzabfällen im Vergleich zur bisher etablierten Methode nach der Vollzugshilfe für die umweltverträgliche Verwertung von Holzabfällen des Bundesamtes für Umwelt. Weiterhin soll untersucht werden, ob auf Grundlage der Ergebnisse einer optischen Sortieranalyse von Holzabfällen Aussagen über die Schadstoffbelastung gemacht werden können.

Für diese Aufgabenstellung wurden Versuche an einem künstlich hergestellten Haufwerk aus Holzabfällen durchgeführt und ausgewertet. Zusätzlich erfolgte die Datenauswertung von Untersuchungen von Holzabfällen, um Szenarien zu erstellen die Rückschlüsse auf die Schadstoffbelastung zulassen.

Mit der Arbeit wird gezeigt, dass die neue Probenahmemethode von Holzabfällen, bei der manuell 16 Einzelproben entnommen werden, gleichwertige und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Weiterhin ist die Sortieranalyse ein hilfreiches Instrument zur Bestimmung der Zusammensetzung einer Probe aus Holzabfall darstellt. Mit Hilfe der erstellten Szenarien kann mit der Probenzusammensetzung eine Aussage über die potenzielle Schadstoffbelastung getroffen werden.

## **Abstract**

...Übersetzung folgt noch Überarbeitung/Korrektur

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XII
Abkürzungsverzeichnis.....	XIV
1 Einleitung .....	1
2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	2
3 Rahmenbedingungen und Ausgangssituation .....	3
3.1 Rechtliche Regelungen .....	3
3.2 Einteilung der Holzabfälle.....	4
3.3 Ausgangssituation .....	6
3.3.1 Entsorgungswege und Altholzaufkommen .....	6
3.3.2 Qualitätskontrolle von Holzabfällen.....	7
3.3.3 Qualität des verwerteten Altholzes.....	8
3.3.4 Altholzverwertung in Deutschland.....	10
3.3.5 Altholzverwertung in Österreich .....	12
3.4 Probenahme von Holzabfällen .....	14
3.4.1 Bestehende Probenahmeverfahren .....	14
3.4.2 Probenahmemethode für Holzabfälle in Anlehnung an die LAGA PN 98 ..	15
3.5 Zuordnungskontrolle von Holzabfällen .....	18
4 Material und Methoden .....	20
4.1 Versuchsaufbau .....	20
4.2 Vorversuche .....	21
4.2.1 Sortieranalyse .....	21
4.2.2 Probenteilung .....	21
4.3 Material.....	22
4.4 Probenahmen.....	28
4.4.1 Probenahmemethode gemäss Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU.....	29
4.4.2 Probenahmemethode ASPE .....	30
4.5 Siebung und Sortierung.....	30

4.5.1	Durchführung Siebung .....	31
4.5.2	Durchführung optische Sortieranalyse .....	31
4.6	Probenaufbereitung für Laboranalysen .....	36
4.7	Chemische Laboranalysen .....	38
5	Ergebnisse und Auswertung .....	42
5.1	Vorversuche .....	42
5.1.1	Sortieranalyse .....	42
5.1.2	Teilungsverfahren .....	45
5.2	Versuchsvorbereitung .....	49
5.3	Vergleich Probenahemethoden .....	50
5.3.1	Siebung der Proben .....	50
5.3.2	Sortieranalysen der Proben .....	52
5.3.3	Laboranalysen der Proben .....	54
6	Szenarientest für maximal tolerierbare Fraktionsanteile .....	59
6.1	Vorgehen für die Erstellung der Szenarien .....	59
6.2	Ergebnisse .....	60
6.3	Plausibilitätstest .....	64
7	Handlungsbedarf und Perspektiven .....	68
7.1	Handlungsbedarf .....	68
7.2	Perspektiven .....	68
7.2.1	Qualitätssicherung für die Altholzverwertung .....	68
7.3	Annahme-Strategien .....	70
8	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	72
8.1	Schlussfolgerungen .....	72
8.2	Ausblick .....	73
	Literaturverzeichnis .....	74
	Eidesstattliche Erklärung .....	77
	Anhang .....	74



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Recyclingfaktor in Abhängigkeit von Recyclingholzanteil (Vgl. [16], S.9)	13
Abbildung 2: Ablauf Probenahme ASPE in Anlehnung an LAGA PN 98 (eigene Darstellung) .....	18
Abbildung 3: Schema Versuchsaufbau (eigene Darstellung) .....	20
Abbildung 4: Voruntersuchung Sortieranalyse (eigene Darstellung) .....	21
Abbildung 5: Fraktionierendes Schaufeln (eigene Darstellung).....	22
Abbildung 6: Aufkegeln und Vierteln (eigene Darstellung) .....	22
Abbildung 7: Paletten/Einwegpaletten (1) (eigene Darstellung) .....	23
Abbildung 8: Paletten/Einwegpaletten (2) (eigene Darstellung) .....	23
Abbildung 9: Bauschaltafeln (eigene Darstellung).....	24
Abbildung 10: Bauschalbretter (eigene Darstellung) .....	24
Abbildung 11: Verschnitt Holzwerkstoffe (eigene Darstellung).....	24
Abbildung 12: Holzwerkstoffe (eigene Darstellung).....	24
Abbildung 13: Fremdstoffe an beschichteten Holzwerkstoffen (eigene Darstellung) ...	25
Abbildung 14: Beschichtete Holzwerkstoffe (eigene Darstellung) .....	25
Abbildung 15: Bahnschwellen, Brandholz (eigene Darstellung) .....	25
Abbildung 16: Radlader (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 17: Bagger mit Greifer (eigene Darstellung) .....	26
Abbildung 18: Mobiler Holzschredder (eigene Darstellung) .....	26
Abbildung 19: LKW mit Mulde (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 20: Probenahme Ausgangsfraction (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 21: Teilprobe Ausgangsfraction (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 22: Probenentnahme Bahnschwellen (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 23: Zweiter Schreddervorgang (eigene Darstellung) .....	27
Abbildung 24: Versuchshaufwerk 100 m <sup>3</sup> (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 25: Probenahmeharasse (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 26: Kontrolle Durchmischung (eigene Darstellung) .....	28
Abbildung 27: Gewebesäcke (eigene Darstellung).....	29

Abbildung 28: Kunststoffharassen (eigene Darstellung).....	29
Abbildung 29: Entnahme Altholz mit Greifer (eigene Darstellung) .....	29
Abbildung 30: Entnahme Probenmaterial mit Schaufel (eigene Darstellung).....	29
Abbildung 31: Probematerial BAFU 1 (eigene Darstellung) .....	30
Abbildung 32: Haufwerk mit Schürfschlitz (eigene Darstellung).....	30
Abbildung 33: Manuelle Entnahme Einzelprobe (eigene Darstellung) .....	30
Abbildung 34: Siebharassen (eigene Darstellung) .....	31
Abbildung 35: Sortierung (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 36: Fraktionen nach Sortieranalyse (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 37: Ablaufschema Probenaufbereitung (eigene Darstellung).....	36
Abbildung 38: Industrieschredder (eigene Darstellung).....	37
Abbildung 39: Schneidsieb 10 mm Industrieschredder (eigene Darstellung) .....	37
Abbildung 40: Riffelprobenteiler groß (eigene Darstellung).....	37
Abbildung 41: Retsch Laborschneidmühle (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 42: Lochsiebe Laborschneidmühle (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 43: Riffelprobenteiler klein (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 44: Mahlbehälter Kugelmühle (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 45: ICPMS für Schwermetalle (eigene Darstellung) .....	39
Abbildung 46: ICPOES für Schwermetalle (eigene Darstellung) .....	39
Abbildung 47: Hg-Analysator AMA254 (eigene Darstellung).....	39
Abbildung 48: GC-ECD für PCP-Analyse (eigene Darstellung).....	39
Abbildung 49: Soxtherm für Extraktion PAK (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 50: GC-MS für PAK (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 51: Cl-Analysator ECS1200 (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 52: Ionenselektive Elektrode für Fluor-Messung (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 53: IC für Chlorid-Messung (eigene Darstellung) .....	41
Abbildung 54: Ergebnisse Voruntersuchung Sortieranalyse normiert (eigene Darstellung) .....	43
Abbildung 55: Ergebnisse Voruntersuchung Sortieranalyse (eigene Darstellung).....	44

Abbildung 56: Ergebnisse Voruntersuchung Teilungsverfahren (wahrer Wert) (eigene Darstellung) .....	46
Abbildung 57: Ergebnisse Voruntersuchung Teilungsverfahren (absolut) (eigene Darstellung) .....	47
Abbildung 58: Ergebnisse Vorversuch Teilungsverfahren, Aufkegeln und Vierteln (eigene Darstellung) .....	47
Abbildung 59: Ergebnisse Vorversuch Teilungsverfahren, fraktionierendes Schaufeln (eigene Darstellung) .....	48
Abbildung 60: Ergebnisse Siebung (eigene Darstellung) .....	51
Abbildung 61: Ergebnisse Sortieranalyse (eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 62: Ergebnisse Sortieranalyse, ohne Fraktionen Feinanteil und Fremdstoffe (eigene Darstellung) .....	53
Abbildung 63: Ergebnisse Laboranalysen (eigene Darstellung).....	55
Abbildung 64: Ergebnisse Laboranalysen, Vergleich Modellierung (eigene Darstellung) .....	56
Abbildung 65: Anteil problematisches Holz – Schadstoffgehalt Chrom (eigene Darstellung) .....	61
Abbildung 66: Plausibilitätstest Probe 1 stoffliche Verwertung (eigene Darstellung) ...	65
Abbildung 67: Plausibilitätstest Probe 1 thermische Verwertung (eigene Darstellung)	65
Abbildung 68: Vorschlag Beurteilung Sortieranalyse, stoffliche Verwertung problematisches Holz (eigene Darstellung).....	69
Abbildung 69: Vorschlag Beurteilung Sortieranalyse, thermische Verwertung problematisches Holz (eigene Darstellung).....	69
Abbildung 70: Beurteilungsschema maximal tolerierbare Fraktionsanteile (eigene Darstellung) .....	70

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Einteilung Holzkategorien (Vgl. Anhang 1 [8], S.4).....	5
Tabelle 2: Statistik Verwertung Holzabfälle 2008 (Vgl. [11], S.29, Vgl. [12], S.5).....	7
Tabelle 3: Richtwerte Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU (Vgl. [7]) .....	8
Tabelle 4: Analysenresultate Altholzbelastung, AWEL Kanton Zürich 2012 (nach [10], S.50 f).....	9
Tabelle 5: Grenzwerte Deutschland/Richtwerte Schweiz (Vgl. [14], Anhang 2, Vgl. [7]) .....	10
Tabelle 6: Anteile Verwertungswege Altholz in Deutschland 2010 (nach [15], S.13) ...	11
Tabelle 7: Vergleich Grenzwerte Österreich/Richtwerte Schweiz (Vgl. [16], Anhang 2, Vgl. [7]) .....	12
Tabelle 8: Anteil Verwertungswege Altholz in Österreich 2006 (nach [19], S.15) .....	14
Tabelle 9: Vergleich Probenahmeverfahren (Vgl. [15], S. 65) .....	15
Tabelle 10: Mindestanzahl der Proben abhängig vom Prüfvolumen (nach Tab. 2 [20], S.18).....	16
Tabelle 11: Mindestvolumen der Einzel- und Laborproben (nach Tab. 3 [20], S.20) ...	17
Tabelle 12: Anpassung Mindestvolumen/-gewicht der Proben (eigene Darstellung) ...	17
Tabelle 13: Übersicht Ausgangsfractionen Versuchshaufwerk (eigene Darstellung) ...	23
Tabelle 14: Übersicht Sortierfraktionen für optische Sortieranalyse (eigene Darstellung) .....	32
Tabelle 15: Übersicht Messtechniken, Referenzmethoden (Vgl. [27], S. 34 ff) .....	41
Tabelle 16: Korngrößenverteilung Voruntersuchung Sortieranalyse (eigene Darstellung) .....	42
Tabelle 17: Korngrößenverteilung Voruntersuchung Teilung (eigene Darstellung) ....	45
Tabelle 18: Zusammensetzung Versuchshaufwerk (eigene Darstellung) .....	49
Tabelle 19: Ergebnis Überprüfung Durchmischung (eigene Darstellung) .....	49
Tabelle 20: Allgemeiner Vergleich Probenahmeverfahren (eigene Darstellung).....	57
Tabelle 21: Szenario 1 (Mittelwerte aus Holzkampagnen) (eigene Darstellung).....	60
Tabelle 22: Szenario 2 (obere Grenze 95%-Konfidenzintervall aus Holzkampagnen) (eigene Darstellung) .....	61

Tabelle 23: tolerierbare Fraktionsanteile stoffliche Verwertung (eigene Darstellung) .. 62

Tabelle 24: tolerierbare Fraktionsanteile thermische Verwertung (eigene Darstellung) 63

**Abkürzungsverzeichnis**

AltholzV	Altholz-Verordnung
ARV	Aushub-, Rückbau- und Recycling-Verband
ASPE	Altholz-Schreddermaterial Probenahme mit 16 Einzelproben
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
BAFU	Bundesamt für Umwelt
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBS	Ersatzbrennstoff
EN	Europäische Norm
GC-ECD	Gaschromatographie mit Elektroneneinfangdetektor
GCMS	Gaschromatographie mit Massenspektrometrie
ICPMS	Induktiv gekoppeltes Plasma mit Massenspektrometrie
ICPOES	Induktiv gekoppeltes Plasma mit optischer Emissionsspektrometrie
ISO	Internationale Organisation für Normung
KVU-Ost	Konferenz der Vorsteher der Umweltämter der Ostschweiz/Fürstentum Liechtenstein
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
LVA	Liste zum Verkehr mit Abfällen
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCP	Pentachlorphenol
RecyclinholzV	Recyclingholz-Verordnung
RGR	Rauchgasreinigung
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
TVA	Technische Verordnung über Abfälle
USG	Umweltschutzgesetz

UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VBBö	Verordnung über Belastungen des Bodens
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VeVA	Verordnung über den Verkehr mit Abfällen

## 1 Einleitung

„Weil durch den Ersatz von Frischholz durch Holzabfälle Ressourcen geschont werden, ist die stoffliche Verwertung von Holzabfällen aus ökologischer Sicht sinnvoll. Eine energetische Verwertung der aus Holzabfällen hergestellten Holzwerkstoffe nach deren Verwendung ist im Sinne einer "Kaskadennutzung" immer noch möglich. In Bezug auf die umweltverträgliche Entsorgung ist wichtig, mittels einer Qualitätskontrolle zu verhindern, dass Schadstoffe aus der Beschichtung oder Imprägnierung von Altholz in Holzwerkstoffe gelangen“ (Vgl. [1]).

Vor diesem Hintergrund erfolgt die Verwertung von Holzabfällen in der Schweiz und speziell im Kanton Zürich. Zur Qualitätssicherung der Altholzverwertung werden regelmäßig Kontrollen durchgeführt, um zu überprüfen ob die Anforderungen an die Verwertungswege eingehalten werden. Diese Überprüfung soll praxisnaher und aufwandgerechter gestaltet werden. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung einer neuen Methode der Probenahme von Altholz. Diese stützt sich auf Grundlagen der deutschen Richtlinie für die Probenahme von festen und stichfesten Abfällen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), die LAGA PN 98, und ist auf die Eigenschaften von Altholz angepasst. Zusätzlich ist eine Selbstkontrolle durch die Betriebe angedacht, um intern Verbesserungsmaßnahmen zur Einhaltung der geforderten Qualität vorzunehmen.

Hieraus leiten sich verschiedene Fragestellungen ab, denen mit dieser Arbeit nachgegangen wird.

1. Ist eine repräsentative von Altholz auf eine praxisnahe und einfache Art und Weise möglich, um dennoch reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten?
2. Kann mit einer Zuordnung von zerkleinertem Altholz zu optisch differenzierbaren Fraktionen zuverlässig die Zusammensetzung von Altholzhauwerken bestimmt werden?
3. Können aufgrund der Zusammensetzung von Altholz bezogen auf die optisch differenzierbaren Fraktionen schnelle Vor-Ort-Abschätzungen zur Schadstoffbelastung vorgenommen und Rückschlüsse auf die Einhaltung der Richtwertanforderungen gezogen werden?

Diese Fragen sollen anhand der Resultate aus Versuchen an Altholz und einem künstlich hergestellten Altholzhauwerk im Folgenden beantwortet werden.



## 2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Hauptziele dieser Arbeit sind die Validierung eines neuen weniger aufwändigen Probenahmeverfahrens für Holzabfälle, die diesbezügliche Erarbeitung einer Anleitung für Abfallanlagen sowie eines betriebsinternen Kontrollinstruments zur Qualitätsbeurteilung von geschredderten Holzabfällen. Mit der Bereitstellung einer Anleitung für Abfallanlagen soll eine Verbesserung der Qualität der Holzabfälle erreicht werden, die für die stoffliche Verwertung bzw. thermische Verwertung in Anlagen ohne weitergehende Rauchgasreinigung einzuhalten ist.

Die Validierung einer neuen Methode der Probenahme von geschredderten Holzabfällen erfolgt im Vergleich zur bisher etablierten Methode gemäss der Vollzugshilfe des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) für die umweltverträgliche Entsorgung von Holzabfällen<sup>1</sup>. Die neue Probenahmemethode, **Altholz-Schreddermaterial Probenahme mit 16 Einzelproben (ASPE)**, basiert auf Grundlagen von Dr. R. Schrägle, TECHNOLOGICA GmbH. Es soll geprüft werden, ob die Probenahmemethode ASPE reproduzier- und vergleichbare Ergebnisse liefert. Von einem künstlich hergestellten Haufwerk mit bekannter Zusammensetzung werden mit den zwei genannten Methoden der Probenahme Altholzproben entnommen.

Als zweite Fragestellung wird untersucht, ob eine optische Sortieranalyse als hilfreiches Selbstkontrollinstrument in Bezug auf die Zusammensetzung des Altholzes für die holzschreddernden Betriebe eingesetzt werden kann. Voraussetzung dazu ist wiederum die Reproduzierbarkeit der Beurteilungsmethode sowie die Festlegung von Qualitätszielwerten für die optisch differenzierbaren Holzfraktionen.

Zu Beginn der Arbeit werden die Rahmenbedingungen und die Ausgangssituation der Holzverwertung in der Schweiz und im Kanton Zürich beschrieben. Im Vergleich zur Schweiz werden die Vollzugsanforderungen bei der Verwertung von Holzabfällen in Deutschland und in Österreich aufgezeigt. Im Kapitel Material und Methoden werden das Vorgehen und der Versuchsaufbau des experimentellen Teils der Arbeit sowie eingesetzte Materialien und Geräte beschrieben. In den anschliessenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt und ausgewertet. Aufbauend darauf wird dargelegt, ob die Probenahmemethode ASPE eine alternative Methode darstellt und ob optische Sortieranalysen zur Beurteilung von Holzproben einsetzbar sind.

---

<sup>1</sup> Anmerkung: nachfolgend als Vollzugshilfe Holzabfälle bezeichnet.

### **3 Rahmenbedingungen und Ausgangssituation**

#### **3.1 Rechtliche Regelungen**

Die Entsorgung von Holzabfällen ist durch verschiedene Gesetze und Verordnungen geregelt. Holzabfälle sind vorzugsweise zu verwerten oder wenigstens umweltverträglich zu entsorgen (Art. 30 Abs. 2 und 3 USG [2]). Weiterhin sind schädliche oder lästige Einwirkungen gemäß Vorsorgeprinzip (Art. 1 Abs. 1 USG [2]) zu begrenzen. Für Holzabfälle gilt nach Art. 10 TVA [3] ein Vermischungsverbot. Den Kantonen obliegt mit Art 11 TVA [3] die Pflicht zur Verbrennung nicht verwertbarer brennbarer Abfälle in geeigneten Anlagen, z.B. in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA). Die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) regelt die thermische Verwertung bzw. die Verbrennung von Holzabfällen. Holzabfälle werden nach Anhang 5 (Art. 21 und 24) Kapitel 3 LRV [4] in vier Kategorien eingeteilt und sind entsprechend der Zuordnung zu entsorgen. Die Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA) regelt den Verkehr mit Holzabfällen im In- und Ausland. Mit Art. 40 Abs. 3 VeVA [5] wird den Kantonen die Aufgabe zugeteilt die Kontrolle von Abfällen beim grenzüberschreitenden Verkehr zu unterstützen. Die Verordnung des UVEK über Listen zum Verkehr mit Abfällen (LVA) umfasst gemäß Art. 2 Abs. 1 VeVA [5] ein Abfallverzeichnis zur herkunftsbezogenen Codierung aller Abfälle. Relevante Abfall-Codes von Holzabfällen sind der Tabelle 1 im nachfolgenden Kapitel 3.2 zu entnehmen. Laut der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) sind Holzabfälle als Sekundärrohstoff für die stoffliche Verwertung für die Herstellung von Holzwerkstoffen zugelassen (Anhang 2.17 (Art. 3) Ziffer 1 Abs. 2 ChemRRV [6]). Für das Inverkehrbringen von Holzwerkstoffen schreibt die ChemRRV mit Anhang 2.17 Ziffer 2 [6] Schadstoffgrenzwerte vor. Zur Förderung einer einheitlichen Vollzugspraxis werden mit der Vollzugshilfe zur umweltverträglichen Entsorgung von Holzabfällen des BAFU [7] Entsorgungswege und Qualitätsanforderungen an Holzabfälle konkretisiert. Die Vollzugshilfe Holzabfälle stellt Anforderungen an die Entsorgung und macht Angaben zur Qualitätskontrolle von Holzabfällen. In der Vollzugshilfe werden Richtwerte für die stoffliche Verwertung und Richtwerte für die Unterscheidung problematischer Holzabfälle und nicht problematischer Holzabfälle vorgegeben. Die Vollzugshilfe Holzabfälle schlägt ein Vorgehen zur Probenahme für die Qualitätskontrolle von Holzabfällen vor. Für Teile der Schweiz liegt zudem das Faktenblatt BAU 7 der Konferenz der Vorsteher der Umweltämter der Ostschweiz/Fürstentum Liechtenstein (KVU-Ost) [8] vor. Es ist dient der Unterstützung des Vollzugs beim Umgang mit Holzabfällen.

### 3.2 Einteilung der Holzabfälle

In der Schweiz werden Holzabfälle gemäss der LRV [4] und der LVA [9] in vier Kategorien eingeteilt. Die Einteilung berücksichtigt die Herkunft, den ehemaligen Verwendungszweck sowie die Qualität der Holzabfälle. Folgende vier Holzkategorien werden genannt:

- a) *Naturbelassenes Holz* = Holzabfälle aus der Bearbeitung von sauberem naturbelassenem oder lediglich mechanisch bearbeitetem Massivholz/Vollholz, d.h. Holz, das weder bemalt, beschichtet, verleimt, behandelt noch in anderer Weise belastet ist (z.B. Holzabfälle aus Sägereien).
- b) *Restholz* = Holzabfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten und Möbeln, die unbehandelt und unbeschichtet sind (z.B. Spanplattenabschnitte, Verschnitte, Schleifstaub).
- c) *Altholz* = Gebrauchtes oder behandeltes Holz, das nicht unter problematische Holzabfälle fällt.
- d) *Problematische Holzabfälle* = Gebrauchtes und ungebrauchtes Holz, das halogenorganisch (mit Polyvinylchlorid (PVC)) beschichtet ist, mit Pentachlorphenol (PCP) behandelt wurde oder einer Tiefenbehandlung (Druckimprägnierung) mit Holzschutzmitteln unterzogen wurde.

Die nachfolgende Tabelle 1 gemäss Faktenblatt BAU 7 der KVV-Ost [8] zeigt eine Übersicht der vier Holzabfallkategorien. In der Tabelle werden den Kategorien Abfall-Codes (VeVA-Codes) zugeordnet, und Angaben zur Herkunft, eine Bezeichnung nach LVA sowie eine Beschreibung mit Beispielen gemacht. Es werden weiterhin zugelassene Verwertungswege genannt, die Holzklassen A I bis A IV entsprechend der deutschen Altholzverordnung zugeordnet und ein Bezug zur LRV hergestellt.

Tabelle 1: Einteilung Holzkategorien (Vgl. Anhang 1 [8], S.4)

Holzkategorie (nach abnehmender Schadstoffbelastung sortiert)	Abfall-Code	Bezeichnung nach LVA	Herkunft	Beschreibung und Beispiele	Zugelassene Nutzungs-/ Verwertungsart	Bezug zu Definitionen und Anlagen bzw. Feuerungen der LRV	Holzklasse gem. AltholzV DE
<b>Problematische Holzabfälle</b> <sup>1)</sup>	17 02 98 [ak]  19 12 06 [ak]	Holzabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten (problematische Holzabfälle)  Holzabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten (problematische Holzabfälle)	Bauabfälle (Bauteile, Abbrüche, Renovationen und Umbauten)  Altholz aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (Abfallbehandlungsanlagen)	Holzabfälle, die druckimpfärgniert oder mit halogenorganischen Verbindungen (PVC) beschichtet sind, intensiv mit Pentachlorphenol behandelt wurden oder aus dem Aussenbereich stammen (z.B. Dachwerk, Fenster, Fassadenbreiter, Aussentüren, Zäune, Parkbänke, Holzbrücken, Telefonstangen oder Eisenbahnschwellen sowie Verschnitte und Schleifstaub), oder Gemische davon	energetisch <sup>3, 9)</sup>	Stoffe aus Holz gemäss Anh 5 Ziff 31 Abs 2 Bst b LRV / Anlagen zum Verbrennen von Siedlungs- und Sonderabfällen (Anh 2 Ziff 71 LRV)	A IV <sup>4)</sup>
<b>Altholz</b> <sup>2)</sup>	17 02 97 [ak]  19 12 98 [ak]	Altholz von Bauteilen, Abbrüchen, Renovationen und Umbauten  Holzabfälle mit Ausnahme von problematischen Holzabfällen oder naturbelassenem Holz	Bauabfälle (Bauteile, Abbrüche, Renovationen und Umbauten)  Altholz aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (Abfallbehandlungsanlagen)	Für die Errichtung von Bauteilen verwendetes Holz, Holz aus Abbrüchen, Renovationen oder Umbauten, das für den Innenbereich verwendet wurde (z.B. Balken, Böden, Täfer, Decken, Treppen, Türen, Einbauten, Möbel) oder Verpackungen aus Holz (z.B. Verpackungen mit Pressspananleien, Paletten (Einwegpaletten werden voraussichtlich zu Restholz umklassiert)), Möbel aus Holz, oder Gemische davon	energetisch oder stofflich <sup>9)</sup>	Altholz gemäss Anh 5 Ziff 31 Abs 2 Bst a LRV / Anlagen zum Verbrennen von Altholz (Anh 2 Ziff 72 LRV)	A III  A II <sup>6)</sup>
<b>Restholz</b> <sup>2)</sup>	03 01 05	Produktionsabfälle von unbedeutendem und unbeschichtetem Holz (Restholz)	Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten und Möbeln	Holzabfälle, die weder druckimpfärgniert noch mit halogenorganischen Verbindungen (PVC) beschichtet sind (z.B. Spanplattenabschnitte, Verschnitte, Schleifstaub)	stofflich oder energetisch	Holzbrennstoffe gemäss Anh 5 Ziff 31 Abs 1 Bst c LRV / Holzfeuerungen (Anh 3 Ziff 52 LRV)	A I
<b>Naturbelassenes Holz</b> <sup>2)</sup>	03 01 01	Rinden- und Korkabfälle	Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten und Möbeln	Produktionsabfälle von sauberem naturbelassenem oder lediglich mechanisch bearbeitetem Massivholz/Vollholz, d.h. Holz, das weder bemalt, beschichtet, verleimt, behandelt noch in anderer Weise belastet ist (z.B. Holzabfälle aus Sägerien).	stofflich oder energetisch	Holzbrennstoffe gemäss Anh 5 Ziff 31 Abs 1 Bst a und b liegen nicht im Geltungsbereich dieses Faktenblattes (Holzfeuerungen, Anh 3 Ziff 52 LRV).	--

**Legende:**

LRV: Luftreinhalteverordnung

LVA: Verordnung des UVEK über Listen zum Verkehr mit Abfällen

AltholzV DE: Altholzverordnung (aus Deutschland: Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz vom 15. August 2002)

- 1) Problematische Holzabfälle gehören gemäss LRV zum Begriff Altholz oder Holzabfälle (siehe Anh 5 Ziff 31 Abs 2 Bst b LRV)
- 2) Klassierung analog LRV
- 3) Eine stoffliche Verwertung von Altholz ist nur zugelassen, wenn die Richtwerte gemäss Anhang A der Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU eingehalten werden.
- 4) PCB (Polychlorierte Biphenyle) müssen speziell ausgewiesen werden.
- 5) PVC-beschichtetes Holz ist nach Entfernung der PVC-Beschichtung zur stofflichen Verwertung (Produktion von Spanplatten) zugelassen.
- 6) In die Holzklasse A II fällt verleimtes, bemaltes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Holz ohne halogenorganische Verbindungen (PVC) in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel

### 3.3 Ausgangssituation

#### 3.3.1 Entsorgungswege und Altholzaufkommen

Holzabfälle werden von dazu bewilligten Entsorgungsunternehmen entgegengenommen, nach entsprechenden Kriterien sortiert und vor der stofflichen oder thermischen Verwertung zerkleinert. Der Einfachheit halber wird im Folgenden die thermische Nutzung mit oder ohne weitergehende Rauchgasreinigung (RGR) als thermische Verwertung bezeichnet. Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) und einzelne Biomassekraftwerke sind mit einer weitergehenden Rauchgasreinigung ausgerüstet. Im Kanton Zürich werden gegenwärtig elf Anlagen (Vgl. [10], S.3) mit einem Holzschredder betrieben, der die Holzabfälle zerkleinert.

Aktuelle Erhebungen des Aufkommens von Holzabfällen für die Schweiz oder den Kanton Zürich liegen nicht vor. Für das Jahr 2008 liegt eine vollständige Statistik in der Schweiz angefallener Holzabfälle vor. In der nachfolgenden Tabelle 2 ist das Holzabfallaufkommen entsprechend des weiteren Verwertungsweges für die gesamte Schweiz zu finden. Die Schweizer Statistik setzt sich aus den Daten entsprechend der Tabelle des Abschlussberichtes von GEO Partner AG [11] und den Angaben der internen BAFU-Statistik [12] zusammen. Ergänzt wird die Tabelle durch das Aufkommen von Holzabfällen im Kanton Zürich, welches schätzungsweise über den Faktor 0.17<sup>2</sup> [13] berechnet wird. Entsprechend dieser Daten fallen schweizweit im Jahr 2008 knapp 1 Mio. t Holzabfälle an, davon entfallen auf den Kanton Zürich ca. 160'000 t Holzabfälle. Weniger als die Hälfte wird im Inland thermisch verwertet. Etwa 40 % der Holzabfälle werden einer stofflichen Verwertung im Ausland (Frankreich, Italien) zugeführt und 15% werden in Deutschland, Frankreich, Italien oder Österreich thermisch entsorgt. Importe von Altholz finden nicht statt.

---

<sup>2</sup> Der Umrechnungsfaktor ergibt sich näherungsweise aus dem Bevölkerungsanteil im Kanton Zürich.

**Tabelle 2: Statistik Verwertung Holzabfälle 2008 (Vgl. [11], S.29, Vgl. [12][12], S.5)**

<i>Verwertungsweg</i>	<i>Schweiz ges. [t]</i>	<i>Kanton Zürich [t]</i>
Biomassekraftwerk	201'796	34'305
Verbrennung in KVA	241'967	41'134
Altholz Inland	443'763 <sup>3</sup>	75'440
stoffliche Verwertung	352'118	59'860
energetische Verwertung	111'020	18'873
Verbrennung in KVA	24'780	4'213
Altholz Export	487'918 <sup>4</sup>	82'946
<b>Altholz gesamt</b>	<b>931'681</b>	<b>158'386</b>

### 3.3.2 Qualitätskontrolle von Holzabfällen

Die Vollzugshilfe Holzabfälle schreibt vor, dass Holzabfälle, die entweder der stofflichen oder der thermischen Verwertung zugeführt werden, auf ihre Qualität überprüft werden müssen. Entsorgungsbetriebe die Holzabfälle zerkleinern sind dazu aufgefordert Analysen von Holzproben durchführen zu lassen. Die Beurteilung der Qualität der Holzabfälle erfolgt auf Grundlage der in der Vollzugshilfe aufgeführten Richtwerte. Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt die für die stoffliche bzw. thermische Verwertung vorgegebenen Richtwerte.

Ziel der Qualitätskontrollen ist, dass nur zugelassene Holzabfälle, abhängig von Herkunft und Schadstoffbelastung, für die entsprechenden Verwertungswege eingesetzt werden. Bisher erfolgen Qualitätskontrollen in Bezug auf die Einhaltung der vorgegebenen Richtwerte. Eine Kontrolle der eingesetzten Sortimente wird nicht durchgeführt.

<sup>3</sup> Zahlen Verwertung Inland aus aktualisierter Fassung Tabelle 7-1, S.29 Vgl. [1] vom 30.10.2012

<sup>4</sup> Zahlen Verwertung Ausland aus interner BAFU-Statistik [12]

**Tabelle 3: Richtwerte Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU (Vgl. [7])**

Parameter	Richtwerte stoffliche Verwertung von Holzabfällen	Richtwerte thermische Verwertung von Holzabfällen <sup>4)</sup>
	[mg/kg TS]	[mg/kg TS]
Arsen (As)	2	5
Blei (Pb)	30	500
Cadmium (Cd)	2	5
Chrom (Cr)	30	100
Kupfer (Cu)	20	100
Quecksilber (Hg)	0.4	1
Chlor (Cl)	600	5000
Fluor (F)	100	200
Zink (Zn)	400	1000
PCP <sup>1)</sup>	3	5
PCB <sup>2)</sup>	3	5
Σ PAK <sup>3)</sup>	25	50

1) Pentachlorphenol (PCP)

2) Polychlorierte Biphenyle (PCB)

3) Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

4) Richtwerte gelten für Feuerungsanlagen ohne weitergehende Rauchgasreinigung

Für die Entnahme der Holzproben zur Qualitätskontrolle beschreibt die Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU ein Probenahmeverfahren (siehe Kap. 4.4.1).

### 3.3.3 Qualität des verwerteten Altholzes

Im Rahmen einer Untersuchung des AWEL [10] zum Thema der Beurteilung der Altholzbelastung im Kanton Zürich wird gezeigt, dass die erfassten und zerkleinerten Holzabfälle teilweise nicht den geforderten Richtwerten gemäß der Vollzugshilfe Holzabfälle genügen. Bei den elf Altholzverwertern, die einen Holzschredder betreiben, wurden Proben entnommen und auf die Schadstoffe Chlor, Fluor, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Zink sowie PCP und PAK untersucht. Die Proben von zerkleinerten Holzabfällen werden entweder aus dem Haufwerk oder aus dem Container entnommen. An zwei Standorten werden aufgrund der Lagermenge (Probe 7 und 8) und der unterschiedlichen Sortierqualitäten (Probe 9 und 10) zwei Proben gewonnen. Abweichend von dem Vorgehen der Probenahme gemäss der Vollzugshilfe Holzabfälle findet eine neue Probenahmemethode Anwendung. Die Beschreibung der Probenahmemethode ist dem Kapitel 3.4.2 zu entnehmen. Die Analysenresultate aus der oben genannten Untersuchung des AWEL sind in der nachfolgenden Tabelle 4 den Richtwerten der Vollzugshilfe Holzabfälle gegenübergestellt. Gelb markierte Messwerte der Proben überschreiten die Richtwerte

für die stoffliche Verwertung. Rot markierte Messwerte liegen über den Richtwerten für die thermische Verwertung in Feuerungsanlagen ohne weitergehende RGR liegen. Mit Ausnahme von Probe 3 liegen bei allen anderen zwölf Proben der untersuchten Holzabfälle Richtwertüberschreitungen betreffend den Anforderungen an die stoffliche Verwertung vor. Weiterhin sind die Proben 1, 2, 5, 7, 8, 9, 10, 12 und 13 nicht für die thermische Verwertung in Anlagen ohne weitergehende RGR geeignet. Für diese Holzabfälle ist eine Verbrennung in Anlagen mit weitergehender RGR, z.B. eine KVA, erforderlich.

**Tabelle 4: Analysenergebnisse Altholzbelastung, AWEL Kanton Zürich 2012 (nach [10], S.50 f)**

	<b>Cl</b> <i>[mg/kg TS]</i>	<b>As</b> <i>[mg/kg TS]</i>	<b>Pb</b> <i>[mg/kg TS]</i>	<b>Cr</b> <i>[mg/kg TS]</i>	<b>Cu</b> <i>[mg/kg TS]</i>	<b>Zn</b> <i>[mg/kg TS]</i>	<b>PCP</b> <i>[mg/kg TS]</i>	<b>Σ PAK</b> <i>[mg/kg TS]</i>
<b>Richtwert 1</b>	600	2	30	30	20	400	3	25
<b>Richtwert 2</b>	5000	5	500	100	100	1000	5	50
Probe 1	601	2.5	32.2	74.6	31.9	95.3	0.12	311
Probe 2	450	1	179	132	4.9	404	0.66	2.5
Probe 3	206	1	12.2	5.5	1.4	109	0.33	2.5
Probe 4	365	1	49.6	5.8	2.2	105	0.25	4.33
Probe 5	326	15.2	337	64	48.3	793	1.55	2.5
Probe 6	238	1.2	126	34.5	71.4	179	4.87	30.6
Probe 7	305	1	122	10	21.9	515	0.6	2.5
Probe 8	808	1	33.2	5.5	1270	172	1.74	2.5
Probe 9	446	1.6	101	49.5	34.4	220	0.76	99.9
Probe 10	280	1	3160	4	2.7	1410	7.94	2.69
Probe 11	738	1	49.9	12.3	25.6	232	0.47	2.5
Probe 12	548	3.5	179	47.2	29.3	485	2.68	168
Probe 13	315	5.5	6.2	57.3	52.1	75.1	0.18	48.3

Bemerkung:

- die Parameter F, Cd, Hg werden nicht berücksichtigt, da keine Überschreitungen vorliegen
- Richtwert 1: Richtwert für die stoffliche Verwertung
- Richtwert 2: Richtwert für die thermische Verwertung

Die Untersuchung des AWEL hat gezeigt, dass bei den Altholzverwertern mehrheitlich keine Differenzierung bei den Qualitäten der Holzabfälle für den entsprechenden Verwertungsweg vorgenommen wird. Unabhängig vom Verwertungsweg liegt bei den Altholzverwertern ein Haufwerk bereit, welches entweder stofflich oder thermisch verwertet werden soll. Problematische Holzabfälle, wie z.B. Bahnschwellen oder Telefonmasten, werden meist separat entgegengenommen. Holzgemische von Baustellen, die zum Teil stark behandeltes Holz und problematisches Holz, wie z.B. Fenster und Türen, enthalten, gelangen unsortiert in das aufbereitete Altholz. Wenige Betriebe beschränken ihr Annahmespektrum, um vorab die Qualität des Altholzes zu



beeinflussen. Entsprechend dieser Erfahrung bei der Untersuchung resultieren die über den Richtwerten liegenden Schadstoffbelastungen im Altholz im Kanton Zürich.

### 3.3.4 Altholzverwertung in Deutschland

Die Verwertung und Beseitigung von Holzabfällen ist in Deutschland durch die Altholzverordnung (AltholzV) geregelt. Die AltholzV nimmt eine Einteilung der Holzabfälle in die vier Kategorien A I bis A IV entsprechend der möglichen Schadstoffbelastung vor. Der Anhang 3 der AltholzV (Vgl. [14], Anhang 3) zeigt eine herkunftsbezogene Übersicht gängiger Altholzsortimente und eine Zuordnung zu den Kategorien im Regelfall. Anforderungen an die Verwertung werden in der AltholzV § 3 genannt. Für die stoffliche Verwertung sind nur die im Anhang 1 AltholzV gelisteten Holzsortimente zugelassen. Weiterhin sind für die stoffliche Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie die Grenzwerte gemäß Anhang 2 AltholzV einzuhalten (Vgl. [14] § 3). Die Tabelle 5 zeigt ein Vergleich der Grenzwerte der AltholzV mit den Schweizer Richtwerten der Vollzugshilfe Holzabfälle für die stoffliche Verwertung. Die Einhaltung der Grenzwerte gemäss AltholzV wird am gleitenden Durchschnitt der letzten vier Untersuchungen beurteilt, der keine Überschreitungen aufzeigen darf. Kein Untersuchungsergebnis darf zudem mehr als 25% über dem Grenzwert liegen (Vgl. [14] § 3 Abs. 1).

**Tabelle 5: Grenzwerte Deutschland/Richtwerte Schweiz (Vgl. [14], Anhang 2, Vgl. [7])**

<i>Parameter</i>	<b>Deutschland</b>	<b>Schweiz</b>
	Grenzwerte <i>[mg/kg TM]</i>	Richtwerte stoffliche Verwertung <i>[mg/kg TS]</i>
Chlor	600	600
Fluor	100	100
Arsen	2	2
Blei	30	30
Cadmium	2	2
Chrom	30	30
Kupfer	20	20
Quecksilber	0.4	0.4
Zink	-	400
PCP	3	3
PCB	5	3
Σ PAK	-	25

Die Kontrolle der Holzabfälle ist abhängig von dem Verwertungsweg. Der § 6 und der Anhang IV der AltholzV beschreiben die Kontrolle der Holzabfälle für die stoffliche Verwertung. Es sind Eigen- und Fremdkontrollen durchzuführen. Die Beprobung wird

an Altholzchargen von nicht mehr als 500 t durchgeführt, wobei die Proben aus dem Abfallstrom entnommen werden. Die Proben werden gemäss den Vorgaben in Anhang IV AltholzV auf die in Anhang II genannten Parameter (siehe Tabelle 5) untersucht. Bei einer Überschreitung der Grenzwerte wird die untersuchte Altholzcharge der Altholzkategorie A IV zugeordnet und ist entsprechend dieser Kategorie zu verwerten (Vgl. [15], S.63). Die Grenzwerte gelten als eingehalten, wenn der gleitende Durchschnitt aus vier Untersuchungen den Grenzwert unterschreitet und kein Ergebnis der Analysen 25% über den Grenzwerten liegt (Vgl. [14] §3 Abs.1).

Werden Holzabfälle energetisch verwertet erfolgt eine Kontrolle gemäss § 7 und Anhang V der AltholzV. Alle 500 t ist eine Probe von vorgebrochenem Material (Kantenlänge 0 – 500 mm) zu entnehmen, die durch eine Zuordnungskontrolle bzw. Sortieranalyse auf die Anteile nicht zugelassener, höherer Holzkategorien untersucht wird. Es werden je 10 t des zu untersuchenden Altholzes jeweils 20 kg Probenmaterial entnommen. Enthält die Probe einen Anteil nicht zugelassener Holzkategorien von mehr als 2%, ist die Charge nicht für die energetische Verwertung zugelassen (Vgl. [15], S.63 f).

Bei den Altholzaufbereitern erfolgt eine Vorsortierung des Altholzes in die vier Kategorien A I, A II, A III und A IV. Diese Einteilung entspricht der Schadstoffbelastung des Altholzes. Vor der Aufbereitung wird empfohlen Fremd- bzw. Störstoffe, wie z.B. Eisenteile, Kunststoffe, Textilien, auszusortieren (Vgl. [15], S. 55). Nach einer Zerkleinerung sind Fremdstoffe schwerer entfernbar. Ziel dieser Massnahmen ist die Einstellung bzw. Verbesserung der Qualität des Altholzes und die Entfernung unerwünschter Stoffe für die vorgesehene Verwertung. Die vier Altholzkategorien werden entsprechend dem Abnehmer und Verwertungsweg zusammengefügt. Anlagen die Altholz verwerten erhalten eine Betriebserlaubnis bezogen auf die einsetzbaren Altholzkategorien.

Für das Jahr 2010 wird das Marktvolumen von Holzabfällen auf ca. 9,1 Mio. t geschätzt (Vgl. [15], S.13). Die Tabelle 6 zeigt die Anteile je Verwertungsweg bei der Verwertung des Altholzes in Deutschland.

**Tabelle 6: Anteile Verwertungswege Altholz in Deutschland 2010 (nach [15], S.13)**

Verwertungsweg	Anteil [%]
energetische Verwertung	78
stoffliche Verwertung	20
Beseitigung	< 1
Sonstiges Inland	< 1
Export	1

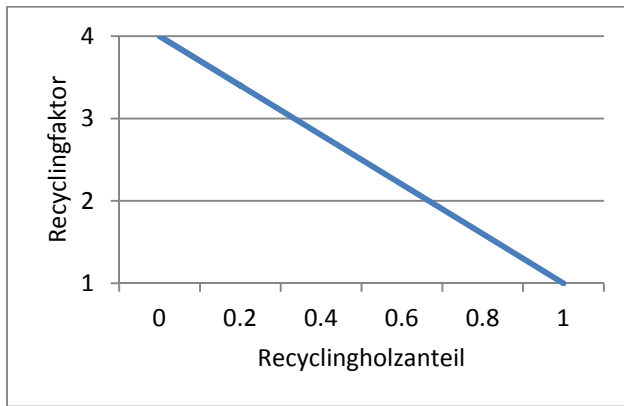
### 3.3.5 Altholzverwertung in Österreich

Die Verwertung von Holzabfällen in Österreich ist durch die Recyclingholz-Verordnung (RecyclingV) geregelt. Die RecyclingholzV gibt im Anhang 2 Kap. 1.1 [16] Grenzwerte für Recyclingholz für die stoffliche Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie vor (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 7: Vergleich Grenzwerte Österreich/Richtwerte Schweiz (Vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Anhang 2, Vgl. [7])**

Parameter	Österreich Grenzwerte Recyclingholz  [mg/kg TM]		Schweiz Richtwerte stoffliche Verwertung  [mg/kg TS]
	Median	Q80	
	Chlor	250	300
Fluor	15	20	100
Arsen	1.2	1.8	2
Blei	10	15	30
Cadmium	0.8	1.2	2
Chrom	10	15	30
Kupfer	-	-	20
Quecksilber	0.05	0.075	0.4
Zink	140	210	400
PCP	-	-	3
Σ PAK	2	3	25

Aus den letzten zehn Untersuchungsergebnissen der in der Tabelle angegebenen Parameter wird der Median und das 80%-Quantil  $Q_{80}$  bestimmt. Zur Berechnung der Beurteilungswerte werden diese Werte durch den Recyclingfaktor dividiert. Der Recyclingfaktor wird abhängig von dem eingesetzten Recyclingholzanteil (gleitender Mittelwert über zwölf Monate) ermittelt (siehe Abbildung 1). Ist der Beurteilungswert kleiner als der Grenzwert, gilt der Grenzwert als eingehalten. Bei weniger als fünf Analysenergebnissen werden aus diesen die Mittelwerte berechnet und daraus der Beurteilungswert wie oben angegeben ermittelt. Überschreitet der Beurteilungswert den Median und kein Einzelresultat das 80%-Quantil gilt der Grenzwert als eingehalten. Der Anteil des Recyclingholzes ist zu verändern, wenn eine Überschreitung der Grenzwerte durch den Beurteilungswert vorliegt. Weiterhin ist eine erneute Untersuchung der zu untersuchenden Teilmenge durchzuführen (Vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Anhang 2).



**Abbildung 1: Recyclingfaktor in Abhängigkeit von Recyclingholzanteil**  
(Vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., S.9)

Es gilt die in einem Monat eingesetzte Abfallmenge (Losumfang) zu untersuchen. Die Berechnung der Anzahl und Masse der zu ziehenden Stichproben erfolgen auf Grundlage der ÖNORM EN 15442. Drei Stichproben, verteilt über den Tag entnommen, sind zu einer qualifizierenden Stichprobe (Tagesmischprobe) zusammenzufügen. Die Mindestprobemenge wird anhand der ÖNORM EN 15442 berechnet. Zur Untersuchung des ersten Loses werden mindestens zehn Tagesmischproben entnommen und einzeln untersucht. Ab dem zweiten Los genügt die Entnahme von mindestens zwei Tagesmischproben und die Analyse einer Probe. Abweichend können 1.500 t Abfall als Losumfang herangezogen werden, wenn die Jahresmenge 18.000 t nicht übersteigt. Dann sind mindestens zwei Tagesmischproben pro Jahr zu entnehmen, von denen eine analysiert wird. Die Probenaufbereitung zur Herstellung einer Labor- bzw. Prüfprobe stützt sich auf die ÖNORM EN 15443 und die ÖNORM EN 15413 (Vgl. [16] Kap. 2 S.10 ff). Einmal jährlich haben zudem eine Identitätsüberprüfung der Abfälle im Rahmen der Eingangskontrolle und eine externe Prüfung, d.h. eine Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen an die stoffliche Verwertung, zu erfolgen (Vgl. [16] Kap. 2, S.13 f).

Das Altholzaufkommen für Österreich wird für das Jahr 2009 mit ca. 4,8 Mio. t (ohne Verpackungsabfälle) angegeben (Vgl. [17], S.20). Unter Berücksichtigung der Verpackungsabfälle wird das Altholzaufkommen mit etwa 6,2 Mio. t angegeben (Vgl. [18], S.16 f). 2009 werden ca. 28.000 t behandeltes Altholz exportiert und 72.000 t behandeltes Altholz importiert (Vgl. [17], S.142). Die Tabelle 8 zeigt die Anteile je Verwertungsweg für die Verwertung der Holzabfälle für Österreich für das Jahr 2006.

**Tabelle 8: Anteil Verwertungswege Altholz in Österreich 2006 (nach [19], S.15)**

Verwertungsweg	Anteil [%]
stoffliche Verwertung	46
thermische Verwertung	45
Weiterverwendung	5
keine Angabe	4

### 3.4 Probenahme von Holzabfällen

Für die Probenahme betreffend der Qualitätskontrolle, d.h. für die Bestimmung der stofflichen Qualität, ist von wesentlicher Bedeutung, dass repräsentative Proben aus einer zu beurteilenden Gesamtmenge erhoben werden. Für die Probenahme von Abfällen gibt es kein vorgegebenes Vorgehen, vielmehr sind angepasst an die Abfalleigenschaften Methoden festzulegen (Vgl. [20], S.4). Strategien für die Probenahme sind entweder die Hot-Spot-Beprobung zur Identifikation von Kontaminationsschwerpunkten oder die Charakterisierung von Grundgesamtheiten, z.B. von Abfallhaufwerken, zur Bestimmung des durchschnittlichen Schadstoffgehaltes (Vgl. [20], S.9 ff). Einen wesentlichen Einfluss auf die Probenahme haben Gesichtspunkte wie die Lagerform und Lagermenge des Abfalls, dessen Homogenität bzw. Heterogenität, die Form und Korngröße (Vgl. [20], S.11 f).

#### 3.4.1 Bestehende Probenahmeverfahren

Für die Probenahme von Holzabfällen existieren folgende Verfahren:

- a) Probenahmeverfahren nach Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU [21], Schweiz
- b) Probenahmeverfahren nach Altholzverordnung (AltholzV) [14], Deutschland
- c) Probenahmeverfahren nach DIN EN 15442 [22]
- d) Probenahmeverfahren nach der Richtlinie der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA PN 98) [20], Deutschland

In der folgenden Tabelle 9 erfolgt ein Vergleich der Verfahren nach AltholzV, DIN EN 15442 und LAGA PN 98.

**Tabelle 9: Vergleich Probenahmeverfahren (Vgl. [15], S. 65)**

Probenahmeverfahren	nach Alholz-Verordnung	nach LAGA PN 98	Normen nach CEN/TC 343 - DIN EN 15442	nach Vollzugshilfe Holzabfälle BAFU <sup>1)</sup>
<i>Ort der Probenahme</i>	Materialstrom	Materialstrom, ruhende Partien	Materialstrom, ruhende Partien	ruhende Partien
<i>Geltungsbereich für Korngrößen</i>	keine Angaben	< 120 mm	< 500 mm	keine Angaben
<i>Probenahmeplan</i>	x	x	x	x
<i>Dokumentation und Probenahmeprotokoll</i>	x	x	x	x
<i>Probenahmeverfahren</i>	x	x	x	x
<i>Mindestanzahl an Einzelproben</i>	< 10 Mg Einzelprobe	abhängig von Grundmenge	min. 24 Einzelproben	keine Angaben
<i>Mindestvolumen Einzelproben</i>	2 l bei stofflicher, 20 kg bei energetischer Verwertungsabsicht	abhängig von Korngröße/ Stückigkeit	abhängig von Korngröße/ Schüttdichte	keine Angaben
<i>Umfang Mischprobe</i>	maximal 50 Einzelproben	abhängig vom Volumen der Einzelprobe	abhängig von Korngröße	abhängig von max. Korngröße
<i>Mindestvolumen Laborprobe</i>	* 500 g	abhängig von Korngröße/ Stückigkeit	abhängig vom Reduktionsfaktor	0.5 - 1 kg
<i>Probenvorbehandlung</i>	* Volumenreduktion	Volumenreduktion	Volumenreduktion	Zerkleinerung, Volumenreduktion
<i>Konservierung, Kennzeichnung, Verpackung, Transport</i>		x	x	x
<i>Analytischer Untersuchungsumfang</i>	* für stoffliche Verwertung	x	x	x
<i>Be-/Auswertung</i>	* x	x	x	x

Bemerkung:

X Festlegung vorhanden

\* Regelungsbereich in der Alholz-Verordnung gilt nur für stoffliche Verwertung

1) Angaben gemäss Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU

Die Probenahme nach AlholzV erfolgt im Materialabwurf der Zerkleinerungsaggregate und eine Entnahme aus ruhenden Partien, z.B. Haufwerken, ist nicht zulässig. Die Probenahme aus dem Materialstrom erweist sich jedoch als unpraktikabel und bei den meisten Entsorgungsbetrieben als nicht anwendbar. Als in der Praxis mit reproduzierbaren Ergebnissen einsetzbar, hat sich die Probenahme nach Vorgaben der LAGA PN 98 bewährt, deren Probenanzahl und -menge abhängig von der Grundmenge und der Korngröße der Holzabfälle ist. Die Probenahme nach DIN EN 15442 ist ebenfalls aus Materialstrom und Haufwerk bei unterschiedlicher Korngröße und Schüttdichte möglich (Vgl.[15], S. 65 f).

### 3.4.2 Probenahmemethode für Holzabfälle in Anlehnung an die LAGA PN 98

Die Vorstellung der Probenahme sowie die Vermittlung der theoretischen Grundlagen der Probenahmemethode für zerkleinerte Holzabfälle in Anlehnung an die LAGA PN 98 erfolgten während eines zweitägigen Sachkundelehrganges im Rahmen einer Untersuchung des AWEL [23].

Für die Probenahme von festen oder stichfesten Abfällen stellt die LAGA PN 98 eine Richtlinie dar. Abhängig von dem Volumen der Grundmenge und der Korngröße des Abfalls ist eine Probenahme aus Haufwerken, Materialströmen oder Behältern möglich.

Aufbauend auf den Grundlagen der LAGA PN 98 erfolgt für die Probenahme von zerkleinerten Holzabfällen eine praxisbezogene Anpassung. Haufwerke von

zerkleinerten Holzabfällen mit einem Volumen größer als  $100 \text{ m}^3$  werden in Abschnitte mit einem maximalen Volumen von  $100 \text{ m}^3$  eingeteilt. Bei Haufwerken mit einem Volumen kleiner als  $100 \text{ m}^3$  entfällt die Abschnittseinteilung. Die Probenahme wird an einem Teilabschnitt, der  $100 \text{ m}^3$  umfasst, durchgeführt. Dieses Vorgehen ist soweit identisch mit dem Probenahmeverfahren nach Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU. Für Abschnitte mit einem Volumen bis  $100 \text{ m}^3$  sind bei homogener Materialverteilung entsprechend der Tabelle 10 16 Einzelproben aus dem Haufwerk zu entnehmen (siehe Markierung). Bei unzureichender Homogenität der zerkleinerten Holzabfälle zwischen den 16 Einzelproben wird die Anzahl der Einzelproben durch die Beprobung eines zweiten Abschnittes erhöht. Die Probenahme ist sowohl an Holzvorbruch (Kantenlänge  $0 - 500 \text{ mm}$ ), an Holzhackschnitzeln (Kantenlänge  $0 - 155 \text{ mm}$ ) als auch an Holzspänen (Kantenlänge  $0 - 20 \text{ mm}$ ) anwendbar.

**Tabelle 10: Mindestanzahl der Proben abhängig vom Prüfvolumen (nach Tab. 2 [20], S.18)**

Volumen der Grundmenge	Anzahl der Einzelproben	Anzahl der Laborproben
bis $30 \text{ m}^3$	8	2
bis $60 \text{ m}^3$	12	3
bis $100 \text{ m}^3$	16	4
bis $150 \text{ m}^3$	20	5
bis $200 \text{ m}^3$	24	6
bis $300 \text{ m}^3$	28	7
bis $400 \text{ m}^3$	32	8
bis $500 \text{ m}^3$	36	9
bis $600 \text{ m}^3$	40	10
bis $700 \text{ m}^3$	44	11
bis $800 \text{ m}^3$	48	11
bis $900 \text{ m}^3$	52	11
bis $1000 \text{ m}^3$	56	12
bis $1100 \text{ m}^3$	60	12
bis $1200 \text{ m}^3$	64	12
		je angefangene $300 \text{ m}^3$ je eine Laborprobe

Das in der LAGA PN 98 geforderte Mindestvolumen der Einzel- und Laborproben nach Tab. 3 LAGA PN 98 (siehe Tabelle 11) wird für die Probenahme von Holzabfällen wie folgt festgelegt.

**Tabelle 11: Mindestvolumen der Einzel- und Laborproben (nach Tab. 3 [20], S.20)**

maximale Korngrösse/ Stückigkeit [mm]	Mindestvolumen der Einzelprobe [in L]	Mindestvolumen der Laborprobe [in L]
≤ 2	0,5	1
> 2 bis ≤ 20	1	2
> 20 bis ≤ 50	2	4
> 50 bis ≤ 120	5	10
> 120	Stück = Einzelprobe	Stück = Einzelprobe

Abweichend von den Angaben in Tabelle 11 erfolgt eine Erhöhung des zu entnehmenden Mindestvolumens bei den Einzel- und Laborproben. Bei Korngrößen der zerkleinerten Holzabfälle über 120 mm werden anstatt Holzstücken Einzelproben mit einem Volumen von 10 L oder 30 L abhängig von der Korngröße entnommen. Bei einer Kantenlänge des zerkleinerten Altholzes bis 200 mm erfolgt die Entnahme der 16 Einzelproben mit einem Kunststoffeimer (10 L Fassungsvermögen). Bei einer Kantenlänge des Materials größer als 200 mm werden die Einzelproben mit einer Kunststoffharasse (30 L Fassungsvermögen) entnommen. Weiterhin wird die Anzahl der Laborproben auf eine Laborprobe je Probenahme reduziert. Die folgende Tabelle 12 zeigt die Differenzierung des Volumens der Einzelprobe bezogen auf die Korngröße und das daraus resultierende Mindestvolumen der Laborprobe.

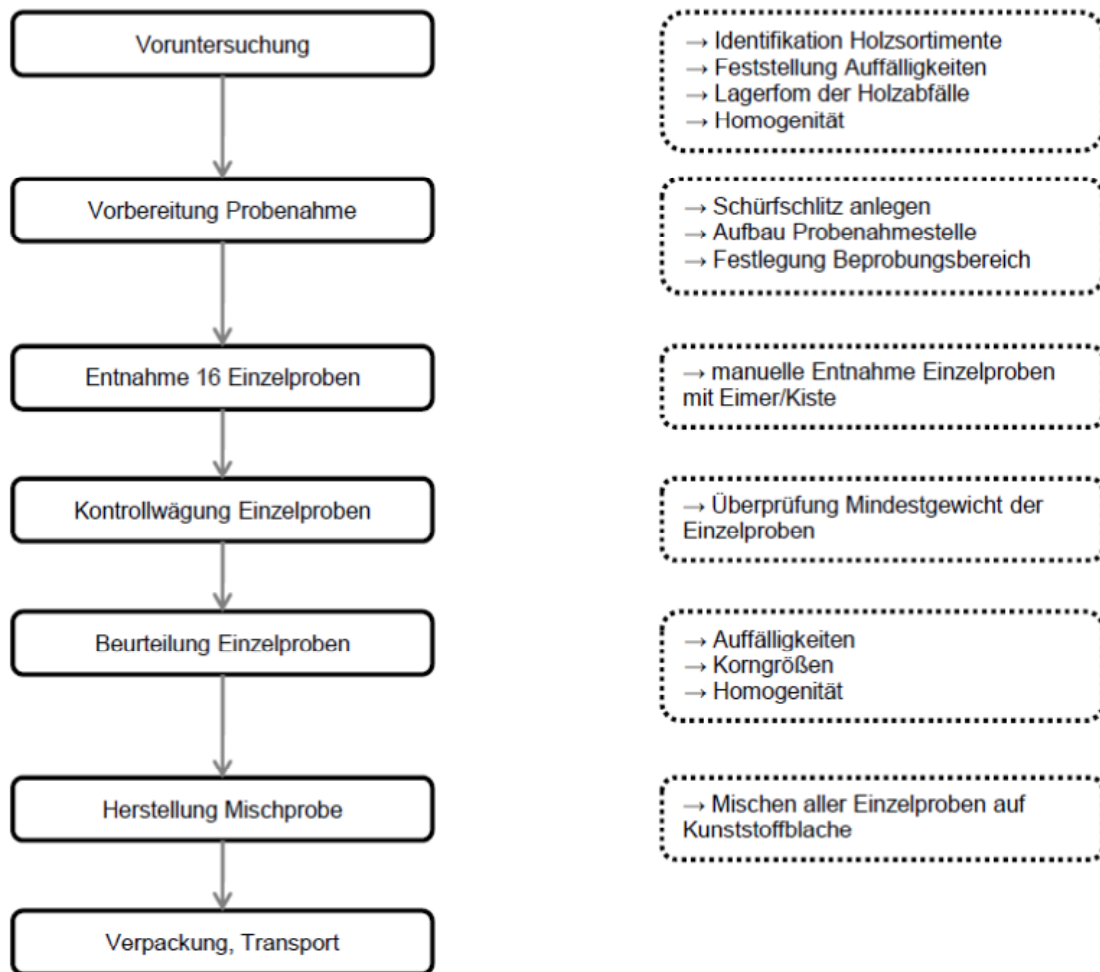
**Tabelle 12: Anpassung Mindestvolumen/-gewicht der Proben (eigene Darstellung)**

<i>Mittlere Kantenlänge Holzabfälle</i>	0 – 200 mm	> 200 mm
<i>Probenahmegerät</i>	Eimer	Kiste
<i>Fassungsvermögen</i>	10 L	30 L
<i>Anzahl Einzelproben</i>	16	16
<i>Mindestgewicht Einzelprobe</i>	ca. 1,5 kg	ca. 5 kg
<i>Anzahl Laborproben</i>	1	1
<i>Mindestvolumen Laborprobe</i>	160 L	480 L
<i>Mindestgewicht Laborprobe</i>	18 kg	80 kg

Die Entnahme der Einzelproben erfolgt manuell mit dem entsprechenden Probenahmegerät beginnend vom Fuss bis zur Spitze des Haufwerkes entlang eines Schürfschlitzes, der mit einem Bagger o.ä. Gerät erzeugt wird. Alle Einzelproben werden nach der Probenahme zu einer Mischprobe vereinigt.



Die Probenahme wird durch eine umfassende Dokumentation und Fotodokumentation begleitet. Die Dokumentation schliesst die qualitative Beurteilung jeder Einzelprobe ein. Die folgende Abbildung 2 zeigt ein Schema zum Ablauf der Probenahme.



**Abbildung 2: Ablauf Probenahme ASPE in Anlehnung an LAGA PN 98 (eigene Darstellung)**

Diese für Holzabfälle angepasste Methode der Probenahme wird nachfolgend als **Altholz-Schreddermaterial Probenahme mit 16 Einzelproben**, Kurzform **ASPE**, bezeichnet.

### 3.5 Zuordnungskontrolle von Holzabfällen

Die Zuordnungskontrolle bzw. Sortieranalyse dient der Charakterisierung des Altholzes bezogen auf verschiedene Aspekte. Grundsätzlich können mit der Zuordnungskontrolle Aussagen über die Zusammensetzung, enthaltene Holzsortimente, über die Gehalte von Fremd- und Störstoffen sowie die Körnung oder Korngrößen getroffen werden. Gekoppelt mit den Analysenresultaten der Laboranalyse ist eine Aussage zu möglichen Schadstoffquellen in der Probe möglich. Anwendung findet die Zuordnungskontrolle bei der Bewertung von vorgebrochenen Holzabfällen vor Ort für die thermische Verwertung in Deutschland gemäss § 7 AltholzV [14]. Bei dieser

Anwendung wird eine Altholzprobe auf Anteile nicht zugelassener Altholzkategorien untersucht und entsprechend des Ergebnisses einer thermischen Verwertung zugestimmt oder nicht zugestimmt.

## 4 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden der Aufbau der Versuche, das methodische Vorgehen bei den Versuchen und die eingesetzten Materialien und Geräte beschrieben.

### 4.1 Versuchsaufbau

Für den praktischen Teil der Arbeit wird ein mehrstufiger Versuchsaufbau entwickelt. Dieser setzt sich aus den Vorversuchen (Kapitel 4.2), der Versuchsvorbereitung (Kapitel 4.3), den Probenahmen (Kapitel 4.4), der Siebung und Sortieranalyse (Kapitel 4.5) sowie aus Aufbereitung und Probenanalyse (Kapitel 4.6 und 4.7) zusammen. In Abbildung 3 ist der Versuchsablauf schematisch dargestellt. In den gepunktet umrandeten Kästen auf der rechten Seite der Abbildung befinden sich kurze Anmerkungen bzw. Ziele zu den Versuchsschritten.

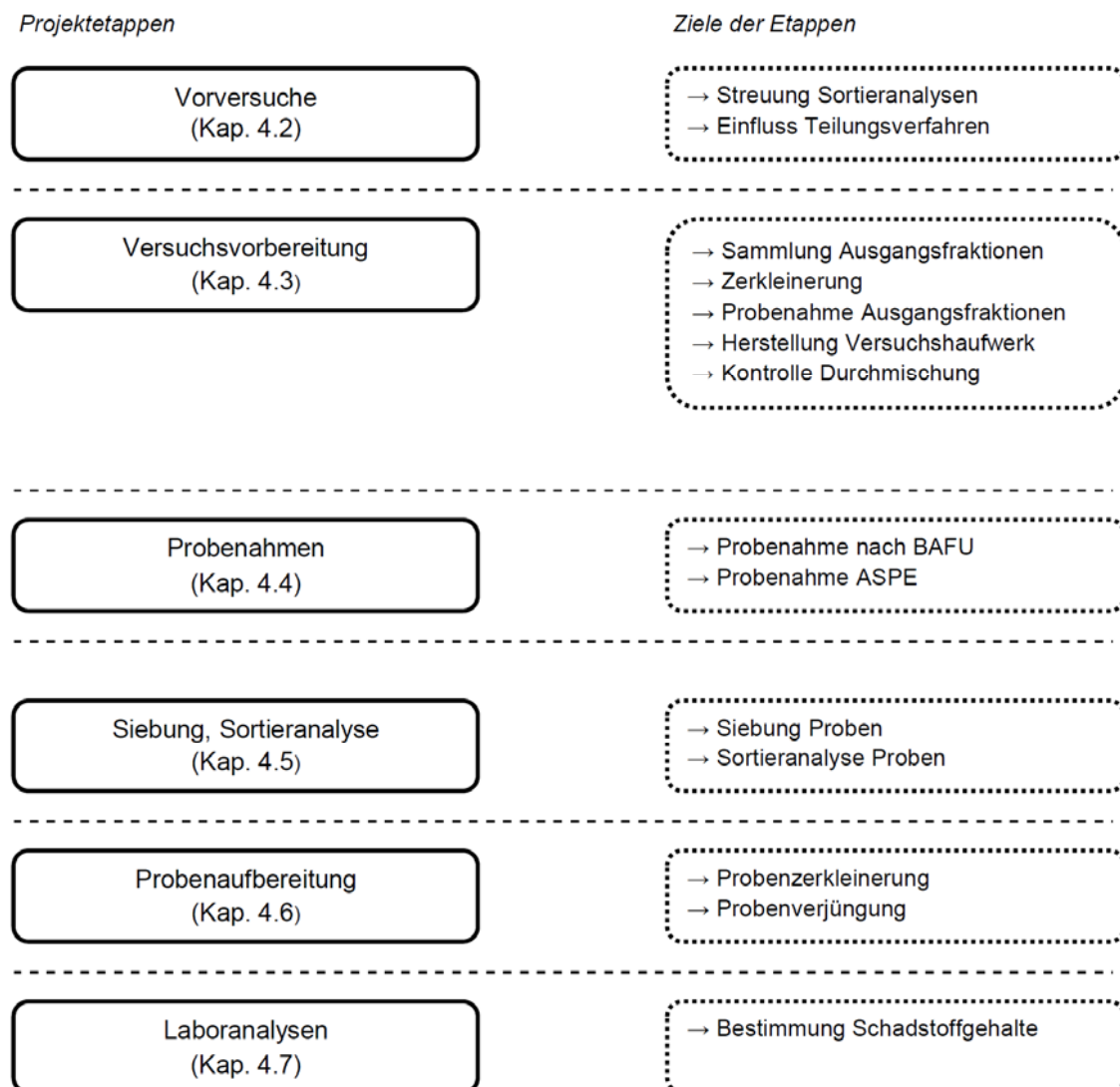


Abbildung 3: Schema Versuchsaufbau (eigene Darstellung)

## 4.2 Vorversuche

Die Voruntersuchung wird bei einem Entsorgungsbetrieb für Holzabfälle durchgeführt. In der Voruntersuchung werden an zwei willkürlich ausgewählten Altholzhaufen mit unbekannter Zusammensetzung Versuche zur Sortieranalyse und zur Probenteilung durchgeführt.

### 4.2.1 Sortieranalyse

Ziel der Voruntersuchung zur Sortieranalyse ist die Ermittlung der Streuung der Ergebnisse bei mehrfacher Sortierung einer Probe sowie die Abweichung der Ergebnisse zwischen zwei verschiedenen Sortierern.

Mit einem Bagger wird aus einem Haufwerk vorgebrochener Holzabfälle an einer beliebigen Stelle Material entnommen und auf einer Kunststoffblache abgelegt. Das Versuchsmaterial wird auf etwa 20 kg reduziert. Ein und dasselbe Material wird von zwei verschiedenen Sortierern abwechselnd je dreimal einer Siebung und Sortieranalyse unterzogen (siehe Abbildung 4). Eine Beschreibung zum Vorgehen bei der Siebung und Sortieranalyse folgt in dem nachfolgenden Kapitel 4.5. Nach der Siebung und der Sortieranalyse werden die Fraktionen gewogen und deren Massenanteile bestimmt. Nach der Versuchsdurchführung wird das Holz auf der Kunststoffblache zusammengefügt, gut miteinander gemischt und der Versuch durch den anderen Sortierer wiederholt.



**Abbildung 4: Voruntersuchung Sortieranalyse  
(eigene Darstellung)**

### 4.2.2 Probenteilung

Ziel der Voruntersuchung zur Probenteilung ist die Ermittlung des Einflusses der Teilung des Probenmaterials und des Teilungsverfahrens auf das Ergebnis der nachfolgenden Sortieranalyse.

Mit einem Bagger wird aus einem Haufwerk vorgebrochener Holzabfälle an einer beliebigen Stelle Material entnommen, auf einer Kunststoffblache abgelegt und auf etwa 40 kg reduziert. Bei diesem Versuch kommen die Probenteilungsverfahren

alternierendes bzw. fraktionierendes Schaufeln (siehe Abbildung 5) und Aufkegeln und Vierteln (siehe Abbildung 6) nach DIN EN 14780 [24] zur Anwendung. Jedes Verfahren wird abwechselnd dreimal an ein und demselben Material durchgeführt. Nach jeder Teilung wird eine Hälfte der Probe von zwei Sortierern gemeinsam gesiebt, sortiert und die Zusammensetzung bestimmt. Dazu werden die Fraktionen gewogen und deren Massenanteile bestimmt. Das gesamte Holz wird nach dem Versuch zusammengefügt und miteinander gemischt. Der Versuch wird wiederholt. Abschliessend wird das gesamte Holz ohne Teilungsverfahren gesiebt, sortiert und seine Zusammensetzung bestimmt.



**Abbildung 5: Fraktionierendes Schaufeln (eigene Darstellung)**



**Abbildung 6: Aufkegeln und Vierteln (eigene Darstellung)**

### **4.3 Material**

In der Versuchsvorbereitung wird ein Haufwerk künstlich hergestellt. Das Haufwerk ist Versuchsgegenstand für die vergleichenden Probenahmen und die Überprüfung der Gewinnung reproduzierbarer Altholzproben.

Während der Vorbereitung des Versuches werden auf dem Gelände eines Altholzverarbeiters verschiedene ausgewählte Holzabfälle bereitgestellt und zu fünf Fraktionen zusammengefügt. Aus den Fraktionen wird ein Altholzhaufwerk mit einem Gesamtvolumen von ca. 100 m<sup>3</sup>, dies entspricht einer Menge von ca. 20 t Altholz, mit definierter Zusammensetzung für die Versuchsdurchführung hergestellt. Die fünf Fraktionen entsprechen den Fraktionen der Sortieranalyse.

Die folgende Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der ausgewählten Holzsortimente für den Versuch sowie eine Zuordnung entsprechend der Holzkategorien gemäss LRV und der Sortierfraktionen.

**Tabelle 13: Übersicht Ausgangsfraktionen Versuchshaufwerk (eigene Darstellung)**

<i>Sortierfraktion</i>	<i>ausgewählte Holzabfälle</i>	<i>Holzkategorie gemäss LRV/LVA</i>
optisch unbehandeltes Massivholz	Paletten Einwegpaletten	Altholz
Holzwerkstoffe	Spanplatten Spanplattenverschnitte	Restholz
beschichtete Holzwerkstoffe	Möbel/Möbelteile Verschnittreste Laminatboden	Altholz
behandeltes Massivholz	Bauschaltafeln Verschnittreste	
problematisches Holz	Bahnschwellen Brandholz	problematische Holzabfälle

*a) Ausgangsfraktion 1*

Die Ausgangsfraktion 1 besteht aus gebrauchten Paletten und Einwegpaletten (siehe Abbildung 7, Abbildung 8) und wird der Sortierfraktion optisch unbehandeltes Massivholz zugeordnet. Optisch ist bei diesem Holzabfall keine Belastung erkennbar. Nach LVA bzw. LRV zählen diese Holzabfälle zur Holzkategorie Altholz. Diese Ausgangsfraktion enthält teilweise neben Palettenfüßen aus gepresstem Holz auch holzfremde Stoffe wie Metallnägeln, Folienreste, Umreifungsband sowie Farbreste oder Verunreinigungen.



**Abbildung 7: Paletten/Einwegpaletten (1)  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 8: Paletten/Einwegpaletten (2)  
(eigene Darstellung)**

*b) Ausgangsfraction 2*

Die Ausgangsfraction 2 setzt sich aus gebrauchten und ungebrauchten Bauschaltafeln und Verschnittresten davon (siehe Abbildung 9, Abbildung 10) zusammen. Die Bauschaltafeln haben gelbe Oberflächenanstriche und teilweise mineralische Anhaftungen. Die Fraction wird zum Einen manuell aus dem Annahmehaufwerk aussortiert und zum Anderen von einer Baufirma zur Verfügung gestellt. Dieses Sortiment entspricht der Sortierfraction behandeltes Massivholz.



**Abbildung 9: Bauschaltafeln (eigene Darstellung)**



**Abbildung 10: Bauschalbretter (eigene Darstellung)**

*c) Ausgangsfraction 3*

In der Ausgangsfraction 3 werden Holzwerkstoffe, dazu gehören Spanplatten, Grobspanplatten, Holzfaserplatten und Sperrholzplatten sowie Verschnittreste davon, (siehe Abbildung 11, Abbildung 12) zusammengefasst. Diese Holzabfälle werden sortenrein über Lieferungen von Sägereien und Holzhändlern erfasst. Dieses Holzsortiment entspricht der Sortierfraction Holzwerkstoffe.



**Abbildung 11: Verschnittne Holzwerkstoffe (eigene Darstellung)**



**Abbildung 12: Holzwerkstoffe (eigene Darstellung)**

*d) Ausgangsfraction 4*

In der Ausgangsfraction 4 sind Laminatplatten, Verschnittreste und Möbel bzw. Möbelteile enthalten (siehe Abbildung 13, Abbildung 14). Das Holzsortiment weist

Beschichtungen aus Melamin oder mit Decor-Platten auf. Diese Holzabfälle enthalten teilweise holzfremde Stoffe wie Kunststoffteile, z.B. Griffe und Leisten, sowie Metallscharniere und -schielen. Die Fraktion wird aus dem Annahmehaufwerk manuell aussortiert. Dieses Holzsortiment entspricht der Sortierfraktion beschichtete Holzwerkstoffe.



**Abbildung 13: Fremdstoffe an beschichteten Holzwerkstoffen (eigene Darstellung)**



**Abbildung 14: Beschichtete Holzwerkstoffe (eigene Darstellung)**

*e) Ausgangsfraktion 5*

Die Ausgangsfraktion 5 besteht aus Bahnschwellen und Brandholz (siehe Abbildung 15). Diese Holzabfälle werden über eine sortenreine Anlieferung zur Verfügung gestellt. Dieses Sortiment entspricht der Sortierfraktion problematisches Holz.



**Abbildung 15: Bahnschwellen, Brandholz (eigene Darstellung)**

Zum Aussortieren und zur Materialbewegung der Holzabfälle stehen auf dem Altholzplatz ein Radlader mit Schaufel (siehe Abbildung 16) und ein Bagger mit Greifer (siehe Abbildung 17) zur Verfügung. Alle Ausgangsfraktionen werden einzeln mit dem Schredder (siehe Abbildung 18) vorgebrochen, d.h. auf eine Korngröße von durchschnittlich 200 – 500 mm zerkleinert. Zur Massenbestimmung der Fraktionen werden diese separat mit der Radladerschaufel aufgeladen oder auf einen LKW mit einer Mulde (siehe Abbildung 19) geladen und mit der LKW-Waage im



Eingangsbereich des Betriebes gewogen. Aus den Gewichten der fünf Fraktionen und der Gesamtmasse werden die Massenanteile der einzelnen Fraktionen, berechnet.



**Abbildung 16: Radlader (eigene Darstellung)**



**Abbildung 17: Bagger mit Greifer (eigene Darstellung)**



**Abbildung 18: Mobiler Holzschredder (eigene Darstellung)**



**Abbildung 19: LKW mit Mulde (eigene Darstellung)**

Während der Zerkleinerung der Ausgangsfraktionen erfolgt eine Probenahme zur Gewinnung von Probenmaterial. Die Proben dienen der Beurteilung der Ausgangsfraktionen und zur Berechnung der möglichen Gesamtbelastung des Versuchshaufwerkes. Die Probenahme erfolgt am Abwurf des Schredders indem mit der Radladerschaufel ca. 30 Sekunden Material aufgefangen wird (siehe Abbildung 20). Das zerkleinerte Material wird auf einer Kunststoffblache abgeschüttet (siehe Abbildung 21) und von diesem Proben gewonnen. Es werden je Ausgangsfraktion zwei Gewebesäcke mit einer Schaufel mit Material gefüllt. Jeder Kunststoff sack stellt eine Probe dar. Die Probenentnahme bei dem Bahnschwellen- und Brandholz erfolgt direkt aus der Radladerschaufel (siehe Abbildung 22). Das verbleibende Material wird jeweils zu den einzelnen Haufwerken der Ausgangsfraktionen hinzugefügt.



**Abbildung 20: Probenahme Ausgangsfraction  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 21: Teilprobe Ausgangsfraction  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 22: Probenentnahme Bahnschwellen  
(eigene Darstellung)**

Zur Herstellung des Versuchshaufwerkes werden die vorgebrochenen Ausgangsfractionen zusammengefügt und mit Hilfe des Radladers und Baggers miteinander vermischt. Zur Homogenisierung der Fraktionen wird das grob gemischte Holz ein zweites Mal mit dem Schredder zerkleinert, als Haufwerk abgeworfen und mit dem Radlader gemischt (siehe Abbildung 23, Abbildung 24)



**Abbildung 23: Zweiter Schreddervorgang  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 24: Versuchshaufwerk 100 m<sup>3</sup>  
(eigene Darstellung)**

Nach der Herstellung des Versuchshaufwerkes wird vor Ort eine Kontrolle durchgeführt, ob die Fraktionen innerhalb des Haufwerkes ausreichend verteilt sind. Zur Überprüfung der Durchmischung werden aus dem Haufwerk, angelehnt an die

Probenahmemethode ASPE (gemäss Kapitel 4.4.2), 16 Einzelproben entnommen. Die Entnahme der Einzelproben erfolgt manuell mit einer Harasse (siehe Abbildung 25). Die Probenahmepunkte verteilen sich über die Oberfläche des Haufwerkes. Alle 16 Einzelproben werden auf einer Kunststoffblache (siehe Abbildung 26) zu einer Mischprobe zusammengefügt. Die Mischprobe wird einer Sortieranalyse (siehe Kapitel 4.5) unterzogen und ihre Zusammensetzung durch wiegen der einzelnen sortierten Fraktionen bestimmt. Entspricht das Ergebnis näherungsweise der berechneten Zusammensetzung des Versuchshaufwerkes ist eine weitere Homogenisierung des Haufwerkes nicht erforderlich.



**Abbildung 25: Probenmeharasse  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 26: Kontrolle Durchmischung  
(eigene Darstellung)**

#### **4.4 Probenahmen**

In diesem Versuchsabschnitt kommen zwei Methoden der Probenahme von Holzabfällen zur Anwendung, die nacheinander jeweils am hergestellten Versuchshaufwerk durchgeführt werden. Ziel dieses Versuchsabschnittes ist die Gewinnung vergleich- und reproduzierbarer Holzproben. Zum Einen wird die Probenahme von Holzabfällen gemäss der Vollzugshilfe Holzabfälle durchgeführt. Zum Anderen erfolgt die Probenahme nach der Methode ASPE, in Anlehnung an die LAGA PN 98. Die Probenahmen werden an einem Haufwerk aus vorgebrochenen Holzabfällen, d.h. Kantenlänge von Holzstücken bis 500 mm, durchgeführt.

Die gewonnenen Proben werden vor der weiteren Behandlung in Gewebesäcke (siehe Abbildung 27) oder große Kunststoffharassen (siehe Abbildung 28) gefüllt und für die Zwischenlagerung in das Labor transportiert. Bei den Probenahmen wird auf eine umfangreiche Dokumentation, Beurteilung des Schreddermaterials sowie Begutachtung der Einzelproben verzichtet. Es erfolgt eine Fotodokumentation der Probenahmen.



**Abbildung 27: Gewebesäcke  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 28: Kunststoffharassen  
(eigene Darstellung)**

#### **4.4.1 Probenahmemethode gemäss Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU**

Entsprechend der Vorgabe der Vollzugshilfe Holzabfälle [21] erfolgt die Beprobung des etwa 100 m<sup>3</sup> großen Versuchshaufwerkes mit Hilfe eines Baggers und eines Radladers. An verschiedenen Stellen und in verschiedenen Tiefen des Haufwerkes werden mit dem Bagger vier bis sechs Greifer Material entnommen (siehe Abbildung 29) und als separates Haufwerk abgelegt. Dieses wird mit der Schaufel des Radladers auf eine Höhe von etwa 15 cm abgeflacht. An mehreren Stellen über das ausgebreitete Holz verteilt werden acht Harassen mit einer Schaufel mit Holzmaterial gefüllt (siehe Abbildung 30). Das verbleibende Material wird mit dem Radlader aufgenommen und wieder unter das Versuchshaufwerk gemischt. Dieser Vorgang wird zweimal wiederholt. Insgesamt werden drei Proben nach diesem Vorgehen entnommen. Zwei der drei Proben verbleiben in den Harassen (siehe Abbildung 31), eine Probe wird nach der Probenentnahme in Gewebesäcke umgefüllt. Die weitere Bezeichnung der Proben lautet BAFU 1, BAFU 2 sowie BAFU 3.



**Abbildung 29: Entnahme Altholz mit Greifer  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 30: Entnahme Probenmaterial mit  
Schaufel (eigene Darstellung)**



**Abbildung 31: Probematerial BAFU 1  
(eigene Darstellung)**

#### **4.4.2 Probenahmemethode ASPE**

Aus dem ca. 100 m<sup>3</sup> großem Versuchshaufwerk werden insgesamt sieben Altholzproben entnommen. Gemäss dem Vorgehen der Probenahmemethode ASPE wird mit dem Bagger ein Schürfschlitz von der Spitze zum Fuss des Haufwerkes gezogen (siehe Abbildung 32). Entlang des Schürfschlitzes werden vom Fuss bis zur Spitze des Haufwerkes manuell 16 Einzelproben entnommen (siehe Abbildung 33). Aufgrund der Korngrösse werden die Einzelproben mit einer Harasse entnommen. Zur Überprüfung des Mindestgewichtes der Einzelproben von ca. 4 – 5 kg wird jede Einzelprobe gewogen. Die 16 Einzelproben einer Probenahme werden zu einer Mischprobe zusammengefügt und in Gewebesäcke verpackt. Die sieben nach der Probenahmemethode ASPE entnommenen Proben werden nachfolgend als ASPE 1 bis ASPE 7 bezeichnet.



**Abbildung 32: Haufwerk mit Schürfschlitz  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 33: Manuelle Entnahme Einzelprobe  
(eigene Darstellung)**

#### **4.5 Siebung und Sortierung**

Alle zehn Proben des Versuchshaufwerkes werden in Zusammenarbeit mit einem Labor einer Siebung und optischen Sortieranalyse unterzogen. Das Ziel dieses Versuchsschrittes ist die Ermittlung der Zusammensetzung bezogen auf die Korngrösse

und die optisch differenzierbaren Sortierfraktionen. Die Ergebnisse der Siebungen und Sortieranalysen sind Grundlage für die Vergleichbarkeit der Probenahmemethoden.

#### **4.5.1 Durchführung Siebung**

Die Siebung dient als Vorbereitungsschritt zur Trennung des Probenmaterials in die Grob- und Feinfraktion und wird vor jeder Sortieranalyse durchgeführt. Bei der Siebung der Proben kommen eigens hergestellte Siebharassen (siehe Abbildung 34) zur Anwendung. Mittels Handsiebung, d.h. Kreis- und Rüttelbewegungen des Siebturmes, erfolgt eine Klassierung des Probenmaterials in die Korngrößenfraktionen  $> 40$  mm,  $40 - 20$  mm,  $20 - 5$  mm und  $< 5$  mm.



**Abbildung 34: Siebharassen  
(eigene Darstellung)**

Die gesiebten Fraktionen werden gewogen und deren Massenanteile bestimmt. Die beiden Fraktionen,  $20 - 5$  mm und  $< 5$  mm, verbleiben als Feinfraktion. Die Grobfraktion, bestehen aus dem Materialanteil  $> 40$  mm und  $40 - 20$  mm, wird nachfolgend einer optischen Sortieranalyse unterzogen.




Die Ergebnisse der Siebung der zehn Holzproben werden im Kapitel 5.3 gezeigt.

#### **4.5.2 Durchführung optische Sortieranalyse**

Bei der optischen Sortieranalyse werden die Grobfraktionen der Proben manuell nach organoleptischen Kriterien in sechs verschiedene Fraktionen separiert (siehe Abbildung 35). Die Beschreibung der Sortierfraktionen ist der zu entnehmen. Es erfolgt eine Separierung in die Fraktionen optisch unbehandeltes Massivholz, behandeltes Massivholz, Spanplatten/Holzwerkstoffe, beschichtete Spanplatten/Holzwerkstoffe, problematisches Holz und Fremd-/ Störstoffe (siehe Abbildung 36).

Tabelle 14: Übersicht Sortierfraktionen für optische Sortieranalyse (eigene Darstellung)

<p>(1) Massivholz, optisch unbehandelt</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Holz ohne erkennbare Fremd- /Schadstoffe oder Farb- /Lackanstriche</li><li>- mechanisch behandeltes Holz</li></ul>	 A photograph showing a pile of light-colored, untreated wood shavings and a small rectangular wood block. A yellow ruler is placed horizontally below the wood for scale.
<p>(2) Massivholz, behandelt</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- lasiertes, gebeiztes Holz</li><li>- Holz mit Farbanstrich, Lackierungen</li></ul>	  Two photographs showing treated wood shavings. The top photograph shows shavings with a yellow coating. The bottom photograph shows shavings with red and blue coatings. A yellow ruler is placed horizontally below each pile for scale.

<p>(3) verleimte, gepresste Holzwerkstoffe</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- jegliche Form von Spanplatten und/oder Holzwerkstoffen</li><li>- mit/ohne Farb-/Lackanstrich</li><li>- nicht beschichtet</li></ul>	
<p>(4) verleimte, gepresste Holzwerkstoffe, mit Beschichtung</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Spanplatten und /oder Holzwerkstoffe mit einer Beschichtung</li><li>- PVC-Beschichtungen</li></ul>	
<p>(5) problematisches Holz</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- teerölhaltiges Holz (dunkel, Teegeruch)</li><li>- imprägniertes Holz</li><li>- Holz mit Schutzanstrich</li><li>- z.B. Bahnschwellen, Fensterholz</li></ul>	



(6) Fremd- und Störstoffe

- Kunststoffe (Plastik, Folien)
- Textilien, Gewebe
- Nägel, Schrauben, Beschläge
- Karton, Papier
- Mineralien, Glas
- Dachpappe



(7) Feinanteil

- Holzfraktion < 20 mm

Anmerkung: Der Feinanteil wird über die Siebung abgetrennt.





**Abbildung 35: Sortierung**  
(eigene Darstellung)

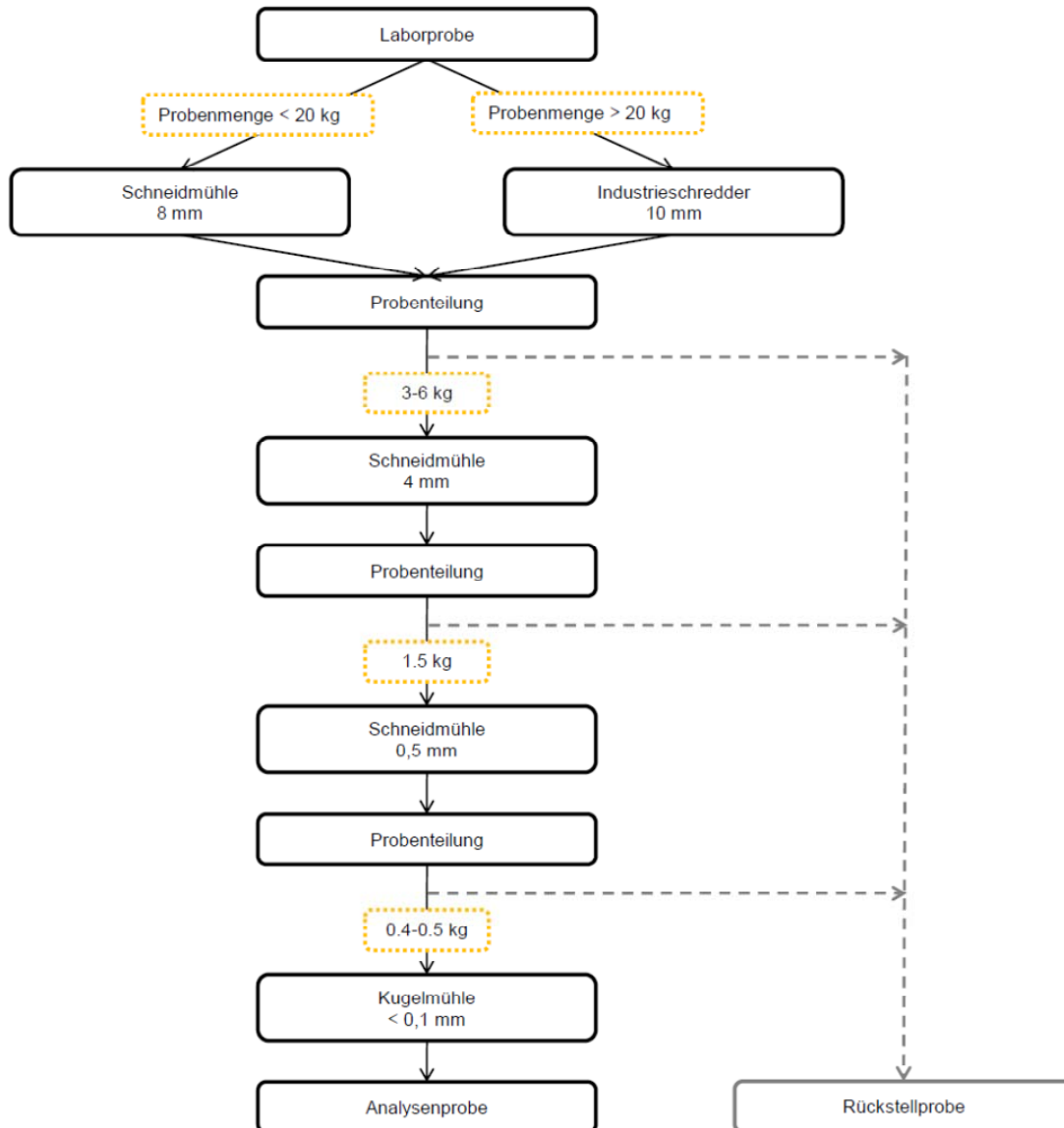


**Abbildung 36: Fraktionen nach Sortieranalyse**  
(eigene Darstellung)

Es handelt sich dabei um eine Positivsortierung, wobei die Fraktionen durch ihre Eigenschaften, wie z.B. Farbe, Struktur, Geruch und das allgemeine Aussehen, voneinander getrennt werden. Die Sortieranalyse wird von zwei Sortierern gleichzeitig auf einer reißfesten Kunststoffblache durchgeführt. Das zu sortierende Probenmaterial entsprechend den Kriterien den sechs Fraktionen zugeordnet und in ein separates Behältnis abgelegt. Die einzelnen Fraktionen werden zur Bestimmung der Massenanteile gewogen. Das Probenmaterial wird vor der weiteren Probenaufbereitung zusammengefügt und in den Gewebesäcken zwischengelagert. Die Probe ASPE 1, die nach der Methode ASPE entnommen wurde, verbleibt nach der Sortieranalyse in den einzelnen Sortierfraktionen. Diese werden anschliessend einer separaten Laboranalyse unterzogen.

Die Ergebnisse der Sortieranalysen der zehn Proben werden im nachfolgenden Kapitel 5.3 gezeigt.

#### 4.6 Probenaufbereitung für Laboranalysen



**Abbildung 37: Ablaufschema Probenaufbereitung (eigene Darstellung)**

Die Aufbereitung der einzelnen Proben richtet sich nach den Vorgaben der Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU (Vgl. [25]). Das Schema der Probenaufbereitung ist in obiger Abbildung 37 dargestellt. Die Proben mit einem Gesamtgewicht über 20 kg werden mit Hilfe eines Industrieschredders (siehe Abbildung 38) auf eine Korngröße von etwa 10 mm zerkleinert (siehe Abbildung 39). Das gesamte Probenmaterial einer Probe wird oben in den Aufgabetrichter des Schredders eingefüllt und das zerkleinerte Probenmaterial wird an der Auswurföffnung in mehreren Kunststoffboxen aufgefangen. In den Boxen wird das zerkleinerte Holz mit einer Handschaufel durchmischt. Die Holzmenge in den Boxen wird jeweils zweimal mit einem Riffelprobenteiler (siehe Abbildung 40) auf ein Viertel reduziert. Dieses Material wird zusammengefügt und

erneut zweimal mit dem Riffelprobenteiler herunter geteilt. Aus einer Hälfte des letzten Teilungsschrittes wird eine Laborprobe und aus der anderen Hälfte eine Rückstellprobe von ca. 3 bis 6 kg gewonnen. Hierzu werden zwei Kunststoffeimer mit dem zerkleinerten Holz mit einer Handschaufel gefüllt. Das verbleibende Material aus den Probenteilungen und nach der Gewinnung der Labor- und Rückstellprobe wird verworfen.



**Abbildung 38: Industrieschredder  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 39: Schneidsieb 10 mm  
Industrieschredder (eigene Darstellung)**



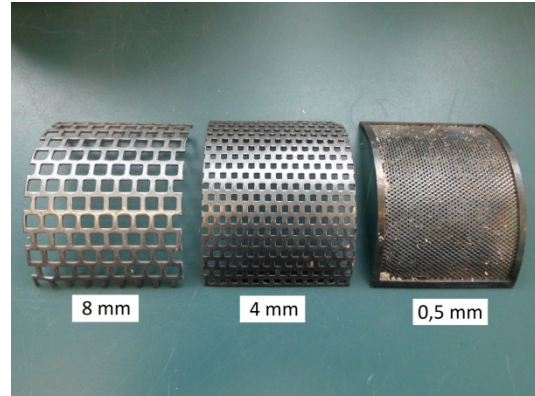
**Abbildung 40: Riffelprobenteiler groß  
(eigene Darstellung)**

Die folgenden Arbeitsschritte der Probenaufbereitung werden vom Labor Bachema durchgeführt. Zum Einsatz kommen eine Laborschneidmühle mit Wolfram-Carbid-Schneidzeug (siehe Abbildung 41), Lochsiebeinsätze für die Schneidmühle mit verschiedenen Lochweiten aus Titan (siehe Abbildung 42), ein kleiner Riffelprobenteiler (siehe Abbildung 43) und ein teflonbeschichteter Mahlbehälter mit Stahlkugeln (siehe Abbildung 44) für die Kugelmühle. Die Laborproben mit einem Gesamtgewicht kleiner als 20 kg werden in der ersten Zerkleinerungsstufe mit einer Schneidmühle auf 8 mm zerkleinert. Das zerkleinerte Material wird mit einem Riffelprobenteiler auf eine Menge von 3 bis 6 kg reduziert. In der nächsten Zerkleinerungsstufe werden alle Proben auf 4 mm zerkleinert und anschliessend mit dem Riffelprobenteiler auf etwa 1,5 kg geteilt. Der nachfolgende Zerkleinerungsvorgang mit der Schneidmühle schneidet das Material

auf eine Größe von 0,5 mm. Etwa 400 bis 500 g dieses Materials werden auf vier Mahlbehälter aufgeteilt und während einer Stunde auf 0,1 mm zerkleinert. Das gemahlene Holz wird in ein verschliessbares Glas gefüllt und stellt die Analysenprobe dar.



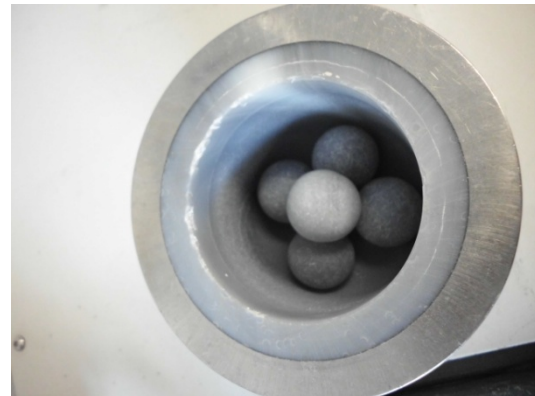
**Abbildung 41: Retsch Laborschneidmühle  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 42: Lochsiebe Laborschneidmühle  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 43: Riffelprobenteiler klein  
(eigene Darstellung)**



**Abbildung 44: Mahlbehälter Kugelmühle  
(eigene Darstellung)**

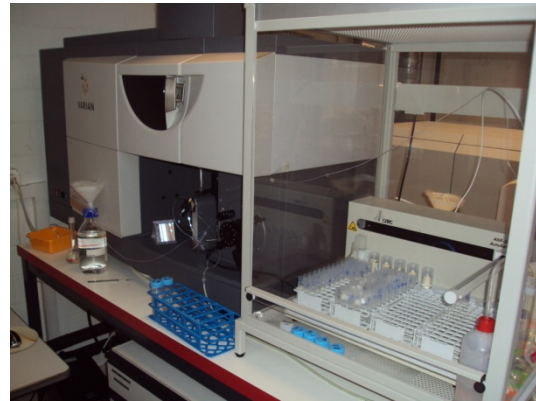
#### **4.7 Chemische Laboranalysen**

Die chemischen Analysen werden von einem Labor durchgeführt und umfassen die Probenvorbereitung und die analytische Messung der folgenden Parameter gemäß der Vollzugshilfe Holzabfälle (Vgl. [7]): Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Chlor (Cl), Fluor (F), Zink (Zn) sowie PCP und PAK. Zusätzlich zu der Bestimmung des Gesamtgehaltes an Chlor wird der Gehalt an Chlorid (Cl<sup>-</sup>) gemessen. Auf die Analyse von PCB wird verzichtet, da bei dem eingesetzten Holzsortiment nicht mit einer PCB-Belastung zu rechnen ist [26].

Die Analyse der Schwermetalle (As, Pb, Cd, Cr, Cu, Zn) erfolgt über Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICPMS) (siehe Abbildung 45) oder über optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICPOES) (siehe Abbildung 46). Für die Analysen werden die Proben über einen zweistufigen Druckaufschluss aufgeschlossen.

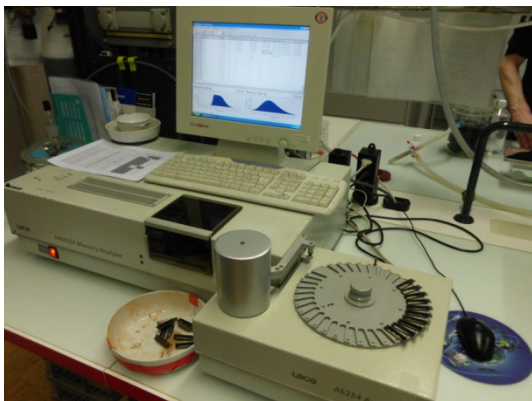


**Abbildung 45: ICPMS für Schwermetalle (eigene Darstellung)**



**Abbildung 46: ICPOES für Schwermetalle (eigene Darstellung)**

Der Quecksilbergehalt kann direkt, ohne eine weitere Probenvorbereitung, über eine Verbrennung mit Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) gemessen werden (siehe Abbildung 47). Die PCP-Analyse erfolgt nach einer Extraktion mit einem Gaschromatographen mit Elektroneneinfangdetektor (GC-ECD) (siehe Abbildung 48).

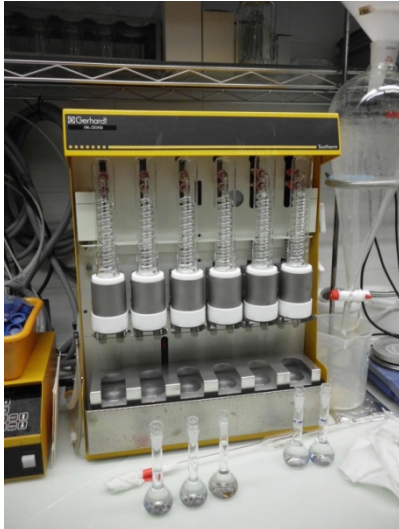


**Abbildung 47: Hg-Analysator AMA254 (eigene Darstellung)**



**Abbildung 48: GC-ECD für PCP-Analyse (eigene Darstellung)**

Nach einer Soxtherm-Extraktion (siehe Abbildung 49) wird der PAK-Gehalt der Proben mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie (GC-MS) gemessen (siehe Abbildung 50).



**Abbildung 49: Soxtherm für Extraktion PAK (eigene Darstellung)**

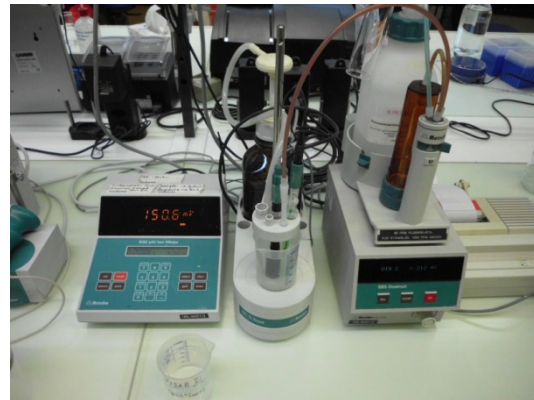


**Abbildung 50: GC-MS für PAK (eigene Darstellung)**

Die Messung von Chlor erfolgt ohne weitere Vorbereitungsschritte coulometrisch nach der Verbrennung einer Probeneinwaage (siehe Abbildung 51). Der Fluor-Gehalt wird nach einem Aufschluss elektrochemisch über eine ionenselektive Elektrode gemessen (siehe Abbildung 52).

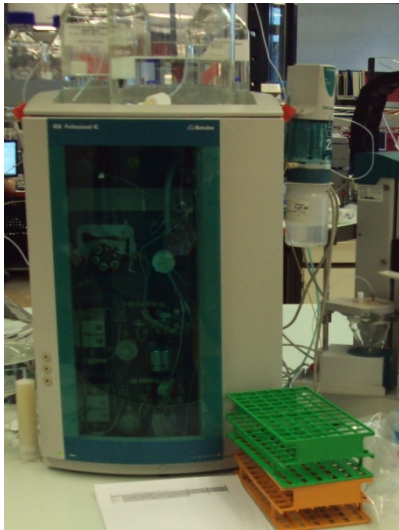


**Abbildung 51: Cl-Analysator ECS1200 (eigene Darstellung)**



**Abbildung 52: Ionenselektive Elektrode für Fluor-Messung (eigene Darstellung)**

Für die Bestimmung des wasserlöslichen Chlorgehaltes durchlaufen die Proben einen 24h-Eluatstest zur Herauslösung des löslichen Chlors. Die Messung erfolgt über Ionenchromatographie (IC) (siehe Abbildung 53).



**Abbildung 53: IC für Chlorid-Messung  
(eigene Darstellung)**

In der folgenden Tabelle 15 sind für jeden zu analysierenden Parameter die Vorbereitungsschritte, die Messtechniken und die entsprechenden Referenzmethoden angegeben.

**Tabelle 15: Übersicht Messtechniken, Referenzmethoden (Vgl. [27], S. 34 ff)**

<i>Parameter</i>	<i>Vorbereitung</i>	<i>Messtechnik</i>	<i>Referenzmethode</i>
Chlor gesamt	keine	coulometrisch nach Verbrennung	DIN 38414 S117
Chlorid	24h-Eluattest nach TVA	IC	DIN EN ISO 10304 D19, SLMB Kap. 27A 4.10
Fluor	Aufschluss	ionenselektive Elektrode	VBBo/DIN 38405-D1
Arsen	zweistufiger Druckaufschluss	ICPMS	DIN 38406-29, Bachema
Blei	zweistufiger Druckaufschluss	ICPOES	EN ISO 11885, DIN 38406-29
Cadmium	zweistufiger Druckaufschluss	ICPMS	EN ISO 11885, DIN 38406-29
Chrom	zweistufiger Druckaufschluss	ICPOES	EN ISO 11885, DIN 38406-29
Kupfer	zweistufiger Druckaufschluss	ICPOES	EN ISO 11885, DIN 38406-29
Zink	zweistufiger Druckaufschluss	ICPOES	EN ISO 11885, DIN 38406-29
Quecksilber	keine	AAS	DIN EN ISO 17852, EPA 7473
PCP	Extraktion mit Ultraschall	GC-ECD	BAFU für Holzabfälle, Bachema
PAK	Extraktion mit Soxtherm	GCMS	EPA 8270



## 5 Ergebnisse und Auswertung

Dieses Kapitel umfasst die Darstellung und Auswertung der wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen. Es erfolgt eine getrennte Betrachtung der Vorversuche, der Versuchsvorbereitung und des Vergleichs der Probenahmemethoden.

### 5.1 Vorversuche

#### 5.1.1 Sortieranalyse

In den Vorversuchen wird die optische Sortieranalyse an Altholzmaterial mit unbekannter Zusammensetzung und mit zwei Sortieren durchgeführt. Es wird betrachtet, welchen Einfluss der Probenehmer bei der Durchführung der optischen Sortieranalyse auf das Ergebnis ausübt. Bei der Sortieranalyse wird das Probenmaterial aufgrund optischer Kriterien in verschiedene definierte Fraktionen eingeordnet und dadurch die Zusammensetzung der Probe ermittelt. Weiterhin soll die Streuung der Resultate bei der Durchführung mehrerer Sortieranalysen aufgezeigt werden. Die Daten zum Vorversuch Sortieranalyse sind dem Anhang zu entnehmen.

In dem Vorversuch zur optischen Sortieranalyse werden etwa 20 kg Altholzmaterial mit einer durchschnittlichen Korngröße > 100 bis 400 mm insgesamt je dreimal sortiert. Die Tabelle 16 zeigt die Mittelwerte der Anteile Korngrößen aus allen Siebungen des Materials.

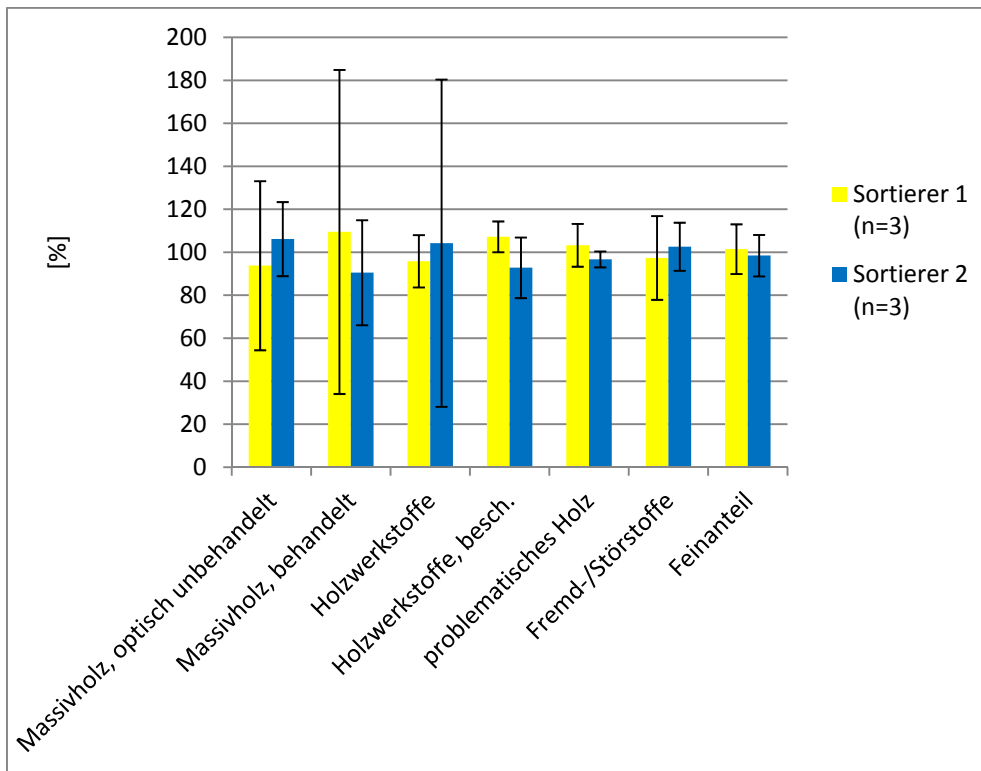
**Tabelle 16: Korngrößenverteilung Voruntersuchung Sortieranalyse (eigene Darstellung)**

<i>Fraktion</i>	<i>Gewicht [kg]</i>	<i>Anteil [%]</i>
> 40 mm	16.97	86.4
40 - 20 mm	1.12	5.7
20 - 5 mm	0.90	4.6
< 5 mm	0.65	3.3
<b>gesamt</b>	19.64	

Es ist zu erkennen, dass das eingesetzte Material zu über 90% aus Holz mit einer Größe von 40 – 20 mm und > 40 mm, welches die Grobfraktionen bildet, zusammengesetzt ist. Etwa 9% des Materials sind 20 – 5 mm und < 5 mm groß. Diese beiden Korngrößenfraktionen werden als Feinanteil zusammengefasst und nachfolgend nicht sortiert.

Die Abbildung 54 zeigt die Mittelwerte der Massenanteile sowie die Streuungen der Messwerte je Sortierfraktion und Sortierer bezogen auf den wahren Wert. Der wahre Wert ist definiert als Mittelwert der Massenanteile aller sechs Sortieranalysen und wird

auf 100% gesetzt. Die Streuungen der Massenanteile werden in 95%-Konfidenzintervalle umgerechnet und als Spannen aufgetragen. In dem Diagramm ist zu erkennen, dass die gemittelten Massenanteile der Fraktionen je Sortierer nahe beieinander liegen, aber vom wahren Wert lediglich bis zu 10% abweichen. Größere Streuungen der Messwerte treten bei Sortierer 1 bei den Fraktionen optisch unbehandeltes und behandeltes Holz sowie bei Sortierer 2 bei der Fraktion Holzwerkstoffe auf.

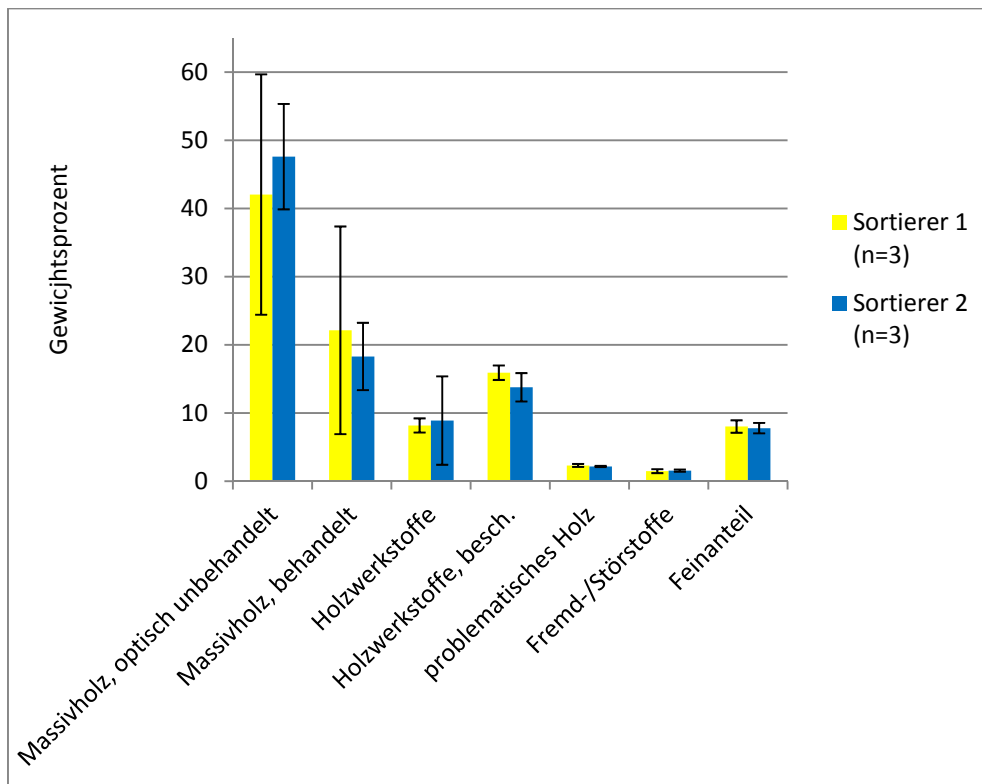


**Abbildung 54: Ergebnisse Voruntersuchung Sortieranalyse normiert (eigene Darstellung)**

Alle Balken sollten bei 100% sein, aber infolge der Streuung gibt es Abweichungen davon. Erreichen die Spannen des 95%-Konfidenzintervall die 100% nicht, deutet dies auf eine systematische Abweichung hin. Dieser Fall tritt bei keiner Fraktion und bei keinem Sortier auf. Es liegen also keine systematischen Abweichungen vor.

In der Abbildung 55 werden die absoluten mittleren Massenanteile der Sortierfraktionen je Sortierer einander gegenüber gestellt. Zusätzlich werden die Streuungen der Massenanteile als Spannen (95%-Konfidenzintervalle) aufgetragen. Es sind zwischen den beiden Sortierern Unterschiede der Ergebnisse der Sortieranalyse zu erkennen. Insgesamt bewegen sich die mittleren Massenanteile je Sortierer jedoch nahe am wahren Wert. Der Anteil der Fraktion optisch unbehandeltes Holz liegt bei Sortierer 2 um rund 10% höher. Bei Sortierer 1 sind die Anteile bei den Fraktionen behandeltes Holz und beschichtete Holzwerkstoffe etwas höher. Alle anderen Fraktionen je

Sortierer sind ähnlich hoch. Starke Streuungen treten bei Sortierer 1 bei der Fraktion optisch unbehandeltes und behandeltes Holz auf. Bei Sortierer 2 streut der Wert der Fraktion Holzwerkstoffe stärker.



**Abbildung 55: Ergebnisse Voruntersuchung Sortieranalyse (eigene Darstellung)**

Durch die Abtrennung des vorhandenen Feinanteils (Korngrößenfraktion 20 – 5 mm, < 5 mm) ist die Sortieranalyse mit der Grobfraktion gut durchführbar. Große Altholzstücke sind einer Sortierfraktion einfach zuzuordnen. Bei der Erkennung und Zuordnung kleinerer Stücke aus einer Probe aus der Korngrößenfraktion 40 – 20 mm treten Schwierigkeiten auf, da teilweise nicht zweifelsfrei zwischen behandelten und nicht behandelten Massivholz und beschichteten und unbeschichteten Holzwerkstoffen differenziert werden kann. Die Ergebnisse des Vorversuches zur optischen Sortieranalyse zeigen aber, dass je Sortier gleichwertige Anteile der im Versuchsmaterial enthaltenen Fraktionen ermittelt werden. Größere Abweichungen zwischen den beiden Sortierern resultieren zum Einen aus der geringen eingesetzten Probenmenge für die Sortieranalyse. Zum Anderen hat die Korngröße des Altholzes einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. Wird ein Probenstück großer Korngröße falsch zugeordnet, bewirkt dies eine erhebliche Verschiebung der Massenanteile der Fraktionen. Dies zeigt sich auch bei den Streuungen der Ergebnisse. Weiterhin hat die Anzahl der Sortieranalysen einen Einfluss auf die Stärke der Streuung. Bei der

geringen Probenanzahl (n=3) resultiert aus den streuenden Messwerten ein großes Konfidenzintervall.

Aus den Ergebnissen des Vorversuches zur optischen Sortieranalyse lässt sich ableiten, dass unabhängig vom Sortierer und von der Anzahl der Sortierungen reproduzierbare Ergebnisse der Fraktionsanteile ermittelt werden können.

### 5.1.2 Teilungsverfahren

In dem Vorversuch zur den Teilungsverfahren wird untersucht, welchen Einfluss die Probenteilung und die Methode der Probenteilung auf die Zusammensetzung der untersuchten Probe, d.h. auf die Ergebnisse der Sortieranalyse, hat. In dem Versuchen werden zwei verschiedene Probenteilungsverfahren angewendet, wobei etwa 35 kg Material geteilt und eine Hälfte des Materials der optischen Sortieranalyse unterzogen wird. Die Daten des Vorversuchs Teilungsverfahren sind dem Anhang zu entnehmen.

Die durch die Materialsiebung ermittelte Korngrössenzusammensetzung des Ausgangsmaterials für die Teilungsverfahren ist in Tabelle 17 zu finden.

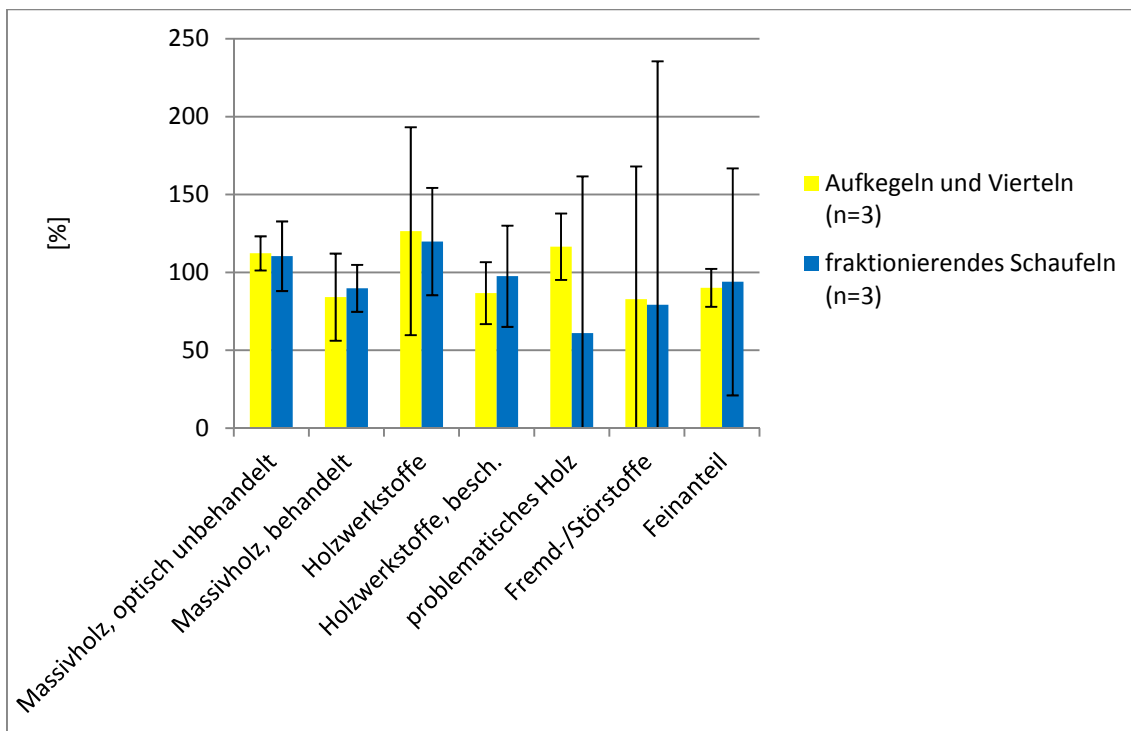
**Tabelle 17: Korngrössenverteilung Voruntersuchung Teilung (eigene Darstellung)**

<i>Fraktion</i>	<i>Gewicht</i>	<i>Anteil</i>
> 40 mm	29.01	84.7
40 - 20 mm	1.73	5.1
20 - 5 mm	2.27	6.6
< 5 mm	1.23	3.6
<b>gesamt</b>	<b>34.24</b>	

Die Grobfraktion (Korngröße > 40 mm und 40 – 20 mm) macht einen Anteil von etwa 90% im gesamten Material für die Versuche der Teilungsverfahren aus. Die Feinfraktion (Korngröße 20 – 5 mm und < 5 mm) weist einen Anteil von etwa 10% auf.

Die folgende Abbildung 56 zeigt die Ergebnisse aus der Voruntersuchung der Teilungsverfahren Aufkegeln und Vierteln sowie fraktionierendes Schaufeln. In dieser Darstellung wird die ermittelte Zusammensetzung des gesamten Materials von 35 kg als wahrer Wert definiert und auf 100% umgerechnet. Die Mittelwerte der Massenanteile der Sortierfraktionen je Teilungsverfahren werden bezogen auf den wahren Wert abgebildet. Ebenso werden die Streuungen der Messwerte, berechnet über das 95%-Konfidenzintervall, als Spannen aufgetragen. Das Diagramm zeigt Unterschiede der Massenanteile abhängig vom Teilungsverfahren. Die Massenanteile für die Fraktionen optisch unbehandeltes Holz, Holzwerkstoffe und problematisches Holz nach dem Teilungsverfahren Aufkegeln und Viertel liegen oberhalb und für die anderen Fraktionen unterhalb des wahren Wertes. Die mittleren Massenanteile nach

dem Teilungsverfahren fraktionierendes Schaufeln liegen für die Fraktionen optisch unbehandeltes Holz sowie Holzwerkstoffe oberhalb und für alle anderen Fraktionen unterhalb des wahren Wertes. Starke Streuungen treten bei dem Teilungsverfahren fraktionierendes Schaufeln bei den Fraktionen problematisches Holz, Fremdstoffe und Feinanteil auf. Ebenfalls starke Streuungen weisen die Massenanteile der Fraktionen Holzwerkstoffe und Fremdstoffe bei der Teilung durch Aufkegeln und Kegeln



**Abbildung 56: Ergebnisse Voruntersuchung Teilungsverfahren (wahrer Wert) (eigene Darstellung)**

In dieser Darstellung bezogen auf den wahren Wert, sollten die Balken die Balken die 100% erreichen. Durch die vorkommende Streuung der Messwerte kommt es jedoch zu Abweichungen. Es würde auf einen systematischen Fehler bei den Teilungsverfahren hinweisen, wenn eine Spanne des 95%-Konfidenzintervalls nicht die 100% erreicht. Dieser Fall tritt bei der Fraktion optisch unbehandeltes Massivholz bei der Variante Aufkegeln und Vierteln auf.

Das Diagramm in der Abbildung 57 zeigt ebenfalls die Ergebnisse aus der Voruntersuchung der Teilungsverfahren Die Darstellung der mittleren Massenanteile je Fraktion und Teilungsverfahren erfolgt absolut. Zusätzlich wird die Streuung der Messwerte, berechnet als 95%-Konfidenzintervall, abgebildet. Zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Teilungsverfahren sind keine großen Unterschiede erkennbar. Die Streuungen der Messwerte sind bei den Fraktionen optisch unbehandeltes Holz und Feinanteil für das Teilungsverfahren fraktionierendes Schaufeln deutlich stärker als bei allen anderen Fraktionen je Teilungsverfahren.

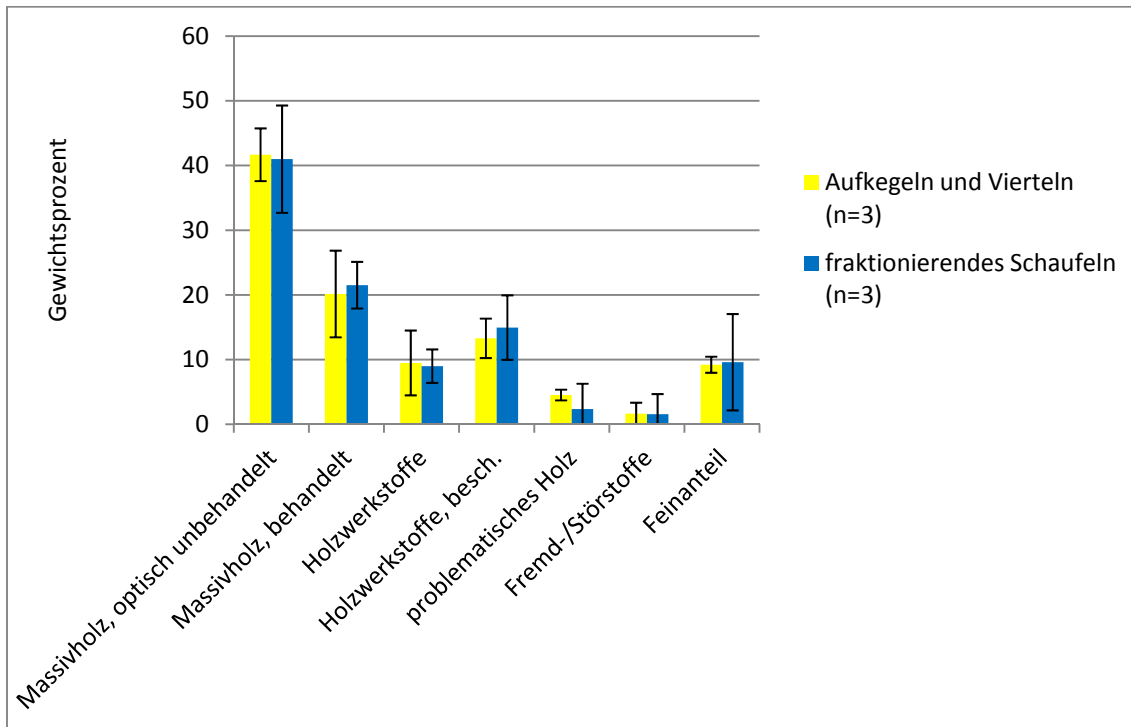


Abbildung 57: Ergebnisse Voruntersuchung Teilungsverfahren (absolut) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 58 zeigt die das Teilungsverfahren Aufkegeln und Vierteln die Mittelwerte der Massenanteile der Fraktionen der sortierten Hälfte sowie der zweiten nicht sortierten Hälfte. Diese Werte werden bezogen auf die Zusammensetzung des gesamten Materials berechnet.

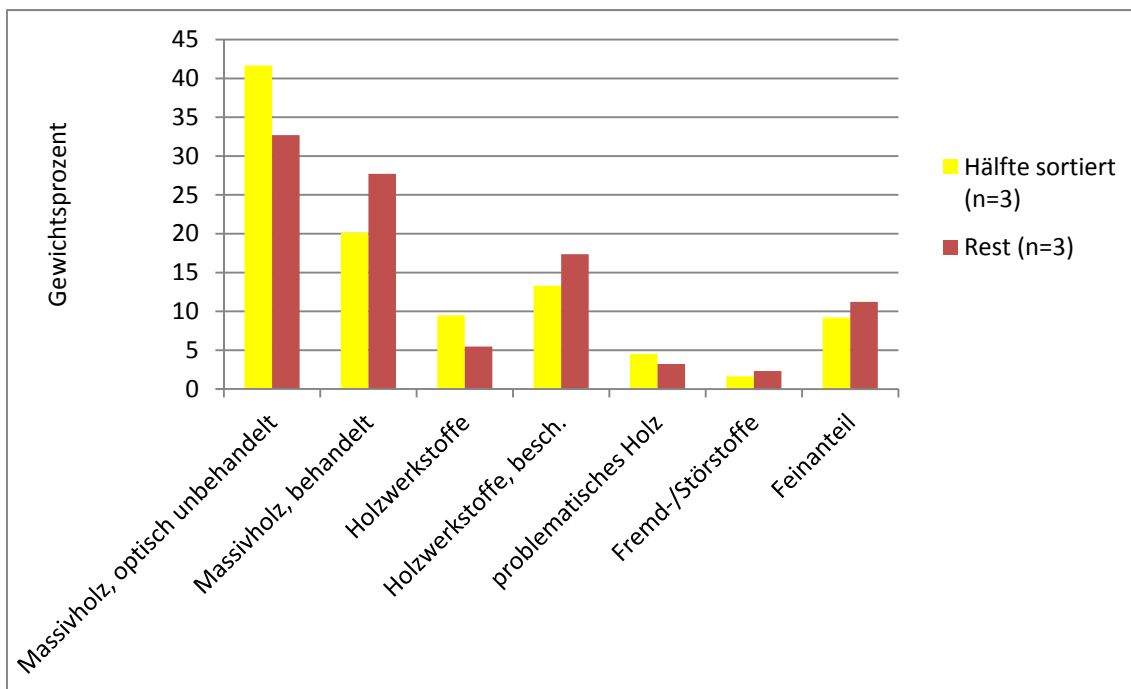
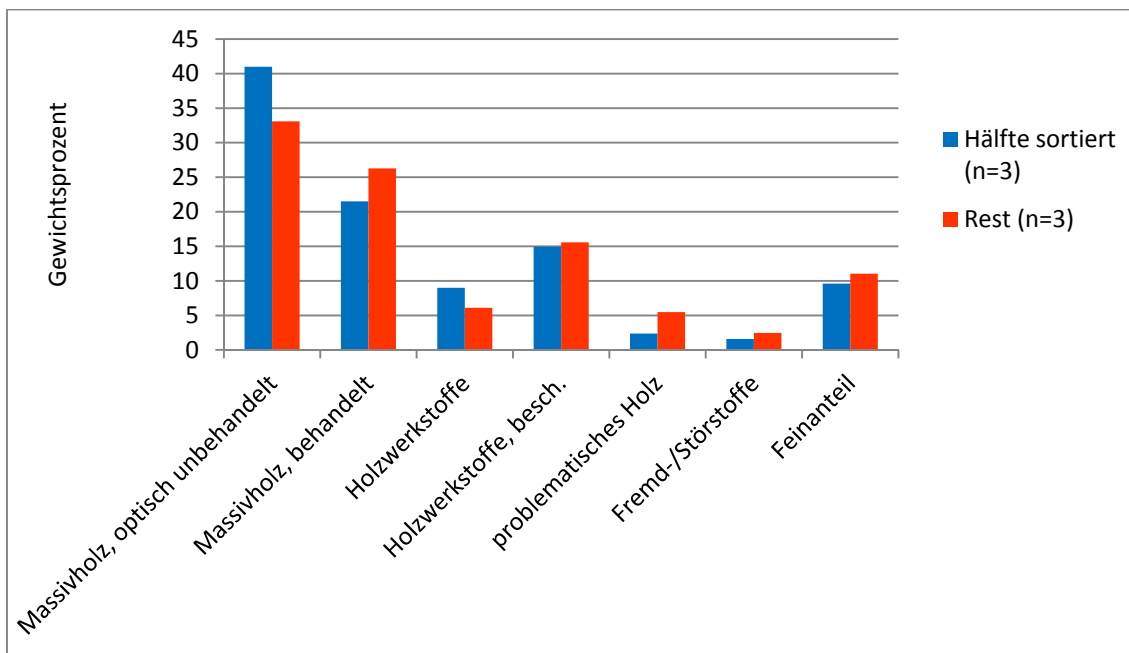


Abbildung 58: Ergebnisse Vorversuch Teilungsverfahren, Aufkegeln und Vierteln (eigene Darstellung)

Die Darstellung der Ergebnisse zeigt, dass es zwischen der sortierten und der nicht sortierten Hälfte nach der Probenteilung Unterschiede in der Zusammensetzung des Materials gibt. Bei Fraktion optisch unbehandeltes Massivholz beträgt der Unterschied der Mittelwerte der Anteile ca. 10%. Ein Unterschied von etwa 7% ist bei der Fraktion behandeltes Massivholz erkennbar. Bei allen anderen Fraktionen betragen die Unterschiede zwischen der sortierten und der nicht sortierten probenhälfte maximal 5%. Ein vergleichbares Bild erhält man für das Probenteilungsverfahren fraktionierendes Schaufeln (siehe Abbildung 59)



**Abbildung 59: Ergebnisse Vorversuch Teilungsverfahren, fraktionierendes Schaufeln (eigene Darstellung)**

Bezogen auf andere Probenteilungsverfahren lassen sich die beiden untersuchten Verfahren Aufkegeln und Viertel sowie fraktionierendes Schaufeln für vorgebrochenes Altholz anwenden. Jedoch ist das Verfahren Aufkegeln und Viertel bei der vorhandenen Stückigkeit des Materials einfacher anwendbar. Bei großen Stücken in der Probe ist eine Teilung durch das fraktionierende Schaufeln schwerer durchführbar. Ebenfalls erfolgt keine gleichmäßige Aufteilung des Feinanteils der Probe auf jede Hälfte mit der eingesetzten Schaufel. Anhand der Ergebnisse aus dem Vorversuch ist ein Einfluss der Probenteilung auf die nachfolgende Sortieranalyse des Probenmaterials erkennbar. Die Probenteilung von vorgebrochenem Holz (Korngröße 0 – 500 mm) zeigt Verschiebungen der Anteile der Fraktionen. Zum Einen erweist sich bei überwiegend großen Holzstücken in dem Probenmaterial, z.B. bei Holzvorbruch (Korngröße 0 – 500 mm) eine Teilung als schwierig. Zum Anderen wirkt sich die geringe Probenmenge von 35 kg für den Vorversuch nachteilig bei der Probenteilung

aus. Große Unterschiede treten vor allem bei Fraktionen auf, die zu einem geringen Anteil in der Probe vorliegen.

## 5.2 Versuchsvorbereitung

In nachfolgender Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Gewichtsbestimmung der fünf separat bereitgestellten Fraktionen sowie die daraus resultierende Zusammensetzung des Versuchshaufwerkes zu finden. Den größten Anteil hat die Fraktion optisch unbehandeltes Massivholz mit 50%. Die Fraktion behandeltes Massivholz macht einen Anteil von 15% aus. Mit 17% ist die Fraktion Holzwerkstoffe und mit 10% die Fraktion beschichtete Holzwerkstoffe im Versuchshaufwerk vertreten. Problematisches Holz weist einen Anteil von 8% auf.

**Tabelle 18: Zusammensetzung Versuchshaufwerk (eigene Darstellung)**

Fraktion	Gewicht	Anteil
Massivholz, optisch unbehandelt	11'110	50
Massivholz, behandelt	3'330	15
Holzwerkstoffe	3'820	17
Holzwerkstoffe, beschichtet	2'120	10
Problematisches Holz	1'860	8
gesamt	22'240	

Die folgende Tabelle 19 zeigt das Ergebnis aus der optischen Sortieranalyse zur Überprüfung der Durchmischung des Versuchshaufwerkes. Es wird eine Mischprobe bestehend aus 16 Einzelproben, die nach der Methode ASPE entnommen werden, der optischen Sortieranalyse unterzogen. Neben den fünf in der Haufwerkszusammensetzung betrachteten Fraktionen kommen bei der Sortieranalyse die Fraktionen Fremdstoffe und die Fraktion Feinanteil hinzu.

**Tabelle 19: Ergebnis Überprüfung Durchmischung (eigene Darstellung)**

Fraktion	Gewicht	Anteil
Massivholz, optisch unbehandelt	41.72	53.2
Massivholz, behandelt	8.23	10.5
Holzwerkstoffe	12.46	15.9
Holzwerkstoffe, beschichtet	5.18	6.6
Problematisches Holz	4.55	5.8
Fremdstoffe	0.13	0.2
Feinanteil	6.21	7.9
gesamt	78.48	



Bei der Überprüfung der Durchmischung des Haufwerkes wird festgestellt, dass die Anteile der Fraktionen in der sortierten Probe annähernd der definierten Zusammensetzung des Versuchshaufwerkes entsprechen. Dieses Kriterium ist entscheidend für die Durchführungen der vergleichenden Probenahmen.

Es wird angenommen, dass das ganze Versuchshaufwerk, bezogen auf die bereitgestellten und zerkleinerten Ausgangsfraktionen gut durchmischt ist und eine homogene Verteilung der Fraktionen vorliegt. Eine weitere Durchmischung des Versuchshaufwerkes vor den Probenahmen ist nicht erforderlich.

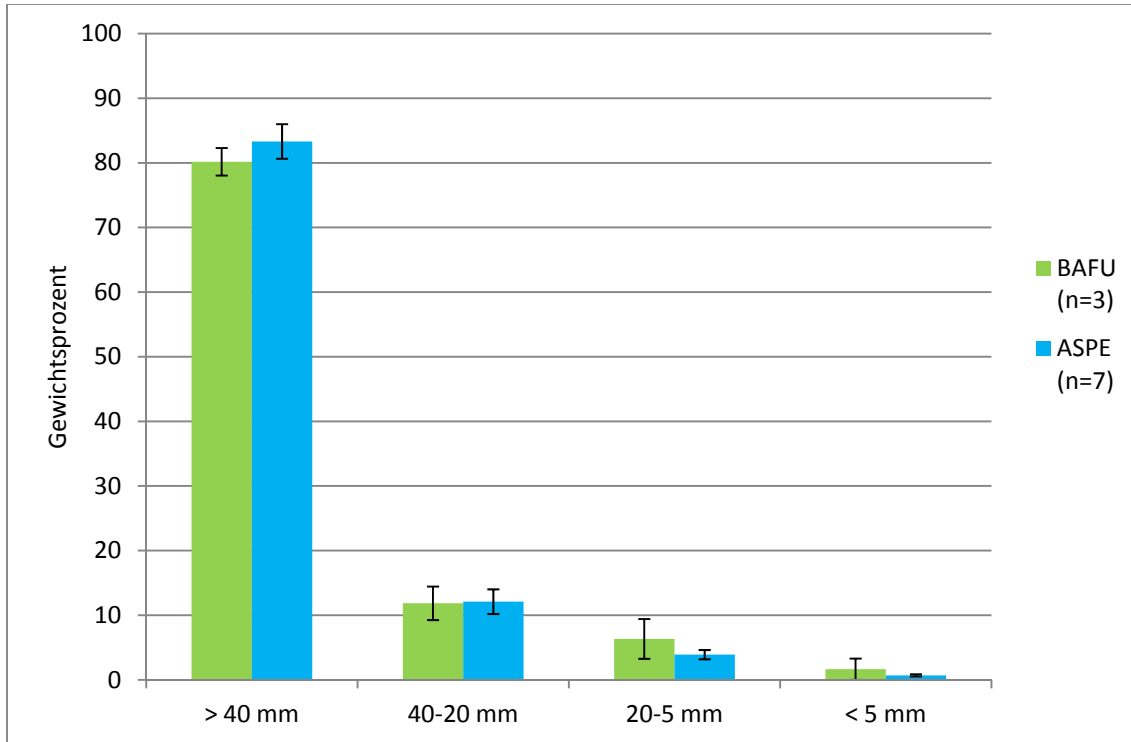
### **5.3 Vergleich Probenahemethoden**

Ein Hauptziel der Arbeit ist die Validierung der Probenahemethode ASPE, d.h. es wird geprüft ob diese Methode gleichwertige Ergebnisse im Vergleich zur bisher eingesetzten Probenahemethode nach Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU liefert und reproduzierbare Ergebnisse erreichbar sind. Hierzu wird aus ausgewählten Holzabfällen ein Versuchshaufwerk hergestellt und dessen Zusammensetzung bezogen auf die eingesetzten Holzabfälle bestimmt. Die eingesetzten Fraktionen können aufgrund optischer Kriterien fünf verschiedenen Sortierfraktionen zugeordnet werden. Um die Proben auf vergleich- und reproduzierbare Ergebnisse zu überprüfen, werden drei Proben nach der Probenahemethode der Vollzugshilfe Holzabfälle und sieben Proben nach der Probenahemethode ASPE entnommen. Zum Methodenvergleich werden alle Proben gesiebt und einer optischen Sortieranalyse unterzogen. Mit der Siebung wird die Korngrößenverteilung und mit der Sortieranalyse die Zusammensetzung bezogen auf definierte Sortierfraktionen bestimmt. Alle Proben werden gesamthaft, d.h. Grob- und Feinfraktion zusammen, nach einer Aufbereitung im Labor chemisch analysiert und deren Schadstoffgehalte bestimmt. In den nachfolgenden Ergebnisdarstellungen werden die Ergebnisse der Untersuchung bezogen auf die Probenahemethode miteinander verglichen. Die Daten der Siebungen, der Sortieranalysen sowie chemischen Laboranalysen sind dem Anhang zu entnehmen.

#### **5.3.1 Siebung der Proben**

Aus der Siebung der Proben resultieren die Ergebnisse, die Abbildung 60 gezeigt werden. Dargestellt sind die Mittelwerte der Massenanteile und die 95%-Konfidenzintervalle der Proben gemäß den beiden Probenahemethoden. Die Grobfraktion (Fraktion > 40 mm und 40 – 20 mm) weist bei beiden Probemethoden einen vergleichbaren Anteil von insgesamt über 90% auf. Die Streuungen der Messwerte bei den Fraktionen > 40 mm und 40 – 200 mm sind etwa gleich groß. Die

Feinfraktion (Fraktion 20 – 5mm und < 5 mm) kommt bei beiden Probenahmemethoden zu einem Anteil von gesamthaft max. 10%, wobei der Anteil der Feinfraktion bei der Probenahmemethode ASPE geringer ausfällt. Die Streuungen der Messwerte bei den BAFU-Proben sind geringfügig größer als bei den ASPE-Proben.



**Abbildung 60: Ergebnisse Siebung**  
(eigene Darstellung)

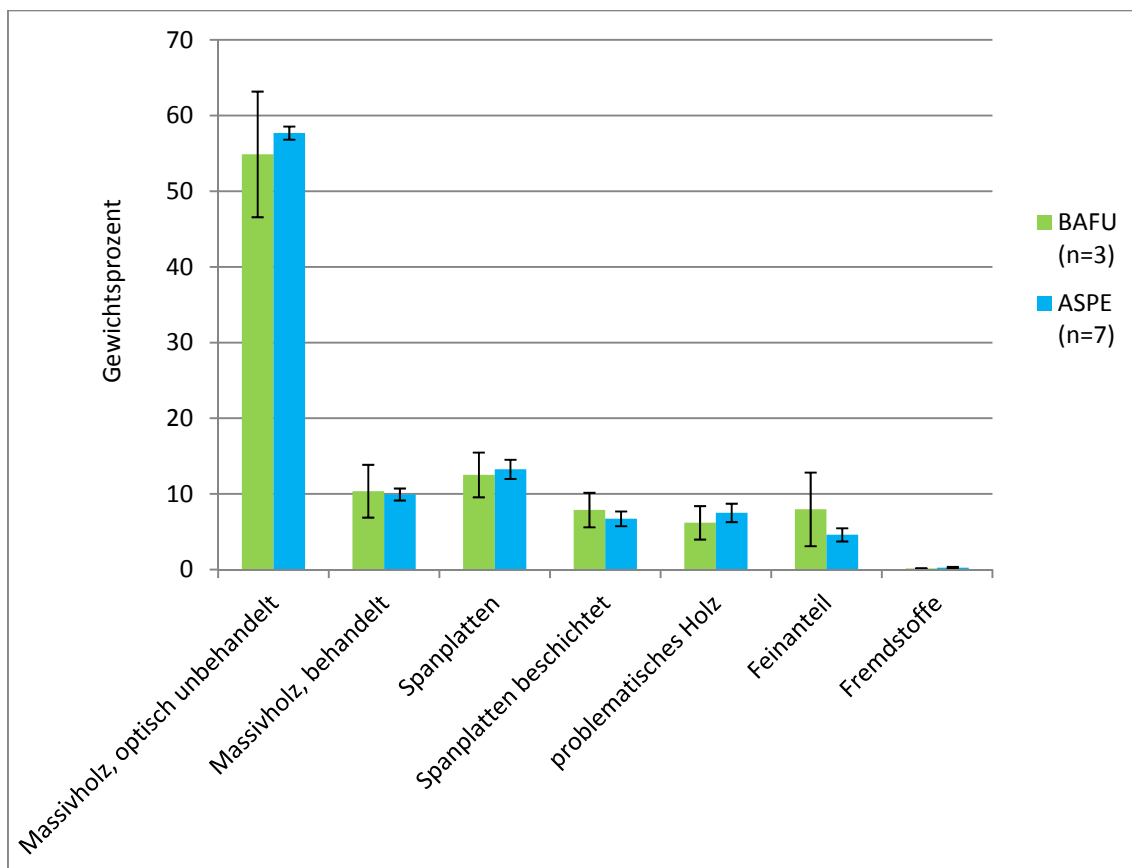
Es ist mit Hilfe der Siebanalyse der Proben erkennbar, dass bei den beiden eingesetzten Probenahmemethoden vergleichbare Korngrössenzusammensetzungen in den Proben vorzufinden sind. Abweichend von der Probenahmemethode nach Vollzugshilfe Holzabfälle wird bei der Methode ASPE weniger Feinanteil aus dem Haufwerk entnommen. Bezogen auf die gesamte Probe beträgt der Unterschied des Anteils der Feinfraktion in den BAFU-Proben zu den ASPE-Proben maximal 4%. Aufgrund der maximalen Korngröße bzw. Kantenlänge des zerkleinerten Altholzes und der Korngrößenverteilung wird das Material als Holzvorbruch eingeordnet. Bei Holzvorbruch liegt überwiegend Altholz mit einer Körnung von 0 – 500 mm vor und der Anteil der Feinfraktion beträgt ca. 10 – 15 % (Vgl. [10], S.50 f)<sup>5</sup>. Die gemessenen Massenanteile bei den Fraktionen 20 – 5 mm und < 5 mm streuen bei den drei BAFU-Proben, was sich in dem größeren Konfidenzintervall zeigt. Aus der geringen Streubreite der sieben ASPE-Proben resultiert dagegen ein kleines Konfidenzintervall. Über die tatsächliche Korngrößenverteilung des Versuchshaufwerks liegt keine Information vor, so dass die Ergebnisse aus den verschiedenen Probenahmen nur

<sup>5</sup> Auswertung der Zusammensetzung der Proben aus der Untersuchung des AWEL.

miteinander verglichen werden können. Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob mit den Probenahmemethoden zu wenig oder zu viel Feinanteil entnommen wird. Geht man von einer vollständigen Durchmischung des Versuchshaufwerks aus, kann gesagt werden, dass die Probenahmemethode ASPE gleichwertige Ergebnisse liefert.

### 5.3.2 Sortieranalysen der Proben

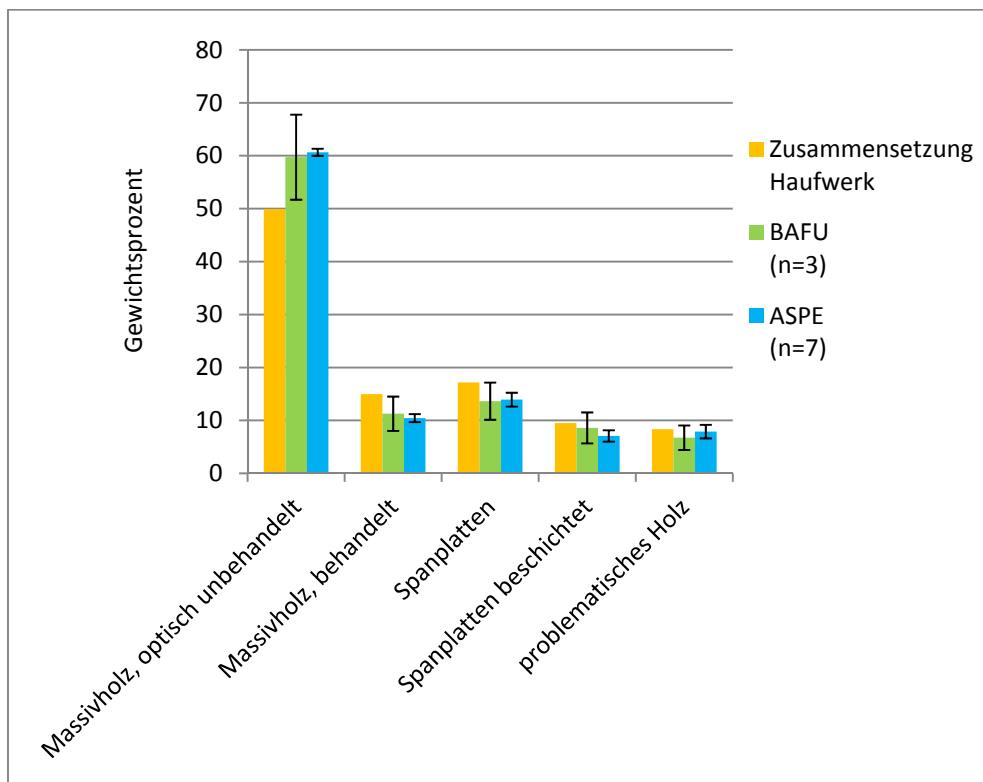
Die Abbildung 61 zeigt die Ergebnisse der optischen Sortieranalyse der Grobfraction der Proben. Zusätzlich angegeben ist die abgesiebte Fraktion Feinanteil. Dargestellt sind die Mittelwerte der Massenanteile der sortierten Fraktionen sowie die 95%-Konfidenzintervalle bezogen auf das Probenahmeverfahren. Die Mittelwerte der Massenanteile der Fraktionen weisen abhängig vom Probenahmeverfahren keine großen Unterschiede auf. Die Sortierfraktion optisch unbehandeltes Massivholz ist im Mittel mit über 50% enthalten. Alle anderen Fraktionen sind im Mittel mit etwa 10% vertreten. Der Anteil der Fraktion Fremdstoffe beträgt kleiner als 1% und ist bei der Skaleneinteilung nicht ablesbar. Im Vergleich zu den ASPE-Proben weisen die BAFU-Proben größere Streuungen der Werte auf.



**Abbildung 61: Ergebnisse Sortieranalyse  
(eigene Darstellung)**

Bei dem Vergleich der gemessenen Anteile der sortierten Fraktionen kann gezeigt werden, dass die BAFU- und ASPE-Proben vergleichbare Anteile aufweisen. Abweichungen der Fraktionsanteile betragen weniger als 5% zwischen den BAFU- und den ASPE-Proben. Unabhängig von der Streubreite der Messwerte resultieren die größeren Konfidenzintervalle aus einer geringeren Probenanzahl. Es kann gezeigt werden, dass die Messwerte der ASPE-Proben reproduzierbar sind geringe Abweichungen der Fraktionsanteile untereinander vorliegen. Die Proben der Probenahmemethode ASPE weisen gleichwertige Ergebnisse gegenüber der Probenahmemethode BAFU auf.

In der Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Sortieranalyse ohne Berücksichtigung der Fraktionen Feinanteil und Fremdstoffe dargestellt. Es werden die Mittelwerte der Massenanteile je Fraktion und Probenahmemethode bezogen auf die definierte Zusammensetzung des Versuchshaufwerkes abgebildet. Diese Darstellung zeigt die Wiederfindung der vorgegebenen Zusammensetzung in den Proben. Die entnommenen Proben weisen einen 10% höheren Anteil an optisch unbehandeltem Massivholz auf, als in dem Versuchshaufwerk enthalten ist. Alle anderen Fraktionen weisen geringere Anteile gegenüber der hergestellten Zusammensetzung auf. Die Streuungen bei den Proben BAFU sind im Vergleich zu den Proben ASPE höher.



**Abbildung 62: Ergebnisse Sortieranalyse, ohne Fraktionen Feinanteil und Fremdstoffe (eigene Darstellung)**

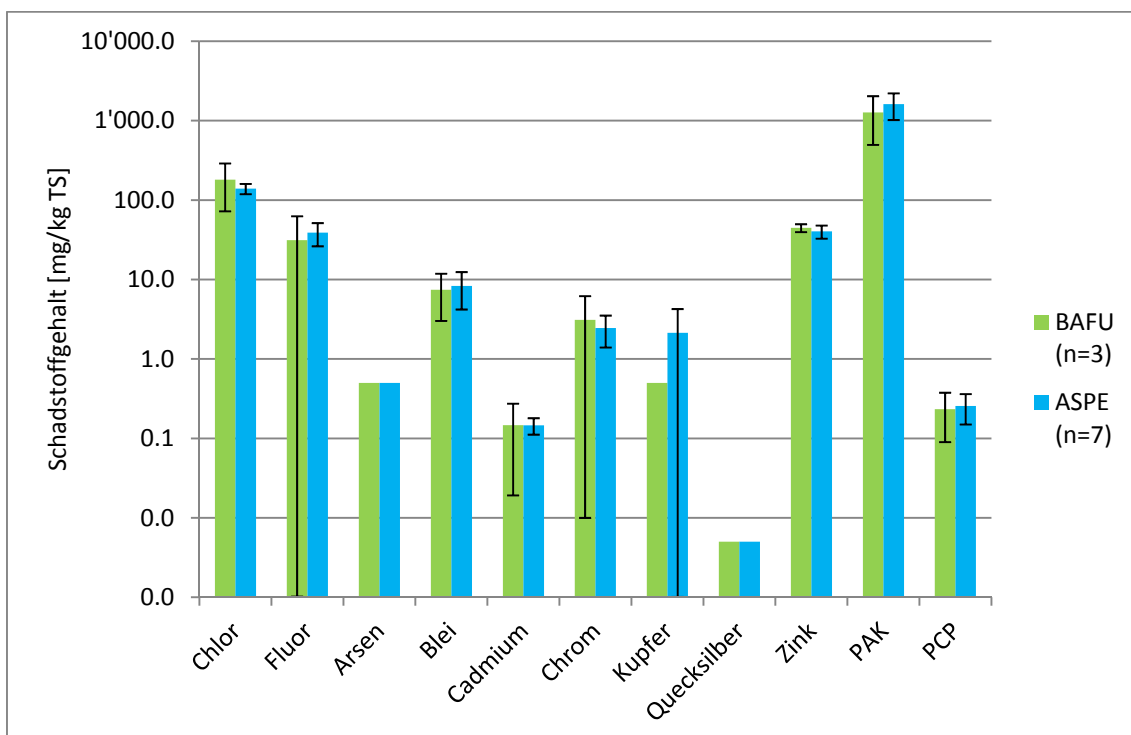
Für diese Darstellung erfolgt eine Neuberechnung der Probenzusammensetzung ohne die Fraktionen Fremdstoffe und Feinanteil, da über die tatsächlichen Anteile dieser Fraktionen im Versuchshaufwerk keine Kenntnis besteht. Fremdstoffe sind nicht erwünscht und werden nicht separat für das Versuchshaufwerk bereitgestellt, sind aber in den Ausgangsfraktionen enthalten. Der Feinanteil entsteht während der Zerkleinerung der Holzabfälle und ist abhängig vom eingesetzten Zerkleinerungsaggregat. Aus der Neuberechnung der Zusammensetzung resultieren Ergebnisse, die mit der bekannten Haufwerkszusammensetzung verglichen werden kann. Die unberücksichtigten Fraktionen sind nach der Umrechnung anteilmäßig in allen anderen fünf Fraktionen enthalten.

Der höhere Anteil an optisch unbehandeltem Massivholz lässt sich mit der Zerkleinerung des Altholzes begründen. Durch die Zerkleinerung erfolgen ein Abrieb der Holzoberfläche und die gleichzeitige Entstehung des Feinanteils, so dass teilweise im Versuchshaufwerk Kernholz vorliegt, welches keine Auffälligkeiten für eine Behandlung aufweist. Es ist von einer Verschiebung von der Fraktion behandeltes Massivholz hin zur Fraktion optisch unbehandeltes Massivholz auszugehen. Infolge des Oberflächenabriebs werden bei der Sortieranalyse ehemals beschichtete Holzwerkstoffe zu der Fraktion Holzwerkstoffe zugeordnet. Der insgesamt geringere Anteil bei den beiden Fraktionen der Holzwerkstoffe ist begründet durch die starke Zerkleinerungswirkung auf das Holz während der Zerkleinerung. Holzwerkstoffe sind vermehrt in dem Feinanteil vorzufinden. Eine gute Wiederfindung liegt bei der fünften Fraktion bei dem problematischen Holz vor. Dieses Holz ist gut optisch und olfaktorisch erkennbar. Auch im zerkleinerten Zustand ist eine Zuordnung einfach durchführbar, da diese Holz dunkle Verfärbungen bis in den Kern aufweist. Es wird gezeigt, dass unabhängig von der Probenahmemethode vergleichbare Zusammensetzungen in den Proben vorliegen, die nahe an der hergestellten Zusammensetzung des Versuchshaufwerks liegen.

### **5.3.3 Laboranalysen der Proben**

Repräsentative Proben des Haufwerkes werden chemisch untersucht. In Abbildung 63 werden die Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Messwerte für jeden Schadstoff und entsprechend des Probenahmeverfahrens dargestellt. Für die Darstellung wird eine logarithmische Skaleneinteilung gewählt, so dass alle mittleren Schadstoffgehalte aufgetragen werden können. Es ist auf die Verzerrung der Gehaltsangaben und der Spannen infolge der logarithmischen Skaleneinteilung zu achten. Weiterhin ist zu beachten, dass ermittelte Schadstoffgehalte, die unter der Nachweisgrenze liegen auf den halben Messwert korrigiert werden [28]. Die mittleren

Schadstoffgehalte von Arsen, Cadmium und Quecksilber sind bei den BAFU- und ASPE-Proben gleich. Für die Schadstoffe Chlor, Chrom und Zink werden bei den Proben ASPE im Vergleich zu den BAFU-Proben geringere Gehalte gemessen. Bei den Schadstoffen Fluor, Blei, Kupfer, PAK und PCP liegen dagegen höhere Schadstoffgehalte vor. Höhere Streuungen der Messwerte der BAFU-Proben treten bei den Schadstoffen Chlor, Fluor, Cadmium, Chrom, PAK und PCP auf. Vergleichbare Streuungen zwischen den Probenahmemethoden liegen bei den Schadstoffen Arsen, Quecksilber, Blei und Zink vor. Beim Schadstoff Kupfer gibt es bei den Messwerten der Proben ASPE deutlich höhere Streuungen. Ein großes 95%-Konfidenzintervall liegt bei dem Schadstoff Chrom der BAFU-Proben vor.

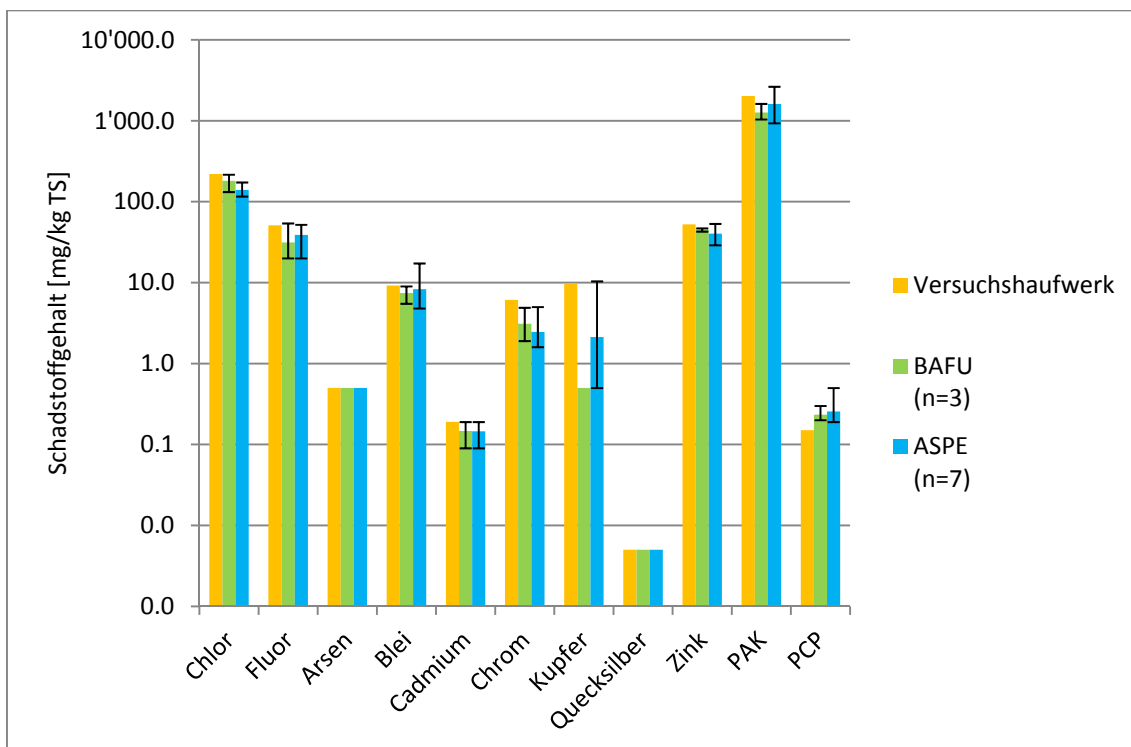


**Abbildung 63: Ergebnisse Laboranalysen (eigene Darstellung)**

Die Ergebnisse der Laboranalysen der Proben zeigen, dass zwischen den Probenahmemethoden gleichwertige Schadstoffgehalte vorliegen. Bis auf den Parameter Kupfer sind keine großen Unterschiede bei den Schadstoffgehalten zwischen den Mittelwerten der drei BAFU-Proben und den sieben ASPE-Proben erkennbar. Der signifikant höhere mittlere Kupfergehalt bei den ASPE-Proben ist durch einen Ausreißer ( $m_{Cu} = 10,4 \text{ mg/kg TS}$ ) begründet. Infolge der großen Streubreite der Kupfergehalte bei den ASPE-Proben ist auch das 95%-Konfidenzintervall größer. Die größeren Konfidenzintervalle bei den BAFU-Proben resultieren aus der geringen Probenanzahl ( $n=3$ ) im Gegensatz zu den ASPE-Proben ( $n=7$ ). Neben der

Standardabweichung der Messwerte je Probenahmemethode hat die Probenanzahl n einen Einfluss auf das 95%-Konfidenzintervall.

In der Abbildung 64 erfolgt eine Gegenüberstellung der mittleren Schadstoffgehalte je Probenahmemethode mit der theoretischen Schadstoffbelastung des Versuchshaufwerks. Die theoretische Schadstoffbelastung des Versuchshaufwerks wird mit Hilfe der Anteile der Ausgangsfractionen im Haufwerk und den Schadstoffbelastungen der einzelnen Ausgangsfractionen berechnet. Abweichend von den vorhergehenden Diagrammen werden zusätzlich das Minimum und das Maximum der Messwerte angegeben. Für die Darstellung wird eine logarithmische Skaleneinteilung gewählt um alle Parameter abbilden zu können. Es ist die Verzerrung der Schadstoffgehalte infolge dieser Skaleneinteilung zu beachten. Bis auf die Parameter Arsen, Quecksilber und PCP ist die theoretische Belastung des untersuchten Altholzes höher als die mittlere Belastung der Proben. Bei den Schadstoffen Arsen und Quecksilber liegen zwischen dem Haufwerk und den Proben gleiche Gehalte vor. Einzig bei dem Parameter PCP wird in den Proben ein höherer Gehalt ermittelt als für das Haufwerk berechnet wird.



**Abbildung 64: Ergebnisse Laboranalysen, Vergleich Modellierung (eigene Darstellung)**

Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich bei der Gegenüberstellung der analysierten Schadstoffgehalte mit den potenziellen Gehalten in den einzelnen Proben. Die potenziellen Gehalte werden anhand der Probenzusammensetzung und den

analysierten Schadstoffgehalten der fünf Ausgangsfractionen berechnet (siehe Anhang).

Ob grundsätzlich ein Minderbefund in den Proben gegenüber der Belastung im zu untersuchenden Haufwerk analysiert wird, kann aufgrund dieser einzelnen Untersuchung nicht ausgesagt werden. Die Analysenergebnisse sind lediglich ein erster Anhaltspunkt. Eine mögliche Ursache für die Minderbefunde ist die Schadstoffentfrachtung durch den Verlust von Feinanteil während der Versuchsvorbereitung, die Probensiebung sowie der Zerkleinerung der Proben im Labor. Während dieser Versuchsschritte ist ein erhöhter Staubanfall zu beobachten. Es ist bekannt, dass sich Schadstoffe, infolge des Abriebes der beschichteten, bestrichenen und lackierten Oberflächen bei der Zerkleinerung, verstärkt im Feinanteil anreichern (Vgl. [29], S.60 f, Vgl. [30], S.18). Es kann jedoch gezeigt werden, dass bei beiden Methoden der Probenahme gleichwertige Schadstoffgehalte in den Proben gegenüber der möglichen Belastung des gesamten Versuchshaufwerkes gefunden werden.

Für einen allgemeinen Vergleich der angewandten Probenahmeverfahren werden in der Tabelle 20 die Probenahmeverfahren gegenübergestellt. Betrachtet werden dabei Aspekte wie der Zeitaufwand, der Aufwand von Geräten und Personal auf den Altholzplatz, der Platzbedarf für die Probenahme, Anzahl und Mengen zu entnehmender Proben und basierend auf die durchgeführte Untersuchung der Vergleich der Ergebnisse.

**Tabelle 20: Allgemeiner Vergleich Probenahmeverfahren (eigene Darstellung)**

	<i>Probenahme nach Vollzugshilfe Holzabfälle</i>	<i>Probenahmemethode ASPE</i>
Zeitaufwand Vorbereitung	-	+
Zeitaufwand Probenentnahme	o	o
Aufwand Geräte/Personal	-	+
Platzbedarf	-	+
Anpassbarkeit	-	+
Dokumentation	-	+
Anzahl Einzelproben	keine Angabe	16
Anzahl Laborprobe	1	1
Probenmenge Mischprobe	ca. 80-100 kg	abhängig von Korngröße < 200 mm: ca. 20 - 30 kg > 200 mm: ca. 80 - 100 kg
Untersuchungsergebnisse	o	o

Bemerkung:

+ Vorteil

- Nachteil



o keine Unterschiede

## **6 Szenarientest für maximal tolerierbare Fraktionsanteile**

Ein weiteres Hauptziel der Arbeit ist die Erprobung einer Methode der Selbstkontrolle von Holzabfällen basierend auf optischen Kriterien. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass Holzabfälle aufgrund der Anteile ihrer Holzfraktionen hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit beurteilt werden können. Die mögliche Beurteilung ist Grundlage für eine Selbstkontrolle von Holzabfällen. Hierzu werden die Daten aus zwei Untersuchungen, die Holzkampagne 98 und die Holzwerkstoffkampagne 2007, ausgewertet. Aus den Daten werden Belastungsszenarien für die fünf Fraktionen der Sortieranalyse und zusätzlich für Bahnschwellenholz erstellt. Mit diesen Szenarien werden maximal zulässige Anteile der Fraktionen im Altholz ermittelt, mit dem Ziel, dass bei Einhaltung dieser Werte die Richtwerte für die stoffliche bzw. thermische Verwertung eingehalten werden.

### **6.1 Vorgehen für die Erstellung der Szenarien**

Auf Grundlage der Analysenergebnisse der Holzkampagne 98 [31] und der Holzwerkstoffkampagne 2007 [32] werden theoretische Schadstoffbelastungen von Holzfraktionen ermittelt. Aus diesen ermittelten Belastungen werden zwei verschiedene Szenarien erstellt. Ausgangspunkt ist die Einteilung der in den Kampagnen untersuchten Holzsortimente in die Fraktionen optisch unbehandeltes Massivholz, behandeltes Massivholz, Holzwerkstoffe, beschichtete Holzwerkstoffe und problematische Holzabfälle. Eisenbahnschwellen werden separat betrachtet (siehe Anhang E). Die Einteilung erfolgt aufgrund der optischen Erkennung und Zuordnung bei einer Sortieranalyse. Datengrundlage für die Fraktionen optisch unbehandeltes Massivholz, behandeltes Massivholz, problematische Holzabfälle und Bahnschwellen ist die Holzkampagne 98. Für die Fraktionen Holzwerkstoffe und beschichtete Holzwerkstoffe werden die Daten der Holzwerkstoffkampagne 2007 verwendet. Die Messwerte der Holzabfallarten werden fraktionsweise zusammengefasst. Mit dem Programm MS Office Excel erfolgt eine Auswertung der Messwerte. Für die Erstellung der Szenarien werden die Mittelwerte sowie mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% mit der t-Verteilung die obere Grenze des Konfidenzintervalls je Fraktion berechnet. Für die Auswertung werden nur die Schadstoffe Cu, Zn, Pb, Cr, Cl und PAK betrachtet. Die Messwerte der anderen Schadstoffe, As, Cd, F, Hg und PCP liegen überwiegend unterhalb der Nachweisgrenzen und werden daher nicht berücksichtigt. Aus der Holzkampagne 98 finden nur die Messwerte von untersuchten Querschnittsproben (QS) Verwendung. Einzelproben und Oberflächenproben werden nicht berücksichtigt. Einzelne Querschnittsproben werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da sie eine starke Streuung verursachen. Liegen einzelne Messwerte unterhalb der

Nachweisgrenzen, werden diese für die Berechnungen auf den halben Wert geändert [28].

Aus den Messwerten werden folgende Szenarien erstellt:

*Szenario 1:* Das Szenario 1 umfasst die Mittelwerte der Messwerte je Fraktion.

*Szenario 2:* Das Szenario 2 verwendet die oberen Grenzen der 95%-Konfidenzintervalle der Messwerte.

Mit den Szenarien wird getestet, welche maximalen Massenanteile der einzelnen Fraktionen zulässig sind, so dass die vorgegebenen Richtwerte noch eingehalten werden. Es wird jeweils rechnerisch mit variierenden Anteilen ein Gemisch aus der Fraktion optisch unbehandeltes Holz und einer anderen Fraktion hergestellt. Die in diesem Gemisch resultierende Gesamtbelastung für jeden Schadstoff wird grafisch dargestellt. Zur Überprüfung der Szenarien wird ein Plausibilitätstest durchgeführt.

## 6.2 Ergebnisse

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse der Auswertung der Daten aus der Holzkampagne 98 und der Holzwerkstoffkampagne 2007. Die vollständigen Messwerte und die Datenauswertung sind im Anhang zu finden.

In Tabelle 21 sind die mittleren Schadstoffgehalte je Fraktion angegeben. Diese bilden das Szenario 1.

**Tabelle 21: Szenario 1 (Mittelwerte aus Holzkampagnen) (eigene Darstellung)**

Fraktion	<b>Cu</b> [mg/kg TS]	<b>Zn</b> [mg/kg TS]	<b>Pb</b> [mg/kg TS]	<b>Cr</b> [mg/kg TS]	<b>Cl</b> [mg/kg TS]	<b>PAK</b> [mg/kg TS]
<i>optisch unbehandeltes Massivholz<sup>1)</sup></i>	3.1	14.4	2.2	1.3	252	2.5
<i>behandeltes Massivholz<sup>1)</sup></i>	3	29.1	8.4	3	627	9.5
<i>Holzwerkstoffe<sup>2)</sup></i>	3.5	33.4	11.4	2	523	1.9
<i>beschichtete Holzwerkstoffe<sup>2)</sup></i>	7.3	64.1	26	4.8	1163	4.1
<i>problematische Holzabfälle<sup>1)</sup></i>	586	614	820	1032	121	412
<i>Bahnschwellen<sup>1)</sup></i>	21.3	69.7	10.3	18.8	329	9913

*Bemerkung:*

1) Daten aus Holzkampagne 98 [31]

2) Daten aus Holzwerkstoffkampagne 2007 [32]

Die Tabelle 22 zeigt die oberen Grenzen der 95%-Konfidenzintervalle bezogen auf die Messwerte der den Fraktionen zugeordneten Holzabfallarten. Diese Werte stellen das Szenario 2 dar.

**Tabelle 22: Szenario 2 (obere Grenze 95%-Konfidenzintervall aus Holzkampagnen) (eigene Darstellung)**

Fraktion	Cu	Zn	Pb	Cr	Cl	PAK
	[mg/kg TS]	[mg/kg TS]	[mg/kg TS]	[mg/kg TS]	[mg/kg TS]	[mg/kg TS]
<i>optisch unbehandeltes Massivholz</i> <sup>1)</sup>	6.6	20.5	3.5	2.2	498	9.7
<i>behandeltes Massivholz</i> <sup>1)</sup>	4.4	51.5	16.4	5.1	992	20.8
<i>Holzwerkstoffe</i> <sup>2)</sup>	12.8	113	54.1	6.4	1598	6.8
<i>beschichtete Holzwerkstoffe</i> <sup>2)</sup>	21	152	75.7	11	4436	11.2
<i>problematische Holzabfälle</i> <sup>1)</sup>	1175	1278	1750	1981	184	770
<i>Bahnschwellen</i> <sup>1)</sup>	65.2	245	21.6	73.8	1323	14856

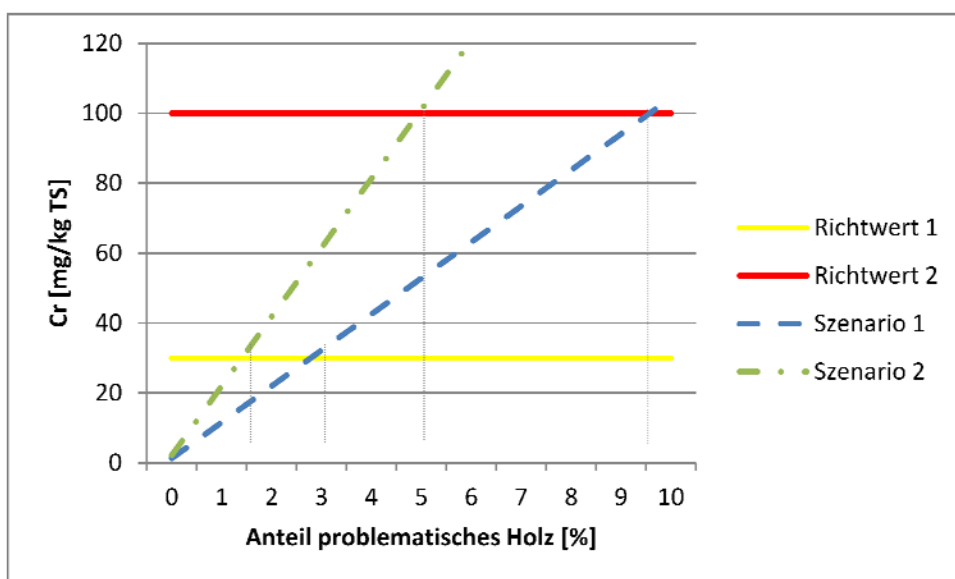
*Bemerkung:*

1) Daten aus Holzkampagne 98 [31]

2) Daten aus Holzwerkstoffkampagne 2007 [32]

Aufbauend auf den Szenarien 1 und 2 wird für jeden Schadstoff der Gesamtgehalt in Abhängigkeit des Massenanteiles der Fraktion grafisch dargestellt. Die vollständige Darstellung der Diagramme ist dem Anhang I zu entnehmen.

Am Beispiel der Fraktion problematisches Holz und dem Schadstoff Chrom (Cr) wird das Vorgehen zur Ermittlung der maximal tolerierbaren Fraktionsanteile beschrieben. Die Abbildung 65 zeigt den Gehalt an Chrom in Abhängigkeit vom Anteil der Fraktion problematisches Holz.



**Abbildung 65: Anteil problematisches Holz – Schadstoffgehalt Chrom (eigene Darstellung)**

Die Zunahme des Anteils von problematischem Holz ist gleichbedeutend mit der Abnahme des Anteils von optisch unbehandeltem Holz in dem betrachteten Gemisch. In der Abbildung 65 werden die Richtwerte für die stoffliche (Richtwerte 1, gelb Gerade) und für die thermische Verwertung (Richtwert 2, rot Gerade) abgebildet. Schnittpunkte der Kurven der Szenarien mit den Geraden der Richtwerte bedeuten das Erreichen des Richtwertes. Oberhalb des Schnittpunktes liegt eine Überschreitung des Richtwertes bezogen auf des entsprechend Szenario vor. Aus der Abbildung ergeben sich Schnittpunkte der beiden Szenarien mit den Richtwerten für die stoffliche und die thermische Verwertung. Unter Berücksichtigung der höheren potenziellen Schadstoffgehalte in Szenario 2 resultieren geringere tolerierbare Fraktionsanteile für problematische Holzabfälle. Für den Richtwert der stofflichen Verwertung liegen Überschreitungen bei einem Anteil an problematischem Holz bei ca. 1,5 % für Szenario 2 und bei 3 % für Szenario 1. Für den Richtwert der thermischen Verwertung liegen Schnittpunkte bei 5 % für Szenario 2 und bei 9,5 % für Szenario 1 vor.

Für alle anderen Fraktionen und Schadstoffe wird wie am Beispiel der Fraktion problematisches Holz verfahren.

Aus den Diagrammen ergibt sich je Fraktion ein limitierender Schadstoff für die maximal tolerierbaren Fraktionsanteile, d.h. die kleinsten Anteile, so dass für alle Schadstoffe eine Einhaltung der Richtwerte gegeben ist. Die folgende Tabelle 23 zeigt für alle Fraktionen die maximal tolerierbaren Fraktionsanteile für die stoffliche Verwertung. Bei der Angabe eines Anteils von 100% liegt keine Einschränkung des Fraktionsanteils vor.

**Tabelle 23: tolerierbare Fraktionsanteile stoffliche Verwertung (eigene Darstellung)**

Fraktion	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>
	<i>Mittelwert</i>	<i>obere Grenze</i> <i>95%-Konf.</i>
	[%]	[%]
optisch unbehandeltes Massivholz	100	100
behandeltes Massivholz	95	20
Holzwerkstoffe	100	10
beschichtete Holzwerkstoffe	15	3
problematische Holzabfälle	2.5	1
Bahnschwellen	0.2	0.1

Unter Berücksichtigung des Szenarios 1, Mittelwerte der Daten, können 100% optisch unbehandeltes Massivholz, behandeltes Massivholz oder Holzwerkstoffe stofflich verwertet werden. Beschichtete Holzwerkstoffe dürften nur zu 15%, problematische Holzabfälle zu 2.5% und Bahnschwellen nur zu 0.2% enthalten sein, wenn das Altholz stofflich verwertet wird. Unter Berücksichtigung des Szenarios 2, obere Grenze des

95%-Konfidenzintervall der Daten, wären 100% optisch unbehandeltes Massivholz stofflich verwertbar. Lediglich 20% behandeltes Massivholz, 10% Holzwerkstoffe, 3% beschichtete Holzwerkstoffe, 1% problematisches Holz sowie 0.1% Bahnschwellen dürften im Altholz, das stofflich verwertet wird, vorkommen, wenn das Szenario 2 betrachtet wird.

Die Tabelle 24 zeigt für alle Fraktionen die maximal tolerierbaren Fraktionsanteile für die thermische Verwertung. Bei der Angabe eines Anteils von 100% liegt keine Einschränkung des Fraktionsanteils vor.

**Tabelle 24: tolerierbare Fraktionsanteile thermische Verwertung (eigene Darstellung)**

Fraktion	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>
	<i>Mittelwert</i>	<i>obere Grenze</i> <i>95%-Konf.</i>
	[%]	[%]
optisch unbehandeltes Massivholz	100	100
behandeltes Massivholz	100	100
Holzwerkstoffe	100	100
beschichtete Holzwerkstoffe	100	100
problematische Holzabfälle	9.5	5
Bahnschwellen	0.45	0.25

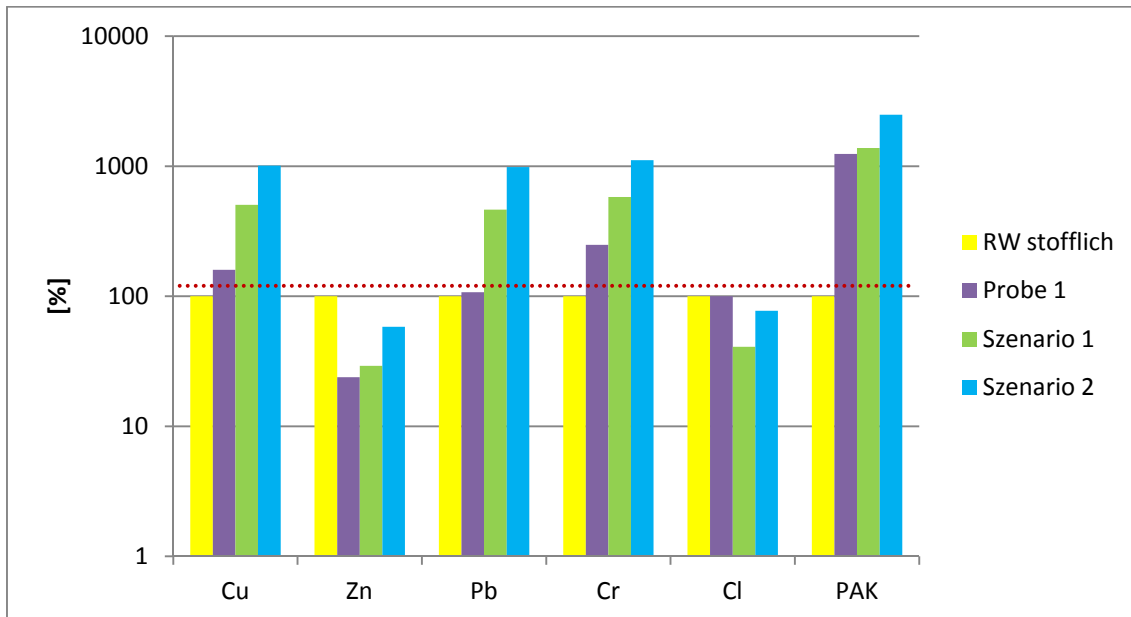
Für die thermische Verwertung gibt es bei den Fraktionen problematische Holzabfälle und Bahnschwellen Einschränkungen für die Anteile im Altholz. Alle anderen Fraktionen dürften unabhängig vom Szenario zu 100% der thermischen Verwertung zugeführt werden. Für die Fraktion problematisches Holz wäre bei Szenario 1 ein Anteil von 9.5% und bei Szenario 2 ein Anteil von 5% zulässig, wenn das Altholz thermisch verwertet werden soll. Für die Fraktion Bahnschwellen liegt die Einschränkung des Anteils bei 0.45% für das Szenario 1 und bei 0.25% für das Szenario 2.

### 6.3 Plausibilitätstest

Der Plausibilitätstest dient der Überprüfung der aufgestellten Szenarien 1 und 2, die auf der Datenauswertung von den Untersuchungen von Holzsortimenten. Zur Überprüfung werden mit den Probenzusammensetzungen, d.h. den ermittelten Fraktionsanteilen, aus zwei Altholzuntersuchungen und den beiden Szenarien, Mittelwerte der Daten (Szenario 1) und obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls der Daten (Szenario 2), potenzielle Schadstoffbelastungen berechnet. Diese berechneten Schadstoffgehalte werden den Richtwerten für die stoffliche und thermische Verwertung sowie den tatsächlich gemessenen Gehalten der Schadstoffe aus den Laboranalysen gegenüber gestellt. Die Probenzusammensetzungen zur Durchführung des Plausibilitätstest stammen aus einer Untersuchung des AWEL [10] und aus einer Praxisuntersuchung zur Altholzqualität [29]. Bei den Zusammensetzungen der Proben, bezogen auf die Sortierfraktionen, werden die Fraktionsanteile ohne Berücksichtigung der Fraktionen Fremdstoffe und Feinanteil neu berechnet. Vereinfachend werden nur die Schadstoffe Kupfer (Cu), Zink (Zn), Blei (Pb), Chrom (Cr), Chlor (Cl) und PAK betrachtet. Bei allen anderen relevanten Schadstoffen gab es zum Einen bei der Datenauswertung und zum Anderen bei den Ergebnissen der Laboranalysen keine Auffälligkeiten. Da in der Untersuchung des AWEL bei der optischen Sortieranalyse keine Unterscheidung zwischen Bahnschwellenholz und problematischem Holz vorgenommen wurde, werden vereinfachend für den Plausibilitätstest die Fraktionen Bahnschwellen und problematisches Holz zusammengefasst und neue gemeinsame Szenarienwerte berechnet. Die zusammengefasste Fraktion wird als problematisches Holz bezeichnet.

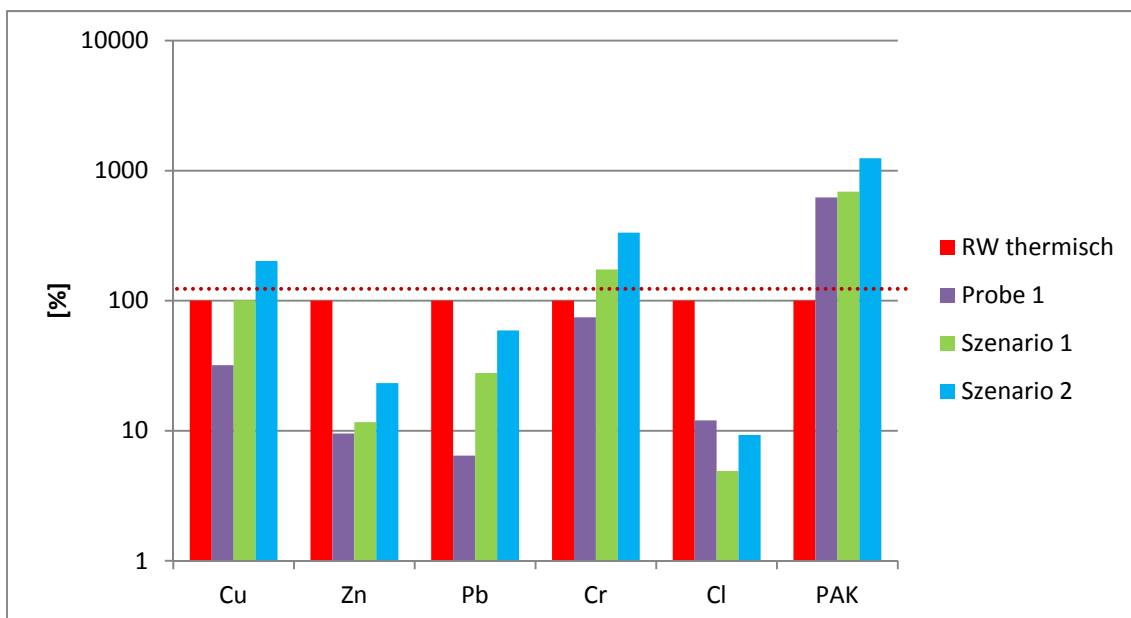
Nachfolgend wird der Plausibilitätstest am Beispiel einer Probe aus der Untersuchung des AWEL durchgeführt. Die Ergebnisse der Überprüfung aller anderen Proben sind dem Anhang J zu entnehmen.

Die Abbildung 66 zeigt die Resultate der Laboranalyse der Probe 1 und die potenziellen berechneten Schadstoffgehalte der Probe 1 bezogen auf das Szenario 1 und 2 gegenüber dem Richtwert für die stoffliche Verwertung. Die jeweiligen Richtwerte der betrachteten Schadstoffe für die stoffliche Verwertung werden auf 100% normiert. Die gemessenen und die potenziellen berechneten Schadstoffgehalte der Probe 1 werden bezogen auf 100% umgerechnet und aufgetragen. Im Diagramm ist die prozentuale Abweichung gegenüber dem Richtwert ablesbar. Zur übersichtlichen Darstellung erfolgt die Darstellung der Schadstoffgehalte mit einer logarithmischen Skaleneinteilung.



**Abbildung 66: Plausibilitätstest Probe 1 stoffliche Verwertung (eigene Darstellung)**

Die folgende Abbildung 67 zeigt äquivalent zur Abbildung 66 die gemessenen und die potenziellen berechneten Schadstoffgehalte der Probe 1. In dieser Abbildung erfolgt die Darstellung gegenüber den Richtwerten der thermischen Verwertung, die auf 100% normiert sind. In dem Diagramm sind die prozentualen Abweichungen zum Richtwert unter Berücksichtigung der logarithmischen Skaleneinteilung ablesbar.



**Abbildung 67: Plausibilitätstest Probe 1 thermische Verwertung (eigene Darstellung)**

Die Diagramme zeigen, dass es zwischen den prozentualen Abweichungen der gemessenen und berechneten Schadstoffgehalte der Probe 1 gegenüber den Richtwerten Unterschiede gibt. Bezogen auf den Richtwert für die stoffliche Verwertung



liegen für die gemessenen Gehalte drei Überschreitungen (Cu, Cr, PAK) und bei beiden berechneten Gehalten vier Überschreitungen (Cu, Pb, Cr, PAK) vor. Gegenüber dem Richtwert für die thermische Verwertung liegen eine Überschreitung der gemessenen Schadstoffgehalte (PAK) und drei Überschreitungen der berechneten potenziellen Schadstoffgehalte (Cu, Cr, PAK) vor. Die Probe 1 ist entsprechend der gemessenen Belastung nicht für die stoffliche und thermische Verwertung in einer Anlage ohne weitergehende RGR geeignet. Bei einer Beurteilung der Probe 1 durch die aufgestellten Szenarien wäre sowohl die stoffliche als auch die thermische Verwertung nicht zulässig.

Ein vergleichbares Bild ergibt sich bei der Auswertung der anderen Proben, die für den Plausibilitätstest betrachtet werden. Werden die tatsächlichen mit den potenziellen Schadstoffgehalten verglichen, liegen nicht immer gleiche Gehalte vor. Jedoch ergeben sich bei der Berechnung der Belastung mit den Szenarien vergleichbare Belastungsbilder der Proben gegenüber den tatsächlichen analysierten Schadstoffgehalten. Bei Proben mit einem hohen Feinanteil (Probe 1, 5, 6, 9) (siehe [10], S.50 f), über 50%, besteht je nach Ausgangsmaterial die Gefahr der Unterschätzung des tatsächlichen Schadstoffgehaltes. Es werden teilweise geringere potenzielle Schadstoffgehalte berechnet als in den Proben analysiert werden. Bei der Umrechnung der Probenzusammensetzung ohne Berücksichtigung des Feinanteils und der Fremdstoffe, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die beiden Fraktionen anteilmäßig die anderen Fraktionen der Probe verteilen. Aus der Neuberechnung der Zusammensetzung ergibt sich lediglich eine Abschätzung der Gesamtzusammensetzung der Probe. Aus einem hohen Fraktionsanteil problematischem Holz resultiert aus der Gehaltsberechnung mit den Szenarien eine hohe PAK-Belastung in der Probe. Diese Belastung deckt sich aber nicht in allen Proben mit den tatsächlichen Gehalten an PAK. Begründet werden kann diese Abweichung mit der vereinfachenden Zusammenfassung von Bahnschwellenholz und anderen problematischem Holz in einer Fraktion. Es kann fälschlicherweise ein hoher PAK-Gehalt berechnet werden, obwohl in der Probe kein Bahnschwellenholz vorhanden ist.

Die Überprüfung der Szenarien führt zu dem Ergebnis, dass die tatsächlichen gemessenen Schadstoffgehalte in den untersuchten Proben näherungsweise durch die potenziellen berechneten Schadstoffgehalte abgebildet werden können. Es kann gezeigt werden, dass die ermittelten maximalen tolerierbaren Fraktionsanteile auf Grundlage des Szenarientest plausible Ergebnisse liefern. Zu berücksichtigen sind aber Unsicherheiten der ermittelten tolerierbaren Fraktionsanteile in Bezug auf die zu

Grunde gelegten Daten aus den Holzkampagnen. Das Szenario 1 liegt im Durchschnitt am nächsten am tatsächlichen Schadstoffgehalt.

Keine Aussagen können über die Schadstoffe PCP sowie über Arsen, Cadmium, Fluor und Quecksilber getroffen werden. Aufgrund der Datenlage in den Holzkampagnen werden diese Schadstoffe in den Szenarien nicht berücksichtigt. Weiterhin konnten in einer Untersuchung des AWEL 2012 keine besonderen Auffälligkeiten bei diesen Schadstoffen, außer PCP, festgestellt werden.

## 7 Handlungsbedarf und Perspektiven

### 7.1 Handlungsbedarf

Die Untersuchungen des AWEL zeigen, dass die qualitativen Anforderungen an die Verwertung von Altholz teilweise nicht eingehalten werden.

### 7.2 Perspektiven

#### 7.2.1 Qualitätssicherung für die Altholzverwertung

Zur Sicherstellung der Qualität von Holzabfällen entweder für die stoffliche Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie oder für die thermische Verwertung in Anlagen ohne weitergehende Rauchgasreinigung wird aufbauend auf den Szenarientest ein Vorschlag ausgearbeitet. Es werden maximal tolerierbare Fraktionsanteile im Altholz vorgeschlagen, die je nach Verwertungsweg eingehalten werden müssen um den Anforderungen zu entsprechen.

Aus dem Haufwerk, Container oder Materialstrom von zerkleinerten Holzabfällen wird nach Vorgabe der entsprechenden Probenahmemethode eine Altholzprobe entnommen. Nach der Siebung des Probenmaterials, d.h. Aufteilung in Grobfraction und Feinfraction, wird eine optische Sortieranalyse der Grobfraction durchgeführt. Bei der Sortieranalyse erfolgt eine Separierung des Probenmaterials anhand optischer Kriterien in die folgenden Fraktionen:

- optisch unbehandeltes Massivholz
- behandeltes Massivholz
- Holzwerkstoffe
- beschichtete Holzwerkstoffe
- problematisches Holz
- Bahnschwellenholz, teerölhaltiges Holz

Die Massenanteile der sortierten Fraktionen werden bestimmt.

Für die Beurteilung der Qualität der Altholzprobe aufgrund ihrer Fraktionsanteile wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen. Das Vorgehen wird am Beispiel der Fraktion problematisches Holz beschrieben. Der aus der Sortieranalyse resultierende Massenanteil an problematischem wird je nach angestrebtem Verwertungsweg mit den entwickelten Beurteilungsrastern (siehe Abbildung 68 und Abbildung 69) verglichen.



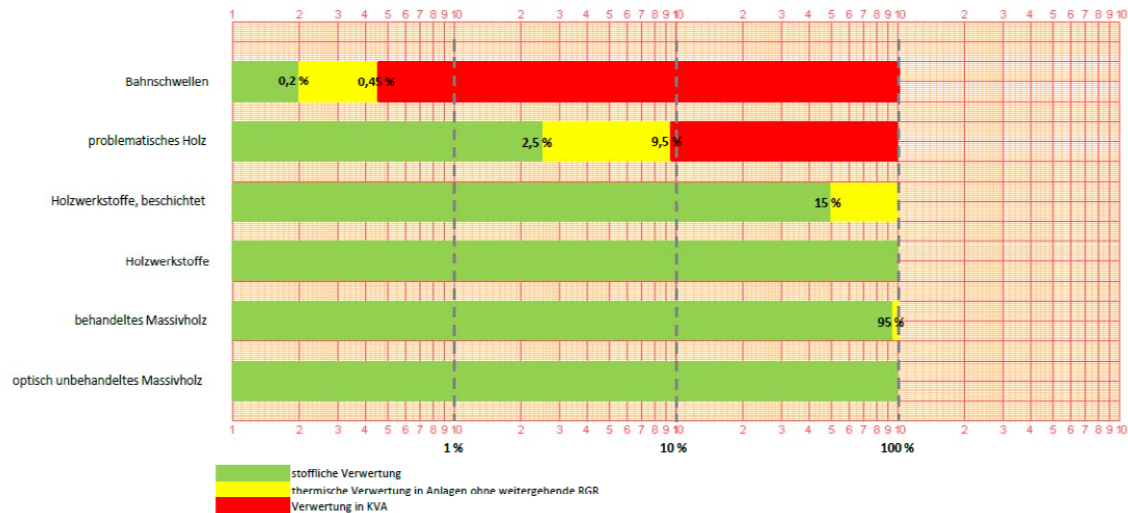
**Abbildung 68: Vorschlag Beurteilung Sortieranalyse, stoffliche Verwertung problematisches Holz (eigene Darstellung)**



**Abbildung 69: Vorschlag Beurteilung Sortieranalyse, thermische Verwertung problematisches Holz (eigene Darstellung)**

In den Beurteilungsrastern finden sich die beiden Szenarien für die Fraktion problematisches Holz wieder. Der untere Toleranzwert (uT) resultiert aus dem erstellten Szenario 2 (obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls der Daten), der obere Toleranzwert (oT) aus dem Szenario 1 (Mittelwert der Daten). Befindet sich der ermittelte Massenanteil des problematischen Holzes unterhalb des unteren Toleranzwertes wird die Probe nicht beanstandet. Wird ein Massenanteil oberhalb des oberen Toleranzwertes festgestellt, ist eine weitere Probe aus dem zu untersuchenden Altholz zu entnehmen. In dieser Probe werden mit Hilfe einer optischen Sortieranalyse erneut die Massenanteile der Sortierfraktionen bestimmt. Bei der Wiederholung der Beurteilung der Probe durch einen Vergleich mit dem Beurteilungsraster muss ein Massenanteil unterhalb des oberen oder unteren Toleranzwertes vorliegen, damit das Altholz für den entsprechenden Verwertungsweg zugelassen werden kann. Resultiert aus der optischen Sortieranalyse ein Massenanteil der größer als der obere Toleranzwert ist, ist das untersuchte Altholz dem übergeordneten Entsorgungsweg zuzuführen.

Alternativ kann das folgende Beurteilungsschema (siehe Abbildung 70) verwendet werden, um in Bezug auf die Zusammensetzung des Altholzes eine Beurteilung vorzunehmen. Beim Ablesen der Fraktionsanteile ist die logarithmische Skaleneinteilung zu beachten. Für die Beurteilung des Altholzes werden für jede Fraktion Bereiche von zulässigen Fraktionsanteilen je Verwertungsweg vorgeschlagen. Die Fraktionsanteile basieren auf dem erstellten Szenario 1 aus dem Szenarientest.



**Abbildung 70: Beurteilungsschema maximal tolerierbare Fraktionsanteile (eigene Darstellung)**

Das Verfahren eignet sich zur Selbst- und Fremdkontrolle von Altholz durch den Betrieb oder die Behörden und ermöglicht eine schnelle und einfache Vor-Ort-Untersuchung und –Beurteilung ohne chemische Analysen. Angewendet werden kann es bei zerkleinertem Altholz wie Holzvorbruch und Holz hackschnitzeln bei dem eine gute Differenzierung der Holzfraktionen möglich ist. Bei Altholz bzw. bei Altholz-Proben mit einem Anteil der Feinfraktion (Korngröße < 20 mm) über 50% ist keine plausible Beurteilung möglich. Unter Berücksichtigung der Information zu den eingesetzten Holzabfällen, welche in der Materialannahme im unzerkleinerten Zustand identifiziert werden können, kann eine Beurteilung erfolgen.

### 7.3 Annahme-Strategien

Um die Qualitätsanforderungen an die stoffliche oder thermische Verwertung zu erfüllen, besteht eine Möglichkeit darin Holzabfälle entsprechend ihrer Belastung zu sortieren und aufzubereiten. Ziel der Altholzaufbereitung sollte eine an den Verwertungsweg angepasste Aufbereitung der Holzabfälle sein und damit einhergehend eine Differenzierung der Qualität des aufbereiteten Altholzes bei den Altholzverarbeitern. An erster Stelle sollte dabei die ökologisch sinnvolle stoffliche Verwertung von Holzabfällen in der Holzwerkstoffindustrie stehen. Da nicht jede Belastung im Holz zweifelsfrei erkennbar ist und es bei der Sortierung zu einer Falschzuordnung zu Lasten der Qualität kommen kann, eignen sich weitere Maßnahmen zum Erreichen der Qualitätsanforderungen. Diese Maßnahmen sollten vor der Aufbereitung von Altholz Anwendung finden, denn einmal gemischte Holzabfälle sind nur mit hohem Aufwand in unbelastetes und belastetes Holz trennbar (Vgl. [30], S.5)

Eine weitere Möglichkeit ist die Einschränkung bei der Annahme von Holzabfällen entsprechend verschiedener Kriterien. Entweder werden Abfälle nach ihrem zugeordneten VeVA-Code entgegengenommen oder es kann eine sortenweise Annahme von Holzabfällen erfolgen. In diesem Fall können Altholzverarbeiter entsprechend ihrer Verwertungswege das Annahmespektrum von Holzabfällen anpassen um vorab die Qualität einzustellen.

Die Sortierung von Holzabfällen stützt sich auf die Erkennbarkeit von Belastungen. Z.B. sind PCP-Belastungen in Dachgebälk nicht optisch erkennbar. Um eine falsche Zuordnung zu vermeiden und den Qualitätsanforderungen zu genügen, bietet sich eine Schadstoffabklärung vor der Erfassung von Holzabfällen an (Vgl. [33], S.13). Eine vorherige Schadstoffabklärung unterstützt die folgende Maßnahme.

Um eine Verschleppung von Verunreinigungen in Altholzgemischen zu vermeiden erweist sich die getrennte Sammlung bzw. Erfassung von Holzabfällen am Ort der Abfallentstehung als hilfreich. Die sogenannte Quellensortierung differenziert vor der Vermischung verschiedener Holzabfälle abhängig von der Qualität bzw. Schadstoffbelastung. So können unbelastete und belastete Holzabfälle getrennt voneinander erfasst und aufbereitet werden und man vermeidet eine nachträgliche aufwendige Sortierung (Vgl. [30], S.5).

## **8 Schlussfolgerungen und Ausblick**

### **8.1 Schlussfolgerungen**

Die Vorversuche zur Untersuchung der optischen Sortieranalyse von Altholz und von Probenteilungsverfahren zeigen, dass es bei der Mehrfachdurchführung zu Abweichungen und zu Streuungen der Messwerte kommt. Diese sind jedoch stark von der Anzahl der Durchführungen, von der Probenmenge und von der Korngröße des Materials abhängig. Die Sortieranalyse ist mit vertretbaren Abweichungen durchführbar und liefert reproduzierbare Ergebnisse, verlangt aber die Fachkenntnis der Sortierfraktionen. Problematik bei der Sortieranalyse ist die Nichterkennung von belastetem Holz und somit eine Falschzuordnung. So können z.B. PCP-Belastungen in Dachgebälk, welches optisch zum unbehandelten Holz zugeordnet wird, nicht erkannt werden [34]. Diese Problematik war jedoch nicht Untersuchungsgegenstand der Arbeit. Bei der Teilung von Altholzproben kommt es zur ungleichen Verteilung der ermittelten Fraktionsanteile, so dass eine Probenteilung beim untersuchten Holzvorbruch nicht vorgeschlagen wird. Bei kleineren Korngrößen und homogenerer Verteilung der Bestandteile ist eine Probenteilung günstiger.

Mit Hilfe des gewählten Versuchsaufbaus aus einem künstlich hergestellten Haufwerk mit definierter Zusammensetzung Altholzproben zu entnehmen, ist es möglich die Probenahmemethoden auf vergleich- und reproduzierbare Ergebnisse zu untersuchen. Ausgehend von einem nahezu homogenen Versuchshaufwerk, bezogen auf die unterschiedlichen Holzfraktionen und deren Korngrößenverteilung, wurden dazu die Korngrößenverteilung, die Fraktionszusammensetzung und die Schadstoffgehalte der entnommenen Proben untersucht. Sowohl die Probenahmemethode nach Vollzugshilfe Holzabfälle des BAFU als auch die neue Probenahmemethode ASPE liefern reproduzierbare Ergebnisse. Es kann gezeigt werden, dass die Probenahmemethode ASPE gut anwendbar ist gleichwertige Ergebnisse liefert. Weiterhin bietet die Probenahmemethode ASPE Vorteile bei der Anwendung bei Altholzverarbeitern.

Aufbauend auf der Durchführbarkeit der optischen Sortieranalyse wird eine Methode zur Selbst- oder Fremdkontrolle von Altholz vorgeschlagen. Hierzu wurden Daten älterer Untersuchungen von Holzabfällen ausgewertet und Szenarien erstellt. Mit einem Plausibilitätstest an realen Altholzproben aus einer vorangegangenen Untersuchung von Altholz können diese Szenarien bestätigt werden. Mit den Szenarien werden maximal zulässige Fraktionsanteile im Altholz je nach Verwertungsweg vorgeschlagen, so dass die Anforderungen an die Verwertung eingehalten werden. Aufgrund der Zusammensetzung einer Probe, die mit der Sortieranalyse ermittelt wird, kann eine Beurteilung vorgenommen werden. Eine Aktualisierung der Datenlage zur

möglichen Schadstoffbelastung von Altholz wird empfohlen, um die vorgeschlagenen Toleranzwerte zu bestätigen bzw. anzupassen.

## **8.2 Ausblick**

Ziel jeder Probenahme ist Gewinnung repräsentativer Proben um die Merkmale einer Gesamtmenge zu bestimmen. Erste Wahl für die Probenahme aus festen Abfällen ist die Probenentnahme aus dem Materialstrom (Vgl. [35]). Hierfür sind entsprechende Vorrichtungen einzuplanen, die eine problemlose und einfache Entnahme von Probenmaterial aus dem sich bewegenden Abfall gewährleisten. Beispielhaft ist die Entnahme von zerkleinerten und homogenen Material bei der Brennstoffbeschickung einer Verbrennungsanlage genannt. Alternativ können Vorrichtungen für eine Probenahme in den Materialstrom dazwischen geschaltet werden. Anwendung findet diese Möglichkeit der Probenahme z.B. in einem Ersatzbrennstoff (EBS) – Kraftwerk in Deutschland. Das automatische Probenahmesystem BenHur entnimmt Proben während des Abladens von Abfall in den Annahmehunker des Kraftwerks (Vgl. [36], S.13 f).

Probenahmen nach LAGA PN 98 orientieren meist auf eine abschnittsweise Beprobung von Abfällen. In einer Arbeit zu Probenahmestrategien wurde hierzu die integrale Beprobungsstrategie statistisch begründet. Diese Strategie stellt eine Alternative dar und zeigt, dass repräsentative als auch kostenoptimierte Probenahmen, auch von inhomogenen Abfällen möglich sind und stets eine vorgegebene Genauigkeit erreicht wird [37].

Neben der in dieser Arbeit untersuchten Probenahmemethode ASPE, welche an die LAGA PN 98 angelehnt ist, hat der Aushub-, Rückbau- und Recycling-Verband (ARV) der Schweiz, Kommission für Bausperrgut/Altholz, ebenfalls ein neues Probenahmeverfahren für Altholz erarbeitet. Das Probenahmeverfahren des ARV baut ebenso auf Grundlagen der LAGA PN 98 auf und berücksichtigt die Lagermengen des Altholzes und unterscheidet die Probenahme an unzerkleinertem, vorgebrochenem Holz und an Holzhackspänen [38].

Es ist vorgesehen, dass die Erkenntnisse dieser Arbeit zur Probenahme und Sortieranalyse von Altholz gemeinsam mit Vertretern anderer Kantone und dem Branchenverband ARV dem BAFU vorgelegt, diskutiert und daraus weitere Maßnahmen abgeleitet werden.



## Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU) (2012): Abfallwegweiser Holzabfälle. Internet-Veröffentlichung:  
<http://www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01473/index.html?lang=de> (Stand 15.05.2012).
- [2] Bundesgesetz über den Umweltschutz - Umweltschutzgesetz (USG) vom 7. Oktober 1983 (Stand 1. Dezember 2010).
- [3] Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990 (Stand: 01. Juli 2011).
- [4] Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand: 15. Juli 2010).
- [5] Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA) vom 22. Juni 2005 (Stand: 01. Januar 2010).
- [6] Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen - Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) vom 18. Mai 2005 (Stand: 01. August 2011).
- [7] BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU): Vollzugshilfe Umweltverträgliche Entsorgung von Holzabfällen. Internet-Veröffentlichung:  
<http://www.bafu.admin.ch/veva-inland/11827/11828> (Stand: 07. Februar 2013).
- [8] KVV-OST Konferenz der Vorsteher der Umweltämter der Ostschweiz/Fürstentum Liechtenstein (2012): Faktenblatt BAU 7 – Umgang mit Holzabfällen. Geänderte Fassung 20.03.2012. Kantonsinternes Dokument.
- [9] Verordnung des UVEK über Listen zum Verkehr mit Abfällen (LVA) vom 18. Oktober 2005 (Stand: 01. Januar 2012).
- [10] HOFMANN, TOM (2012): Beurteilung der Altholzbelastung im Kanton Zürich. Schlussbericht, internes Dokument AWEL, Zürich.
- [11] TAVERNA, RUEDI, ET AL. (2010): Abschätzung des Altholzaufkommens und des CO<sub>2</sub>-Effektes aus seiner energetischen Verwertung. Schlussbericht. GEO PARTNER AG, Zürich.
- [12] BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU) (2012): Statistik Altholz. Internes Dokument VeVA-Fachtagung 2012. Veröffentlichung BAFU, Bern.
- [13] WINZELER, REGULA (2012): schriftliche Auskunft 30.10.2012, Zürich.
- [14] Altholzverordnung (AltholzV) vom 15. August 2002 (BGBl. I S. 3302) (Stand 24.02.2012).
- [15] BUNDESVERBAND DER ALTHOLZAUFBEREITER – UND VERWERTER (BAV) (Hrsg.) (2012): Leitfaden der Altholzverwertung. Berlin.

- [16] Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über das Recycling von Altholz in der Holzwerkstoffindustrie (RecyclingholzV) vom 15.05.2012 (BGBl II Nr. 160/2012) (Stand 28.01.2013).
- [17] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (Hrsg.) (2012): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 Österreich, Band 1. Internet-Veröffentlichung: <http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at> (Stand 25.07.2012).
- [18] HAIDER, ANDREAS (2011): Masterarbeit – Ökobilanzierung von Altholzverwertungsalternativen. Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien.
- [19] WINDSPERGER, ANDREAS (2011): Verwertungspotenziale für Abfälle und Reststoffe, Vortrag. Institut für industrielle Ökologie, St. Pölten.
- [20] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) (2001): Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bewertung/Beseitigung von Abfällen LAGA PN 98 (Stand Dezember 2012).
- [21] BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU) (2010): Vorgehen für die Probenahme von geschreddertem Altholz. Internet-Veröffentlichung: [http://www.bafu.admin.ch/veva-inland/11827/11828/11846/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGe39\\_fmym162epYbg2c\\_JjKbNoKSn6A--](http://www.bafu.admin.ch/veva-inland/11827/11828/11846/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGe39_fmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--) (Stand 01.12.2010).
- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) (2011): DIN EN 15442 Feste Sekundärrohstoffe – Verfahren zur Probenahme. Beuth-Verlag, Berlin.
- [23] SCHRÄGLE, RAINER (2012): Sachkundelehrgang 14./15. März 2012 - theoretische Grundlagen und praktische Anwendung Probenahme und optische Sortieranalyse von Holzabfällen. Kanton Zürich.
- [24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) (2011): DIN EN 14780 Feste Biobrennstoffe – Probenherstellung. Beuth-Verlag, Berlin.
- [25] BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU) (2010): Aufschluss und Analyse der Probe von Holzabfällen. Internet-Veröffentlichung: [http://www.bafu.admin.ch/veva-inland/11827/11828/11846/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGe39\\_f2ym162epYbg2c\\_JjKbNoKSn6A--](http://www.bafu.admin.ch/veva-inland/11827/11828/11846/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGe39_f2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--) (Stand 01.12.2010).
- [26] SCHRÄGLE, RAINER (2013): Beratung Technologica GmbH, telefonische Auskunft 11.01.2013, Zürich.

- [27] BACHEMA AG (Hrsg.) (2011): Bachema AG Dienstleistungsverzeichnis 11/13. Zürich.
- [28] GLOOR, ROLF (2013): telefonische Auskunft 01.03.2013, Zürich.
- [29] FUCHS, SIMON (2012): Praxisuntersuchung zur Altholzqualität – Bachelorarbeit. Veröffentlichung Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg.
- [30] FRITZ EGGER GMBH & CO. OG (Hrsg.) (2012): Leitfaden zur Sortierung von Altholz für die stoffliche Verwertung bei EGGER. St. Johann.
- [31] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDWIRTSCHAFT (BUWAL) (Hrsg.) (2004): Schadstoffgehalte in Holzabfällen – Analysenresultate der Holzkampagne 98. In: Umwelt-Materialien Nr. 178 – Abfall, Bern.
- [32] LABORATORIUM DER URKANTONE (Hrsg.) (2010): Marktkontrolle Holzwerkstoffe und Altholz 2007 – Gesamtschweizerische Marktkontrolle unter Leitung des Laboratoriums der Urkantone. Veröffentlichung Laboratorium der Urkantone, Brunnen.
- [33] RUBLI, STEFAN (2012): Untersuchung zur PCP-Belastung in Holzkonstruktionen von Gebäuden im Kanton Zürich – Schlussbericht. Schlieren.
- [34] SCHRÄGLE, RAINER (2013): Altholzverwertung/Vollzugserfahrungen Deutschland, Einsatz Sortieranalyse. Kurzvortrag, Hearing AWEL am 15.03.2013, Zürich.
- [35] SKUTAN, STEFAN (2012): schriftliche Auskunft 16.11.2012, Zürich.
- [36] SCHINGNITZ, DANIEL (2012): Seminarmodul Abfallwirtschaft und Altlasten, Veranstaltung 3, Schnelltestsysteme zur Bestimmung brennstoffrelevanter Parameter bei Ersatzbrennstoffen. Vorlesungsunterlagen TU Dresden, Dresden.
- [37] WINTERSTEIN, MICHAEL (2012): Probenahmestrategien für eine repräsentative und kostenoptimierte Beprobung von Abfallhaufwerken. In: Müll und Abfall (44-2012), Seiten 565-628.
- [38] Aushub-, Rückbau- und Recycling-Verand (ARV), Kommission Bausperrgut/Altholz (Hrsg.) (2012): Vorgehen für die Probenahme von Altholz – Entwurf (Stand 29.11.2012). Internes Dokument.

### **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Sämtliche benutzten Informationsquellen sowie das Gedankengut Dritter wurden im Text als solche kenntlich gemacht und im Literaturverzeichnis angeführt. Die Arbeit wurde bisher nicht veröffentlicht und keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



## Anhang

A	Ergebnisse Voruntersuchung.....	75
B	Ergebnisse Siebung.....	76
C	Ergebnisse Sortieranalyse .....	77
D	Ergebnisse Laboranalysen.....	78
E	Übersicht Zuordnung Holzabfallarten zu Sortierfraktionen .....	79
F	Daten Holzkampagne 98.....	80
G	Daten Holzwerkstoffkampagne 2007 .....	81
H	Ergebnisse Referenzwerte.....	82
I	Ergebnisse Szenarientest .....	83
J	Ergebnisse Plausibilitätstest .....	84

## **A Ergebnisse Voruntersuchung**

## **B Ergebnisse Siebung**



## **C Ergebnisse Sortieranalyse**

## **D Ergebnisse Laboranalysen**

## E Übersicht Zuordnung Holzabfallarten zu Sortierfraktionen

<i>Massivholz, optisch unbehandelt <sup>1)</sup>:</i>	Dachbalken Dachlatten Kanthölzer Einwegpaletten Massivholz Stückholz/Scheitholz Laub- und Nadelholz Restholz aus Sägereien
<i>Massivholz, behandelt <sup>1)</sup>:</i>	Fassadenbretter Dielenbretter Wandbretter Fruchtkisten, Harassen Schalungstafeln
<i>Holzwerkstoffe <sup>2)</sup>:</i>	rohe Spanplatten MDF-Platten OSB-Platten Sperrholz
<i>Holzwerkstoffe, beschichtet <sup>2)</sup>:</i>	beschichtete Spanplatten
<i>problematische Holzabfälle <sup>1)</sup>:</i>	Fensterladen Fenster Palisaden Zäune Baum- und Rebpfähle Telefonstangen/Pfähle Parkbänke/Spielplatzgeräte
<i>Bahnschwellen <sup>1)</sup>:</i>	Bahnschwellen

Bemerkung:

1) Holzsortiment aus Holzkampagne 98 [31]

2) Holzsortiment aus Holzwerkstoffkampagne 2007 [32]

## **F Daten Holzkampagne 98**

## **G Daten Holzwerkstoffkampagne 2007**

## **H Ergebnisse Referenzwerte**

## **I Ergebnisse Szenarientest**

J Ergebnisse Plausibilitätstest

