

# Schlussbericht vom 15.01.2024

---

zu IGF-Vorhaben Nr. IGF 21841 BG

## Thema

TomoBale - Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Röntgentechnik zur Verbesserung und Erweiterung der Wareneingangskontrolle von Altpapierballen

## Berichtszeitraum

1.5.2021 - 31.7.2023

## Forschungsvereinigung

Papiertechnische Stiftung (PTS)

## Forschungseinrichtung(en)

FE1: Papiertechnische Stiftung (PTS)

FE2: Fraunhofer-Gesellschaft e.V. - Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Gefördert durch:

## Inhalt

Inhalt	2	
Zusammenfassung	3	
Danksagung	4	
1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	5
2	Stand der Forschung und Entwicklung	6
2.1	<b>Messtechnische Bewertung von Altpapierballen</b>	6
2.2	<b>Computertomographie – Theorie</b>	7
2.3	<b>Industrielle Computertomographie</b>	9
2.4	<b>Dual-Energy-CT</b>	10
2.5	<b>Spezifische Anforderungen an den Strahlenschutz</b>	10
3	Konzept des Forschungsvorhabens	10
4	Ergebnisse	12
4.1	<b>Ermittlung der Erfordernisse an die CT- und Röntgentechnik (vgl. Arbeitspaket 1)</b>	12
4.2	<b>Erstellung eines Konzeptes zur Probenerstellung (vgl. Arbeitspaket 2)</b>	12
4.3	<b>Aufbau von Software-, Datenbank- und IT- Schale (vgl. Arbeitspaket 3)</b>	13
4.4	<b>Aufbau und Referenz-Bewertung eines modularen Probensatzes (vgl. Arbeitspaket 4)</b>	14
4.4.1	Probepollen (Grundset)	14
4.4.2	Standard-Materialien	16
4.5	<b>Variation der Messmodi (vgl. Arbeitspaket 5)</b>	22
4.6	<b>Erhöhung der Komplexität der Proben (vgl. Arbeitspaket 6)</b>	28
4.7	<b>Vergrößerung der Proben- und Messvolumina (vgl. Arbeitspaket 7)</b>	29
4.8	<b>Mathematische Modellierung der Zusammenhänge (vgl. Arbeitspaket 8)</b>	33
4.9	<b>Validierung an realen AP-Ballen (vgl. Arbeitspaket 9)</b>	39
4.10	<b>Konzeptstudie zur Umsetzung in die Praxis (vgl. Arbeitspaket 10)</b>	46
5	Schlussfolgerungen	48
6	Abkürzungsverzeichnis	50
7	Literaturverzeichnis	51

---

## Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erweiterung und Komplementierung der bisher eingeführten Methoden der technischen Wareneingangskontrolle von Altpapier in Ballenform durch den Einsatz von Computer-Tomographie. Deren Einsatzmöglichkeiten wurden beginnend mit synthetischen Mustern bis hin zur Untersuchung realer Ballen evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass selbst letztere mit einer räumlichen Auflösung von weniger als 400 µm mit hinreichender Kontrastbildung vermessen werden können. Die dafür notwendigen technischen Parameter wurden optimiert, vor allem im Hinblick auf die Messzeit. Single- und Dual-Scan-Messungen wurden ebenso in die Auswertungen einbezogen, was die Vielfalt der Ergebnisse erhöhen konnte.

Es wurden hinreichend viele synthetische Ballen-Muster erstellt, um die vorab erstellten Hypothesen untersuchen und ggf. bestätigen zu können. Im Gegensatz zu den initialen Erwartungen konnte gezeigt werden, dass für die meisten Analysen und Messungen ein Probenvolumen von nur wenigen Kubikzentimetern ausreichend gewesen wäre. Unter Verwendung dieser Proben konnten eine Reihe grundlegender Zusammenhänge zwischen Materialgruppen, Verdichtungen, Feuchtegehalt, Füllstoffgehalt und Strukturen aufgeklärt werden, die die Voraussetzungen für nachfolgende quantitative Auswertung waren.

Zur Normierung der CT-Bilder und zur Übertragung der Ergebnisse innerhalb verschiedener Mess-Systeme wurden Standardmuster definiert, die das Spektrum für Papier und verwandte Produkte vorzufindender Schwächungskoeffizienten abdeckten. Die Eignung der Materialien und die Reproduzierbarkeit der damit erzielten Ergebnisse wurden nachgewiesen. Ebenso wurden Methoden erstellt, die CT-Abbildungen in hinreichender Weise manipulieren können. Dies betrifft vor allem räumliche Operationen, um die Ausrichtung entlang der Vorzugsschichtungsebene in Ballen zu gestatten.

Nachdem gefunden wurde, dass Feuchte keinen erkennbaren Einfluss auf die CT-Abbildungen hat und so keinen Einfluss auf die Ergebnisse ausübt, wurde eine prinzipielle Strategie der Auswertung der CT-Bilder erstellt. Diese beinhaltet die Aufteilung des jeweiligen Gesamtvolumens einer CT-Abbildung in Volumeneinheiten ca. 500 Voxeln, was vor allem zur Reduktion von Rechenzeit bei guter Wiedergabe der Verteilung von Schwächungskoeffizienten führt.

Die Erkennung und Quantifizierung von Material-Sorten wurden in zwei Richtungen vorangetrieben. Auf der einen Seite wurden Methoden verwendet und angepasst, um die Sorten mit einer nicht-normalverteilten Schwächungskoeffizientenkurve identifizieren zu können. Dabei erwies sich der Kolmogorov-Smirnov-Test als effizient und genau, vor allem bei der Zuordnung von Wellpappen in originaler aber auch in kollabierter Struktur. Materialien, deren Schwächungskoeffizienten eine Normalverteilung aufweisen, was meist der Fall ist, wurden durch Maximum und Standardabweichungen der Verteilungen separiert. Dabei konnten Büropapier, Zeitungsdruck und Magazinpapier gut voneinander unterschieden werden. Dagegen war Zeitungsdruck von Graukartons nicht unterscheidbar, da diese auch chemisch und physikalisch ähnliche Eigenschaften aufweisen. Die Hinzunahme der Ergebnisse von Dual-Scan-Messungen konnte die Differenzierung verbessern.

Die Verrechnung hinsichtlich Basismaterialzerlegung (BMZ) erhöhte den Informationsgehalt der Messungen weiter. Obwohl dabei die räumliche Auflösung scheinbar sinkt und sich das Rauschen in den Abbildungen erhöht, konnte ein Ansatz zur Erkennung von Kunststoffen gefunden werden. Da diese oft hochkomprimiert aber füllstoffarm sind, zeichnen sich makroskopische Objekte in den CT-Bildern ab, auch wenn diese flächig sind. Zum anderen lässt die BMZ quantitative

Rückschlüsse auf den Füllstoffgehalt zu. Dieser Ansatz ist ähnlich genau, wie der von NIR-Messungen. Seine Grenze ist die unterschiedliche Zusammensetzung von Füllstoffen, die in der BMZ nicht ermittelt werden kann. Eine Fokussierung auf das häufig vorkommende Kalzium lieferte die besten Ergebnisse.

Die Erkennung von Metallteilen – auch in realen Ballen – ist nahezu uneingeschränkt möglich. Die Schärfe der Erkennung hängt einzig von der Messauflösung ab. Weiter unerwünschte Bestandteile in Ballen lassen sich vor allem durch ihre räumliche Struktur erkennen. In synthetischen Ballen konnten z.B. CDs, Handyakkus, Textilien und einige Kunststoffverbunde hinreichend gut erkannt werden. Die in realen Ballen verpressten papierfremden Objekte wurden vor allem daran erkannt, dass sie nicht überwiegend lineare oder ebene Strukturen bilden.

In einem Vergleich der CT-Messung eines realen Ballens und der manuellen Sortierung desselben konnten qualitative und quantitative Zusammenhänge gefunden werden, obwohl die Messungen bei anderer Strahlungsenergien als bei den Laboranwendungen und der Methodenerstellung erfolgten. Grundlegender Unterschied der Ergebnisse ist dabei, dass die CT-Messungen allein volumenbezogen, die der klassischen Methoden aber massebezogen sind. Da die reale Verdichtung innerhalb eines Ballens nicht materialspezifisch gemessen werden kann, kann eine Annäherung der beiden Ergebnisse nur auf der Basis begründeter Annahmen erfolgen.

Letztlich wurden Konzepte erstellt, die den Einsatz von CT-Systemen in der industriellen Praxis beschreiben. Diese sind bei aktuellem Stand der Technik noch nicht geeignet, Ballenvolumina komplett und in angemessener Zeit zu scannen. Zusätzlich ist der energetische Auswand dafür im Verhältnis zum Warenwert zu hoch. Es konnte aber gezeigt werden, dass auch eine geringe Anzahl an CT-Schnittbildern geeignet ist, einen großen Teil des Volumens statistisch abzubilden. Die Technik kann somit auch für andere ballenförmig gehandelte Materialien und Rohstoffe zum Einsatz kommen, vorwiegend wenn die beinhalteten Objekte in Dezimeter-Bereich liegen. Auf Grund der hohen Investitionskosten für derartige Systeme, ist ein Einsatz an zentralen Handels- und Verteilzentren zu empfehlen.

## **Danksagung**

Das Forschungsvorhaben IGF 21841 BG wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsförderung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Hierfür möchten wir uns herzlichst bedanken. Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses für die Unterstützung der Arbeiten.

## **1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Altpapier ist der wichtigste Rohstoff in der deutschen Papierindustrie. In Deutschland liegt die Altpapiereinsatzquote gemessen am Gesamtfaserrohstoffverbrauch (Zellstoff, Holzstoff und Altpapier) derzeit bei rund 76 % [i]. Der Gesamtverbrauch an Altpapier stieg dabei in den vergangenen Jahren kontinuierlich an und erreichte 2021 ein vorläufiges Maximum von 18,3 Mio. Tonnen [ii]. Dieser Trend wird sich auch in der Zukunft noch weiter fortsetzen. Haupttriebfedern sind dabei ökonomische und ökologische Gründe, aber auch eine Selbstverpflichtung der europäischen Papierindustrie zur Wiederverwertung des Altpapiers [iii].

Mit dem steigenden Altpapierbedarf und der damit einhergehenden immer stärkeren Erfassung erwachsen immer wieder neue Anforderungen an seine Qualität. So besteht die Gefahr, dass mit der gesteigerten Erfassung von Altpapier, insbesondere aus dem haushaltsnahen Bereich, eine Qualitätsverschlechterung einhergeht [iv]. Dabei sind nicht nur typische Altpapierverunreinigungen, die mittels vorhandener Techniken ausgeschleust werden können, entscheidend. Selten, aber dafür mit erheblichem Schadenspotenzial vorkommende Fremdstoffe (z.B. Motorblock oder Teppich) sind derzeit nahezu nicht detektierbar.

Im europäischen Rahmen gibt es seit vielen Jahren Anstrengungen und Initiativen, um die Altpapierqualität zu sichern und zu verbessern. So wurde in der Europäischen Norm EN 643 die Zusammensetzung der einzelnen Altpapierqualitäten verbindlich festgelegt [iv] und im Jahr 2013 in stark überarbeiteter Version verfeinert [v]. Zu nennen sind weiterhin die „European Declaration on Paper Recycling (2006-2010)“ [iii] und die „Recovered Paper Quality Control Guidelines“ [vi] der CEPI.

Aktuell hat sich die internationale Situation verschärft, denn China hat 2017 einen Importstopp für verschiedene Recyclingmaterialien erlassen, u.a. auch für Altpapier [vii]. Die in den zugehörigen Bestimmungen für den Gehalt an unerwünschten Bestandteilen, z.B. Metallteilen, genannte Grenze liegt dabei bei nur 0,5 %, was den Altpapierhandel mit China quasi zum Erliegen gebracht hat.

Diesen gesetzlichen und rechtlichen Bestimmungen nahezu entgegen liegen die praktischen Möglichkeiten der Bewertung von Altpapierballen. Diese werden oftmals direkt am Anfallort der Materialien bzw. in regionalen Sammelstellen gefertigt, länder- und kontinenteübergreifend gehandelt und meist ungeöffnet in den Aufbereitungsprozess gegeben. Dabei macht es nicht nur die Menge, sondern auch die hohe Verdichtung dieser Ballen unmöglich, über Außen- oder Stichprobenkontrollen hinaus messtechnisch gesicherte Aussagen zu den wesentlichen Inhaltsstoffen zu treffen. Neben einer überwiegend äußerlichen Messung der Feuchte mittels elektromagnetischem Wechselfeld oder einer einfachen Widerstandsmessung, haben sich in den letzten Jahren NIR-basierende Methoden verbreitet, welche durch Erfassung von CH- und OH-Gruppen stoffliche Aussagen treffen können.

NIR-Strahlung hat physikalisch bedingt im Verhältnis zum Gesamtvolumen eines AP-Ballens keine Eindringtiefe. Aus diesem Grund müssen Bohrungen per Hand oder Automat eingebracht werden, deren Loch bzw. deren Bohrmaterial untersucht wird. Diese Entwicklungen werden im

Wesentlichen von der französischen Firma Techpap [viii] und von der PTS [ix] selbst vorangetrieben. Dabei wird Feuchte, Kunststoffanteil, Ligningehalt (Holzstoffanteil) sowie der Anteil an Anorganika, und zuletzt sogar der Weißgrad [x] der Lieferungen stichprobenartig bestimmt.

Eine 100-prozentige Wareneingangskontrolle ist derzeit nicht einmal im Ansatz möglich. In diese Richtung weisende messtechnische Versuche auf der Basis von Mikrowellenstrahlen zeigen, dass selbst für den Parameter Feuchte keine stabile Bewertung von LKW-Ladungen möglich ist.

## **2 Stand der Forschung und Entwicklung**

### **2.1 Messtechnische Bewertung von Altpapierballen**

Im Folgenden werden die wesentlichen auf dem Markt befindlichen Geräte zur Bewertung von AP-Ballen kurz beschrieben.

#### **Oberflächliche Feuchtemessung mittels elektromagnetischen Wechselfeldes**

Das im Messfeld befindliche Material wird von einem elektrischen Feld durchdrungen. Bei diesen Handmessgeräten wird das Messsignal auf ein konstantes Volumen bezogen und damit der Feuchte-Wert berechnet.



*Abbildung 1: Messung der Feuchte von AP-Ballen am LKW im Wareneingang einer Papierfabrik, effektive Eindringtiefe laut Herstellerangabe ca. 300 mm [xi]*

#### **Oberflächliche Feuchtemessung mittels Widerstandsmessung**

Es werden verschiedene Handmessgeräte angeboten, die aus der Messung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei in die Ballenoberfläche zu stechenden Elektroden auf den Feuchtegehalt schließen.

#### **Mikrowellenmessung der Feuchte kompletter LKW-Ladungen**

Das System misst den relativen Feuchtigkeitsgehalt von Altpapier-Ballen, die mit Lastwagen geliefert werden, mit einer Online-Echtzeit-Mikrowellen-basierten Messtechnik während der LKW durch das sog. Messtor fährt.



Abbildung 2:  
Prinzipskizze  
des sog.  
Feuchtetores  
„HPNA“ [xii]

Untersuchungen der PTS haben gezeigt, dass die Messergebnisse nur eine eingeschränkte Aussagekraft besitzen [xiii].

### **NIR-Spektroskopische Verfahren**

Systeme wie das PBS II der PTS und das „NIR Moisture and Plastic“-Gerät von Techpap [xiv] aus Frankreich nutzen die NIR-Spektroskopie. Für eine sinnvolle Messung ist es notwendig, ein Loch in den Ballen zu bohren. Auch eine Kernbohrung kann durchgeführt werden. Mit dem Messgerät wird dann die Wandung des entstandenen Loches bzw. die Außenseite des Bohrkerns abgetastet und die Messergebnisse direkt an einen PC zur Auswertung weitergegeben.

Beide Systeme können den Feuchtegehalt und den Kunststoffanteil an den beprobten Ballen sehr gut bestimmen, da NIR-Spektren überwiegend die OH- und CH-Gruppen von Wasser bzw. verschiedenster Kunststoffe widerspiegeln. Mit dem PTS-System wird zusätzlich noch das Holzstoff-Zellstoff-Verhältnis auf Basis des enthaltenen Lignins und seiner aromatischen CH-Schwingungen ermittelt. Zuletzt wird hier auch der Füllstoffgehalt - im Wesentlichen dadurch, dass Anorganika das Faserstoffspektrum schwächen - bestimmt, was aber zu einer vergleichsweise geringen Genauigkeit von nur +/- 3 % führt.

Weitere, maßgebliche technische Lösungen „zur Analyse von AP-Ballen sind nicht bekannt. Im Einzelfall können auch die Ballenöffnung allein oder eine Stichprobennahme und klassische Referenzanalytik zum Einsatz kommen.

## **2.2 Computertomographie – Theorie**

### **Erzeugung**

Bei der für die Erstellung von CT-Bildern notwendigen Röntgenstrahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen  $10^{-8}$  m und  $10^{-13}$  m, der sich somit von der UV-Strahlung bis zur  $\gamma$ -Strahlung erstreckt. Eine gängige Methode zur Erzeugung von Röntgenstrahlung ist die Röntgenröhre: Mit Hilfe einer Glühkathode werden zunächst thermische Elektronen erzeugt und dann in einem elektrischen Feld in Richtung der Anode beschleunigt. Beim Eintritt der Elektronen in das Metall der Anode entstehen Röntgenstrahlen, deren Energie von der Eintrittsgeschwindigkeit der Elektronen abhängt.

Dabei kommen je nach Einsatzbereich unterschiedliche Beschleunigungsspannungen zum Einsatz. Während bei medizinischer Diagnostik zwischen 25 kV und 150 kV und bei der Strahlentherapie zwischen 10 kV und 300 kV verwendet werden, werden bei der Materialprüfung Beschleunigungsspannungen bis 500 kV benötigt [xv].

Treten Elektronen in das Anodenmaterial ein, führen elektrische Felder der dortigen Atome zu Ablenkungs- und Abbremsprozessen. Letztere entstehen durch Wechselwirkungen zwischen orbitalen Elektronen und Atomkernen und führen zu freier Energie in Form elektromagnetischer Wellen. Dabei entstehen Photonen. Idealerweise wird die Energie eines Elektrons komplett in ein einzelnes Photon umgewandelt.

Aufgrund vielfältiger Abbremsungsprozesse im Anodenmaterial ergibt sich ein kontinuierliches Bremsspektrum, das von einem charakteristischen Linienspektrum ( $K_{\beta}$  und  $K_{\alpha}$ ) überlagert wird. Letzteres kommt durch direkte Wechselwirkungen beschleunigter Elektronen mit Elektronen des Anodenmaterials zustande. Das charakteristische Röntgenspektrum hängt von weiteren Faktoren wie Anodenmaterial, Filterung sowie der zugrundeliegenden Beschleunigungsspannung ab. Der Röhrenstrom ändert dabei lediglich die Gesamtintensität.

Grundsätzlich ist der Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Röntgenstrahlung sehr gering und beträgt bei Wolframanoden bei einer Beschleunigungsspannung von 100 kV lediglich ca. 1 %. Der Rest der Energie wird in Wärme umgewandelt und führt zu hohen Temperaturen an der Anodenoberfläche, weshalb üblicherweise eine rotierende Anode (Drehanode) eingesetzt wird, um die thermische Belastung zu reduzieren. Die Stelle, an der die Elektronen auf die Schrägung der Anode auftreffen, wird als „optischer Brennfleck“ bezeichnet und sollte möglichst klein sein. Große Brennflecken führen durch Halbschatteneffekte zu unscharfen Abbildungen.

### Aufbau und Funktionsweise von Computertomographen

Während bei medizinischen Anwendungen Röntgenquelle und Detektor um den Patienten rotieren, wird bei der industriellen CT-Technik meist das zu prüfende Objekt rotiert, wie in folgender Abbildung dargestellt. In Abhängigkeit des Rotationswinkels werden einzelne Transmissionsbilder (sog. Einzelprojektionen) des Prüfobjekts erstellt und abgespeichert. Diese richtungsabhängigen Einzelprojektionen bilden wiederum die Basis für die CT-Rekonstruktion.

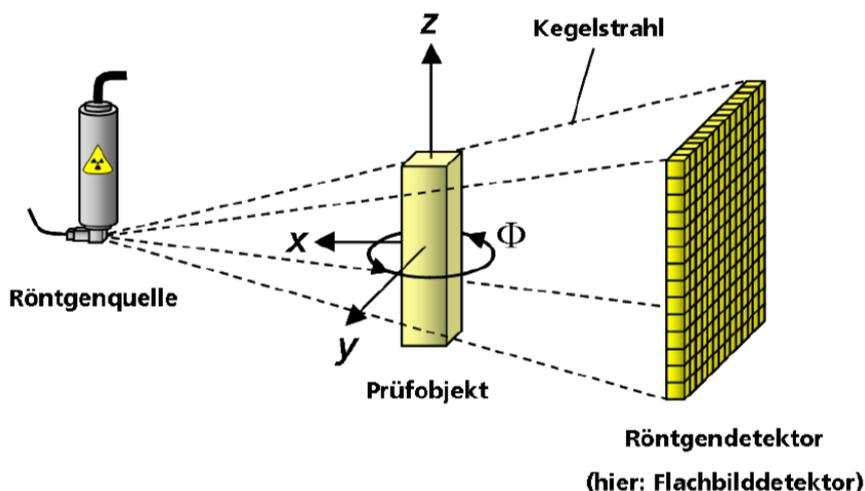
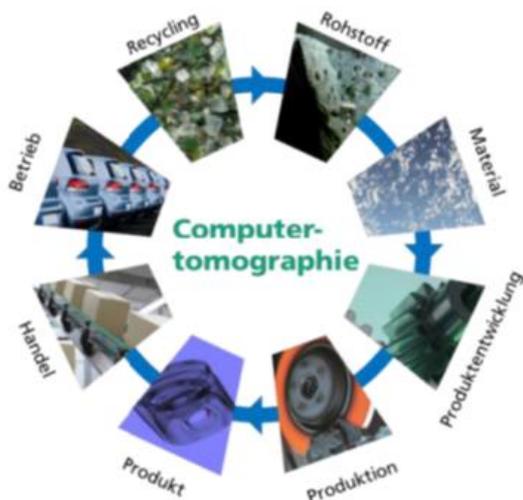


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer dreidimensionalen CT [xvi]

Neben der dargestellten Kombination aus Kegelstrahl und Flächendetektor kommen auch Kombinationen aus Fächerstrahl und Zeilendetektor zum Einsatz. Letztere weisen eine reduzierte Anfälligkeit gegenüber Streustrahlung und hohe Genauigkeiten auf. Dies geht jedoch u. U. mit deutlich höheren Aufnahmezeiten einher, sofern nicht nur einzelne Transmissionsbilder erstellt werden sollen, da dann alle Einzelprojektionen zeilenweise angefertigt werden müssen.

Für die Bildrekonstruktion stehen eine Reihe komplexer Algorithmen zur Verfügung, deren Anwendung je nach Einsatzzweck erfolgt. Das bekannteste Rekonstruktionsverfahren ist die gefilterte Rückprojektion (engl. Filtered Backprojection, FBP), die sich je nach Filterung sehr gut zur Abgrenzung von Strukturen eignet, aber auch ein erhöhtes Bildrauschen aufweist. Zur effektiveren Rauschunterdrückung kommt im Rahmen der modernen CT daher auch die iterative Rekonstruktion zum Einsatz.

## 2.3 Industrielle Computertomographie



Die industrielle Computertomographie (CT) wird heute in nahezu allen Phasen des Produktlebenszyklus, beginnend beim Rohstoff über das Produkt im Betrieb bis hin zum Recycling am Lebensende (vgl. Abbildung) - aber nur in ausgewählten Branchen - eingesetzt [xvii].

Die Hauptanwendungsgebiete werden im Übersichtsartikel [xviii] ausführlich behandelt und sind im Folgenden kurz zusammengefasst: Materialcharakterisierung mittels hoch- und höchauflösender CT [xix], Materialprüfung (Risse, Lunker, Fremdeinschlüsse) an keramischen, metallischen Bauteilen oder Kunststoffbauteilen [xx], Digitalisierung industrieller Bauteile zur messtechnischen Analyse [xxi], [xxii], [xxiii], [xxiv], Untersuchung von Gepäck und großen Seefrachtcontainern auf gefährliche Inhalte (Sprengstoffe, Waffen) [xxv], CT zur Wiederaufbereitung (Sanierung) von Produkten und Materialbestimmung und -trennung mittels Dual-Energy-CT (siehe nachfolgendes Kapitel) zur Gewinnung von Rohstoffen (Detektion von Diamanten in Gestein [xxvi]) und für Recyclinganwendungen.

In einem typischen Aufbau eines industriellen CT-Scanners wird das Prüfobjekt auf dem Drehteller fixiert, durchstrahlt und um 360° gedreht, wobei typischerweise 1000 bis 2000 zweidimensionale Röntgenprojektionen generiert werden. Mittels verschiedener 3D-Rekonstruktionsverfahren wird ein dreidimensionaler Volumendatensatz berechnet, wobei jedes Volumenelement (Voxel) den (mittleren) lokalen Schwächungskoeffizienten des Objekts im Strahlengang enthält. Dieses Konzept wurde bereits in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt und ist heute Stand der Technik [xxvii].



Darüber hinaus betreibt das Fraunhofer EZRT am Standort Fürth die weltweit größte zivil zugängliche CT-Anlage mit einem Linearbeschleuniger als Strahlungsquelle. Diese Systeme können Objekte bis hin zu einer Größe eines Automobils digitalisieren und sind Gegenstand aktueller Forschung.

## **2.4 Dual-Energy-CT**

Dual-Energy Computertomographie wurde zuerst in den 70er Jahren beschrieben [xxviii]. Dabei werden zwei Aufnahmen mit unterschiedlicher Röntgenenergie gewonnen (low und high energy) und aus den unterschiedlichen Abschwächungseigenschaften der verschiedenen Elemente zusätzliche Materialinformationen gewonnen. Die Schwächungseigenschaften von Materialien sind abhängig von der Photonenenergie der verwendeten Röntgenstrahlung. Mit Dual-Energy-CT oder gar Multi-Energy-CT wird es auch in industriellen Anwendungen möglich, präzise Dichtemessungen und Materialbestimmungen durchzuführen [xxix].

Eine mögliche Implementierung der Dual-Energy Technik ist die sogenannte Basismaterialzerlegung. Dabei werden aus den beiden Röntgenaufnahmen zwei neue Bilder generiert, die jeweils die Bestandteile mit niedriger effektiver Ordnungszahl und hoher effektiver Ordnungszahl darstellen. (Siehe dazu auch: [xxx]).

## **2.5 Spezifische Anforderungen an den Strahlenschutz**

Beim Einsatz von Röntgentechnik muss gemäß der Strahlenschutzverordnung und des Strahlenschutzgesetzes [xxxii] aktive Vorsorge und Schutz betrieben werden.

Der nötige Strahlenschutz wird in der Regel so gestaltet, dass das System als Vollschutzgerät betrieben werden kann. Je nach Ergebnis von entsprechenden Konzeptstudien (Röntgenenergie, Röntgenintensität, Design und Aufstellort.) muss der Strahlenschutz dabei an die Situation angepasst werden. Im speziellen Fall muss der Strahlenschutz durch Blei oder Schwerbeton realisiert werden. Kompakte CT-Systeme für Laboranwendungen haben am Fraunhofer EZRT für mittlere Röntgenenergien von 200 - 300 kV entweder einen Bleimantel von 15 - 20 mm oder eine Wandstärke von 30 bis 40 cm Schwerbeton. Während einer Messung muss das System von allen Seiten abgeschirmt werden, so dass zwingend Türen bzw. Tore anzubringen sind. Beim Öffnen der Zugangstüren (stets mit Bleimantel) muss sichergestellt werden, dass die Röntgenstrahlung ausgeschaltet. Da die Intensität der Strahlung dem Abstandsquadratgesetz gehorcht, wonach die Intensität mit zunehmendem Abstand zur Quelle quadratisch abnimmt, lässt sich der Strahlenschutz auch durch zur Verfügung gestellten Abstand von mehreren Metern realisieren.

Bei der Verwendung eines Linearbeschleunigers als Strahlungsquelle mit Photonenenergien bis zu 9 MeV sind die Anforderungen an den Strahlenschutz noch weitaus größer. Am Fraunhofer EZRT wird hierfür eine bis zu drei Meter dicke Sandwichkonstruktion aus Beton und E-Ofenschlacke zur Abschirmung verwendet, was eine Unterbringung in bestehenden Gebäuden nahezu unmöglich macht.

## **3 Konzept des Forschungsvorhabens**

Das Forschungsprojekt umfasste insgesamt elf Arbeitspakete, welche in enger Abstimmung von den beiden beteiligten Forschungseinrichtungen bearbeitet wurden.

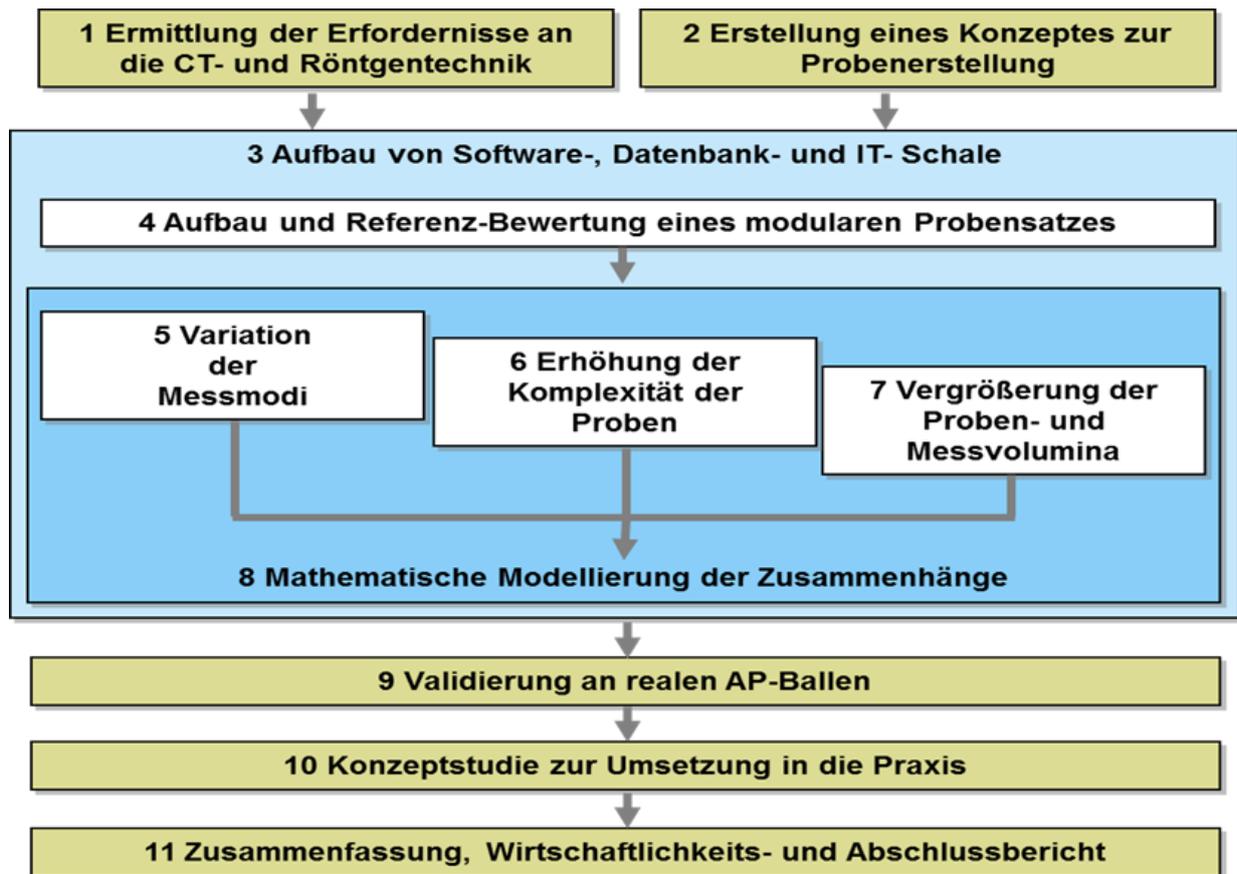


Abbildung 4: Überblick über die 11 Arbeitspakete

Zunächst wurden in einer Konzeptphase prinzipielle Anforderungen im Hinblick auf die röntgentechnischen Messungen im Umgang mit den hier behandelten Materialien untersucht (Fh IIS) und auf der anderen Seite ein System entwickelt, um homogene sowie inhomogene Materialzusammenstellungen in den entsprechenden Größenordnungen zu erstellen und zusätzlich geeignete Normkörper zu entwickeln.

Die Arbeiten der AP 4 bis 8 waren eingefasst von der erfolgten Software- und IT-technischen Umrahmung. In diesem Rahmen wiederum stellte das AP 8 mit der mathematischen Beschreibung und Modellierung der aus den CT-Messungen erstellten Daten einen Kern dar. Dieser wurde gefüllt mit der CT-Messung und der referenzanalytischen Bewertung von verschiedenen Probensätzen bei Variation der Messbedingungen.

Die AP 9 und 10 befassten sich letztlich mit der Umsetzung der Erkenntnisse in den praxisrelevanten Bereich durch Messung eines konkreten Altpapierballens sowie Überlegungen zur technischen Umsetzung.

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Ermittlung der Erfordernisse an die CT- und Röntgentechnik (vgl. Arbeitspaket 1)**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine umfassende Anforderungsanalyse durchgeführt. Dabei wurden sowohl Anforderungen, als auch zu berücksichtigende Randbedingungen für die Prüfung und Bewertung von Altpapier-Ballen mit CT- und Röntgentechnik erarbeitet und entwickelt. Bei der CT- und Röntgentechnik handelt es sich um ein komplexes System mit sehr vielen Einstellparametern, welche unterschiedlichste Auswirkungen auf die Ergebnisqualität, die Messzeit und die Systemkosten haben. Daher galt es zu eruieren, welche Parameter für die Anforderungen das beste Ergebnis in der geforderten Zeit liefern können.

Insbesondere wurden zunächst folgende Parameter auf Grundlage der ermittelten Anforderungen hinsichtlich ihres Einflusses abgeschätzt:

- Röntgenenergie und Fokusgröße der Röntgenröhre
- Detektorgröße und Auflösung
- Belichtungszeiten des Detektors
- Manipulationskonzept (Drehtisch, Gantry, Roboter etc.)
- Radiographie, CT oder Dual-Energy-CT-Modus
- Anzahl der notwendigen Röntgenprojektionen
- Filterung des Röntgenspektrums
- notwendige Verfahren zur Bildartefaktkorrektur

#### **Erzielte Ergebnisse**

Im Arbeitspaket wurde ein auf die Anforderungen und Randbedingungen zur optimalen Messung und Bewertung von Altpapierballen zugeschnittener erster Parametersatz für die CT- und Röntgentechnik entwickelt. Ausgehend von diesem konnten die spezifischen Parameter vor allem bezüglich des Gesamtvolumens der Ballen und der nötigen Ortsauflösung variiert werden.

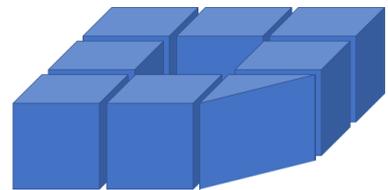
### **4.2 Erstellung eines Konzeptes zur Probenerstellung (vgl. Arbeitspaket 2)**

Einer der wichtigsten Problemkreise des Projektes war die Erstellung einer hinreichenden Zahl an Referenzproben, die die verschiedenen Altpapierqualitäten und die darin enthaltenen gewünschten und unerwünschten Bestandteile enthalten. Dabei war auf der einen Seite zu berücksichtigen: die Voraussetzungen der verfügbaren CT-Technik, das damit messbare Probenvolumen und die Kapazität der Messgeräte (zeitlich). Auf der anderen Seite musste auf eine ausgewogene Struktur des Probensatzes bezüglich Sorten, Inhaltsstoffe und Inhomogenitäten geachtet werden. Unter Verwendung der aktuellen Altpapiersortenliste und den in PTS vorliegenden Erfahrungen in Bezug auf typische Inhaltsstoffe (Untersuchungen aus dem Einsatz NIR-basierter

Mess-Systeme in der industriellen Praxis; überwiegend Ballenware) wurden entsprechende Konzepte erstellt, bewertet und beispielhaft umgesetzt. Dabei wurden ca. 10 Grundprodukte der Papierproduktion und -verarbeitung mit ca. ebenso vielen physikalischen und geometrischen Eigenschaften der Muster kombiniert. Für eine praktikable Umsetzung des Konzeptes wurden Grund-Struktureinheiten von 10 cm Kantenlänge definiert. Es wurden vier Möglichkeiten der Herstellung untersucht und umgesetzt, gänzlich in einem nichtmetallischen Gebinde:

- gleichmäßig geschichtete Ballen
- Ballen in einer stabilen Einhausung (für kleinteilige Proben und zum schnellen Einbringen von definierten Fremdkörpern)
- in Plastikfolie eingeschweißte Ballen (für langzeit-stabile Aufbewahrung fragiler und feuchter Muster)

- Ballen zum Auffüllen von Leerstellen in Proben größeren Volumens und an den Ecken (Anmerkung: Viele CT-Scans lassen nur einen Probendurchmesser von ca. 35 cm zu, so dass in einem 3 x 3 Ballensetting die Eckballen verkleinert werden müssen. Siehe Abbildung)



### **Standardmaterialien**

Auch im Bereich der Röntgen- und CT-Technik haben sich Materialien und Probekörper etabliert, die eine Standardisierung und Normierung der erstellten Abbilder erlauben, aber auch zur Justage von Geräten dienen. Insgesamt tragen diese dazu bei, eine konsistente und zuverlässige Grundlage für Messungen zu schaffen, die mit verschiedenen Mess-Systemen an unterschiedlichen Orten und unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden. Dies fördert die Vertrauenswürdigkeit und Vergleichbarkeit von Daten, was in vielen wissenschaftlichen, industriellen und regulatorischen Kontexten von entscheidender Bedeutung ist und auch für den letztlichen Anwendungsfall von Relevanz ist.

Es wurde ein Konzept erstellt, dieses Normmaterial zu fertigen und in den Messprozess standardmäßig einzubinden. Inhalte waren dabei die Auswahl geeigneter Materialien, deren Zusammenstellung, Konfektionierung und Einhausung. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Möglichkeit gelegt, dieses Material auch künftig in gleicher Qualität fertigen zu können.

## **4.3 Aufbau von Software-, Datenbank- und IT- Schale (vgl.**

### **Arbeitspaket 3)**

Im FH ISS und an der PTS liegen verschiedene Strukturen vor, in denen Mess- und Auswertungsarbeiten durchgeführt werden können. Um hier gemeinsam an den CT-Bilddaten arbeiten zu können wurden folgende Arbeiten durchgeführt.

- Anforderungsanalyse und Auswahl der geeigneten Softwarepakete zur Auswertung der 3D-CT-Bilder, die auch im IT-System der PTS zum Einsatz kommen können
- Entwicklung eines datenbankbasierten Frameworks für ein einheitliches Datenmanagementsystem; aufbauend auf bestehenden Systemen zum Datenmanagement
- Bereitstellung eines geeigneten Softwarepakets für die PTS

- Schaffung von Schnittstellen zum Datenexport für die Softwarepakete von PTS
- Konzeption zur Einbindung der mathematischen Algorithmen und zu den Optionen der Datenausgabe (Art, Umfang, Darstellung)

### **Erzielte Ergebnisse**

Durch die Erweiterung des Umfanges der CT-Messungen, deren räumlichen Variationen und der Hinzunahme von Dual-Scan-Messungen sowie deren folgenden mathematischen Auswertungsmöglichkeiten hinsichtlich niedriger und hoher Ordnungszahlen wurde die Datenbasis überproportional erweitert. Für jede Probe liegen folgende Datensätze vor:

- Gemessene Projektionen (Transmissionsbilder aus den verschiedenen Winkelpositionen während der CT-Messung)
- 3-D-Rekonstruktionen (aus den Projektionsdaten rekonstruierte Volumendarstellungen im Format der Software des FH ISS zur bildlichen Darstellung und Erzeugung von Schnittbildern)
- 3-D-Rekonstruktionen (übernommene Daten innerhalb einer in Python erstellten Software zur weiteren Verarbeitung und spezifischen Auswertung, vorwiegend auf Seiten der PTS)
- Schnittbilder (in x-, y- und z-Richtung, in standardisierten Abständen und abgelegt als unkomprimierte TIFF-Dateien)

Die tomographischen Messungen wurden in der Regel mit zwei verschiedenen Röntgenenergien (Low- und High-Energy) durchgeführt, was die Datenmenge zusätzlich um einen Faktor von ca. 2,5 erhöht.

Anhand dieser Messungen wurden erstellt

- Basismaterialzerlegungen auf der Grundlage niedriger Ordnungszahlen. Hierfür wurde Kohlenstoff als Referenzmaterial zur Berechnung genutzt, da es wesentlicher Bestandteil organischer Inhaltstoffe von Papieren ist.
- Basismaterialzerlegungen auf der Grundlage hoher Ordnungszahlen. Hierfür wurde Kalzium als Referenzelement zur Berechnung genutzt, da es häufig als anorganischer Füllstoff in Papieren genutzt wird.

Auch diese Daten liegen jeweils als 3-D-Volumen und als Schnittbilder (s.o.) vor.

Zur Verarbeitung und Analyse der Daten wurde ein Software-Tool in Python erstellt, das neben schon beschriebenen Abläufen auch das Extrahieren von Teilvolumina zur weiteren Analyse und das freie Rotieren der Datensätze um beliebige Winkel erlaubt.

## **4.4 Aufbau und Referenz-Bewertung eines modularen Probensatzes**

### **(vgl. Arbeitspaket 4)**

#### **4.4.1 Proballen (Grundset)**

Das in AP 2 erstellte Konzept zur Probenherstellung wurde umgesetzt. Zu Beginn wurden überwiegend homogene Kleinballen der Kantenlänge 10 cm aufgebaut. Diese decken mehr als

ein Dutzend der häufigsten Papiersorten und Papierprodukte ab. Die entsprechenden Inhaltsstoffe wurden beschrieben und relevante Eigenschaften (u.a. Dichte, Feuchtegehalt, Asche- bzw. Füllstoffgehalt) im Labor ermittelt. Proben mit Feuchtegehalten bis zu 40 % wurden ebenso gefertigt.

Diese Muster reichten aus, um eine Gesamtdurchstrahlungslänge von ca. 1 m zu erreichen, nicht aber um eine Fläche von 1 m<sup>2</sup> zu füllen. Zur Abschätzung, welche technischen Voraussetzungen für die Vermessung eines realen Ballens notwendig sind, wurden entsprechende Arbeiten vorgezogen. So wurde eine Ballenstruktur erstellt, die eine Grundfläche von 1,1 x 1,1 m und eine Höhe von 20 cm aufweist sowie eine ballentypische Dichte von ca. 0,6 g/cm<sup>3</sup> hat. Diese kann im weiteren Projektverlauf ebenso genutzt werden, um definiert einzelne Materialproben in die Messungen einzubeziehen. Aufgrund des aktuell hohen Zeit- und Energieaufwandes sind hier aber nur gezielte Einzelmessungen möglich.

*Tabelle 1: Übersicht über die wesentlichen Materialien im initialen Probensatz sowie der jeweilige Mineralstoffanteil*

Papiersorte	Kürzel	MSA in %
Zeitungsdruckpapier (ZDP)	ZDP	13,15
Büropapier (BP)	BP	21,18
Magazinpapiere, beidseitig gestrichen (MAG)	MAG	42,71
Wellpappe, unbeschädigt (WP, unbesch.)	WP, unbesch	13,69
Wellpappe, beschädigt (WP, besch.)	WP, besch.	14,94
Wellpappe, unbeschädigt, weiß gedeckt und gestrichen	WP, gestr. & besch.	20,69
Graukarton	Karton	16,51
Getränkekarton, Materialverbund	-	-

Alle Proben wurden jeweils einzeln vom FH ISS im Computertomographen des Typs *HeiDetect FXInline-CT* mit folgenden Parametern gescannt.

Spannung und Strom	225 kV; 6 mA
Anzahl Projektionen	400
Pixelgröße und -anzahl	400 µm; 1000x1000 px <sup>2</sup>
Belichtungszeit	35 msec (1 Bildmittelung)
Voxelgröße	280 µm
Volumenabmessung	500x500x500 Voxel <sup>3</sup>

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Ballen aus Zeitungsdruckpapier mit beigefügten Standardprobensätzen I und II in einem CT-Schnitt. Gut zu erkennen ist der Kabelbinder.



Abbildung 5: Muster 1 (Zeitungsdruckpapier)

Ohne weitere mathematische Bearbeitung zeigen diese vor allem die Struktureigenschaften der Muster. Am Auffälligsten sind dabei die verschiedenen Wellpappen, die für das menschliche Auge in originaler, aber auch kollabierter Form eindeutig zu erkennen sind, was eine gute Voraussetzung für eine nachfolgende Erkennung mittel automatisierter Methoden ist. Gedeckte wie auch zusätzlich gestrichene Wellpappen sind allein am CT-Abbild nicht von unbeschichteten Wellpappen zu unterscheiden. Dies gilt auch für die Beschichtungen anderer untersuchter Produkte. Die Auflösung der Bilder ist dabei zu grob und der ggf. niedrigere Anorganikagehalt einer weißen Zellstoffschicht bzw. der höhere eines darauf befindlichen Striches beeinflussen die Schwächungskoeffizienten in den Abbildungen nicht oder heben sich gegenseitig sogar auf.

Im Verlaufe der Untersuchungen wurden weitere Probestellen erstellt, die spezifisch für einzelne Fragestellungen zusammengefügt wurden. Verwendung fanden dazu aber Einhüllungen aus einem stabilen 4-Kant-Papprohr. Dieses erlaubt einen schnellen Wechsel der Inhalte. In diesem Aufbau wurden vor allem Mischungen von verschiedenen Papier-Mustern gefertigt und gemessen.

Weiterhin wurden die in AP 1 vorgeschlagenen Auffüllmuster gefertigt. An diese bestanden kaum Anforderungen, so dass sie aus kommerziell erhältlichen Holz-Reststoff-Platten gefertigt wurden. Allein die Dichte sollte der von komprimiertem Papier ähnlich sein. Auch sollten keine abschirmenden Inhaltsstoffe vorhanden sein.

#### 4.4.2 Standard-Materialien

Das in AP 2 beschriebene Standardmaterial wurde erstellt und zusammengesetzt, um im Projektzeitraum und darüber hinaus zum Abgleich der CT-Bilder und quantitativen, aber auch qualitativen Abschätzung verwendet werden zu können. Es handelt sich dabei um eine Zusammenstellung von acht unterschiedlichen, homogenen und definierten Würfeln der Kantenlänge 15 mm, die in einer Einhausung schmutzsicher untergebracht sind. Die enthaltenen Materialien wurden referenzanalytisch untersucht. Die Auswahl erfolgte danach, dass die Referenzkörper kostengünstig und in beliebiger Menge nachgefertigt werden können.

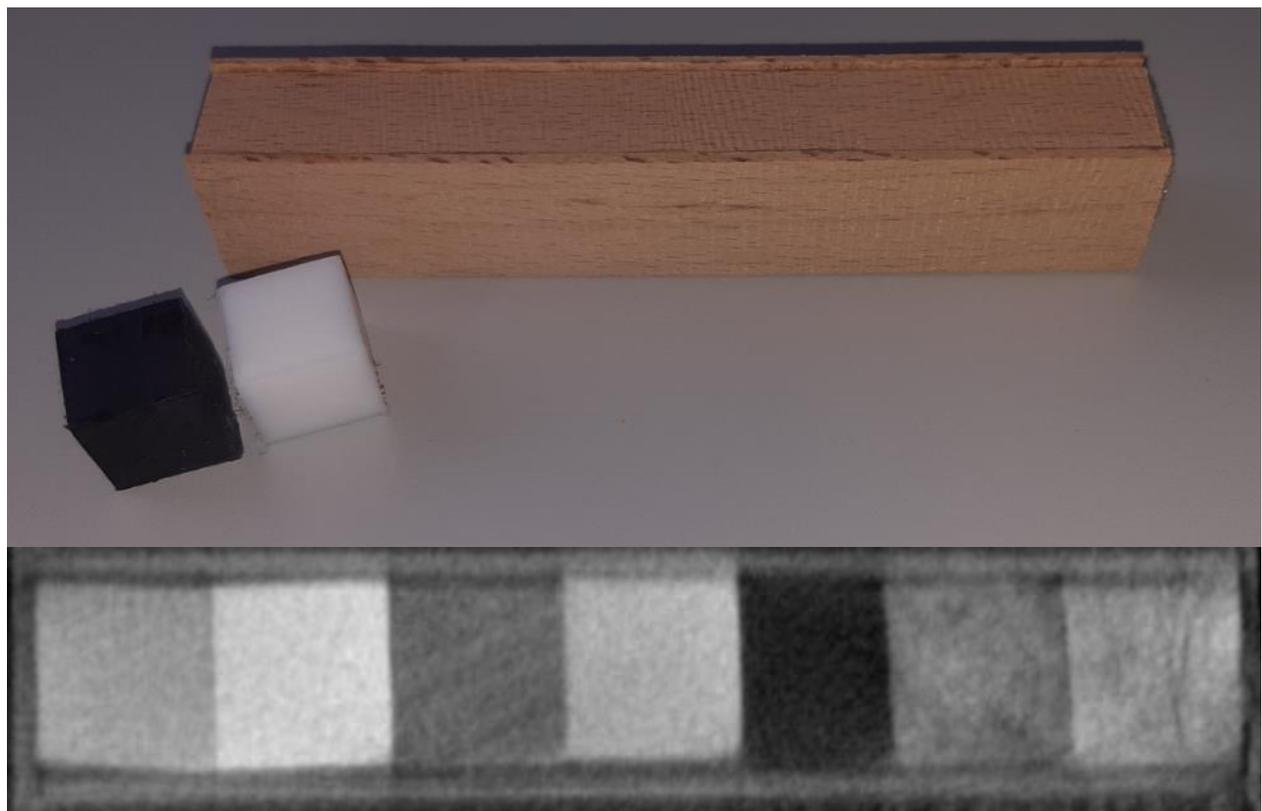
In der Projektbearbeitung wurden dabei mehrere Mischungen aus organisch basierten Materialien (verschiedene Kunststoffe, Papiere, Holz) erstellt, die in Sets zusammengefasst wurden.

Diese wurden den Messproben in einer Weise angefügt, dass mindestens ein Schnittbild ein Maximum an Materiallagen der Messprobe und die komplette Reihe an Standardproben enthielt.

Das initiale Set Nr. I bestand aus verschiedenen Materialien, die in einem AP-Ballen vorkommen.

*Tabelle 2: Übersicht der für das Standardmaterialienset I verwendeten Materialien sowie Mineralstoffanteil und (scheinbare) Dichte*

Material	Kürzel	MSA in %	$\rho_{(\text{schein})}$ in g/cm <sup>3</sup>
Zellstoff mit Füllstoff	ZS_F	37,4	1,00
Faserstoff mit Füllstoff	FS	8,8	0,76
Schwamm	-	-	0,03
Spektralon (gesintertes PTFE)	-	-	1,59
Buchenholz	Buche	0,5	0,76
PTFE	-	-	2,47
POM	-	-	1,06



*Abbildung 6: Realansicht des Standardmustersatzes I und CT-Bild (die Muster wurden in einer Holzschachtel zusammengeführt)*

Wie die Abbildung zeigt, weisen einige der verwendeten Materialien Eigenschaften auf, die zu inhomogenen CT-Abbildern führen. So ist Holz wegen der unterschiedlichen Dichten von Früh-

und Spätholz vergleichsweise inhomogen und weist eine Verteilung der Schwächungskoeffizienten mit mindestens zwei lokalen Maxima auf. Siehe dazu die nachfolgende Abbildung.

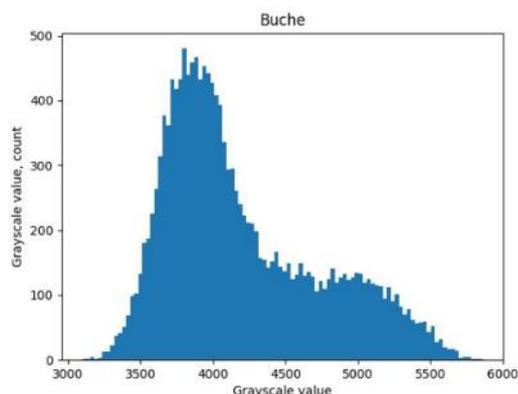


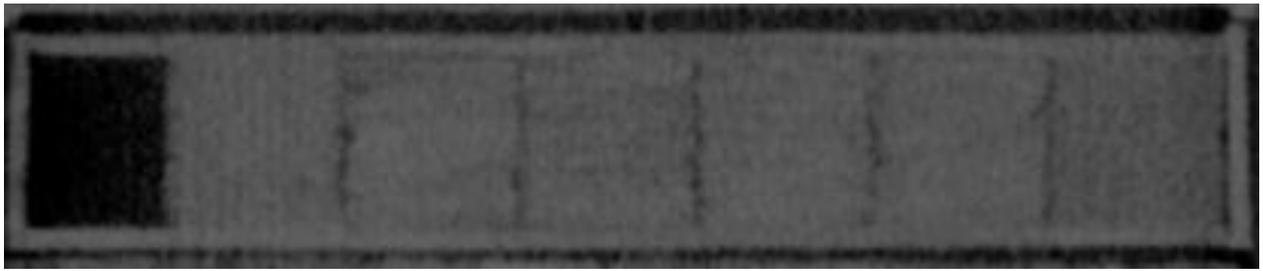
Abbildung 7: Verteilung der Graustufen aller Voxel des Würfels „Buchenholz“ des Sets I

Bei den beiden in Abbildung 6 am rechten Rand gelegenen Würfelmaterialien handelte es sich um vermahlene Papierprodukte, die feucht verpresst und dann getrocknet wurden. Auch diese Materialien, die sich im Bereich von Nahinfrarot-Messungen seit Längerem bewährt hatten, erweisen sich hier als nicht perfekt und liefern deutlich inhomogenere CT-Bilder als die nebenstehenden Kunststoffe.

Nach den ersten CT-Messungen hatte sich gezeigt, dass der initiale Standardprobensatz geeignet ist, eine hohe Spanne an zu erwartenden Materialien in AP-Ballen abzubilden. Zur Ergänzung und als Maßstab für spezifischere Eigenschaften von Papieren (überwiegend verschiedener anorganischer Bestandteile) wurde ein zweiter Probensatz erstellt und referenzanalytisch bewertet. Dieser Satz beinhaltete Papiere identischer Faserstoffherkunft bei Zugaben der typischen Füllstoffe Titandioxid, Kreide und Kaolin bei Anteilen von ca. 40 Masse-Prozent sowie ein aschefreies Muster, sowie Büropapier, einem Testliner und Luft.

Tabelle 3: Übersicht der für das Standardmaterialienset II verwendeten Materialien sowie Mineralstoffanteil und (scheinbare) Dichte

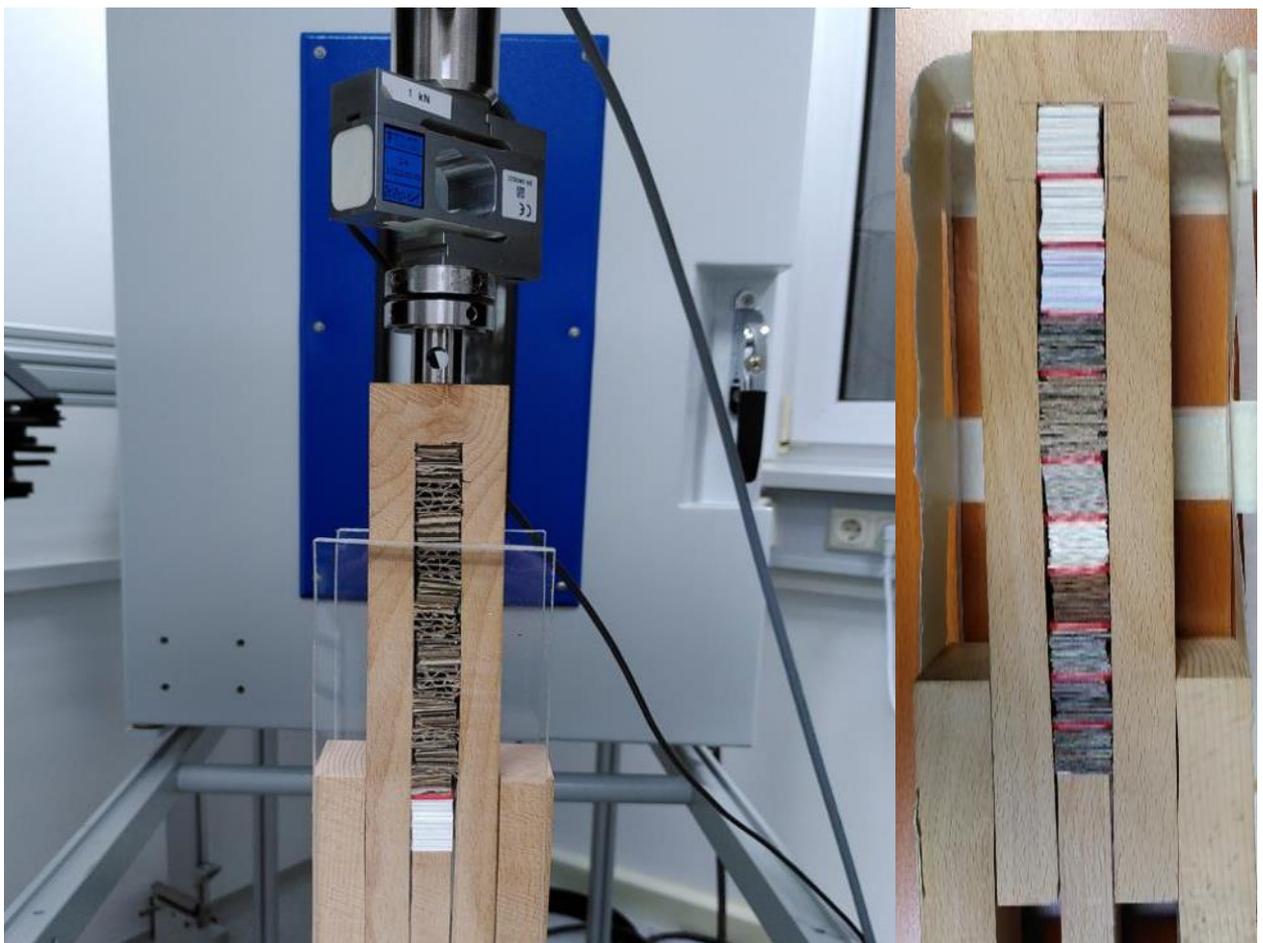
Material	Kürzel	MSA in %	$\rho_{\text{schein}}$ in g/cm <sup>3</sup>
Testliner	TL	18,0	0,61
Büropapier	BP	22,0	0,61
Zellstoff mit Kaolin	ZS_Kaolin	43,9	0,61
Zellstoff mit TiO <sub>2</sub>	ZS_TiO <sub>2</sub>	42,3	0,61
Zellstoff mit GCC	ZS_GCC	39,6	0,61
Zellstoff	ZS	0,4	0,54



*Abbildung 8: Schnittbild des 2. Standardprobensatzes nach CT-Rekonstruktion (ganz links: Luft)*

Wie in der Abbildung zu erkennen, waren keine signifikanten Unterschiede der Schwächungskoeffizienten in den Mustern mit und ohne Anorganika auszumachen. In erster Näherung repräsentierten die Schwächungskoeffizienten allein die scheinbare Dichte.

Dieser Umstand führte zu einer vor Projektbeginn nicht vorhersehbaren Richtung in der weiteren Bearbeitung. Es zeigte sich, dass Verdichtung, Oberflächenstruktur und Füllstoffgehalt in einem komplexen Zusammenhang stehen und dieser auch in den Standardproben abgebildet werden muss. Folglich wurde ein weiterer Materialdatensatz erstellt und referenzanalytisch bewertet. Zusätzlich wurde eine variable Vorrichtung unter den CT-spezifischen Voraussetzungen gebaut, welche in ein Zugprüfgerät eingepasst und mit verschiedenen praxisrelevanten Drücken beaufschlagt werden kann.

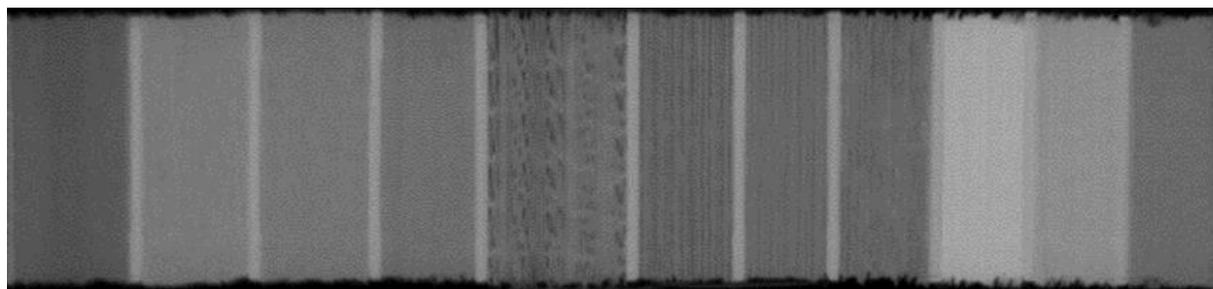


*Abbildung 9: Vorrichtung zur Erstellung des Standardmustersatzes III (links: im Vergleich Büro-papier und Wellpappen vor dem Verpressen, rechts: alle Muster nach dem Verpressen. Die Wellpappe wurde dabei auf ein ähnliches Volumen wie die anderen Muster verdichtet.)*

Das dritte Standardmaterialienset sollte als Ergänzung für die Sets I und II dienen und entstand nach allen anderen in der Arbeit verwendeten Proben. Es beinhaltet Papiersorten, die mit einem Druck von ca. 500 kN/m<sup>2</sup> verpresst wurden, um Pressenkräfte bei der Herstellung von Altpapierballen nachzubilden. Der Druck auf die Proben wird über einen Holzrahmen gehalten. Damit sollten einerseits Veränderungen der scheinbaren Dichten und die damit einhergehende Abschwächung berücksichtigt werden, andererseits auch die resultierende Zerstörung der Wellpappenstruktur genauer analysiert werden. Die enthaltenen Papiermaterialien sind in Tabelle 4 aufgeführt.

*Tabelle 4: Übersicht der für das Standardmaterialienset III verwendeten Materialien sowie Mineralstoffanteil und (scheinbare) Dichte*

Material	Kürzel	MSA in %	$\rho_{\text{schein}}$ in g/cm <sup>3</sup>
Zellstoff	ZS	0,4	0,66
Zellstoff mit GCC	ZS_GCC	39,6	0,88
Büropapier	BP	22,0	0,88
Zeitungsdruck	ZDP	13,7	0,88
Wellpappe	WP	13,4	n. v.
Karton, grau	KART_grau	22,9	0,73
Karton, weiß gedeckt	KART_weiss	22,0	0,72
Karton, braun	KART_braun	6,6	0,75
Magazinpapier, beidseitig gestrichen	MAG	35,6	1,16
Werbedruck, kalandriert	SC	15,5	0,95
Flyer, stark bedruckt, ähnlich Zeitungsdruck	ZDP_Flyer	16,4	0,71



*Abbildung 10: CT-Schnittbild des dritten Standardprobensatzes (links: Zellstoff, zwischen den Papiersorten jeweils eine Kunststoff-Trennlage)*

Auch in dieser verpressten und hochverdichteten Probe lässt sich mindestens noch gut die Struktur der Wellpappe erkennen, obwohl viele Lagen kollabiert sind. Weiterhin lässt sich für alle Materialien die Schichtung und damit auch die Lagenabfolge nachvollziehen, obwohl die räumliche Auflösung i.A. oberhalb der Dicke der Einzelschichten der Papiere liegt.

Der im Standardprobensatz halbquantitativ gefundene Zusammenhang zwischen den Graustufen der CT-Abbildung und der scheinbaren Dichte wurde hier quantifiziert.

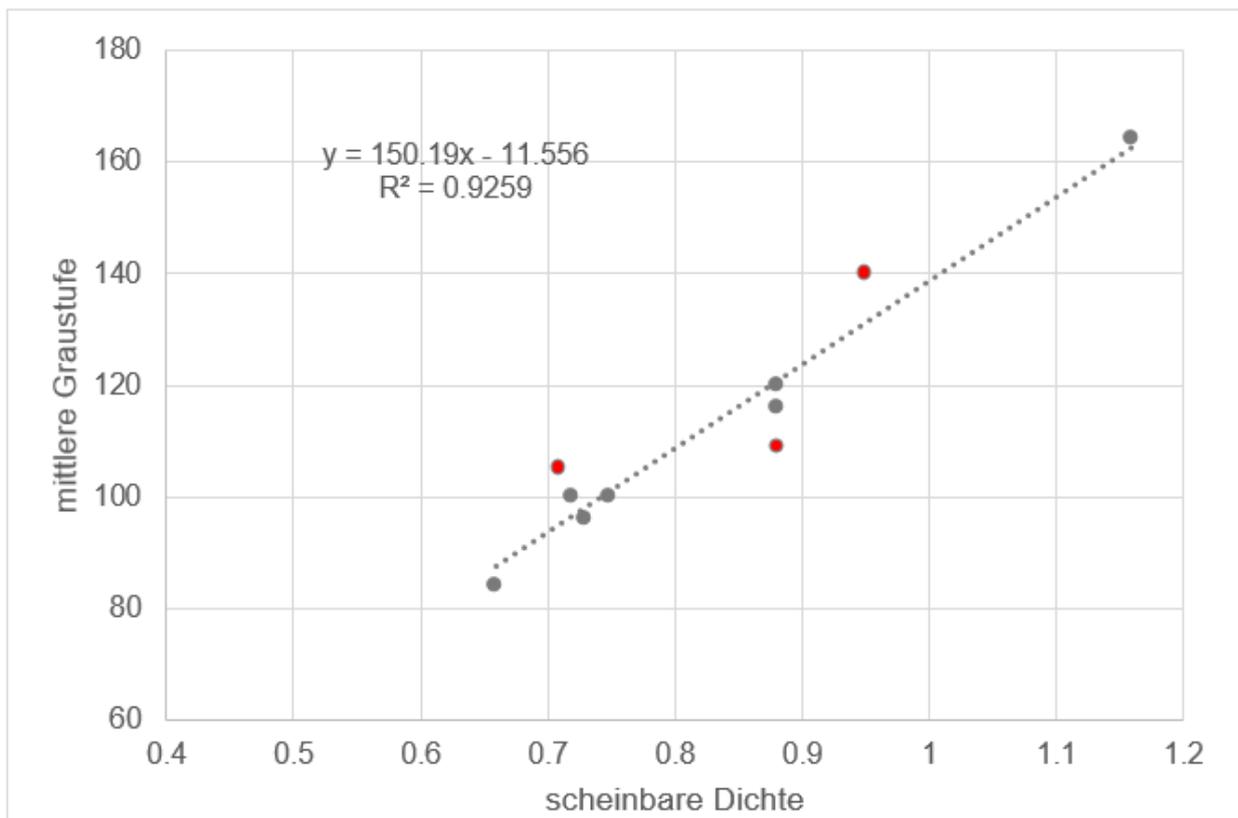


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen mittlerer Graustufe der Standardmuster in Set III zur jeweiligen scheinbaren Dichte

Wie die Abbildung zeigt, besteht ein guter Zusammenhang der beiden Werte. Die rot markierten Ausreißer (nach oben: Flyer und Werbedruck, nach unten: ZDP) lassen sich nicht mit dem jeweiligen Füllstoffanteil erklären.

### Erzielte Ergebnisse

Es bleibt aber festzuhalten, dass das Set I für eine hinreichende Normierung von CT-Bildern im Papierbereich ausreichend ist. In einem späteren Einsatzfall ist die Anzahl der enthaltenen Proben hinreichend, denn sie deckt – abgesehen von reinen Metallen – den gesamten zu erwartenden Graustufenbereich (genauer: Schwächungskoeffizienten-Bereich) ab. Es ist dabei die Verwendung von Standardkunststoffen mit verschiedenen Anteilen an Anorganika zu bevorzugen. Naturstoffe mit variierenden Dichten und ihnen eigenen Inhomogenitäten sind zu vermeiden.

Die Sets II und III führten in eine Richtung, die zu Beginn nicht beachtet wurde und ggf. in weiterführende Untersuchungen eingebracht werden sollten. Der Fehlschlag in der Auswahl der Proben für Set II und die daraus folgende Verwendung einer Vorrichtung zur Herstellung und Vermessung komprimierter Proben wäre eine Möglichkeit gewesen, von Anfang der Bearbeitung an

- die verwendeten Messproben praxisnäher zu gestalten
- die Proben-, Mess- und Datenvolumina fast um den Faktor 1000 zu verringern und
- die Anzahl der verwendbaren Proben und damit die Varianz in den Proben zu erhöhen.

#### 4.5 Variation der Messmodi (vgl. Arbeitspaket 5)

Die bisher vorliegenden Ballen-Materialien wurden mit den vorhandenen röntgentechnischen Möglichkeiten des FH ISS vermessen. Variiert wurden dabei:

- Scanmodus: 2D-Röntgen, 3D-CT (stop`n go, on the fly), Dual-Energy-CT
- Manipulationsstrategie: Standard-Kreis-CT
- Röntgenenergie und Vorfilterung des Spektrums
- Detektorauflösung, Bildmittelung und geometrische Vergrößerung
- Systemauswahl hinsichtlich Probenvolumen
- Messzeit abhängig von Projektionsanzahl, Bildmittelung und Belichtungsdauer

Nach Bereitstellung des Standardmaterials wurde dieses in die Untersuchungen einbezogen. Dabei war darauf zu achten, dass das Standardmaterial so im Verhältnis zu den Ballen zu applizieren ist, dass mind. ein Schnittbild erzielt werden kann, welches alle Einzel-Standardwürfel und alle Schichten der Kleinballen zeigt.

Als Beispiel für den Einfluss der Messzeit auf die Qualität der entstehenden Schnittbilder soll folgendes Bilderpaar dienen. Dabei wurde die Anzahl der verwendeten Projektionen im Verhältnis zur Standardmessung um den Faktor 4 verringert (rechtes Bild).

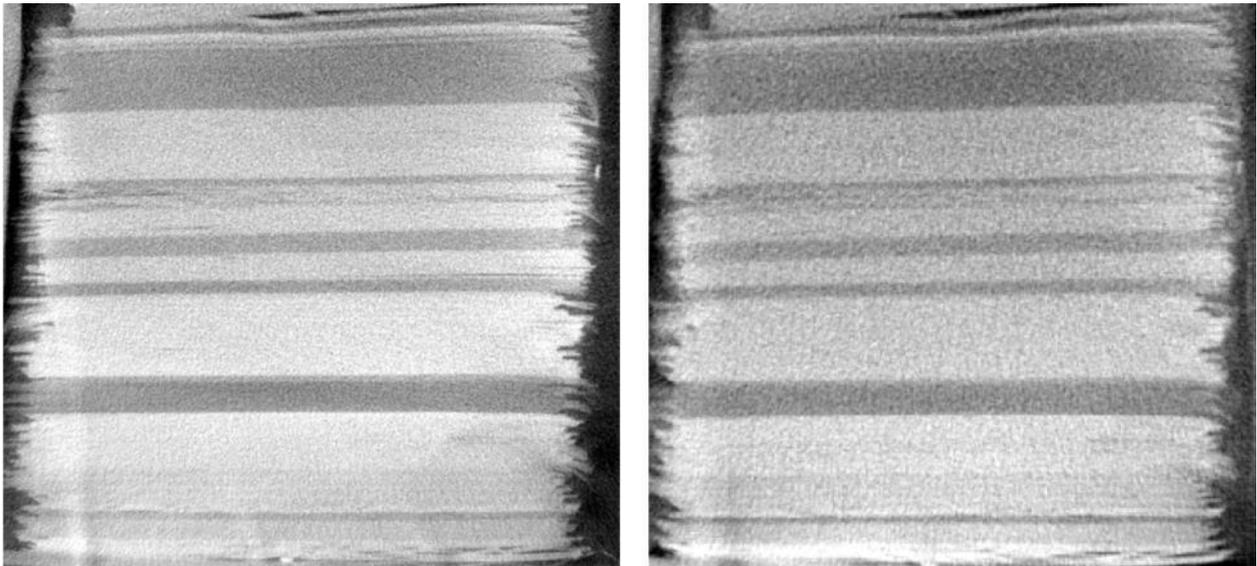


Abbildung 12: Zwei Scans unterschiedlicher Auflösung eines Probewürfels aus homogenen, dünneren Papieren mit variierendem Aschegehalt (höhere Auflösung links, schnellerer Scan rechts).

Deutlich zu erkennen sind die verringerte Auflösung, ein höheres Rauschen und eine erhöhte Menge an Artefakten. Letztere lassen sich im rechten Bild am unteren Rand durch starke Kontrasterhöhung im Verhältnis zum Standardbild ausmachen. Der schnelle Scan wurde nicht weiter in die Untersuchungen einbezogen.

Zu den Probesätzen lagen nun Parameterstudien vor. Nach Variation der oben genannten Parameter hat sich mit Blick auf die Messzeiten und die resultierende Bildqualität eine optimierte

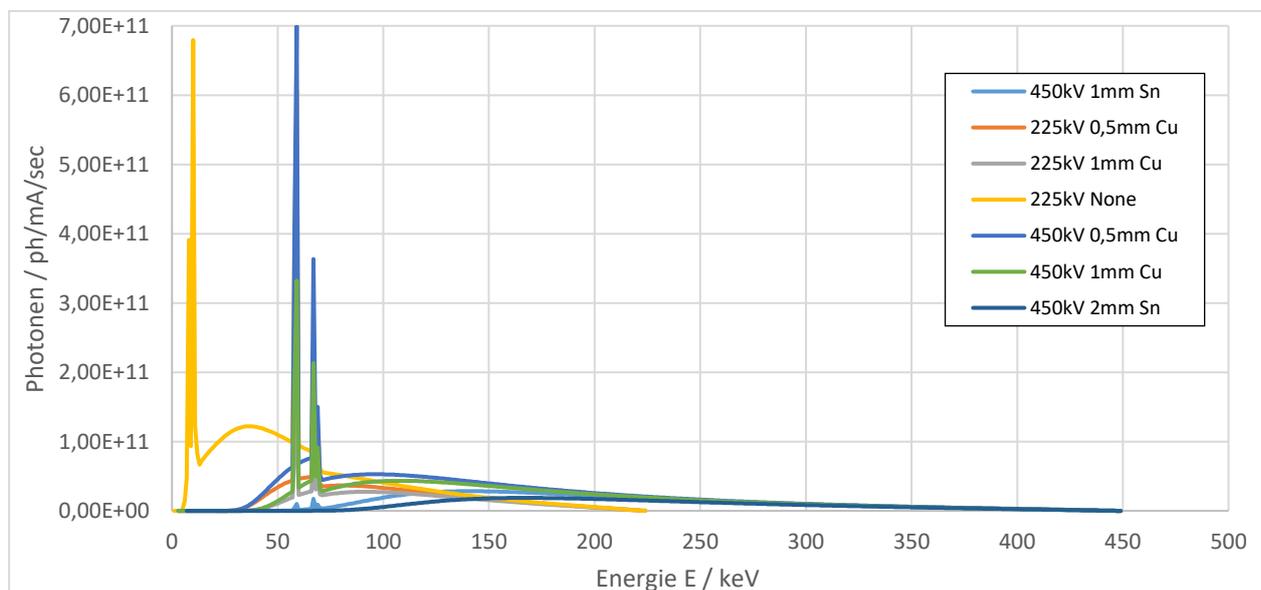
Parameterwahl herauskristallisiert. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass man CT-Scans im Bereich von einer halben Minute mit reduzierter, aber ausreichender Qualität anfertigen kann.

Bevor alle Einzelproben und Probenkombinationen in Dual-Energy-Modus gescannt wurden, wurde anhand einer ausgewählten Probe eine einfache Parameterstudie zur Bestimmung optimaler Scan-Parameter durchgeführt. Dabei wurde die Spannung jeweils bei 225kV und 450 kV gehalten. Der Strom und der physikalische Vorfilter wurden dann variiert (siehe Tabelle 5).

*Tabelle 5: Parametervariation zur Bestimmung optimaler Scan-Parameter*

lfd.-Nr.:	phys. Vorfilter:	Spannung [kV]:	Strom [mA]:
1	1,0 mm Zinn	450	3,30
2	-	225	3,30
3	0,5 mm Kupfer	225	4,60
4	0,5 mm Kupfer	450	2,80
5	-	225	0,97
6	1 mm Kupfer	450	2,90
7	1 mm Kupfer	225	6,60
8	2 mm Zinn	450	3,30

Zusätzlich wurden die - sich aus den Parametern ergebenden - Röntgen-Spektren simuliert und miteinander verglichen (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14). Ziel bei der Dual-Energy-Methode war es, zwei CT-Scans mit möglichst unterschiedlichen Röntgen-Spektren zu erstellen. Als Ergebnis wurden folgende zwei Parameter-Kombinationen ausgewählt (Tabelle 6).



*Abbildung 13 simulierte Spektren (normiert) für die Auswahl der Röntgenparameter*

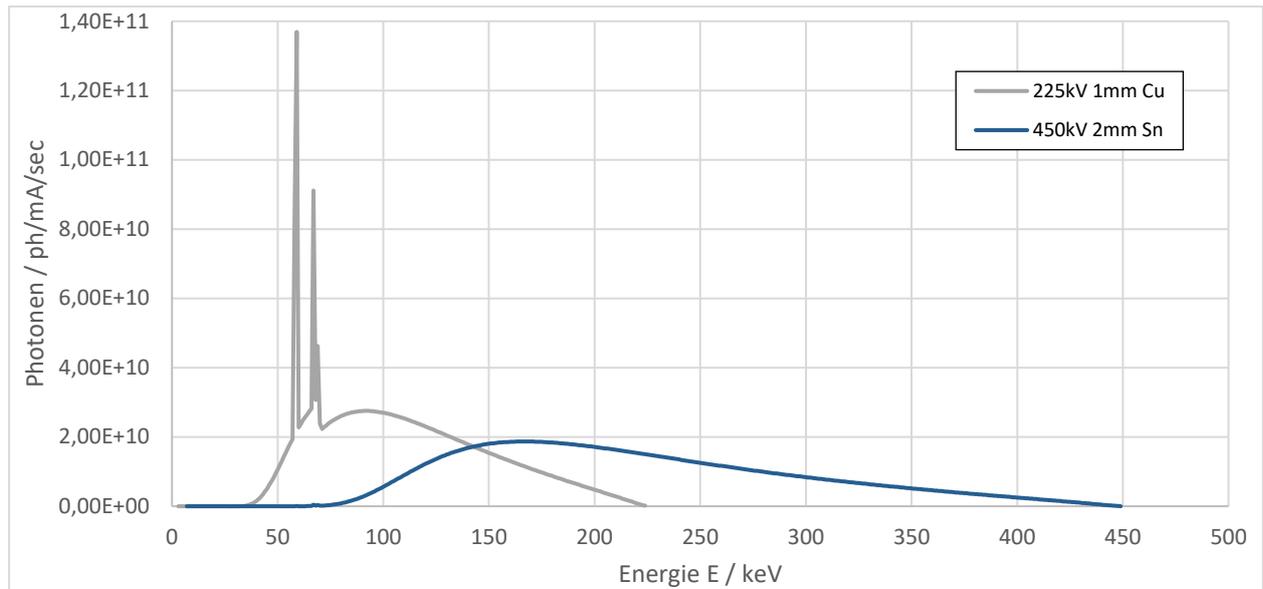


Abbildung 14 ausgewählte Spektren für nachfolgende Dual-Energy-Messungen

Tabelle 6 ausgewählte Parametersätze für Dual-Energy-Messungen

	Parametersatz „Low-Energy“	Parametersatz „High-Energy“
Spannung (vgl. Energie):	225 kV	450 kV
Strom:	3,3 mA	6,6 mA
phys. Vorfilter:	1 mm Cu	2 mm Sn
Belichtungszeit:	200 msec (1 Bildmittelung)	500 msec (1 Bildmittelung)
Mittlere Energie:	107 kV	219 kV
Photonenfluss:	$3,17 \cdot 10^{12}$ ph/mA/sec	$3,48 \cdot 10^{12}$ ph/mA/sec
Weitere Parameter:		
Detektor:	1010x1010 px <sup>2</sup> ; 400 µm Pixelgröße	
Anzahl Projektionen:	800	
Rekonstruierte Voxelgröße:	320 µm	

Anschließend wurden in einer großen Messkampagne alle Proben aus dem Probensatz einzeln und in unterschiedlichen Kombinationen gescannt. Zudem wurden auch nochmals die Proben aus dem vorhergehenden Probensatz ebenfalls in unterschiedlichen Kombinationen gescannt.

Bei der Variation der Messpositionen wurde versucht, mögliche Einflüsse durch die Ausrichtung der Papierlagen zu erfassen, bzw. abzudecken (siehe Abbildung 15). Bei den Kombinationen unterschiedlicher Proben wurde versucht die Einflüsse der unterschiedlichen Abschwächung der unterschiedlichen Papiersorten zu erfassen.

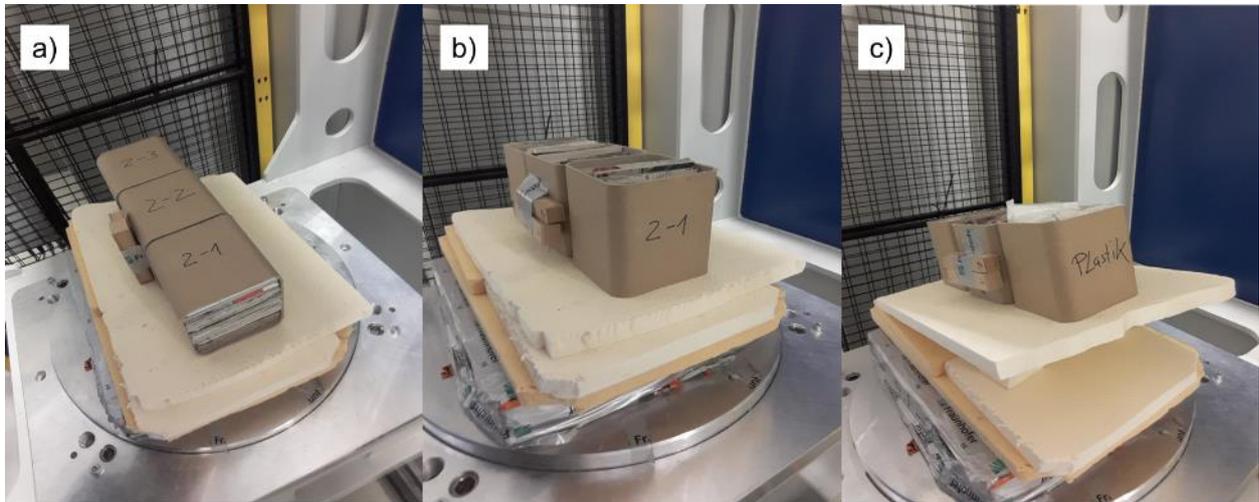


Abbildung 15: Bilder der Probenansätze auf dem Drehtisch des Computertomographen; a) in unterschiedlichen Verhältnissen gemischtes Zeitungsdrukpapier, Magazinpapier und Wellpappe; b) selbe Proben wie zuvor stehend angeordnet; c) unterschiedliche Papierproben und Kunststoffe als Fremdkörper in schräger Anordnung; jeweils mit seitlich angeordneten Standardproben

Die Abmessungen der Proben sind im Vergleich zu realen Ballen klein. Dadurch sind die Durchstrahlungslängen auch sehr viel kürzer, wodurch es zu einer unterschiedlichen Bildqualität in den CT-Scans kommt. Um diesen Effekt etwas abzumildern, bzw. Ergebnisse zu erzeugen, die näher an der Realität liegen, wurden bei einigen Scans Holzwerkstoffe um die Proben herum angeordnet. Holz besitzt aufgrund der sehr ähnlichen molekularen Zusammensetzung und Dichte ähnliche röntgenphysikalische Eigenschaften wie Papier. In Abbildung 16 ist ein Schnittbild aus einem rekonstruierten Volumen abgebildet. Im Einzelnen zu erkennen sind:

- die eigentliche Messprobe in der Mitte
- die umgebenden Auffüllmuster
- die Standardsets I und II

Die hier gewählte Schnittebene (x-y) ist dabei für eine spätere Auswertung ungeeignet, da von den zu messenden Ballen nur 2 Schichten angeschnitten werden. Es zeigt vor allem beispielhaft das Mess-Setup und seine räumlichen Grenzen.

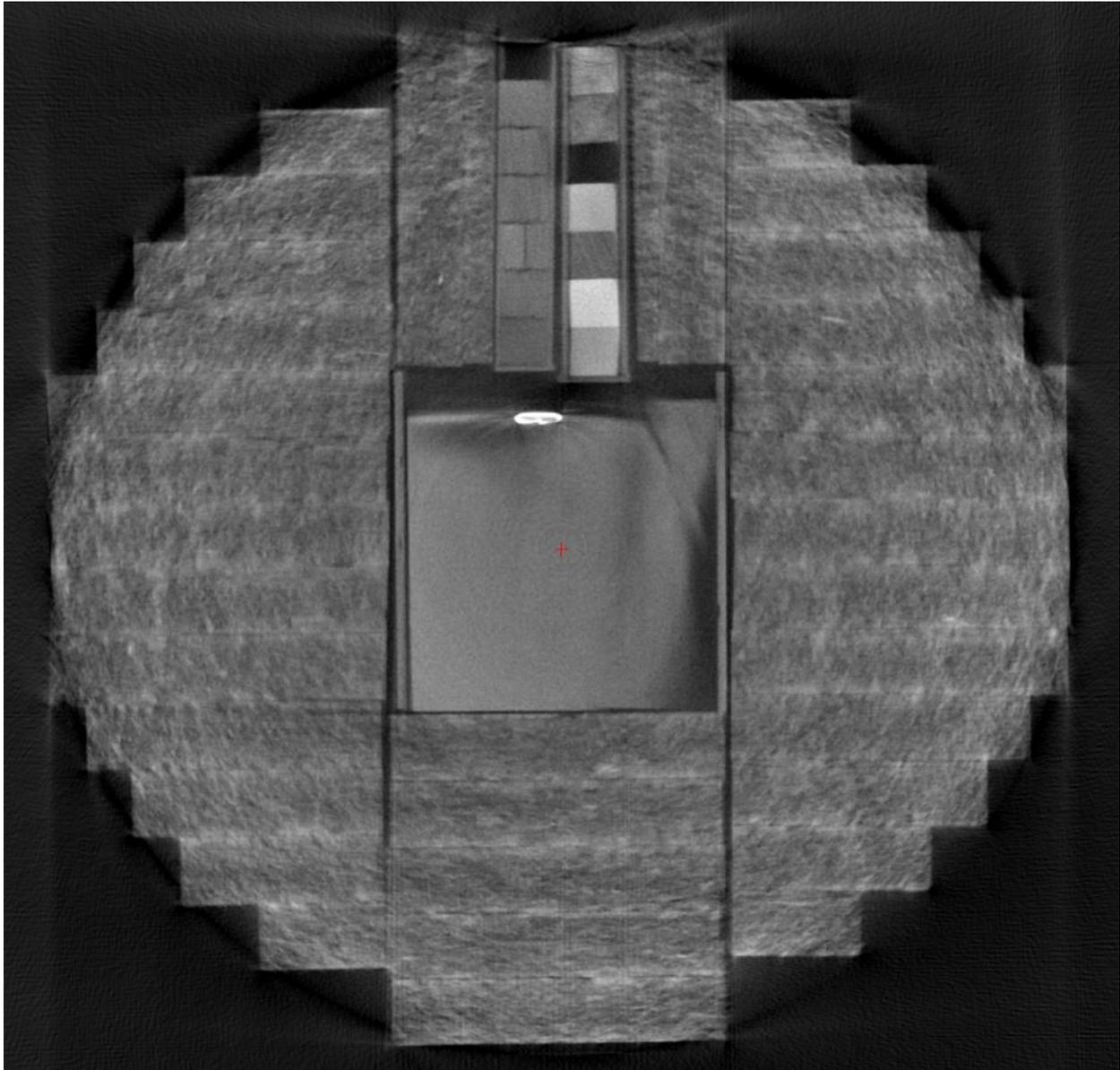


Abbildung 16: Low-Energy Messung (225 kV, Schnittebene in x-y-Richtung)

### Artefakte und räumliche Grenzen

Wie die obige Abbildung beispielhaft zeigt, sind in den rekonstruierten CT-Schnittbildern verschiedene Artefakte enthalten. Diese zeigen sich im Bereich von Papiermaterialien mit ihren vergleichsweise geringen Unterschieden in den Schwächungskoeffizienten deutlicher, als beispielsweise bei einer Unterscheidung zwischen Metallen oder Knochen zur umgebenden Luft.

- Generell finden sich kreisrunde und im Drehpunkt der Messapparatur zentrierte Artefakte.
- In der Umgebung von Metallteilen kommen Artefakte vor, die sich daraus ergeben, dass diese Objekte die Strahlung stark schwächen und somit andere Objekte in den zugehörigen Projektionen überdecken.
- In den Randbereichen der Messung entstehen Bildfehler, da diese Bereiche nicht in allen Projektionen enthalten sind und die Rekonstruktion damit mit unvollständigen Daten arbeiten muss.

Die Messungen der für den Labormaßstab gefertigten Ballen sowie der ergänzenden Standardwürfel wurden abgeschlossen. Im Verhältnis zu den initialen Messungen konnten Optimierungen und Vereinfachungen eingebracht werden, die in den Ergebnissen zusammengefasst sind.

Nach Bereitstellung des Standardmaterials wurde dieses in die Untersuchungen einbezogen. Dabei wurden die Standardmaterialien so im Messvolumen platziert, dass sie in mind. einem Schnittbild abgebildet sind, welches auch alle Schichten der Kleinballen zeigt, wie in der folgenden Abbildung dargestellt. Dabei sind die vier, zur weiteren Analyse verwendbaren, prinzipiellen Darstellungsarten gezeigt.

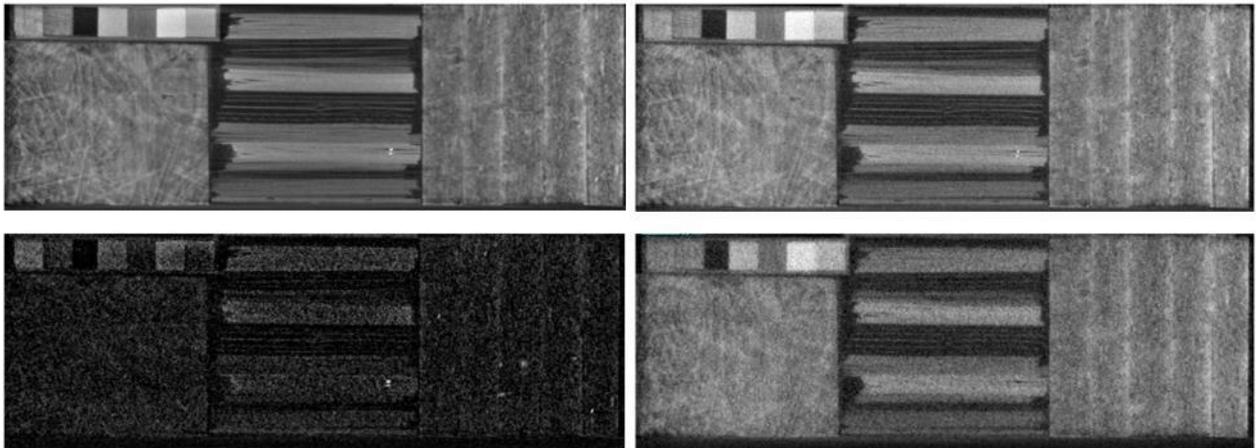


Abbildung 17: Schnittbilder eines rekonstruierten 3-D-Volumens einer Probe (oben links: Low-Energy-Scan, rechts oben: High-Energy-Scan, jeweils mit Standardwürfeln, unten links: Basismaterialzerlegung nach hohen Ordnungszahlen, unten rechts: nach niedrigen OZ)

In der direkten Gegenüberstellung von High- und Low-Energieaufnahmen lassen sich kaum Unterschiede feststellen. Die daraus errechneten Bilder der Basismaterialzerlegung nach Kohlenstoff und Kalzium zeigen umso größere Unterschiede.

### **Anmerkungen und Folgerungen**

Der Theorie der BMZ folgend, sind deren bildliche Wiedergaben von absolutem Charakter, d.h. sie sind ohne weitere Normierungsschritte innerhalb verschiedener Messungen vergleichbar. Sie sind trotzdem nur eine Annäherung an die Wirklichkeit, da weder die organischen noch die anorganischen Komponenten allein aus Kohlenstoff bzw. Kalzium bestehen oder aber deren jeweilige effektive Ordnungszahlen diesen Elementen im Mittel entsprechen.

Die erreichbare Qualität der BMZ-Bilder liegt unterhalb der dazu jeweils verwendeten Low- und High-Energy-Scans. Dies hat mindestens folgende Ursache: Die zugrundeliegenden beiden Scans müssen nacheinander durchgeführt werden. Auch wenn die Messprobe dabei räumlich nicht verändert wird, reichen Unterschiede im Sub-Voxelbereich in der nachfolgenden Überlagerung dazu aus, Bildstörungen zu erzeugen. Zudem verstärken die Berechnungsschritte der BMZ prinzipbedingt das Bildrauschen.

Folgernd für eine Messung eines realen Ballens ist dies umso relevanter. In einer industriellen Umgebung soll dabei ein Objekt von 500 kg bis zu einer Tonne nach Aufgabe auf ein Transportband einem sich rotierenden Scanbereich zugeführt werden. Selbst bei einem Scan mit nur einer Strahlungsenergie ist dabei mit erheblichen Bewegungen des Ballens zu rechnen, u.a. mit

- Setzbewegungen aufgrund des Eigengewichtes,
- Entspannungsprozesse nach dem Transport, u.a. durch seitlichen Angriff von Gabelstaplern und
- Pendelbewegungen während der Rotation; besonders im oberen Bereich.

Dies ist in der Projektierung der Anforderungen an eine Realmessung zu bedenken.

#### **4.6 Erhöhung der Komplexität der Proben (vgl. Arbeitspaket 6)**

Ziel des Arbeitspakets war es, bei zunehmender Komplexität der Probenkörper (chemisch und strukturell), Messungen vorzunehmen und den nachfolgend zu entwickelnden Auswertungsroutinen zur Verfügung zu stellen. Dabei wurden die im AP 5 geprüften Randbedingungen beachtet. Ausgangspunkt waren reine Einstoff-Systeme, die im dm<sup>3</sup>-Format vermessen werden. Die Komplexität dieser Mess-Proben wurde schrittweise in verschiedene Richtungen erhöht, wie es im AP 4 beschrieben war. Es wurde begonnen, dazu homogenisierte Proben inkl. fein verteilter Störstoffe (u.a. Metall, Sande), gemischte flächige Proben, Proben mit Kunststoff-Folien und Metallfolien verschiedener Dicke und Proben mit nichtflächigen Einschlüssen zu erstellen.

Die notwendigen Probenmaterialien lagen vor und wurden in Ballenform gebracht. Die bisherigen Untersuchungen hatten gezeigt, dass anorganisch gefüllte Kunststoffe Absorptionen im CT-Bild erreichen, welche sich nur unwesentlich von Papier unterscheiden. Metallische Objekte hingegen bewirken im CT-Bild je nach Dichte und Ordnungszahl sowie der Materialdicke Abbildungsfehler. Diese können die Aussagekraft des Scans in der näheren Umgebung der Metalle unter Umständen beeinträchtigen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde der Probenumfang erweitert:

- Proben-Ballen (1 dm<sup>3</sup>)
- gleichmäßig geschichtete Ballen,
- Ballen in einer stabilen Einhausung (für kleinteilige Proben und zum schnellen Einbringen von definierten Fremdkörpern),
- in Plastikfolie eingeschweißte Ballen (für langzeit-stabile Aufbewahrung fragiler und feuchter Muster

Die Zusammensetzung bezüglich Sorten, analytischen Werten sowie Gewichten und Volumenanteilen wurden ermittelt und für die CT-Messungen bereitgestellt. Neben den aus AP 5 abgeleiteten Messparametern wurden die Einzelmuster zur Messung in verschiedenen Einzelversuchen in Zusammenstellung und Anordnung variiert. So wurden u.a. folgende Einflüsse auf die CT-Messergebnisse geprüft:

- Einfluss der Anzahl und Art des umgebenden Materials auf innenliegende Ballen bei Messungen von Einzelballen in Reihe (3 Stück) und Fläche (9 Stück)
- Einfluss der Vorzugsebene der Ballen (horizontal, vertikal, geneigt oder gemischt)
- Einfluss der Kontaktflächen zwischen den Ballen

#### **Erzielte Ergebnisse**

Zu den Probeballen:

Die zu Projektbeginn erstellten Proben bzw. das zugrundeliegende Konzept haben sich bewährt. Das Probenset ließ sich hinreichend oft kombinieren und bedarfsgemäß erweitern. Auch die Anzahl und Auswahl der Papiersorten erwies sich als ausreichend. So konnte im Ergebnis festgestellt werden, dass abhängig von der möglichen räumlichen Auflösung einige Muster anhand ihrer Struktur, Verdichtung und dem Verhältnis Organika/Anorganika gut voneinander unterscheidbar sind. Andere Materialien lassen sich nicht weiter im CT-Scan unterscheiden (z.B. bei ähnlicher stofflicher Zusammensetzung und Verdichtung, wie es z.B. bei Graukartonen und Zeitungsdruckpapieren vorkommt).

Untersuchungen zur Wiederholbarkeit zeigten sehr gute Ergebnisse auch bei Veränderungen des Probenvolumens. Einzig eine Probenummantelung mit einer Wasserglas-verfestigten Kartonnage führte zu stärkeren Abschwächungen der darin eingeschlossenen Ballenproben. Die Ursache dafür muss noch weiter untersucht werden.

Zu den Standardkörpern:

Die Komplexität, die stoffliche Zusammensetzung und die mechanischen Umgebungsvariablen der vor Projektbeginn angedachten Standardkörper mussten innerhalb des Projektes mehrfach überarbeitet werden. Die zu diesen Körpern gefundenen Zusammenhänge sind eines der wesentlichen Ergebnisse des Gesamtprojektes und können für CT- bzw. Röntgenanwendungen auch auf anderen Feldern als Grund- oder Ausgangslage für dortige Überlegungen angewendet werden.

#### **4.7 Vergrößerung der Proben- und Messvolumina (vgl. Arbeitspaket 7)**

Parallel zum vorhergehenden AP wurde die Größe der zu vermessenden Probestellen erhöht. Dies wird durch die Verbindung mehrerer Einzelmuster zu größeren Strukturen erreicht, was hier ein-, zwei- und dreidimensional erfolgte. Es hat sich gezeigt, dass vor allem die Ausbreitung der Probenvolumen in der gesamten zur Verfügung stehenden Fläche realistische Aussagen erbringen kann und deshalb bevorzugt verwendet werden sollte. Eine deutliche Erhöhung der Proben-schichtung über die aktuell verwendete Höhe von 10 cm bringt keinen zusätzlichen Erkenntnis-gewinn.

Die Varianz in diesem Schema wurde weiter dadurch erhöht, dass die einzelnen Probestellen in ihrer Vorzugsschichtung innerhalb des kompletten Objektes gedreht wurden sowie, dass die räumliche Anordnung variiert wurde. Im Einzelfall werden Lücken durch Elemente aufgefüllt, die in ihrer Dichte und chemischen Zusammensetzung Papier entsprechen aber einfacher handhabbar sind. Die Vielfalt der durchzuführenden Messungen wurde mit einem Versuchsplan eingegrenzt.

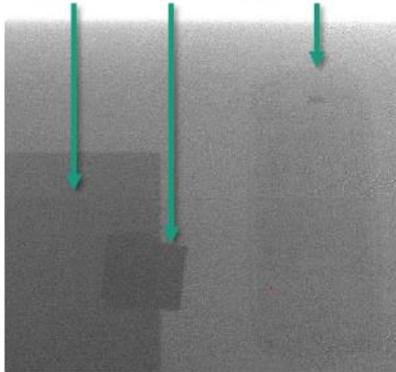
##### **Durchführung**

Bis zu einem untersuchten Messvolumen von ca.  $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$  konnte gezeigt werden, dass die Aneinanderreihung von Probestellen keine nennenswerte Degradierung der Datenqualität bei nahezu gleichbleibenden Scanzeiten von unter einer Minute nach sich zieht. Es wurden Tests unternommen, um später reale Ballen von ca.  $1 \text{ m}^3$  bewerten zu können.

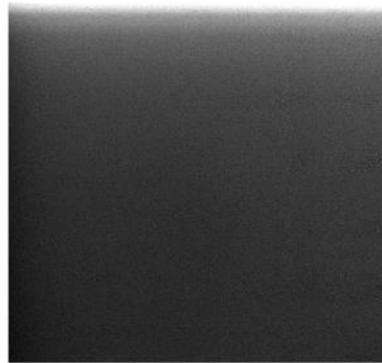
Zunächst wurden Tests zur benötigten Röntgenenergie durchgeführt, um die maximal durchstrahlbare Dicke zu ermitteln. Dazu wurden Stapel von ca. 5 cm dicken Paketen aus Büropapier

verwendet, zwischen die Fremdkörper eingebracht wurden. Nach 50 cm Papier sind die Fremdkörper bei 450 kV noch gut zu erkennen, bei 75 cm Papierdicke sind die Fremdkörper weder bei 450 kV noch bei 600 kV erkennbar. 450 bzw. 600 kV Beschleunigungsspannung stellen das Maximum an Röntgenenergie dar, das mit konventionellen Röntgenröhren erreichbar ist. Höhere Röntgenenergien erfordern eine andere Art der Strahlerzeugung, z.B. ein Betatron oder einen Linearbeschleuniger.

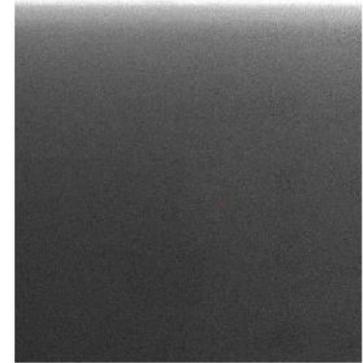
2mm Stahl, 2 mm Blei, altes Handy



450 kV, 50 cm Papier (10 Packs)



450 kV, 75 cm Papier (15 Packs)



600 kV, 75 cm Papier (15 Packs)

*Abbildung 18: Abhängigkeit der maximal durchstrahlbaren Dicke von der Röntgenenergie. Nach 50 cm Papier sind die Fremdkörper bei 450 kV noch gut zu erkennen, bei 75 cm Papierdicke sind die Fremdkörper weder bei 450 kV noch bei 600 kV erkennbar*

Ein nächster Schritt in der Vergrößerung des Messvolumens war durch den Übergang zu Messungen am Linearbeschleuniger CT des EZRT in Fürth möglich. Der dortige XXL CT-Scanner verfügt über einen Liniendetektor, sodass neben der Drehung des Messobjektes nun auch eine Bewegung in z-Richtung nötig ist, um Volumen zu vermessen. In Vorbereitung auf die Messung von realen Ballen wurden hier simulierte Ballen erstellt, die in ihrer Größe (Grundfläche), Verdichtung und Anorganikaanteil diesen entsprechen. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein solches Konstrukt, mit einer Grundfläche von über 1 m<sup>2</sup>, bestehend aus Stapeln Büropapiers.



*Abbildung 19: Simulierter realer Ballen zur Einrichtung des XXL CT-Scanners mit eingebrachten Fremdbestandteilen*

Es wurden Projektionsaufnahmen unter verschiedenen technischen Einstellungen vorgenommen, das Setup optimiert und aus den optimalen 3-D-Volumen erstellt. Teil dieser Arbeiten war auch eine Optimierung von Zeitaufwand, Auflösung und Energiebedarf für die Messungen.

### Erzielte Ergebnisse

Zunächst wurden 2-D Projektionsaufnahmen erstellt. Bei einer maximalen Röntgenenergie von ca. 8 MeV ist auch bei einer durchstrahlten Dicke von ca. 1 m Büropapier noch eine gute Erkennbarkeit der Fremdkörper zu erreichen.

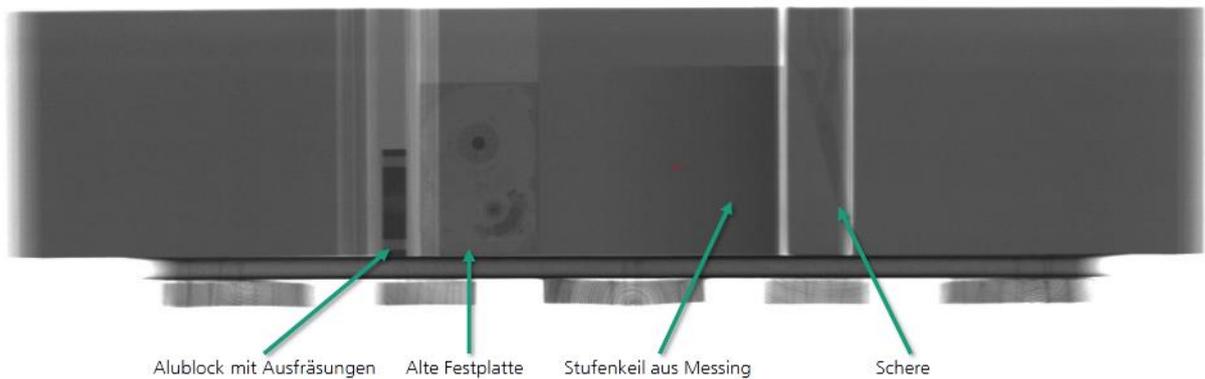


Abbildung 20: 2D-Projektionsaufnahme mit ca. 100 cm Büropapier mit eingebrachten Fremdkörpern

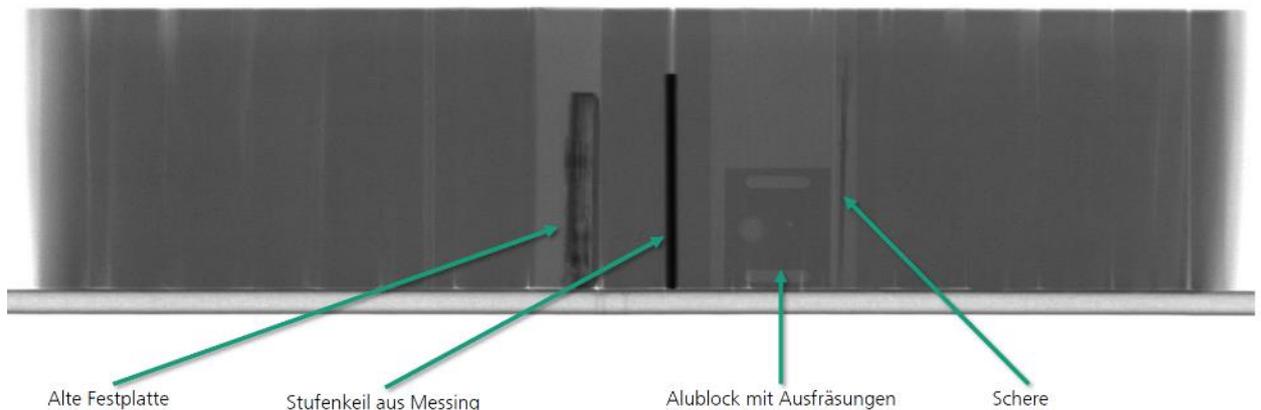


Abbildung 21: Um 90° gedrehte Projektionsrichtung

Im nächsten Schritt wurden computertomographische Schnittbilder des Testaufbaus mit dem Linearbeschleuniger als Strahlungsquelle erstellt. Durch die sehr hohe Durchdringungsfähigkeit der hochenergetischen Röntgenstrahlung konnte eine sehr gute Bildqualität auch bei dieser Probengröße erreicht werden, die sogar kleine Details der eingebrachten Fremdkörper zeigt (siehe Abbildung 22).

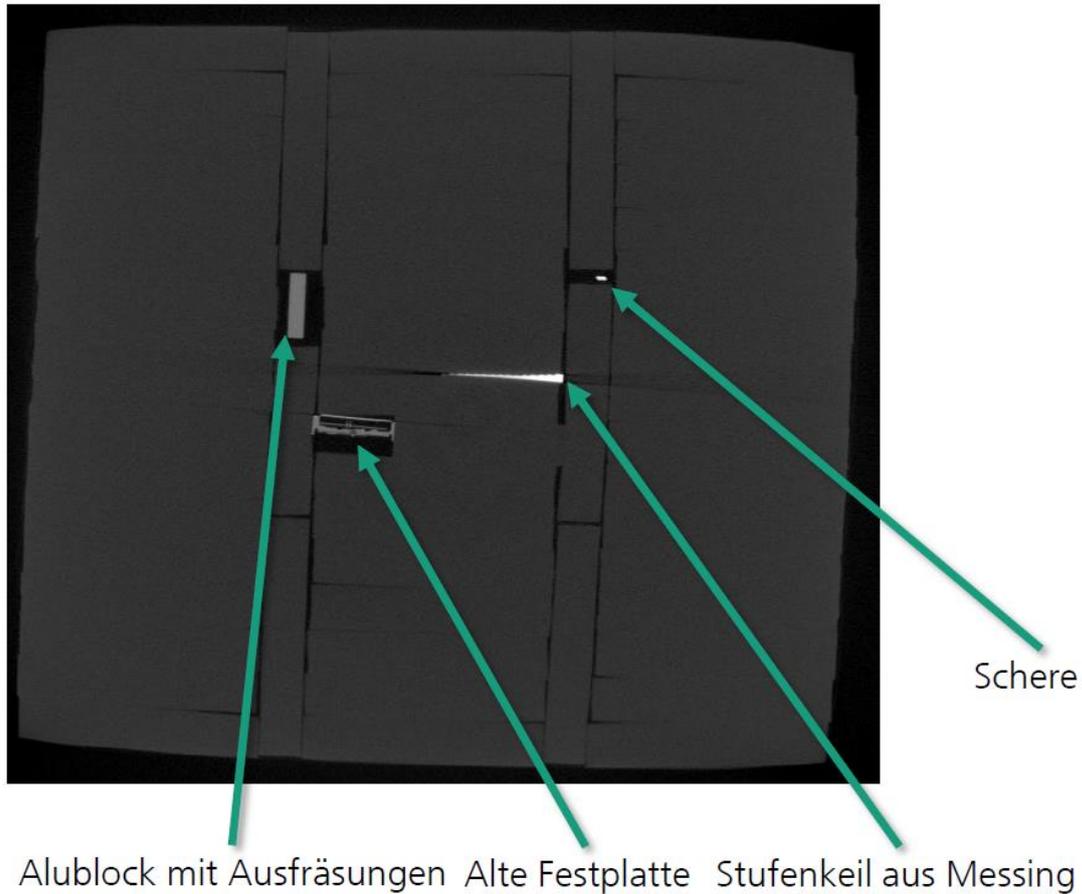


Abbildung 22: Tomographisches Schnittbild des Testaufbaus

Es konnte festgestellt werden, dass für Gebinde in Realballengröße eine räumliche Auflösung von  $335\ \mu\text{m}$  Voxelkantenlänge erreicht werden kann, was als Grundlage für die in AP 9 vorgesehene Messung genutzt wird. Es wurde ebenso gezeigt, dass für solche sehr kompakten Gegenstände eine hinreichend gute Durchstrahlung möglich ist. Für eine Aufwandseinschätzung wurden die folgenden Kennwerte ermittelt, angepasst bzw. errechnet:

- Scanmodus: Linearbeschleuniger, ca. 8 MeV Röntgenenergie
- Detektorauflösung:  $400\ \mu\text{m}$
- Anzahl Projektionen: 3600
- Scanvolumen: fünf Schichten je  $1\ \text{m} \times 1\ \text{m} \times 0,4\ \text{mm}$
- Messzeit: 10 min pro Schicht
- Energieverbrauch pro Messung eines Ballens mit  $1\ \text{m}^3$ : ca. 8 kW Anschlussleistung

#### Energetische und zeitliche Einordnung

Die vorliegenden Daten und Werte lassen sich für einen realen Ballen hochrechnen. Sollte dieser gescannt werden, dann in einer Weise, dass die Anzahl der Schichten gering ist. Beispiel-

haft soll ein  $1,2 \times 1,2 \times 1,4 \text{ m}^3$  Ballen Verwendung finden. Bei einer Anzahl von ca. 3000 Einzelschichten würde die Messung fast einen Monat dauern und rund 5 MWh benötigen, was jenseits jeglicher Praxisrelevanz ist. Selbst bei einer Verringerung der Auflösung auf eine Voxelgröße von  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$  ist mit einer Messzeit von mindestens einem Tag zu rechnen, was ca. 300 kWh entspräche. Das ist die Energie, die bei der Verbrennung von 30 kg Kohle frei wird.

Ein Ausweg kann allein die Reduktion der Auflösung, unter Inkaufnahme von höherem Bildrauschen und die Auswahl nur weniger zu scannender Schichten sein. Allein die Verdoppelung der Kantenlänge der Voxel senkt die Messzeit auf ein Achtel. Damit kann keine 100 % Kontrolle erfolgen, abhängig von der Größe der Objekte in einem Ballen und statistischen Erwägungen kann so aber selbst bei der Messung einer Einzel-Schicht ein erhebliches Volumen erfasst werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich Objekte seitlich in den Schichten ausbreiten. Bei einer mittleren Objektgröße von 20 cm (DIN-A4-Blatt) kann mit einer CT-Schicht ca. 20 % des Ballenvolumens repräsentiert werden. Unter dieser Annahme sind mit drei Schnitten durch einen Ballen bei aktuell nutzbarer Technik ca. 60 % des Volumens repräsentiert. Die Messzeit könnte dann weiterhin in den angestrebten 10 Minuten verbleiben.

## **4.8 Mathematische Modellierung der Zusammenhänge (vgl.**

### **Arbeitspaket 8)**

Hauptarbeitsgebiet des Vorhabens waren verschiedene Herangehensweisen zur Modellierung der stofflichen und sortenspezifischen Zusammenhänge. Diese sind unter dem Arbeitspaket 8 hier nachfolgend mit ihren zwölf wichtigsten Einzelthemen zusammenfassend aufgeführt. Eine detaillierte Ausarbeitung zu den Kernthemen erfolgt nach der Beschreibung der Arbeitspaktes separat.

#### 1. Bildnormierung anhand der Standardkörper

Die 3-D-Volumen der CT-Scans zeigen volumenbezogene Schwächungskoeffizienten, die sich bei identischen Proben abhängig von den Messbedingungen unterscheiden können. Um dies auszugleichen wurden die Standardkörper erstellt. Das erste entsprechende Standardkörperset wies eine gute Spreizung in der Verteilung der Schwächungskoeffizienten auf und wurde durchweg zur Bildnormierung verwendet. Das zweite, spezifischere Set zeigte unerwartete Ergebnisse und führte zur Fertigung eines dritten Sets. Set II und Set III dienten im Verlauf vorwiegend der Aufklärung grundlegender Zusammenhänge in der Wechselwirkung von verschiedenen Materialien und Strahlung. Set I wurde in verschiedener Art an Ballen vermessen und die Schwächungskoeffizienten für das am stärksten absorbierende Material Teflon (PTFE) für eine Normierung genutzt. Es konnte gezeigt werden, dass das Set bei dieser Herangehensweise nicht nur an den Extrempunkten, sondern auch im mittleren Schwächungsbereich reproduzierbare Ergebnisse liefert. Größter Einflussfaktor war die Ermittlung einer größeren Anzahl an Schwächungswerten innerhalb der einzelnen Standardproben. Hierzu wurde ein Softwaretool erstellt, das nach Markierung der Mittelpunkte der randständigen Würfelchen, hinreichend große Teilvolumina der Einzelwürfel markiert und die jeweiligen Mittelwerte der Schwächungen berechnet. In der weiteren Bearbeitung wurde diese Methode für alle 3-D-Bilder verwendet.

#### 2. Bildnormierung anhand der Vorzugsebene

Es wurden CT-Messungen durchgeführt, bei denen das Probenmaterial deutlich von der typischen aufrechten oder liegenden Lagenabfolge abwich. Auf der Grundlage der bekannten Transformationstechniken wurde ein Softwaretool erstellt, das in der Lage ist, die rekonstruierten Volumina an den Vorzugsrichtungen der Ballen auszurichten. Hierzu müssen im 3-D-Volumen zwei Punkte einer Ebene ausgewählt werden, um das Abbild auszurichten. Im Gegensatz zur Erwartungshaltung zu Projektbeginn, wurde dieses Verfahren nur selten angewendet, da die Bildauswertungen überwiegend volumenbezogen und nicht flächig vorgenommen wurden. Vor allem aber für das Labeln von Schnittbildern als Grundlage für KI-Auswertungen mussten die Lagen an die Schnittbildebenen angepasst werden, was das Drehen von Volumina hier nötig machte.

### 3. Feuchte als möglicher Mess- oder Störparameter

Die Untersuchungen zur Feuchte wurden mit verschiedenen Mustern definierter Feuchte durchgeführt. Der genaue Anteil der Feuchte wurde in einen Ansatz aus Bestimmung der Lutro-Feuchte der Muster und definierter Zugabe festgelegt. Die Proben wurden durch Vakuumieren einer einheitlichen Komprimierung ausgesetzt. Die CT-Messungen zeigten, dass selbst bei hohen Feuchtegehalten die Schwächungskoeffizienten nicht nachweislich beeinflusst werden. Die Schnittbilder zeigen anschaulich, dass das zugefügte Wasser linear das Volumen der Ballen erhöht.

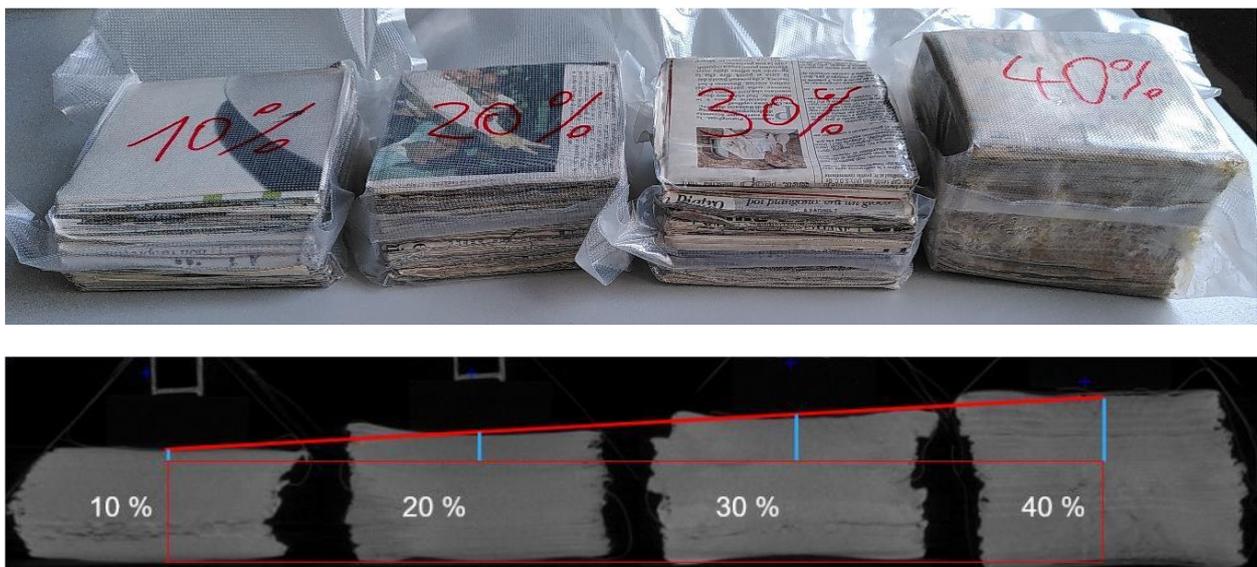


Abbildung 23: Oben: Proben gleicher Masse an trockenem Papier und zunehmender Feuchtegehalte; Unten: Zusammengesetzte Schnittbilder dieser Muster

Es ist zu schlussfolgern, dass der Feuchteanteil in einem praxisrelevanten Bereich keinen Einfluss auf die Schwächungskoeffizienten im untersuchten Material hat. Das ist mit der elementaren Zusammensetzung von Faserstoff (C, O, H) bzw. Wasser (O, H) erklärbar.

### 4. Erstellung einer prinzipiellen Auswertungsstrategie

Die Primärdaten lagen mit einer Voxelgröße von 300 µm Kantenlänge vor. Die Verwendung von Schnittbildern als Grundlage von Auswertungen erwies sich bei Verwendung aktueller Software- und Programmiermöglichkeiten als unnötig. Zu Beginn wurden Histogramme der Schwächungskoeffizienten homogener Proben erstellt. Es zeigte sich, dass Wellpappe hier ein charakteristisches Bild zeigt.

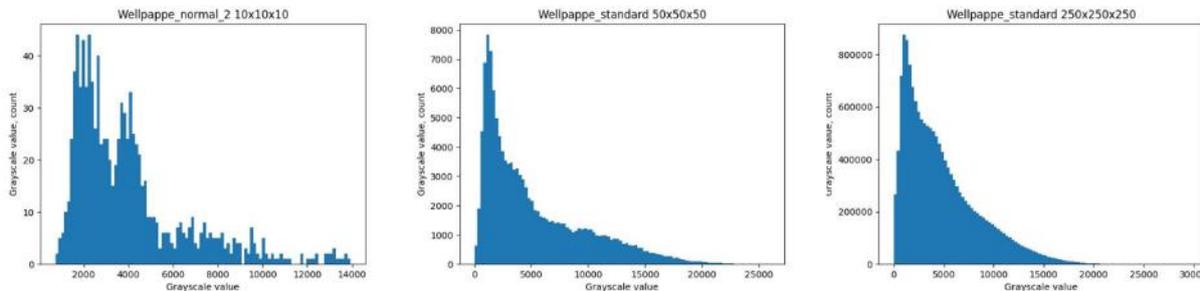


Abbildung 24: Histogramme der Schwächungskoeffizienten von Wellpappe (für verschieden große Teilvolumina)

Es zeigte sich, dass diese Verteilungsfunktion in ihrer Form erhalten bleibt, auch wenn das Probenvolumen sehr klein ist. Erst bei sehr kleinen ausgewerteten Volumen (hier 103 Voxel) traten prinzipielle Unterschiede auf. Die untersuchten Muster wurden gänzlich virtuell in Einzelwürfel zerlegt. Die gefundene optimale Mindest-Größe der Teilvolumina wurde mit 503 Voxeln gefunden. Eines der Kriterien war dabei die Rechenzeit.

#### 5. Feststellung von Ballengrenzen und Bereichen mit Luft

Die Bestimmung der Grenzen eines Ballens wurde innerhalb des Projektes hauptsächlich durch händisches Reduzieren aller Seiten des Datensatzes durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Methodik für unregelmäßige Objekte erarbeitet. Dabei werden als Luft erkannte Bereiche für die weitere Datenverarbeitung als „Luft“ gelabelt. Unter Verwendung der Aufteilung des Bildvolumens in die oben genannten Teilvolumina wurde jeweils eine Entscheidung auf Basis der Schwächungskoeffizienten getroffen. Dies kann im Gegensatz zum Original 3D-Würfel auch räumlich dargestellt werden.

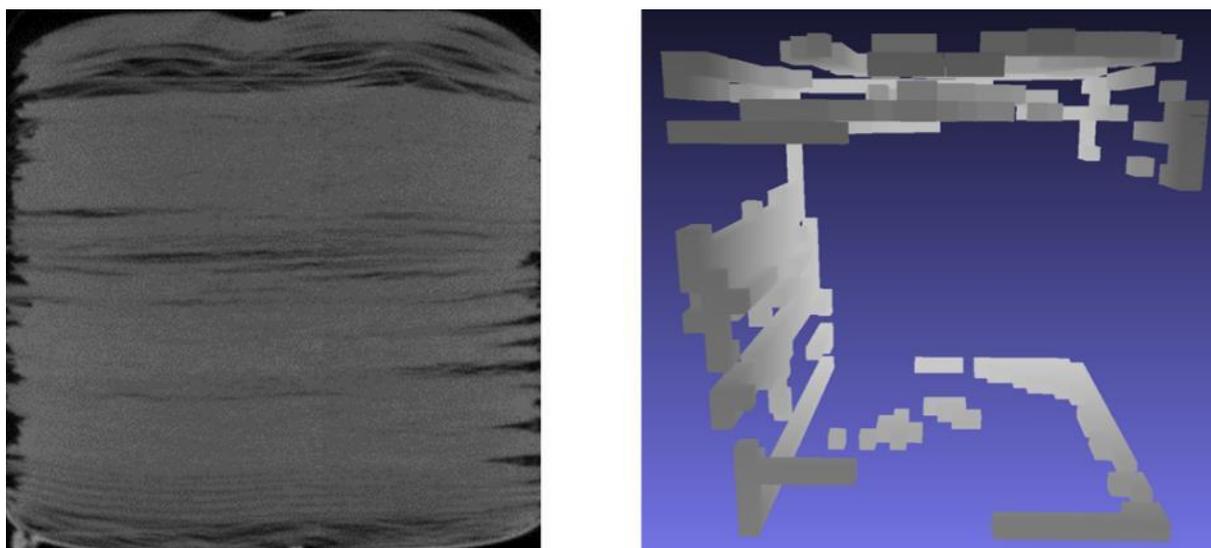


Abbildung 25: Schnittbild durch einen Ballen (links) und das als Luft identifizierte Teilvolumina (rechts)

Die Extraktion der luftgefüllten Bereiche im Innern der Ballen und in den äußeren Bereichen der CT-Abbildung ist der erste Schritt in der Analyse der Zusammensetzung. Dabei ist es möglich, Bereiche im Innern von Ballen von denen an der Außenseite zu differenzieren, indem Letztere als mit dem 3-D-Bildrand verbunden sind, innere Luftbereiche aber keine Verbindung zu randständigen Luft-Volumina haben.

#### 6. Erkennung von Sorten mit spezifischer Schwächungswerte Verteilung

In einem nächsten Schritt werden Balleninhaltsstoffe mit spezifischen Verteilungen an Schwächungskoeffizienten identifiziert bzw. quantifiziert. Von den untersuchten Papiermaterialien wurde Wellpappe als solche erkannt, die eine typische, von einer Normalverteilung abweichende Verteilungskurve aufweist. Eine Methode, um diese qualitativ und nachträglich auch quantitativ nachzuweisen ist der Kolmogorov-Smirnov-Test (K-S-Test). Dieser wurde für die Erkennung des Wellpappenanteils angewendet. Dabei wird ein größerer Referenzbereich ausgewählt und die dort vorzufindende Verteilung aufgezeichnet. Danach wird diese Verteilung mit der von Testvolumina verglichen. Ist die Verteilung mit der der Referenz ähnlich, kann vom selben Material ausgegangen werden.

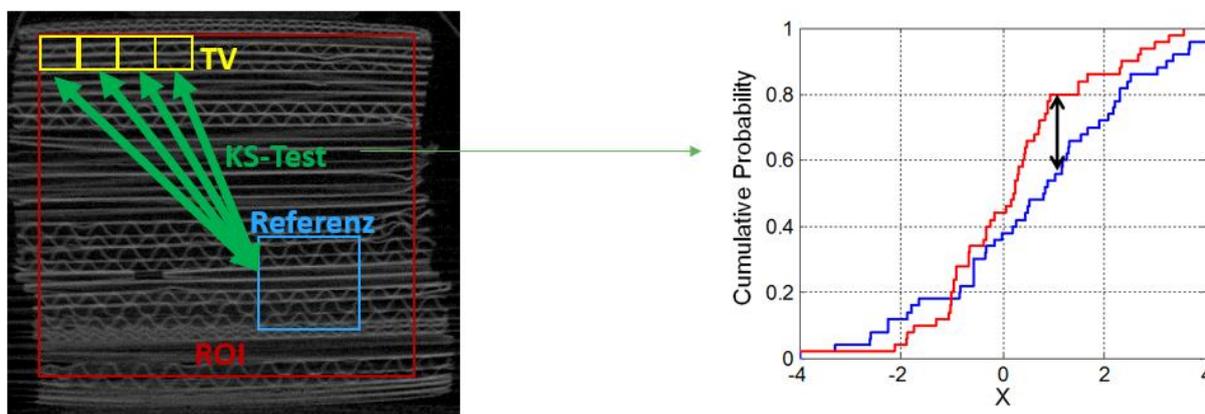


Abbildung 26: Prinzip des Einsatzes des K-S-Tests mit Referenz- und Testbereich innerhalb eines Probenvolumens

Es konnte gezeigt werden, dass der Anteil von Wellpappen – auch in kollabierter, komprimierter Form – mit 95 bis 98 % der enthaltenen Menge in reinen und gemischten Ballen richtig erkannt wird. Falsche Zuweisungen in Mischballen und Ballen ohne Wellpappenanteil lagen bei bis zu 6 %. Neben Wellpappe konnten keine anderen Materialien gefunden werden, die mit dem K-S-Test erkennbar sind.

#### 7. Erkennung von Sorten ohne spezifische Schwächungswerte Verteilung

Im Gegensatz zu Wellpappen zeigen die meisten anderen untersuchten Materialien eine Normalverteilung ihrer Schwächungskoeffizienten. Diese Verteilungen wurden aus den Scans der 1 dm<sup>3</sup>-Ballen extrahiert und zur weiteren Auswertung genutzt. Aus den Verteilungskurven wurden Mittelwert und Verteilungsbreite abgeleitet. Diese statistischen Werte wurden für eine Materialerkennung in den 3D-Volumina der Standardballen genutzt. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, kam es dabei zu Überschneidungen der Materialien, weshalb nicht immer eine eindeutige Zuordnung des Materials möglich war. Aufgrund des Partialvolumeneffekts kann es in der Nähe von Materialgrenzen (bspw. Papier – Luft) zu Fehlklassifikationen kommen. Auf der anderen Seite sind auch Bereiche in den Schwächungskoeffizienten enthalten, die nicht von einem bekannten Material abgedeckt sind. In diesen Fällen wird die nächstliegende Papiersorte als Zutreffende

verwendet. Diese Herangehensweise ist letztlich vieldimensional, da für diese Auswertung für Dual-Energy-Scans vier verschiedene Graustufenabbilder verwendet werden können.

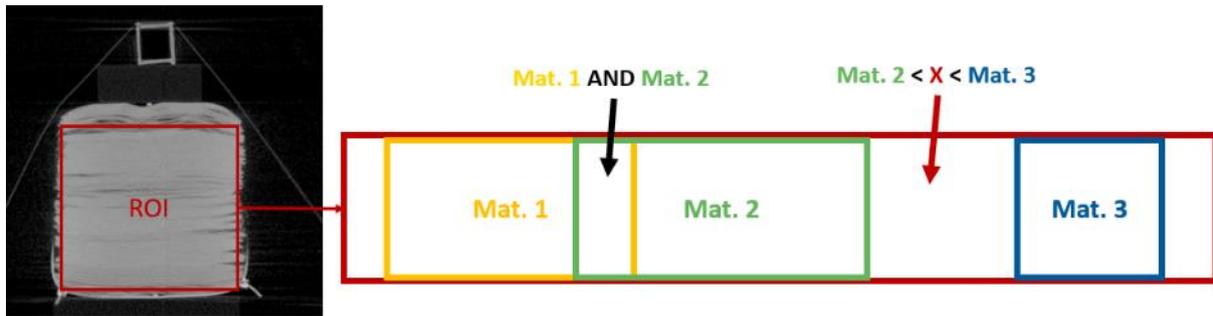


Abbildung 27: Prinzipdarstellung der Extraktion von Schwächungskoeffizienten dreier Materialien mit teilweisen Überschneidungen

Im untersuchten Fall konnte dieser Ansatz sehr gut für die Unterscheidung von Büropapier, Zeitungsdruck und Magazinpapier angewendet werden. Diese drei Sorten ließen sich gut differenzieren, vor allem bei Nutzung der Low-Energy-Messungen, wobei es bei Zeitungsdruck und Büropapier zu geringen Überlagerungen kam. Bei Übertragung auf neue Ballen wurden die o.g. drei Materialien zu jeweils ca. 70 % korrekt erkannt, wobei jeweils 10 bis 15 % des Volumens als Luft oder „unbekannt“ bewertet wurde. Nicht zu unterscheiden waren mit dieser Methodik graue Kartonagen und Zeitungsdruck.

#### 8. Erkennung von Materialien anhand Basismaterialzerlegung

Die Ergebnisse der Basismaterialzerlegung erschienen zu Beginn der Untersuchungen bei Anwendung auf die verwendeten Materialien wenig erfolgversprechend. Tiefere Auswertungen, u.a. unter Nutzung des Standardsets III, zeigten aber die Potenziale.

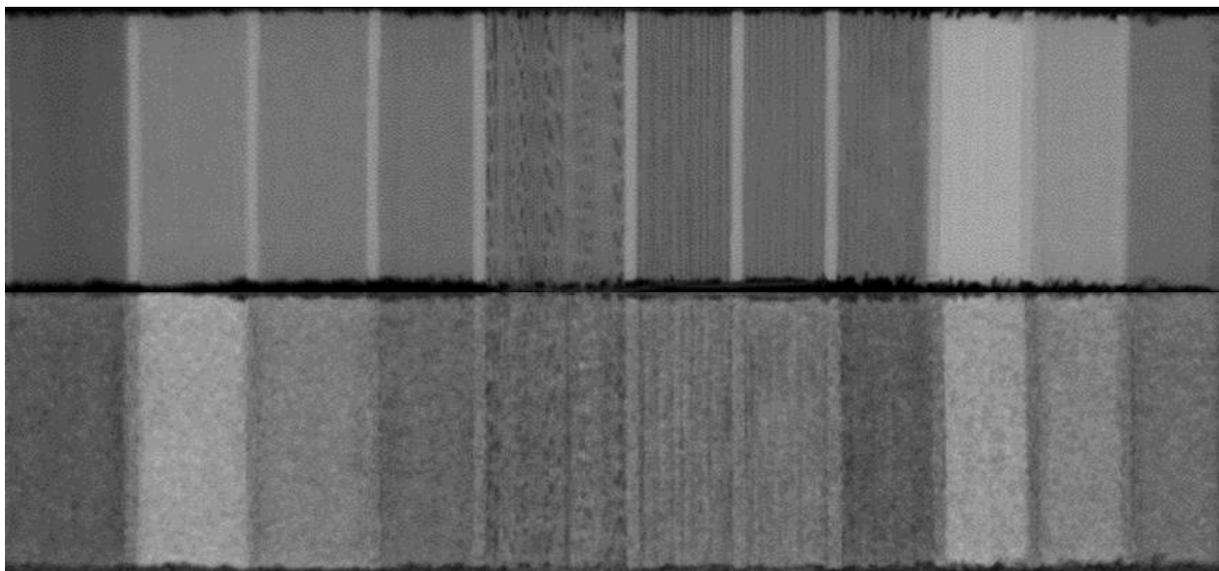


Abbildung 28: Schnittbilder durch den Standardprobensatz III (oben: Low-Energy Scan, unten: Basismaterialzerlegung nach hohen Ordnungszahlen), Papiere jeweils durch Kunststoffplatte getrennt

So konnte festgestellt werden, dass sich aus den verschiedenen Schwächungskoeffizienten und den aus der BMZ stammenden Partialdichten ein 4-dimensionaler Raum aufspannen lässt,

in dem sich die Materialien sehr deutlich separieren. Überwiegend aschefreie, kompakte Kunststoffe, deren Dicke die räumliche Auflösung der Scans übersteigt, wirken im Scan hell und in der BMZ (nach hohen OZ) dunkel. Komprimierte hochgefüllte Papiere (Magazine, SC-Papiere) lassen sich von ebenso füllstoffreichen aber weniger kompakten Papieren unterscheiden.

### 9. Bestimmung des Aschegehaltes

Als Methode zu Ermittlung des Füllstoffgehaltes wurde die Basismaterialzerlegung nach höheren Ordnungszahlen (hier für Kalzium) ausgewählt. Wie beschrieben, mussten die Proben dazu bei verschiedenen Energien gescannt werden. Die folgende Abbildung zeigt die gefundenen Zusammenhänge.

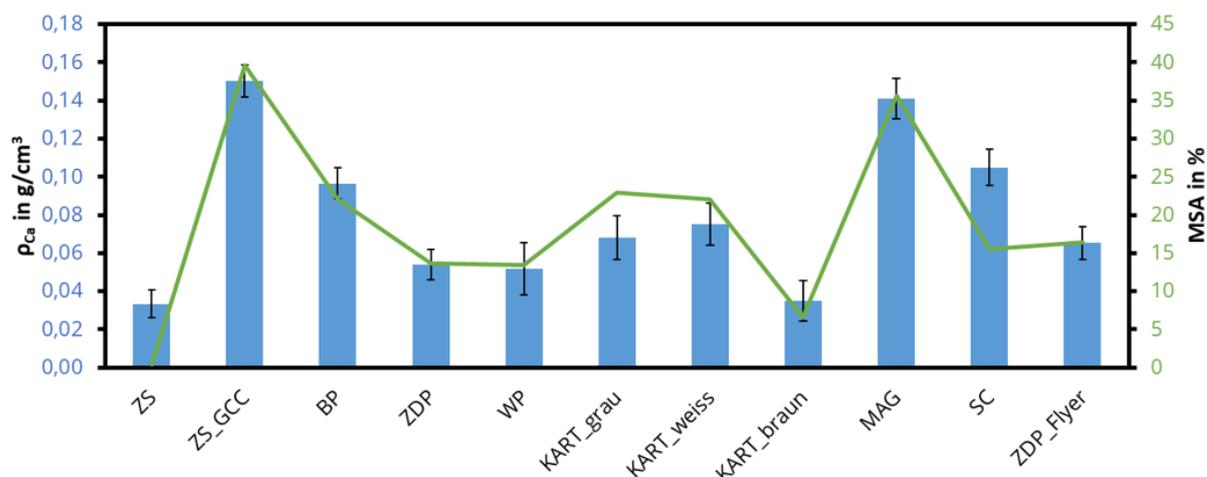


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Ergebnisse einer Basismaterialzerlegung (hohe Ordnungszahlen) und des jeweiligen Mineralstoffanteils (MSA) für ausgewählte Papiere/Sorten

Es konnte festgestellt werden, dass eine hohe Korrelation der beiden Parameter vorliegt. Allein aus der Theorie der Basismaterialzerlegung ergeben sich prinzipielle negative Effekte, da neben Kalzium auch andere schwerere Elemente in den Füllstoffen enthalten sind, und diese im Realfall nicht vorab weder für Einzelobjekte noch für einen Gesamtkörper ermittelt werden können. Es ergaben sich somit Differenzen von bis zu 5 % Füllstoffgehalt, im Falle von SC-Papieren sogar mehr. Auf den Anwendungsfall übertragen, wird eine Differenzierung der Füllstoffanteile in max. 4 Bereiche zwischen 0 und 40 % erreicht werden können.

### 10. Erkennung unerwünschter Objekte

Unerwünschte Bestandteile in AP-Ballen zeichnen sich durch ihre Form, ihr Material oder ihre Strukturen aus und unterscheiden sich darin von Papiermaterial. Eine typische Auswahl solcher Objekte wurde zusammengestellt und vermessen. Er zeigte sich, dass unabhängig von den bekanntermaßen gut zu identifizierenden Eisen- und Stahl-Objekten auch solche mit geringeren Anteilen an Metallen, wie z.B. Akkus gut durch ihre hohen Schwächungskoeffizienten zu erkennen sind. Auch Plastikobjekte, wie CD's lassen sich auf Grund ihrer Form gut ausmachen. Wie im nachfolgenden Bild zu sehen, sind gewebte Natur- oder Kunststoffe maximal anhand ihrer wiederkehrenden Strukturen erkennbar. Objekte mit vielen Hohlräumen, wie beispielsweise Luftpolsterfolie oder Schaum-Polystyrol, sind mit dieser Herangehensweise kaum von Luft selbst zu unterscheiden.

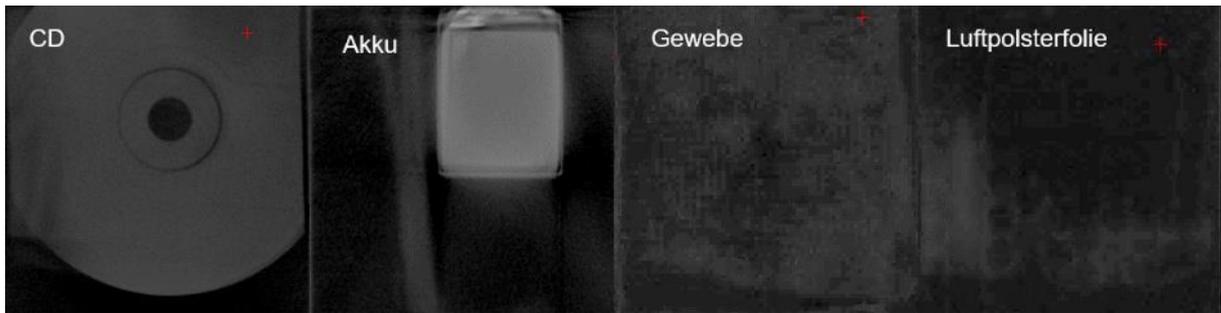


Abbildung 30: CT-Schnittbilder verschiedener papierfremder Objekte

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Bewertung von AP-Ballen unter Nutzung prinzipiell aller o.g. Herangehensweisen erfolgen muss. Die jeweils erkannten bzw. bewerteten Volumenbereiche sind entsprechend zu labeln und werden im nachfolgenden Analyseschritt entsprechend eines Entscheidungsbaums weiterverarbeitet.

#### 4.9 Validierung an realen AP-Ballen (vgl. Arbeitspaket 9)

Letztlich wurde ein realer Ballen gefunden, der den Anforderungen entsprach. Es handelte sich um einen Ballen der Sorte 1.04 in einer vergleichsweise schlechten Qualität, mit hohem Wellpappenanteil und hinreichend vielen Beimischungen von verschiedenen Papiersorten und unerwünschten Bestandteilen. Die Wahl auf diese Sorte fiel, da vor allem die Erkennung von Wellpappen im Verhältnis zu anderen Produkten mit hoher Genauigkeit innerhalb der simulierten Ballen erfolgte.

Der Ballen wurde für die CT-Messung vorbereitet und um einige weitere Materialien ergänzt. So wurden zusätzlich Sand und Metallteile, sowie die drei Standardmustersets angebracht. Die Messung des kompletten Ballens mit einer räumlichen Auflösung von ca. 670  $\mu\text{m}$  und einiger ausgewählter Schichten in maximaler Auflösung von 335  $\mu\text{m}$  wurde erfolgreich durchgeführt. Die Dateigröße des gesamten Ballens betrug in dieser Auflösung ca. 19 GB; die Messzeit ca. 20 Stunden.



Abbildung 31: Ballen der Sorte 1.04 auf dem Versuchsstand des Fraunhofer IIS

Im gezeigten Aufbau befindet sich das Messobjekt auf einem drehbaren Teller. Im Hintergrund ist als schwarzer horizontaler Balken der Lineardetektor zu erkennen. Die Röntgenquelle befindet sich in ungefährender Richtung des Betrachtenden in ca. 10 m Entfernung. Während der Messungen rotiert der Tisch, und nach Abschluss eines Schichtscans werden Quelle und Detektor angehoben. Wie in den Vorbetrachtungen beschrieben, liegt der Ballen so, dass die Messzeit minimal ist. Weiterhin liegt er auf einer der vier planen Seitenflächen, was eine hinreichende Stabilität gewährleistet. Außerdem wurde zwischen Transport und Vermessung Zeit gelassen, sodass Setzungsbewegungen abklingen konnten, wobei an dieser Stelle zu beachten ist, dass kein für AP-Ballen typischer Stapler mit seitlichen Angriffspunkten verwendet wurde, sondern allein die Palette die Kräfte während des Transportes aufnehmen musste.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft einen CT-Schnitt durch den Ballen. Gut zu erkennen sind:

- die Verdrahtung, deren 5 Metalldrähte links und rechts im Bild als weiße Punkte erscheinen,
- unten im Bild die angelegten drei Standardprobensets,
- einzelne, kleine Metallteile innerhalb des Ballens (weiße Punkte),
- ein großer Bereich im rechten Teil der Abbildung, der deutlich heller, und damit Anorganik-reicher oder komprimierter ist, als der Rest des Ballens,
- kompakte, längliche, hellere Objekte, die als Kartonagen erkannt wurden, bis hin zu einem Buch im linken Bildausschnitt

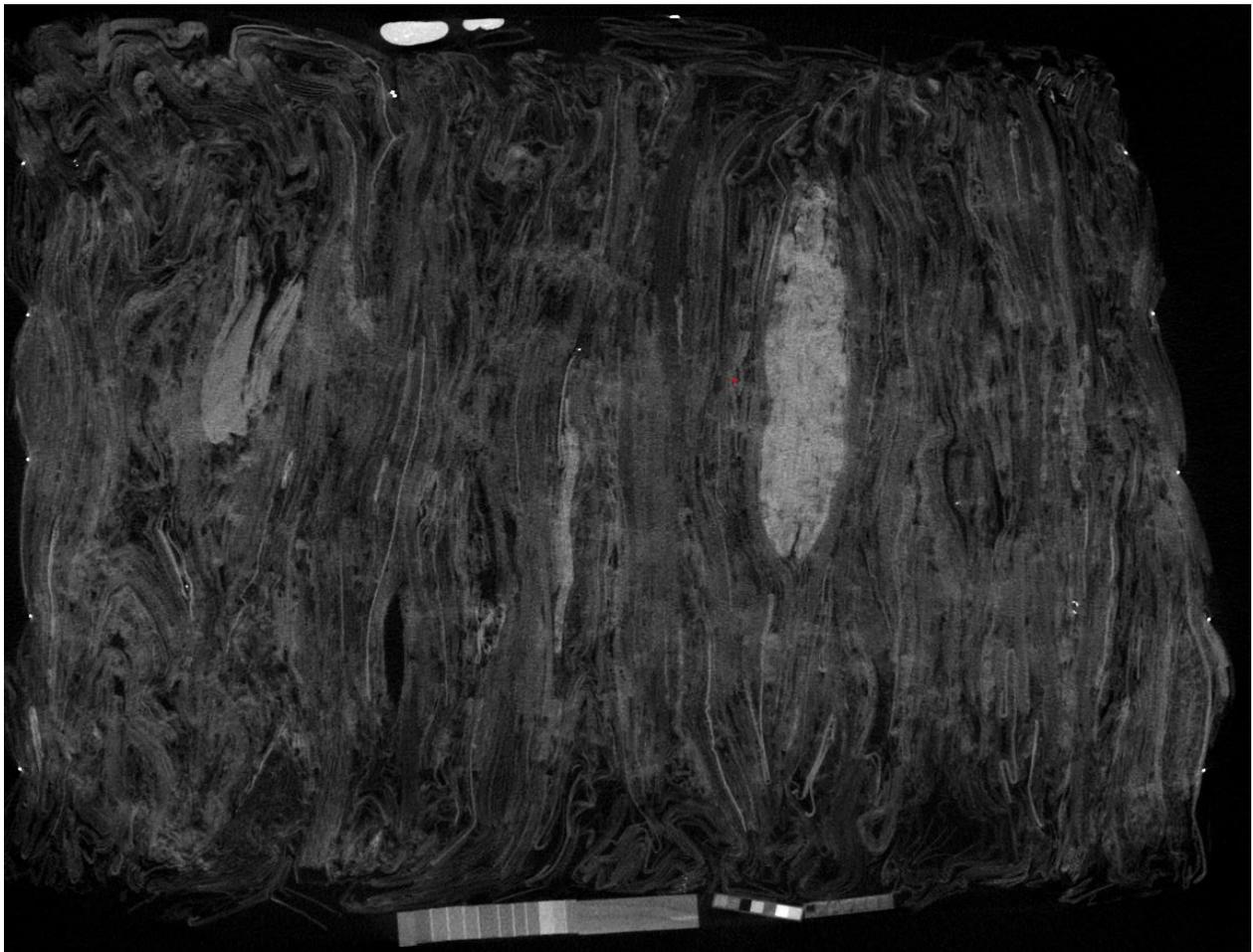


Abbildung 32: Horizontale Schnittebene durch den realen Ballen

## Sortieranalyse

Der vermessene Altpapierballen der Sorte 1.04.01 nach EN643 („Wellpappe 70 - Gebrauchte Papier- und Kartonverpackungen, die mindestens 70% Wellpappe enthalten, der Rest ist eine Mischung aus Papier, Karton und Pappeprodukten“) wurde mittels einer händischen Sortieranalyse komplett untersucht. Dazu wurde der Ballen geöffnet, in verschiedene Bestandteilfraktionen sortiert und die Massenanteile der Fraktionen bestimmt. Die Gesamtmasse des Ballens betrug ca. 871 kg (ohne die Ballenumdrahtung). Die Unterteilung der Fraktionen basiert zum einen auf den Beschreibungen der Altpapiersortenliste EN 643 und auf der Differenzierung von Altpapier hinsichtlich papiertechnologischer Gebrauchswerteigenschaften [xxxii, xxxiii].



Abbildung 33: Vorbereitung zur Ballenöffnung

Die Unterteilung erfolgt in die Obergruppen Grafische Papierprodukte (Zeitung, Magazine, Werbedruck, sonstiges grafisches Papier), Verpackungen (verschiedene Wellpappenarten, Karton, Verpackungspapier und sonstige Verpackungen) sowie dem Rest, welcher im Wesentlichen die Gruppe der unerwünschten Bestandteile nach EN643 abdeckt. Zu dieser Gruppe gehören zum einen die papierfremden Bestandteile (bspw. Metall, Kunststoffe, Holz, Textilien) und zum anderen die ungeeigneten Papierprodukte, u.a. Hygienepapiere oder Verbunde (bspw. Aktenordner mit Metallbügel).

In den nachfolgenden Tabellen ist die Zusammensetzung des untersuchten Altpapierballen hinsichtlich der Massenanteile der Bestandteilfraktionen dargestellt.

	Angaben in kg		1.Hälfte	2.Hälfte	Summe
1	<b>Zeitungen</b>	- ZD	7.23	11.1	18.33
2	<b>Magazine</b>	- MG	4.2	6.7	10.9
3	<b>Werbedruck</b>	- WD	6.95	9.45	16.4
4	<b>Sonstige Grafische</b>	- SG	8.6	17.5	26.1
7	<b>Wellpappe braun</b>	- WPb	185.59	319.6	505.19
8a	<b>Wellpappe weiß gestrichen</b>	- WPw-g	23.55	35.95	59.5

8b	<b>Wellpappe weiß ungestrichen</b>	- WPw-ug	32.7	54.25	86.95
12	<b>Karton</b>	-KA	8.1	9.75	17.85
13	<b>Packpapier</b>	- PP	6.3	11.15	17.45
14	<b>Faserguss</b>	- FG	0.05	1	1.05
15	<b>Sonstige Verpackung</b>	- SV	9	7.55	16.55
10	<b>Rest</b>	- Re	6.7	6.35	13.05
11	<b>Fein ⇨ Rückstand</b>	- Rü	22.5	59.2	81.7
	<b>Summe</b>	<b>Summe</b>	<b>321.47</b>	<b>549.55</b>	<b>871.02</b>

Prozentual ergab dies:

Verteilung mit Rückstand

Angaben in %	1.Hälfte	2.Hälfte	Summe
- ZD	2.2%	2.0%	2.1%
- MG	1.3%	1.2%	1.3%
- WD	2.2%	1.7%	1.9%
- SG	2.7%	3.2%	3.0%
- WPb	57.7%	58.2%	58.0%
- WPw-g	7.3%	6.5%	6.8%
- WPw-ug	10.2%	9.9%	10.0%
-KA	2.5%	1.8%	2.0%
- PP	2.0%	2.0%	2.0%
- FG	0.0%	0.2%	0.1%
- SV	2.8%	1.4%	1.9%
- Re	2.1%	1.2%	1.5%
- Rü	7.0%	10.8%	9.4%
<b>Summe</b>	<b>100.0%</b>	<b>100.0%</b>	<b>100.0%</b>

Verteilung ohne Rückstand

Angaben in %	1.Hälfte	2.Hälfte	Summe
- ZD	2.4%	2.3%	<b>2.3%</b>
- MG	1.4%	1.4%	<b>1.4%</b>
- WD	2.3%	1.9%	<b>2.1%</b>
- SG	2.9%	3.6%	<b>3.3%</b>
- WPb	62.1%	65.2%	<b>64.0%</b>
- WPw-g	7.9%	7.3%	<b>7.5%</b>
- WPw-ug	10.9%	11.1%	<b>11.0%</b>
-KA	2.7%	2.0%	<b>2.3%</b>
- PP	2.1%	2.3%	<b>2.2%</b>
- FG	0.0%	0.2%	<b>0.1%</b>
- SV	3.0%	1.5%	<b>2.1%</b>
- Re	2.2%	1.3%	<b>1.7%</b>
- Rü			
<b>Summe</b>	<b>100.0%</b>	<b>100.0%</b>	<b>100.0%</b>

Gut zu erkennen ist der sortenspezifisch und erwartungsgemäß hohe Anteil verschiedener Wellpappen mit 75 %. Graphische Papiere zusammen haben einen Anteil von ca. 9 %. Reststoffe liegen unter 2 %. Damit ist der Ballen normkonform (mind. 70 % WP für die Sorte 1.04.01). Der Ballen wurde vor der Sortierung auch mittels AP500 und PBSII bewertet. Dabei wurde die Feuchte mit 7 – 8 % bzw. 8,6 % ermittelt, was allein zeigt, dass der Ballen im Prinzip (luft-)trocken war und die gravimetrische Auswertung nicht gestört war. Zum Kunststoffanteil wurde mit PBSII 0,5 % ermittelt. Da nur der kleinere Anteil der gefundenen Reststoffe aus Kunststoff bestand, kann hier von einer guten Übereinstimmung ausgegangen werden.

Von diesem Rest sind rund 25 % Aktenordner mit maßgeblichen Metallanteilen sowie ca. 64% Kunststoffe in Form von verschiedenen Kunststoffteilen, Folien und Säcken als auch knapp 10% Holz. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Bestandteile der Fraktion Rest im untersuchten Ballen.



Abbildung 34: Exemplarisches Bild der Restfraktion aus dem untersuchten Altpapierballen 1.04

### CT-Auswertung

Für die Auswertungen der CT-Bilder des realen Ballens konnten viele der qualitativen Methoden, die innerhalb der Projektbearbeitung entstanden sind, nicht 1:1 angewendet werden. Das liegt vor allem daran, dass nur bei einer Energie gemessen werden konnte und somit Basismaterial-Zerlegungen nicht erstellt werden konnten. Im Vergleich mit den beigelegten Standardmaterialien wurden folgende Abschätzungen an mehreren Schnittbildern unternommen.

#### Bestimmung des Anteiles von **Luft** und **Wellpappen**

In der Projektbearbeitung war davon ausgegangen worden, dass die Wellpappen unter den typischen Verpressdrücken kollabieren würden. Dies ist im Realfall aber nicht vollständig so. Wie die nachfolgende Abbildung in einem ca. 30 cm breiten Detailausschnitt zeigt, herrschen in den Randbereichen des Ballens unkollabierte Wellpappen vor. Diese sind im Bild überwiegend im rechten Winkel zur Welle angeschnitten, und die Welle ist zwar nicht perfekt bildlich aufgelöst, kann aber noch erkannt werden. Am Ballenrand ist weiterhin ein höherer Anteil an luftgefüllten Bereichen zu erkennen. Dies macht Abbildung 36 (links) besonders deutlich. Die extrahierten Bereiche ohne Material sind dabei um die zentrale Achse des Ballens herum am geringsten.

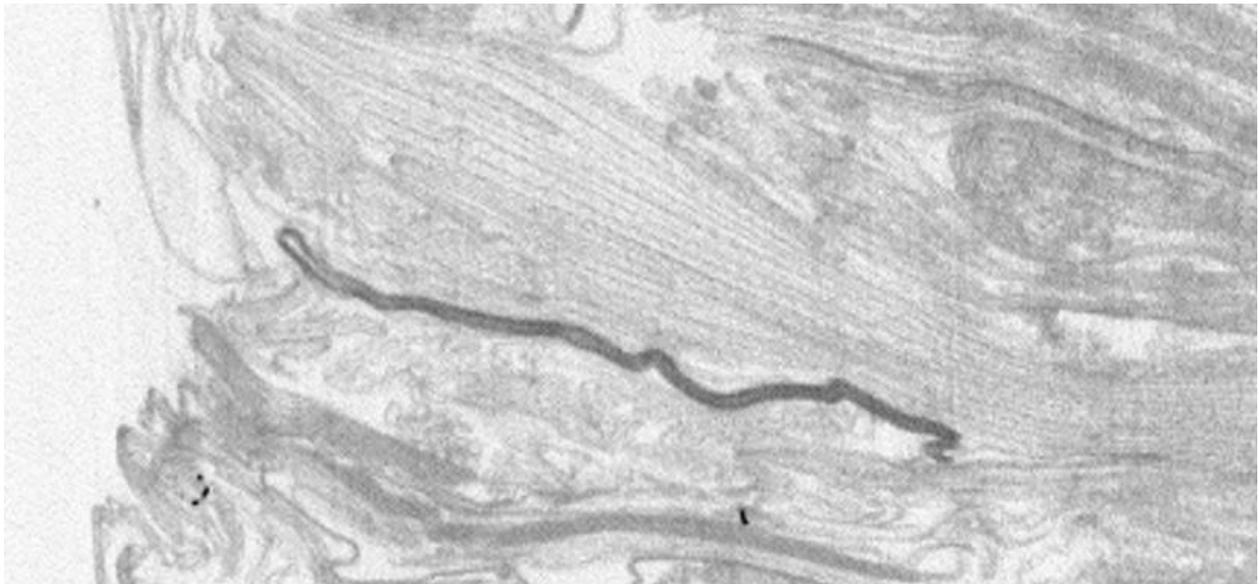


Abbildung 35: Bildausschnitt eines CT-Schnittes durch den Ballen mit weitgehend unkollabierter Wellpappe

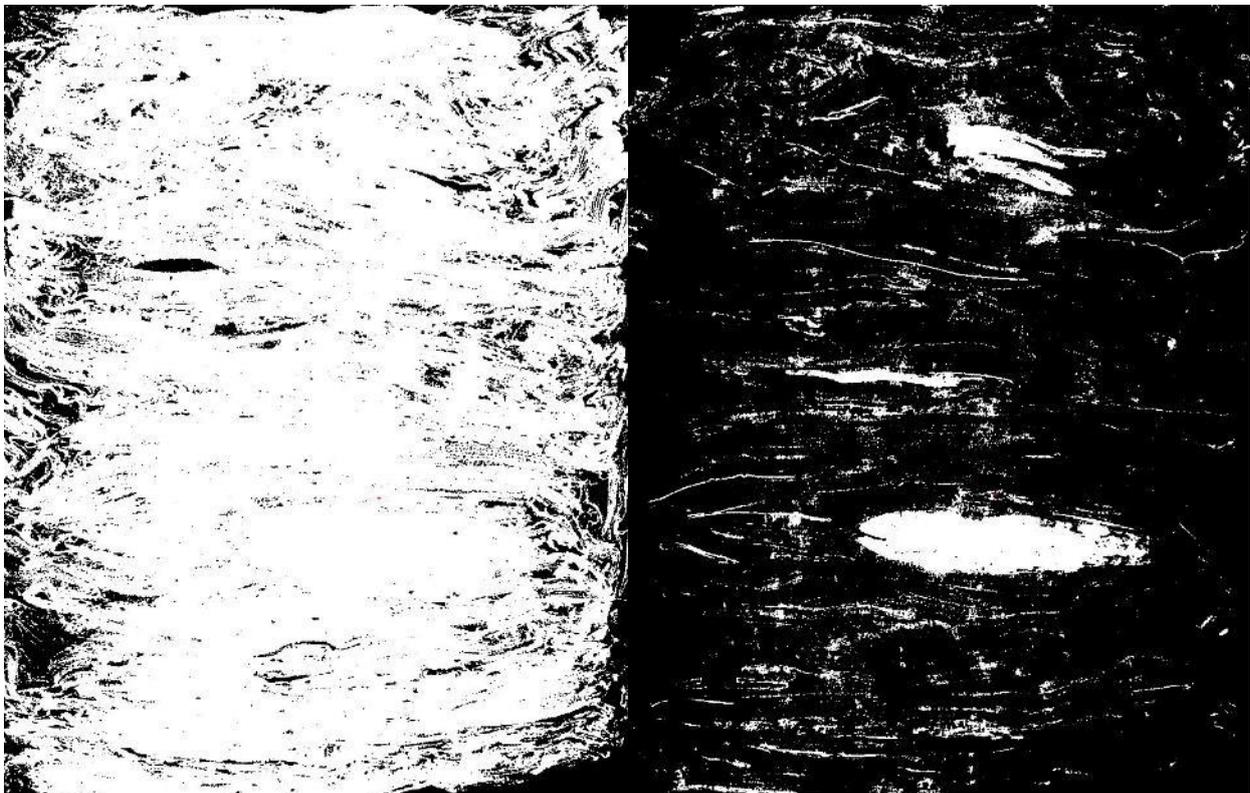


Abbildung 36: Beispielschnittebene mit Extraktion der materialfreien Bereiche (Luft; schwarze Bereiche) in der linken Abbildung, und rechts der Bereiche (weiß), die keine Wellpappen enthalten

Wie die Auswertung der obigen Bilder zeigt, ist der Anteil an Luft fast 15 %, wobei rechts unten ein kleiner Bereich mit einbezogen wurde, der teilweise außerhalb des Ballens liegt. Das rechte Bild zeigt einen nicht WP-Anteil von 9 %. Miteinander kombiniert ergibt das einen Volumenanteil von knapp 11 %. Somit kann von einem Volumenanteil von fast 90 Wellpappen im Ballen ausgegangen werden. Da die Verdichtung des Materials im Ballen nachträglich nicht feststellbar ist,

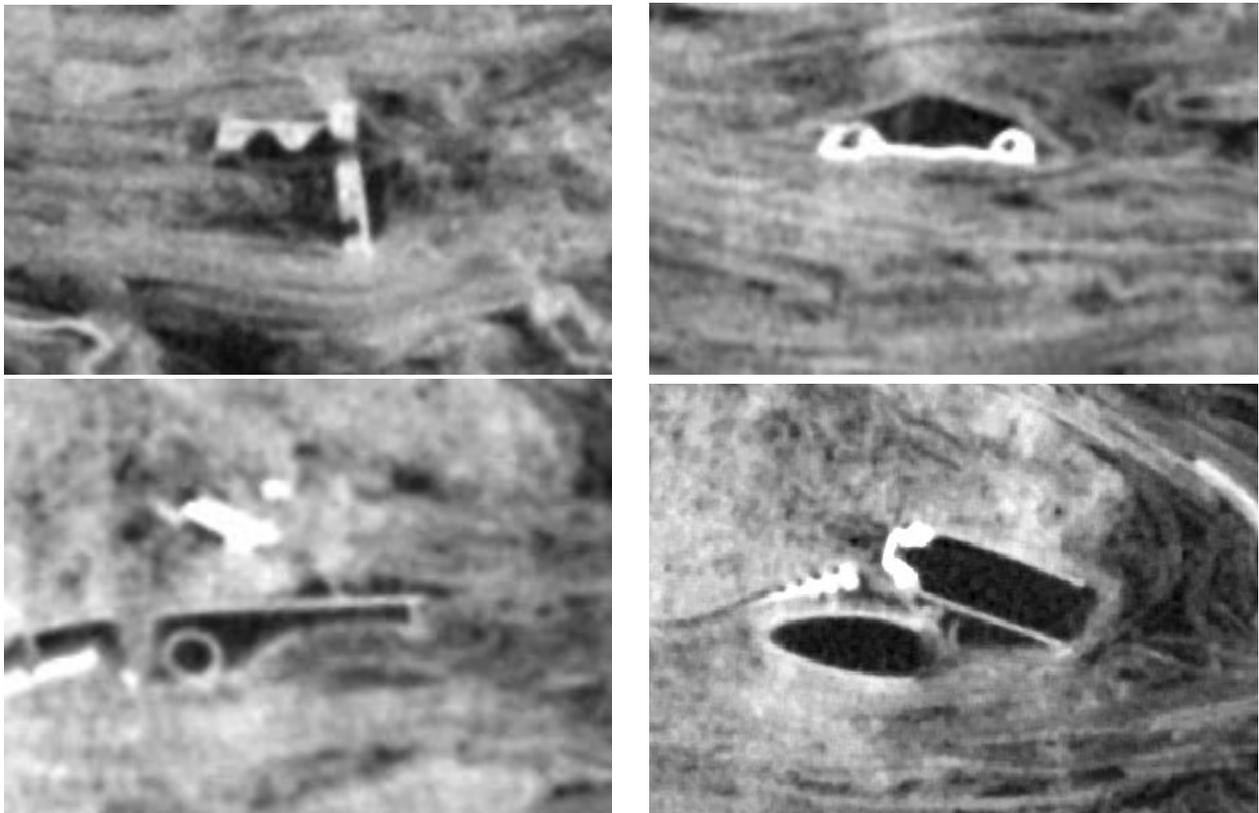
bleibt die Gegenüberstellung eines Massenanteils von 75 % gegenüber einem Volumenanteil von 89 %, ohne dass diese beiden Werte weiter ineinander umgerechnet werden können.

#### Bestimmung des Anteiles **Graphischer Papiere**

In einer weiteren Bearbeitung des rechten Bildes in Abbildung 36 im Vergleich mit den beigelegten Standardkörpern wurde die Menge an hochverdichteten und gefüllten Materialien mit fast 6 % bestimmt. Sein Masseanteil ist laut Ballenöffnung ca. 9 % Da dieses Material typischerweise dichter ist als andere Inhaltsstoffe, ist diese Relation in ihrer Tendenz folgerichtig.

#### Bestimmung **unerwünschter Bestandteile**

Im Ballen fanden sich Kunststoffe in ihrer übergroßen Mehrheit als Folien. Diese konnten in den CT-Aufnahmen wegen ihrer geringen Dicke nicht gefunden werden. Im Gegensatz dazu wurden Metallteile und auffällige nichtflächige Fremdstoffe gut erkannt. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft vier Fremdkörper, wobei allein das obere rechte Objekt aus Metall bestand und als Teil eines Ringordners identifiziert werden konnte. Die anderen Objekte bestehen aufgrund ihrer Schwächungskoeffizienten überwiegend aus Plastik, teilweise mit Metallanhaftungen.



*Abbildung 37: unerwünschte Bestandteile in den CT-Aufnahmen*

Es ist weiterhin zu bemerken, dass vor allem die unerwünschten Objekte, die nicht aus Metall waren, in der Sortierung nicht auffällig waren oder nicht zugeordnet werden konnten. Das liegt vor allem daran, dass man diese im Gegensatz zu reinen Metallobjekten nicht auf dem Ballenvolumen digital extrahieren kann, weil sie überwiegend die Schwächungskoeffizienten der Umgebung zeigten. Bei der Auswertung von vielen hundert Einzelschnitten durch den Ballen kann künftig sicherlich eine KI-Anwendung dem menschlichen Betrachter an die Seite gestellt werden. Da-

mit würden viele nicht-Papier Objekte erkannt werden können. Ihre Zuordnung zu einer Objektbezeichnung wird dabei auch mittelfristig nur in den seltensten Fällen möglich sein, da die Objekte in zufälligen Schnittbildern und meist nach mechanischer Komprimierung vorliegen.

#### **4.10 Konzeptstudie zur Umsetzung in die Praxis (vgl. Arbeitspaket 10)**

Im Hinblick auf die Anwendung, Altpapierballen der standardisierten Größe sowohl in 2D (Röntgentransmission) als auch 3D (Röntgen-CT) zu erfassen, wurden zwei Messkonzepte erarbeitet, welche folgende Punkte berücksichtigen:

- Hoher Durchsatz
- Kompakte Bauweise
- Integrierter Strahlenschutz
- Kostengünstiger Aufbau und Betrieb

Hierfür wurde zunächst die benötigte Energie der Röntgenstrahlung (kV) für die Transmissionsbildung bestimmt. Für diese Bestimmung wurde eine mittlere Dichte des Altpapierballens von  $0,5 \text{ g/cm}^3$  angenommen, was bei einer Kantenlänge von 110 cm eine Flächendichte von ca.  $55 \text{ g/cm}^2$  für den Ballen ergibt. Übliche Röntgenquellen sind bis zu einer Energie von 600 kV erhältlich, jedoch werden bei 600 kV 99,98% des Röntgenspektrums von den Ballen absorbiert (bei  $55 \text{ g/cm}^2$ ). Die verbleibenden 0,02% Transmission sind nur bedingt geeignet, um ausreichend Kontrast für bildgebende Verfahren zu erzeugen. Diese Abschätzung wurde in Kapitel 5.7 validiert, bereits bei 75 cm Schichtdicke Papier und 600 kV waren keine verwertbaren Aufnahmen mehr möglich. Für die Erarbeitung der Konzepte wurde daher ein Linearbeschleuniger mit einer Energie von 4 MeV bzw. 6 MeV angedacht, da hier Transmissionswerte von 2% (bei 4 MeV) und 3,5% (bei 6 MeV) errechnet wurden. Dieser Transmissionsanteil ist ausreichend, um schnelle 3D-Scans und 2D-Messungen durchzuführen. Auch diese Abschätzung konnte validiert werden. Im vorigen Kapitel wurden erfolgreiche Aufnahmen eines kompletten Ballens mit 8 MeV (Linearbeschleuniger) vorgestellt.

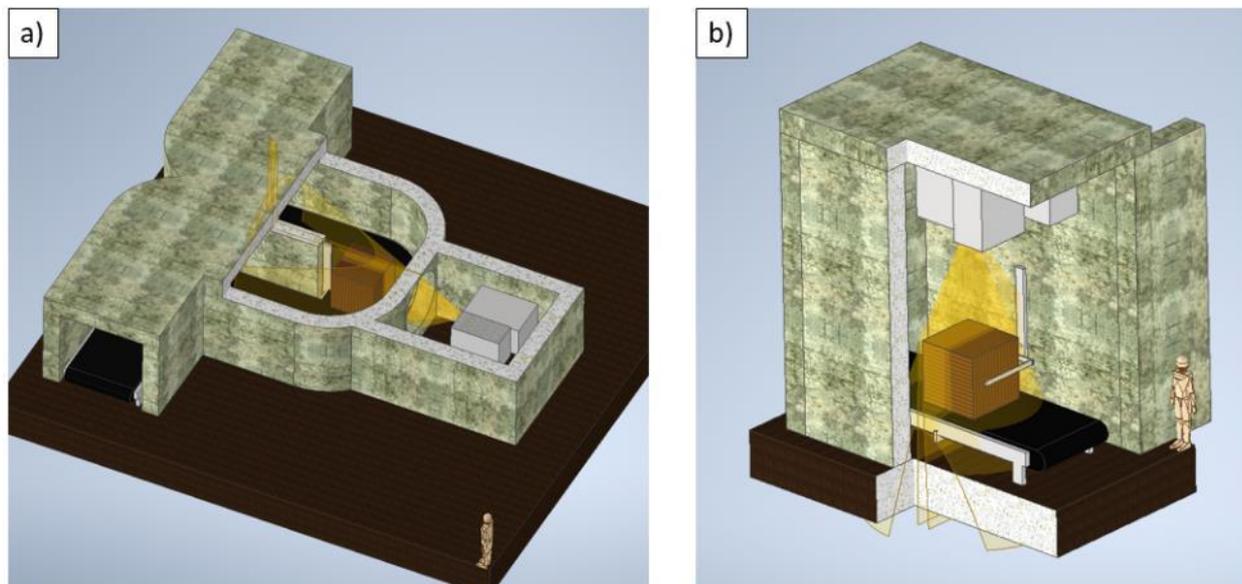


Abbildung 38: Anlagenkonzepte für die 2D- und 3D-Bildgebung der Altpapierballen. Das Bild a) zeigt ein Basisschutzsystem mit hohem Durchsatz. Das Bild b) zeigt ein Vollschutzsystem, welches kompakt gebaut werden kann. Die graue Einheit zeigt dabei den Linearbeschleuniger, von dem ein Fächer-Röntgenstrahl ausgeht. Der braune Würfel stellt den Altpapierballen dar. Hinter dem Ballen ist die Röntgenzeilenkamera angebracht. Der Strahlenschutz soll durch Schutzwände aus Barytbeton realisiert werden.

Die Abbildung zeigt die zwei erarbeiteten Konzepte für eine Röntgenenergie von 6 MeV. Für beide Konzepte werden Zeilenkameras eingesetzt, die ein 1D-Zeilenbild erzeugen. Durch eine gleichmäßige Bewegung des Ballens an der Kamera vorbei entstehen dann die 2D-Projektionen. Das in a) gezeigte Konzept ist ein „offenes System“, dabei werden die Ballen kontinuierlich durch das Röntgensystem geführt, wodurch ein hoher Durchsatz erreicht wird. Pro Ballen ist von 4 – 8 Sekunden Messzeit, für eine 2D-Projektion, auszugehen. Anlagenkonzept b) zeigt eine „Vollschutzanlage“ welche eine geschlossene Einhausung des Röntgensystems mit Strahlenschutztor vorsieht und damit sehr kompakt gebaut werden kann. Für beide skizzierten Röntgensysteme sind Auflösungen von 0,8 mm – 2,4 mm angestrebt.

Der räumliche Bedarf, um eine solche Anlage in einem kmU zu implementieren und der finanzielle Aufwand werden eine mittelfristige Nutzung im Wareneingang nur in größeren Betrieben ermöglichen.

Der Betrieb von Röntgeneinrichtungen mit einer Beschleunigungsspannung oberhalb von 1 MeV unterscheidet sich nicht nur in der Dicke der notwendigen Abschirmung sondern ist aufgrund erhöhter Gefahren und Risiken für den menschlichen Organismus rechtlich strikt reglementiert. Der Betrieb erfolgt dabei auf der Grundlage der Strahlenschutzverordnung, die seit wenigen Jahren jede Anwendung von Strahlung zu technischen Zwecken regelt. Während jedoch konventionelle Röntgenröhren mit Beschleunigungsspannungen bis 1 MeV unter verhältnismäßig einfachen Rahmenbedingungen zum Einsatz kommen dürfen, wie es der massenhafte Betrieb in der Medizin oder in der Gepäckkontrolle erfordert, werden Beschleunigereinrichtungen unter deutlich strikteren Bedingungen betrieben. Typischerweise müssen heute dem Betrieb nahezu jeder Röntgeneinrichtung, mit Ausnahme von Bauartzugelassenen Geräten, folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

- Strahlenschutzadministration inkl. Strahlenschutzverantwortlicher (SSV) und Strahlenschutzbeauftragter (SSB) ist zu etablieren
- SSB's müssen über entsprechende Fach- und Sachkunde verfügen (Erfahrungsnachweis 3 -6 Monate sowie Kursteilnahme 1-3 Tage inkl. Auffrischung alle 5 Jahre)
- Strahlenschutzanweisung zum sicheren Betrieb der Einrichtung ist zu erstellen
- Sachverständigenprüfung ist von einer Benannten Stelle durchzuführen und alle 5 Jahre zu wiederholen
- Anzeige des Genehmigungsbedürftigen Betriebs bei der zuständigen Behörde
- Einrichtung von Personendosimetrie, wenn nötig
- Einhaltung von Dokumentationspflichten
- Das Personal muss jährlich in diese unterwiesen werden
- Etablierung eines sicheren Betriebs durch geeignete Schutzvorkehrungen

Für den Betrieb von Linearbeschleunigereinrichtungen werden diese Kriterien weiter verschärft indem z.B. der für die Ernennung zum SSB erforderliche Erfahrungsnachweis auf 1 Jahr heraufgesetzt ist und die Kurse zur Erlangung der Fachkunde bis zu 2 Wochen in Anspruch nehmen können. Zudem erfolgt eine Sachverständigen-Prüfung im einjährigen Turnus.

Darüber hinaus erfordert der Umgang mit hochenergetischen Röntgenstrahlen eine tiefere Kenntnis im Umgang mit radioaktiven Stoffen, da Teile des Beschleunigers oder im Ausnahmefall selbst die Proben durch die hochenergetische Röntgenstrahlung aktiviert werden können. Diese Risiken ergeben sich jedoch insbesondere erst ab Strahlungsenergien um 9 MeV oder höher, weshalb im Regelfall davon abgesehen wird.

Der Betrieb von Beschleunigereinrichtungen wird von den Behörden entsprechend strikter überwacht und muss im Gegensatz zu konventionellen Röntgenanlagen durch die Schaffung einer Deckungsvorsorge, die etwaige im Betrieb entstehende Risiken abdeckt, zusätzlich abgesichert werden.

## **5 Schlussfolgerungen**

### **Einordnung**

Im Rahmen des Forschungsprojektes ist es erstmals gelungen, die Möglichkeiten des Einsatzes von CT-Röntgentechnik in der Wareneingangskontrolle von Altpapierballen aufzuzeigen. Im Detail wurden dabei folgende Ergebnisse erhalten:

### **Vergrößerung des messbaren Probenvolumens bis hin zu einem realen Ballen**

Primäres Ziel war die Erweiterung bisher üblicher Wareneingangskontrolle. Dazu war es nötig, zu zeigen, dass mit aktueller CT-Technik die nötigen Voraussetzungen geschaffen werden können. In mehreren Schritten wurde das zu messende Probenvolumen von wenigen Kubikzentimetern bis hin zu über einem Kubikmeter kompaktes Material erhöht. Es konnte gezeigt werden, dass eine räumliche Auflösung in Voxel der Kantenlänge 400 µm auch für einen Realballen aufrechterhalten werden kann und gleichermaßen das Signal/Rauschverhältnis nicht signifikant im Verhältnis zur Messung an kleinen Objekten sinkt. Die dafür notwendigen Röntgenenergien liegen dabei erwartungsgemäß höher und auch einige Features, die im Labormaßstab zur Anwendung kommen konnten, z.B. die Verwendung von Dual-Energy-Scans, konnten mit den zur Verfügung stehenden technischen Mittel noch nicht hochskaliert werden.

Ebenso erwartungsgemäß liegt die Messzeit wie auch die Menge an anfallenden und aufzubereitenden Daten bei der Messung eines kompletten Realballens aktuell über den für einen praktischen Einsatz sinnvollen Grenzen. Dieser Einschränkung wurde u.a. mit der Vergrößerung der Voxel auf eine doppelte Kantenlänge und der Reduktion der Messung weniger Einzelschichten begegnet. Letztlich wurde geschlussfolgert, dass mit der Messung nur weniger Einzelschichten eine hinreichende Gesamtbewertung eines Ballens möglich ist und in ca. 10 Minuten – und damit praxisrelevant – möglich ist.

Es wurden weiterhin Konzepte entwickelt, die aufzeigen, dass eine solche Warenkontrolle mit überschaubarem Raumverbrauch und unter Einhaltung der gesetzlichen Regelungen bezüglich des Strahlenschutzes in einer online Applikation möglich ist. Dabei ist ein menschlicher Eingriff nicht erforderlich. Je nach Durchsatz an einem Transportband werden die Ballen dabei aus dem linearen Ablauf in einen Bypass geleitet. Jedoch liegen die Anforderungen an den Strahlenschutz bei den für einen realen Ballen (Volumen ca. 1 m<sup>3</sup>) notwendigen Röntgenenergien (MeV-Bereich) so hoch, dass eine wirtschaftliche Anwendung für Altpapierballen im Moment nicht absehbar ist. Niedrigere Röntgenenergien haben weniger hohe Anforderungen bezüglich des Strahlenschutzes, sind aber prinzipbedingt auf deutlich kleinere Objektdurchmesser limitiert, im Falle von Altpapier auf ca. 40 - 50 cm.

### **Verbesserung der chemischen Aussagekraft**

Eine zweite zu untersuchende Hypothese war, dass komplementär zu den bisherigen, überwiegend NIR-spektroskopischen Methoden, die organische Stoffe sehr gut identifizieren und quantifizieren können, mittels CT-Messungen die anorganischen Bestandteile besser erkennbar und differenzierbar sind. Es konnte gezeigt werden, dass diese Hypothese zutrifft. Metallteile beginnend von Heftklammern können sicher erkannt werden. Anorganische Füllstoffe sind bei Dual-Scan-Messungen gut mathematisch extrahierbar. Einziger, nicht quantifizierbarer weiterer Einfluss auf die Aussagekraft dieser Bestimmung ist die Verdichtung des jeweiligen Materials. An dieser Stelle müsste eine dritte, möglichst unabhängige Eigenschaft während der Scans erhoben werden können. Bei Bestimmung des Ballenvolumens (abzüglich innerer materialfreier Bereiche) und seines Gewichtes lässt sich aber ein Ballenmittelwert errechnen.

Eine unbekannte Einflussgröße stellte zu Beginn die Feuchtigkeit bzw. freies Wasser dar. Die Untersuchungen belegten, dass Wasser zwar nicht quantifizierbar ist, aber auch nicht als weitere Einfluss- oder Störgröße in die Betrachtungen mit einfließen muss. Wasser verhält sich in den CT-Bildern nahezu wie füllstoff-freier Faserstoff und erhöht allein – proportional zu seiner Menge – das Volumen. Der gefundene Zusammenhang ist positiv zu bewerten, da somit andere Messgrößen nicht verfälscht werden.

### **Verbesserung der Aussagekraft zu AP-Materialien**

Die Ermittlung der spezifischen Zusammensetzung von AP-Ballen hinsichtlich einzelner Objekte war bisher nur durch den äußeren Anschein oder nach Öffnung möglich. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass eine Reihe an Materialien auch im Innern quali- und quantifizierbar sind. Dies kann umso genauer erfolgen, je mehr sich die Struktur der Materialien oder deren Schwächungskoeffizienten unterscheiden. Wellpappen sind in dieser Hinsicht am einfachsten zu erkennen. Viele papierfremde und unerwünschte Bestandteile lassen sich ebenso leicht erkennen und ggf. auch spezifischen Objekten zuordnen. Diese Herangehensweise kann vergleichsweise einfach auf andere Ballentypen übertragen werden. Materialien, deren Strukturen unterhalb der räumlichen Auflösung der CT-Messung liegen, müssen allein aus den Graustufenverteilungen

der verschiedenen Datenaufbereitungen zugeordnet werden, wobei es zu Überschneidungen kommt. Einige Materialklassen lassen sich mit CT-Technik letztlich ebenso wenig trennen, wie mit anderen Analysemethoden, so z.B. Graukarton und Zeitungsdruck. Für eine weitere Differenzierung der Zusammensetzung wird angeregt, Untersuchungen in Richtungen folgen zu lassen, die es ermöglichen, einen oder mehrere weitere Parameter zu finden, die die bisherigen Messwerte ergänzen und zusätzliche Aussagen zulassen würden.

Insgesamt ist hier anzumerken, dass allein eine volumenmäßige Abschätzung der Anteile erfolgt, die bei Kenntnis der spezifischen Dichten in eine massenmäßige Abschätzung umgerechnet werden kann.

### **Umsetzung in die industrielle Praxis**

Die Umsetzung der Methodik in die industrielle Praxis ist auch zum aktuellen Stand der Technik möglich und praktikabel. Die Investitionskosten und Betriebskosten müssen dabei aber in einem vernünftigen Verhältnis zu den Kosten der untersuchten Materialien und der möglichen Auswirkungen von unerkannten und schädlichen Verunreinigungen oder Inhaltsstoffen stehen. Auch die Messzeit kann in einer Weise angepasst werden, dass jeder Ballen mindestens in einer repräsentativen Schicht gescannt und ausgewertet werden kann. Eine 100 %-Kontrolle mit Auflösungen unter 1 mm ist vor allem aus zeitlichen Gründen nur im Ausnahmefall geboten.

## **6 Abkürzungsverzeichnis**

AP	Altpapier
BP	Büropapier
EQ I	Einsatzquote I
GCC	Ground Calcium Carbonate
GK	Graukarton
KART	Karton
MAG	Magazinpapier
MSA	Mineralstoffanteil
POM	Polyoxymethylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
ROI	Region of Interest
SC	SC-Papiere (super-calendered)
SD	Standard deviation bzw. Standardabweichung
WP	Wellpappe
ZDP	Zeitungsdruckpapier
ZS	Zellstoff
$\rho$	Dichte in g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{\text{schein}}$	Scheinbare Dichte in g/cm <sup>3</sup>

$A_M$	Anteil eines best. Materials am Gesamtmaterial
$A_{WP}$	Anteil Wellpappe am Gesamtmaterial
$e$	Elektronenladung, $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$
$h$	Planck'sches Wirkungsquantum, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
$h_n$	Relative Häufigkeit
$I$	Röntgenintensität in Röntgenquanten/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )
$I_0$	Röntgenintensität an der Röntgenquelle in Röntgenquanten/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )
$m_e$	Elektronenmasse (geschwindigkeitsabhängig) in kg
$s_{TV}$	Kantenlänge eines Teilvolumens in Voxel
$TV_{WP}$	Teilvolumen, das dem Material Wellpappe zugeordnet wurde
$U_B$	Anodenspannung bzw. Beschleunigungsspannung in V
$v$	Geschwindigkeit in m/s
$v_{max}$	Maximalgeschwindigkeit in m/s
$Vox_{Luft}$	Voxel, das Luft enthält (mit $\mu_l < 0,01$ )
$Vox_M$	Voxel, welches einem Material M zugeordnet wurde
$Vox_{ROI}$	Voxel innerhalb einer definierten ROI
$Vox_{WP}$	Voxel, das dem Material Wellpappe zugeordnet wurde
$W_M$	Wertebereich um den mittleren materialspez. Schwächungskoeffizienten
$Z$	Ordnungszahl, einheitenlos
$\alpha$	Materialspez. Absorptionskoeffizient in $\text{m}^{-1}$
$\Delta\eta$	Materialstärke in m
$\eta$	Distanz zur Röntgenröhre in m
$\lambda$	Wellenlänge in m
$\mu$	Schwächungskoeffizient in $\text{m}^{-1}$ bzw. $\text{cm}^{-1}$
$\bar{\mu}$	Gemittelter Schwächungskoeffizient in $\text{m}^{-1}$ bzw. $\text{cm}^{-1}$
$\mu_l$	Schwächungskoeffizient eines Voxels in $\text{cm}^{-1}$
$\mu_s$	Materialspez. Streukoeffizient in $\text{m}^{-1}$
$\bar{\mu}_M$	Gemittelter materialspez. Schwächungskoeffizient in $\text{cm}^{-1}$
$\sigma_M$	Materialspez. Standardabweichung des Schwächungskoeffizienten in $\text{cm}^{-1}$

## 7 Literaturverzeichnis

- 
- [i] *Papier 2019. Ein Leistungsbericht, vdp Verband Deutscher Papierfabriken e. V., Bonn 2019*
  - [ii] *DIE PAPIERINDUSTRIE e. V., <https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik>*
  - [iii] *European Declaration on Paper Recycling (2006-2010), CEPI and ERPA (European Recovered Paper Association), September 2016*
  - [iv] *Wasser- und Rückstandsumfrage in der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie 2016, Minimaler Ressourceneinsatz für qualitativ hochwertige Papierprodukte, Wochenblatt für Papierfabrikation (2018), S. 158*
  - [v] *Paper and board - European list of standard grades of paper and board for recycling BS EN*

- 643:2014
- [vi] Paper for Recycling Quality Control - Guidelines - CEPI, November 2016
  - [vii] China schränkt weltweite Müllimporte weiter ein, zeit.de vom 19.11.2018
  - [viii] <http://www.techpap.com/nir-moisture-and-plastic,sensors,10.html>
  - [ix] <https://www.ptspaper.de/produkte/automatisierte-ap-ballenpruefung/>
  - [x] Messung der Altpapierweiße, PTS erweitert Ballentester bei Essity, PTS-NEWS 1/2019
  - [xi] [https://www.emco-leipzig.com/emco\\_feuchtemessgeraete\\_papier\\_de.html](https://www.emco-leipzig.com/emco_feuchtemessgeraete_papier_de.html)
  - [xii] [http://dunakontroll.hu/wp-content/uploads/2011/09/atvilagitas\\_3.jpg](http://dunakontroll.hu/wp-content/uploads/2011/09/atvilagitas_3.jpg)
  - [xiii] Bewertung von zur Altpapiereingangskontrolle genutzter Messtechnik bezüglich Messgrößen, Messbereich, Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit, Schlussbericht INFOR-Projekt 203 / INGEDE-Projekt 154/17
  - [xiv] <http://www.techpap.com/nir-moisture-and-plastic,sensors,10.html>
  - [xv] T. Buzug (2005): Einführung in die Computertomographie: Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, 1. Nachdruck, ISBN 978-3-540-20808-2
  - [xvi] T. Brandmüller (2009): Schematic representation of a 3D Computed Tomography. Wikipedia, abgerufen am 26.11.2022
  - [xvii] De Chiffre, L.; Carmignato, S.; Kruth, J. -P.; Schmitt, R.; Weckenmann, A.: Industrial applications of computed tomography, CIRP Annals: Manufacturing Technology, vol: 63, issue 2, pages: 655-677, 2014
  - [xviii] Zabler, S.; Maisl, M.; Hornberger, P.; Hiller, J.; Fella, C.; Hanke, R.: X-ray imaging and computed tomography for engineering applications, tm - Technisches Messen, eISSN 2196-7113, ISSN 0171-8096 (2020)
  - [xix] Heilmeier, F.; Koos, R.; Hornberger, P.; Hiller, J.; Weraneck, K.; Jakobi, M.; Koch, A.W.; Volk, W.: Calibration of cast-in fibre Bragg gratings for internal strain measurements in cast aluminium by using neutron diffraction, elsevier, measurement, 2020; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107939>
  - [xx] Glinz J., Reiter M., Gastinger T., Huskic A., Plank B., Kastner J. and Senck S.: Porosity determination in additively manufactured Ti parts using X-ray tomography, In 9th International Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2019. Padova, Italy, February, 2019
  - [xxi] Hornberger, P.; Aichinger, C.; Hiller, J.: Dimensionelles Messen mit Computertomographie. In: Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung der Fraunhofer-Allianz Vision (285-291), 2017
  - [xxii] Hiller, J.; Hornberger, P.; Salzinger, M.: Bewertung technischer Oberflächen mit Röntgen-Computertomographie. In: Fraunhofer Vision - Leitfaden zur Inspektion und Charakterisierung von Oberflächen mit Bildverarbeitung, 2016
  - [xxiii] Hiller, J.; Hornberger, P.: Measurement accuracy in X-ray computed tomography metrology: Toward a systematic analysis of interference effects in tomographic imaging, Precision Engineering 45 (2016): 18-32
  - [xxiv] Schmitt, Robert H. ; Buratti, Andrea ; Grozmani, Natalia ; Voigtmann, Christoph ; Peterek, Martin: Model-based optimisation of CT imaging parameters for dimensional measurements on multimaterial workpieces. In: CIRP Annals 67 (2018), Nr. 1, S. 527–530. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850618300271>
  - [xxv] Wang, Qian ; Ismail, Khalid N. ; Breckon, Toby P.: An Approach for Adaptive Automatic Threat Recognition Within 3D Computed Tomography Images for Baggage Security Screening. 3/25/2019
  - [xxvi] Firsching, M.; Nachtrab, F.; Mühlbauer, J.; Uhlmann, N.: Detection of Enclosed Diamonds using Dual Energy X-ray imaging, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012, Durban, South Africa

- [xxvii] *Buzug, T.: Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT; Springer Verlag (2008)*
- [xxviii] *Alvarez, R. E., & Macovski, A. (1976). Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography. Physics in Medicine & Biology, 21(5), 733*
- [xxix] *Jansson, Anton: Non-linear dual-energy method development and evaluation for industrial computed tomography, Meas.Sci.Technol. 30 (2019) 065006 (11pp)*
- [xxx] *B. Heismann et al., Journal of Applied Physics, Vol 94, no. 3, 2003*
- [xxxi] *[https://www.buzer.de/StrlSchG\\_Strahlenschutzgesetz.htm](https://www.buzer.de/StrlSchG_Strahlenschutzgesetz.htm)*
- [xxxii] *DIN EN 643. (11/2014). Papier, Karton und Pappe - Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten. Deutsche Fassung EN 643:2014-11. Deutschland*
- [xxxiii] *Tempel, L., & Meinel, G. (2015). Entwicklung einer Methode zur Bestimmung des papiertechnologischen Gebrauchswertes von Altpapier durch differenzierte Analyse der Altpapiereinzelobjekte als Entscheidungshilfe für die Beschaffung und den Einsatz des Sekundärrohstoffes. Forschungsvorhaben IK-MF 120064*