

Sortieren mit innovativen Bildverarbeitungstechniken – Neue Wege im Altholz-Recycling

Thermografie-Forum Eugendorf, 20.9.2024

Dr.-Ing. Jochen Aderhold, Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI

Innovative Bildverarbeitung im Altholz-Recycling

Gliederung

- **Altholzgewinnung aus Sperrmüll**
 - **Exkurs: Normung der Thermographie mit Relativbewegung**
- **Störstofferkennung in Altholz**
- **Ausblick**
 - **Sortierung von Bauschutt**
 - **Sortierung von Laubschnittholz**
- **Zusammenfassung**

Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Einführung (1)

Projektdaten

- Altholzgewinnung aus Sperrmüll durch künstliche Intelligenz und Bildverarbeitung im VIS-, IR- und Terahertz-Bereich
 - ASKIVIT
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR)
 - Förderaufruf „Ausbau der Material- und Energieeffizienz in der Holzverwendung“
 - Themenbereich „Stoffliche Nutzung von Altholz“
 - Teilaspekt „Erschließung neuer Altholzquellen“
- Laufzeit: 1.7.2021 – 30.6.2025



Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Einführung (2)

Sperrmüll

- Gemischte Abfälle
- Frei von Schadstoffen
- Zu groß für normale Hausmüllentsorgung

- In DE jährlich > 2 Millionen Tonnen
 - 50% des Sperrmülls bestehen aus Holz
 - Nur 50% des Holzes wird stofflich verwertet

- Potenzielle neue Altholzquelle



Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Einführung (3)

Projektziele

- Erhöhung der stofflichen Verwertung von Holz aus Sperrmüll
- Automatisierte Sortierung
 - Quote des positiv heraussortierten Holzes erhöhen
 - Sortieraufwand senken
- Automatisches Herausklauen von Buntmetallen
 - Weitere Effizienzsteigerung (hohe Erlöse für Buntmetalle)

Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Einführung (4)

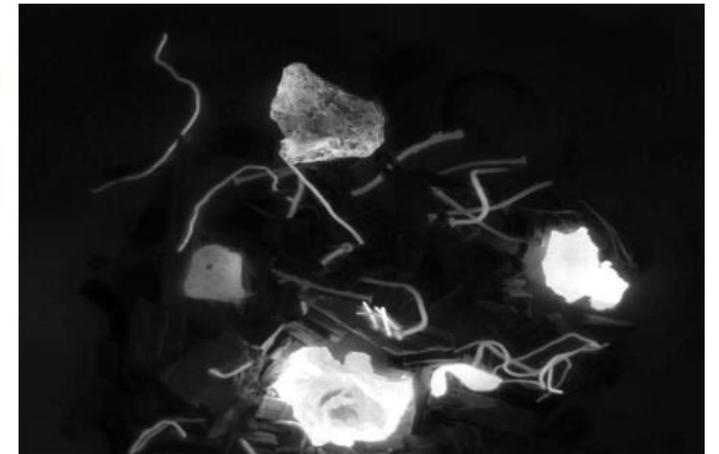
Stand der Technik bei der Sperrmüllsortierung



Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Lösungsansatz (1)

- Händisches Klauben durch künstliche Intelligenz nachstellen
 - Farbkameras
 - Deep Learning
 - Geringere Kosten, geringere Fehleranfälligkeit
- Zusätzliche Sensoren ...
 - ... sehen unter die Oberfläche
 - ... oder sind empfindlich für Materialeigenschaften
- Erhöhung der Trefferquote

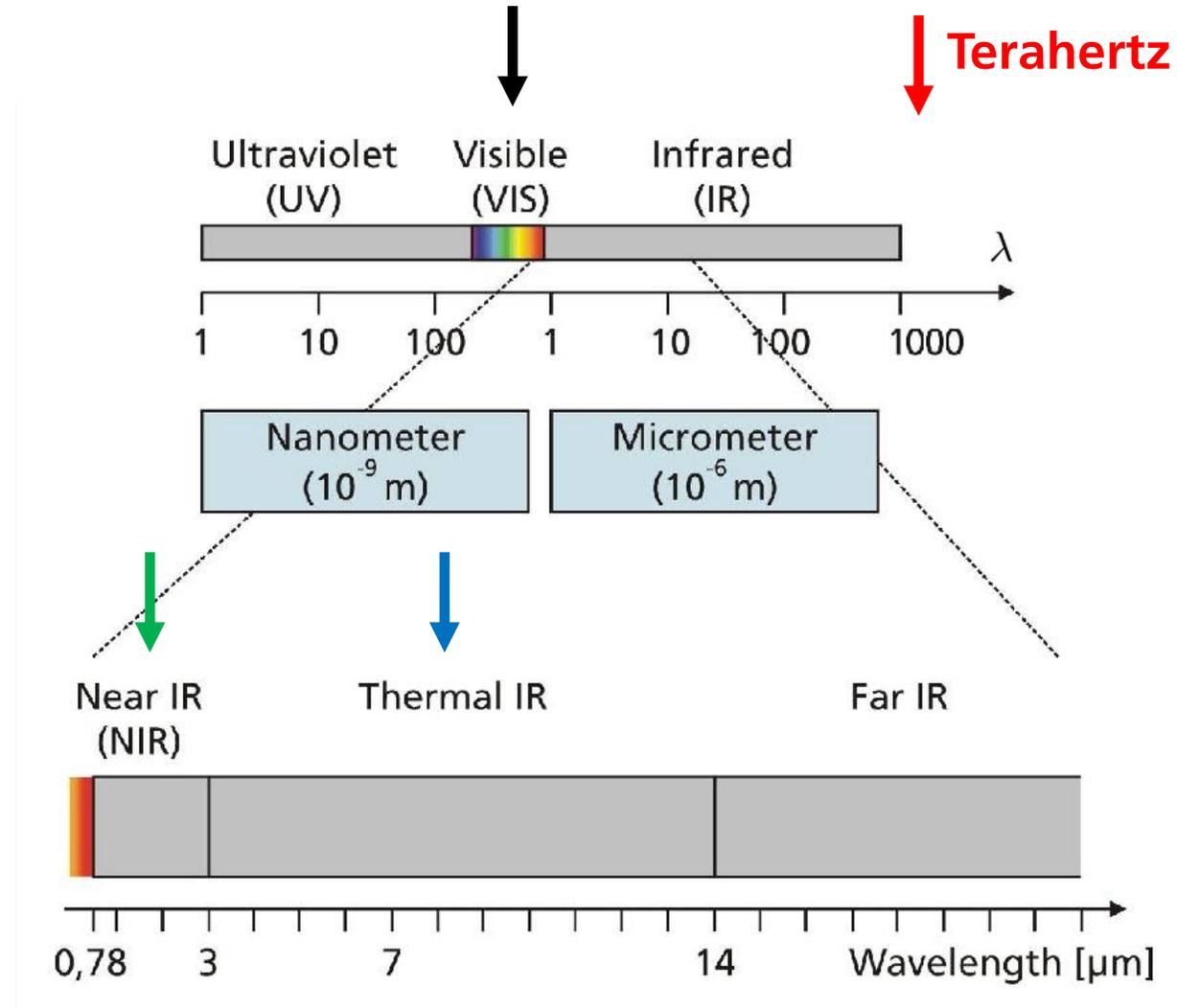


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Lösungsansatz (2)

Spektralbereiche

- **VIS**
 - Information des menschlichen Klaubers
- **NIR**
 - „Chemischer Fingerabdruck“
- **Thermisches IR**
 - Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Emissivität
- **Terahertz**
 - Dielektrizitätskonstante

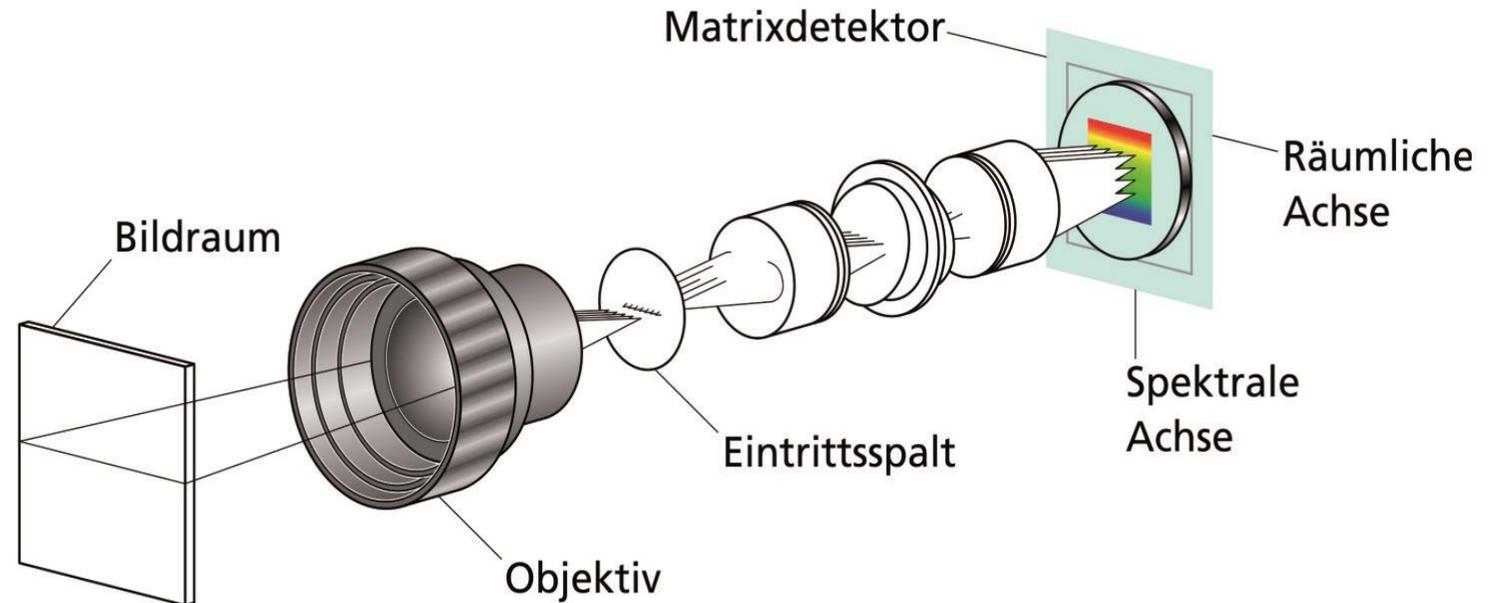


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Lösungsansatz (3)

Bildgebende Spektroskopie

- Zeilenspektrograph
 - Jede Zeile gibt ein zweidimensionales Bild
 - Eine räumliche Dimensionen, eine spektrale



Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Auswertung (1)

„Early-fusion-Ansatz“

- Daten der verschiedenen Sensorsysteme übereinanderlegen („registrieren“)
- Auswertung mit neuronalem Netzwerk

Laborversuche

- Probenträger mit AruCo-Markern zur Registrierung
- Größtmögliche Flexibilität
- Messungen können im Prinzip an verschiedenen Orten stattfinden

Praxiseinsatz

- Sensorsysteme sind am gleichen Förderband und fest zueinander angeordnet
- Marker nur zum Einfahren notwendig
- Laufender Betrieb ohne Marker

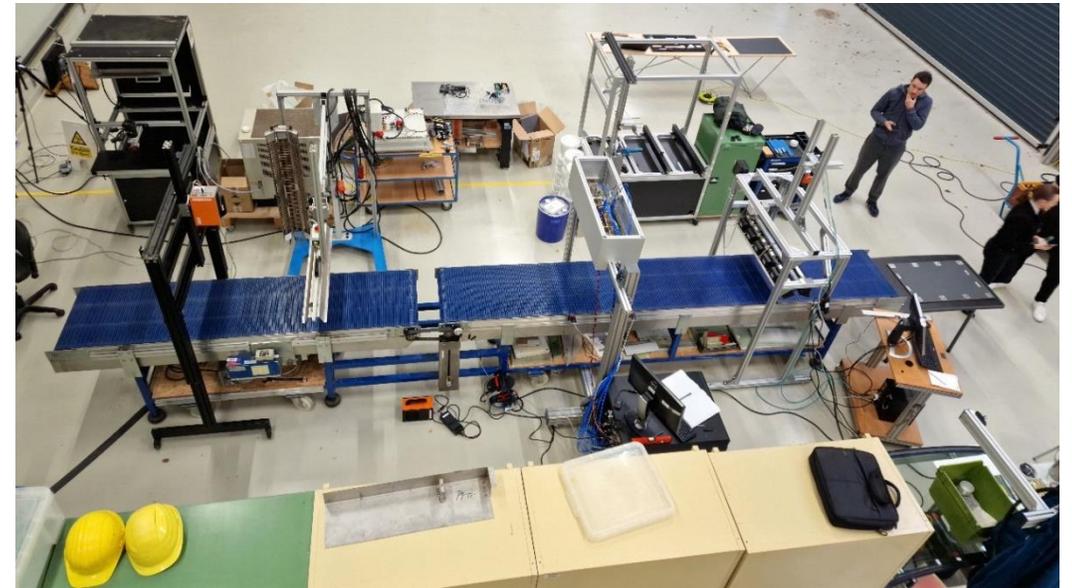
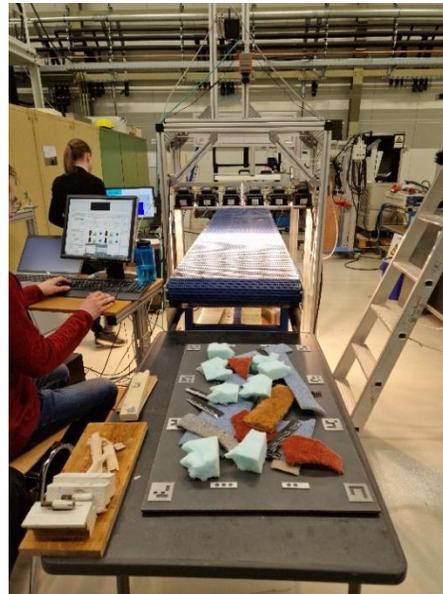


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (1)

Sortiersversuch am WKI am 25.11.2022

- Vorzerkleinerte (neue) Möbel
 - Weitere Proben:
 - Metalle
 - Verschiedene Kunststoffe
 - Keramik
 - Holzwerkstoffplatten
 - Etc. etc.
- Keine echter Sperrmüll
- Alle vier Sensorsysteme im Einsatz

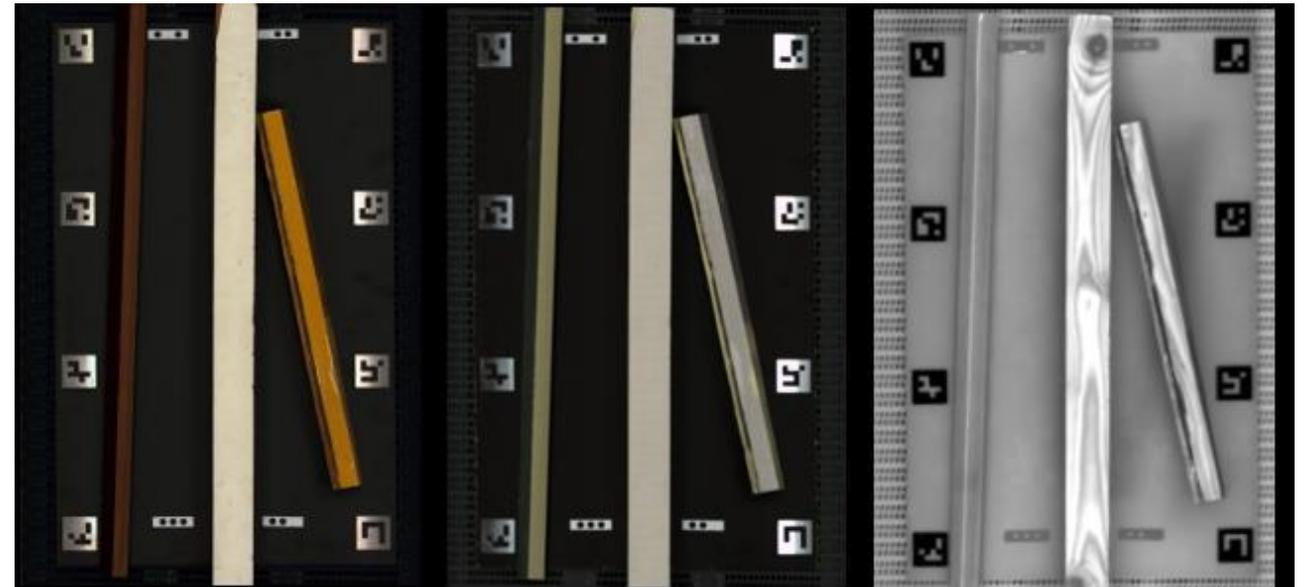


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (2)

Ergebnisse für lackierte Fensterkanteln

- Von links nach rechts: VIS-NIR-Thermographie
- Informationstiefe von VIS und NIR endet an der Oberfläche
- Thermographie schaut unter die Lackschicht
 - Holzmaserung wird sichtbar

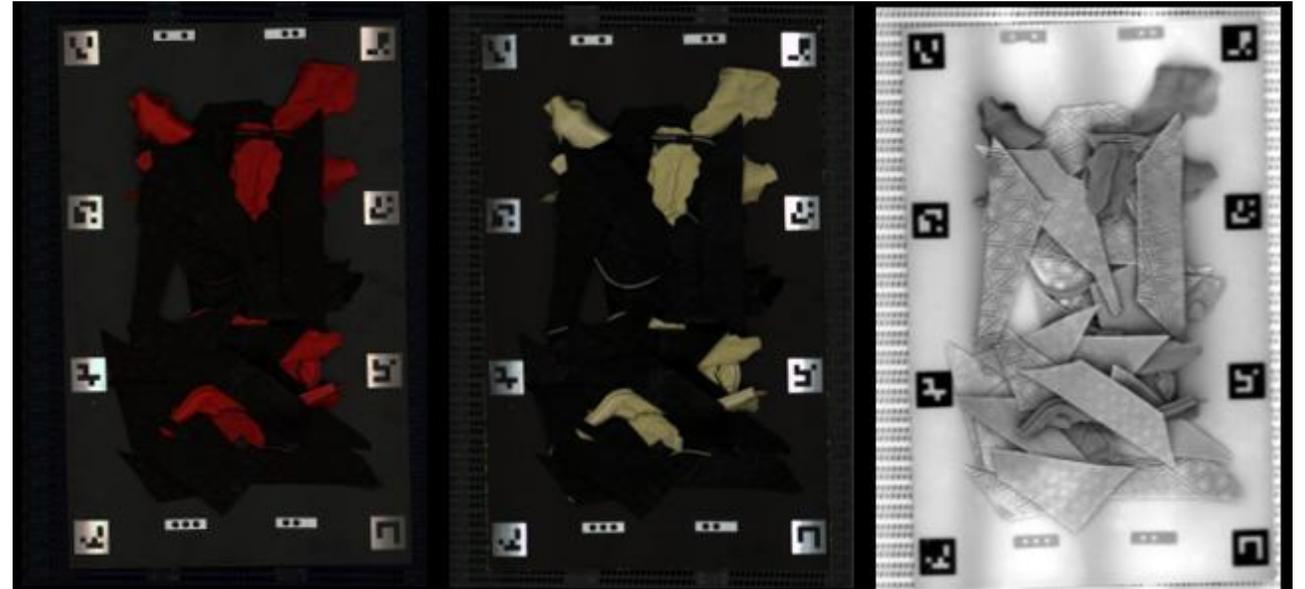


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (3)

Ergebnisse für Gummi

- Von links nach rechts: VIS-NIR-Thermographie
- Schwarzes Gummi für VIS und NIR quasi unsichtbar
- Thermographie sieht auch schwarzes Gummi

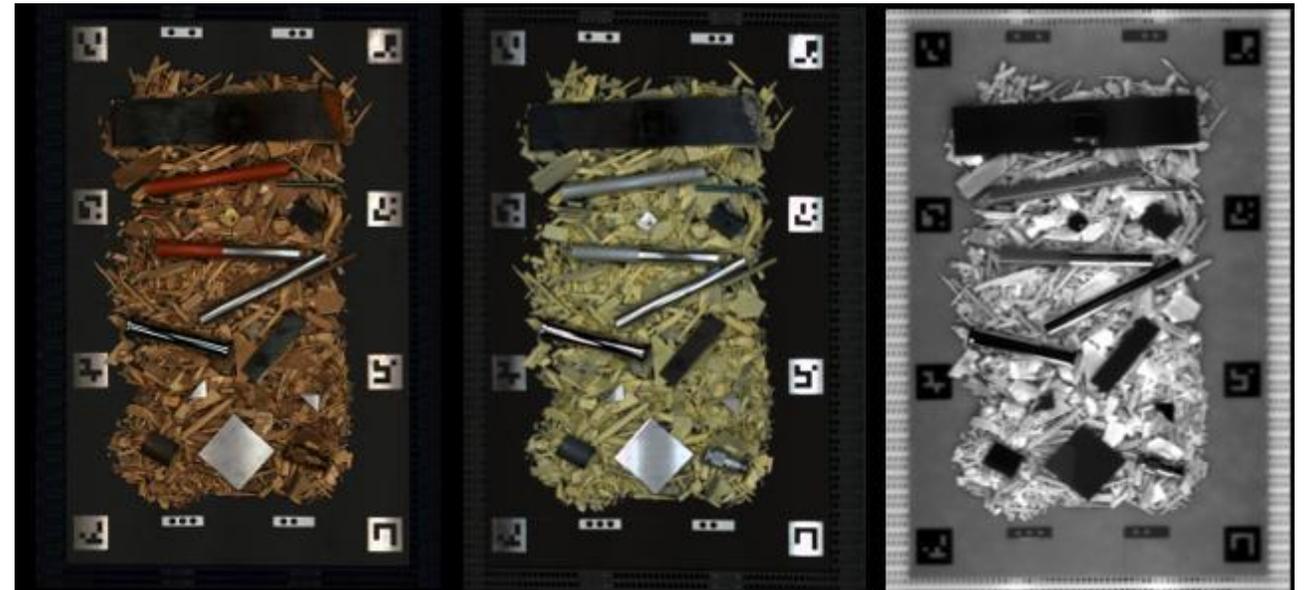


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (4)

Ergebnisse für Metall und Holz

- Von links nach rechts: VIS-NIR-Thermographie
- „Buntes Bild“ im VIS und im NIR
- In der Thermographie erscheinen Metalle einheitlich dunkel

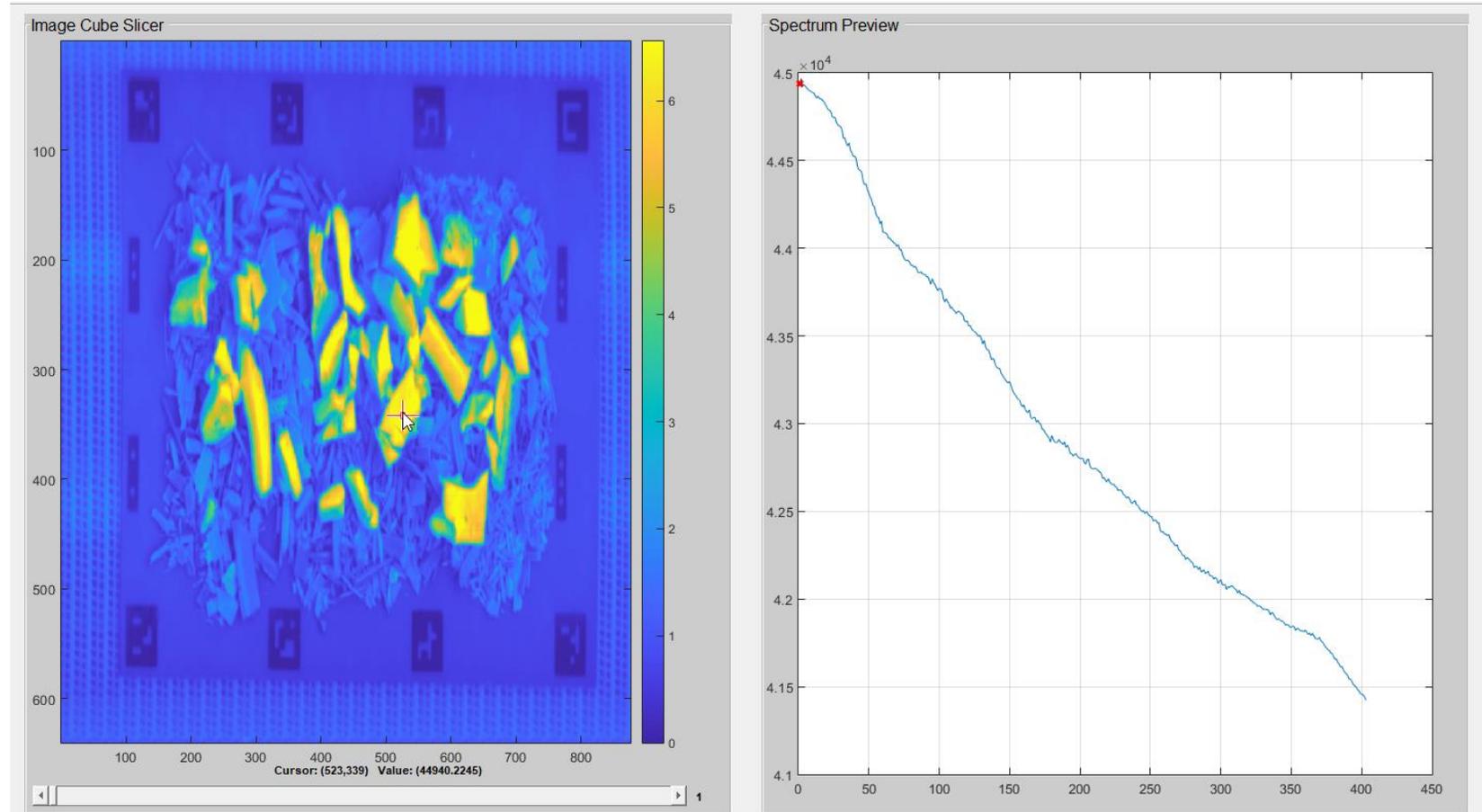


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (5)

Sensorfusion

- VIS, NIR: Intensität als Funktion der Wellenlänge
- Thermographie: $T(t)$
- Pixelgenaue Registrierung!
- Abrollung

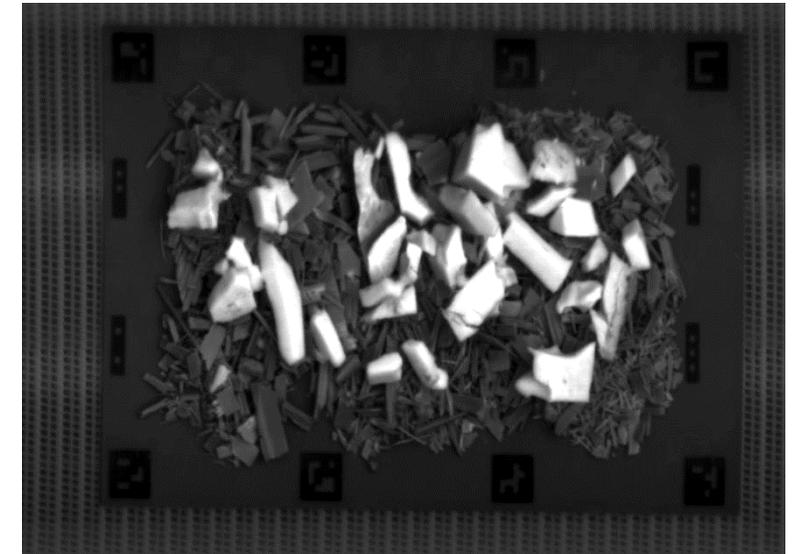
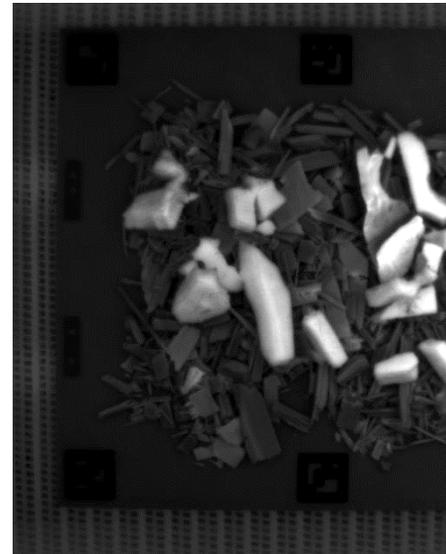


Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (6)

Abrollung

- Für quantitative Auswertung erforderlich
- Thermografie-Sequenz so umordnen, dass für jeden Pixel die Zeitabhängigkeit der Temperatur bestimmt werden kann
- Einzelne Bilder der Sequenz zeigen das Objekt auf unterschiedlichen Positionen
- Umordnung erzeugt quasi-stationäre Aufnahme, in der das Objekt in jedem Bild (fast) auf der gleichen Position ist



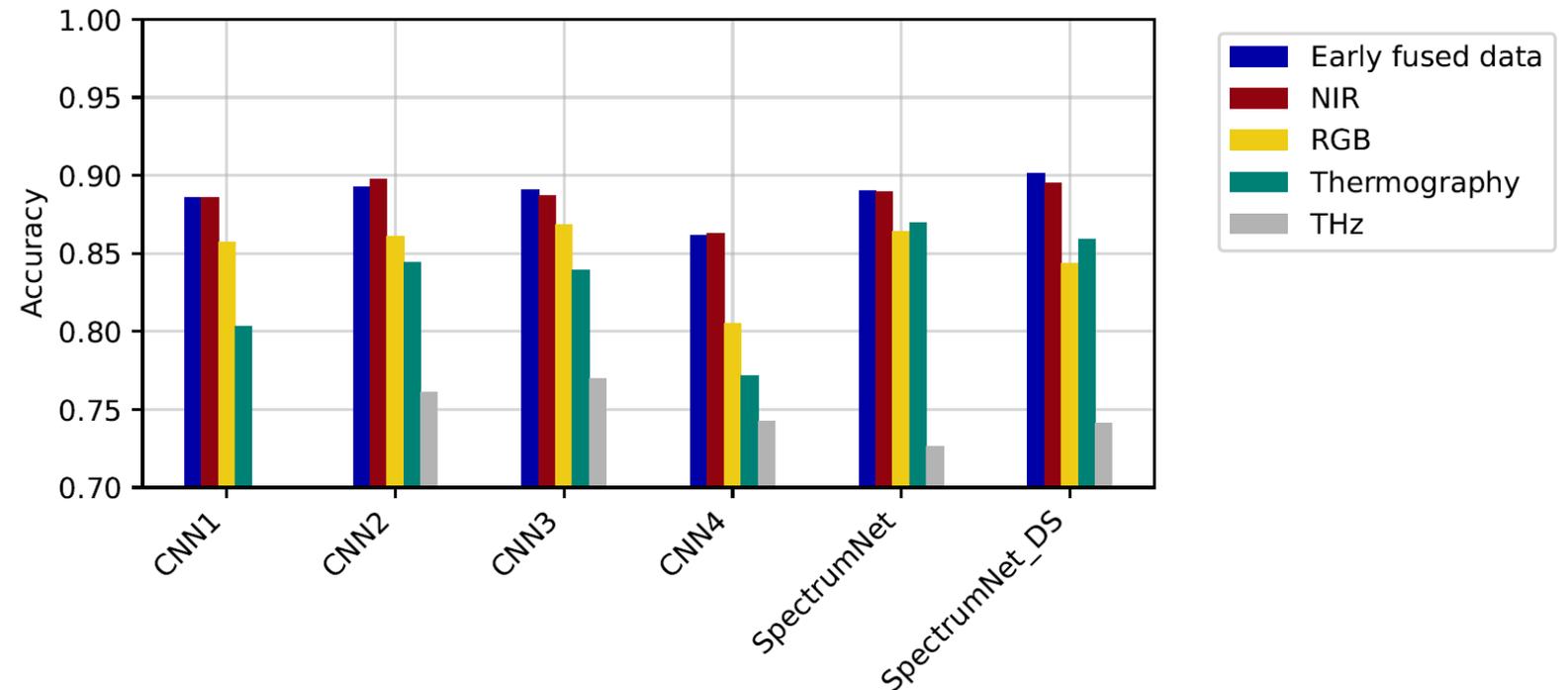
Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (7)

Klassifikationsgenauigkeit für verschiedene Sensoren und neuronale Netze

- Künstliche Sperrmüllproben
- Thermografie: Schnappschuss
- T(t) nicht ausgewertet

M. Bihler; L. Roming; Y. Jiang; A. J. Afifi; J. Aderhold; D. Čibiraitė-Lukenskienė et al., Multi-sensor data fusion using deep learning for bulky waste image classification, In: J. Beyerer und M. Heizmann (Hg.): Automated Visual Inspection and Machine Vision V, Bd. 12623. International Society for Optics and Photonics: SPIE, 126230B (2023):



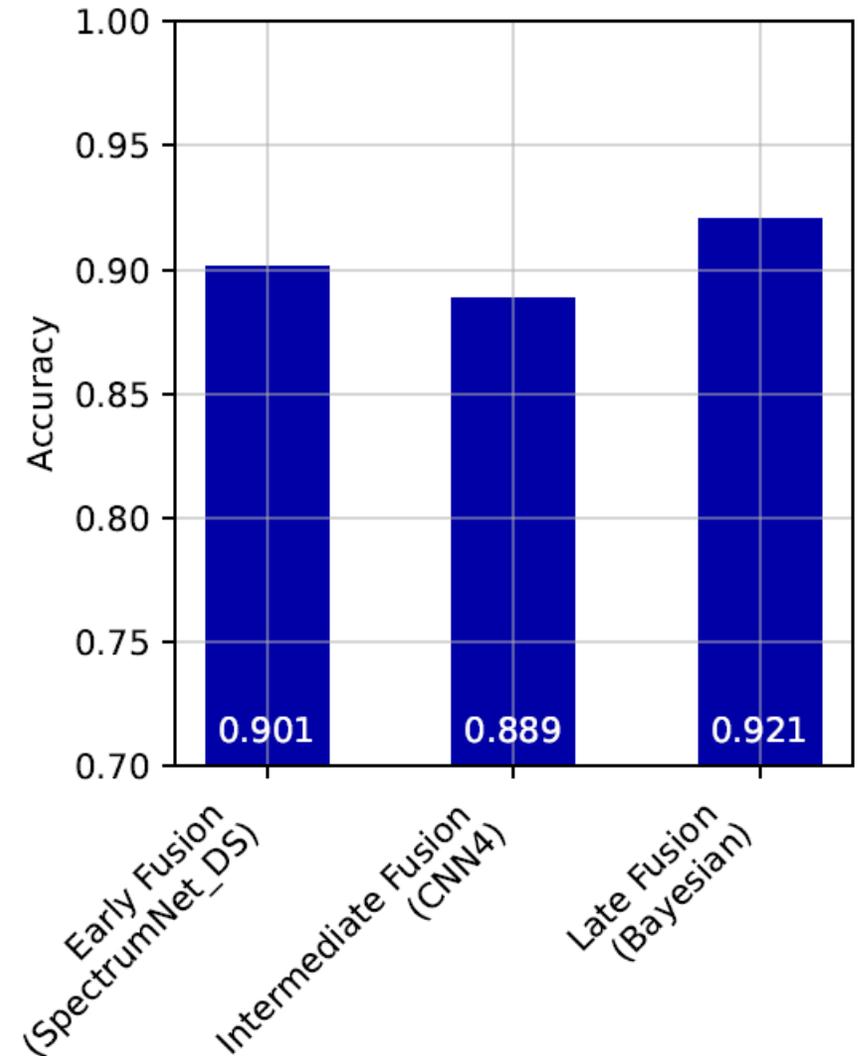
Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (8)

Klassifikationsgenauigkeit für verschiedene Fusionsansätze

- Künstliche Sperrmüllproben
- Thermografie: Schnappschuss
- T(t) nicht ausgewertet

M. Bihler; L. Roming; Y. Jiang; A. J. Afifi; J. Aderhold; D. Čibiraitė-Lukenskienė et al., Multi-sensor data fusion using deep learning for bulky waste image classification, In: J. Beyerer und M. Heizmann (Hg.): Automated Visual Inspection and Machine Vision V, Bd. 12623. International Society for Optics and Photonics: SPIE, 126230B (2023):



Exkurs

Normung der Thermographie mit Relativbewegung (1)

- Entwurf DIN 54187
- Arbeitsausschuss NA 062-08-27 AA „Thermografische Prüfung“
 - DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)
- Stand September 2024
 - Normentwurf liegt vor und wird demnächst veröffentlicht.

Altholzgewinnung aus Sperrmüll

Erste Ergebnisse (8)

Sortiersversuch am WKI am 7.-10.8.2023

- Echter Sperrmüll von Alba Braunschweig
- Alle vier Sensorsysteme im Einsatz
- Auswertung läuft



Störstofferkennung in Altholz

Einführung (1)

Beispiel: Störstofferkennung in Altholz

- In Deutschland fallen ca. 8 Millionen Tonnen Altholz pro Jahr an
- Nur ca. 30% davon werden stofflich genutzt (Spanplatten)
- Mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz darf nicht stofflich genutzt werden
 - AT: Recyclingholzverordnung
 - DE: Altholzverordnung
- Idee: Mit Holzschutzmitteln kontaminiertes Holz erkennen und aussortieren, um stoffliche Nutzung zu erleichtern



Störstofferkennung in Altholz

Einführung (2)

Ansatz: NIR-Spektroskopie!

- Viele organische Materialien haben im NIR charakteristische Spektren
- Infrarotspektren gehen auf Rotationen und Schwingungen der Moleküle zurück
 - Grundfrequenzen liegen im mittleren und fernen Infrarot
 - Charakteristisch für funktionelle Gruppe
 - Oberschwingungen liegen im nahen Infrarot
 - Charakteristisch für spezifische Verbindungen

Störstofferkennung in Altholz

Einführung (3)

Modell: Holzproben mit unterschiedlichen Anteilen von

- PCP
- Lindan
- Kupfersalzen
- Borsäure
- Benzalkoniumchlorid
- Propiconazol
- Didecylpolyoxethylammoniumborat



Störstofferkennung in Altholz

Auswertung (1)

Erster Schritt:

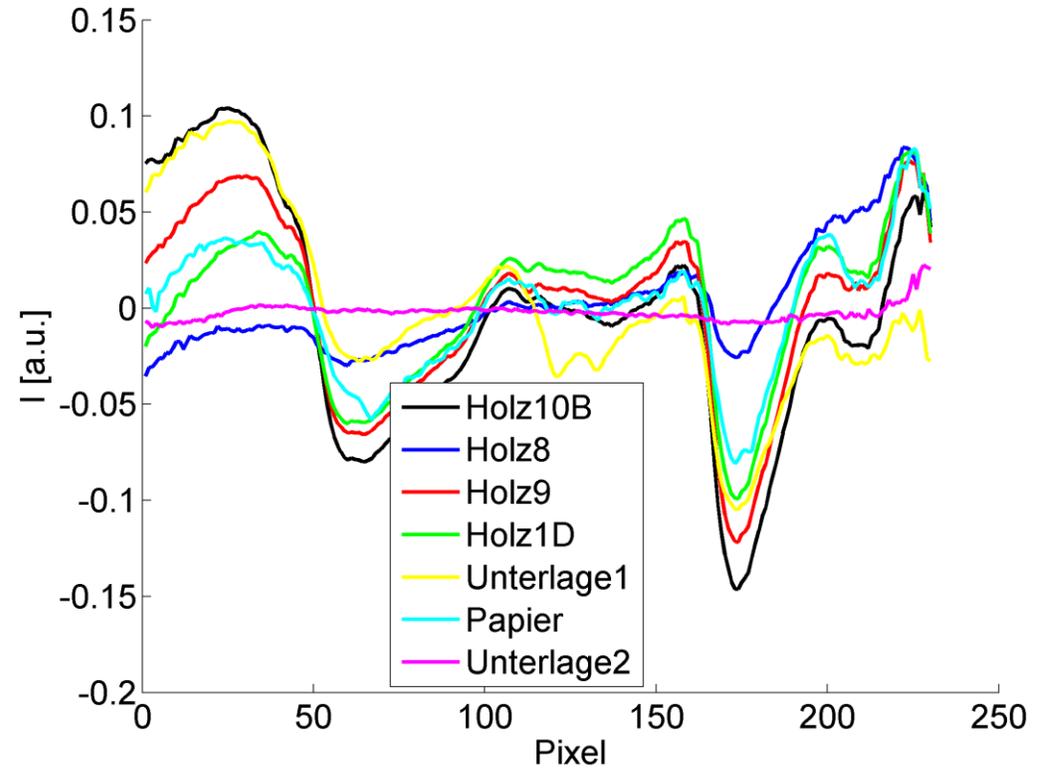
- Aus dem Spektralwürfel Gebiete chemisch einheitlicher Oberflächen ausschneiden
- Mittenzentrierung: Spektren über spektrale Dimension mitteln, Mittelwert von den Rohdaten abziehen
- Beurteilung möglich, ob Spektren überhaupt getrennt werden können
- Eventuell Auswertung auf bestimmte Wellenlängenbereiche einschränken



Störstofferkennung in Altholz

Auswertung (2)

Mittenzentrierte Rohspektren

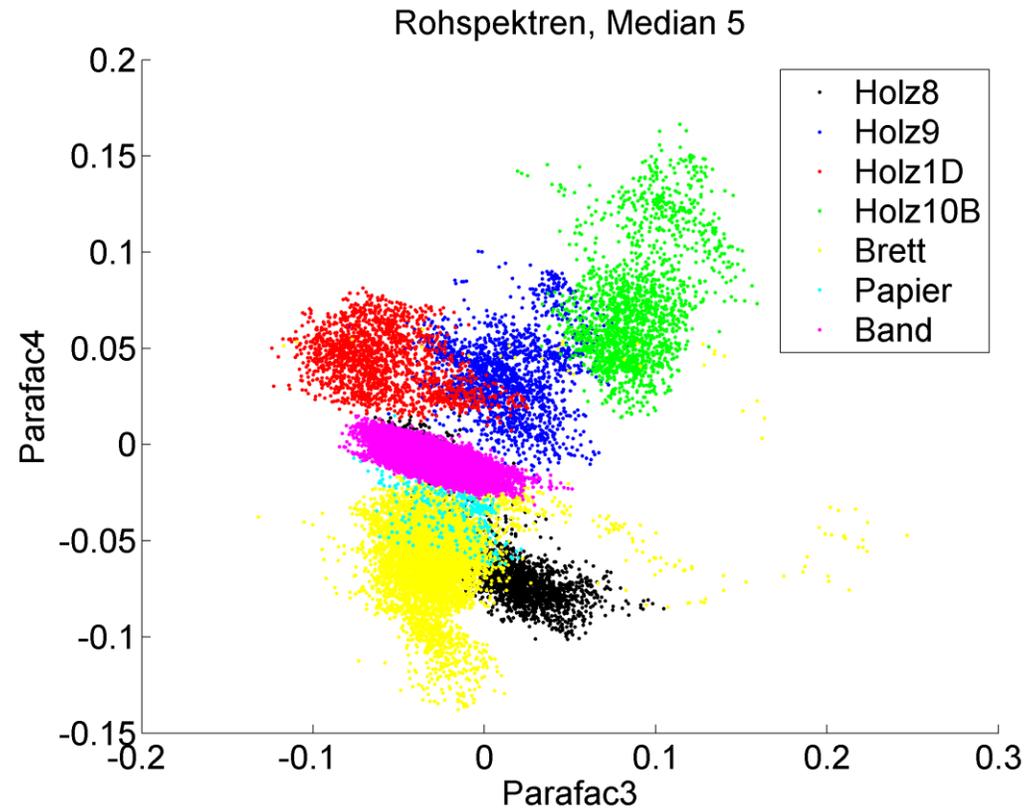


Störstofferkennung in Altholz

Auswertung (3)

PARAFAC-Komponenten 3 und 4

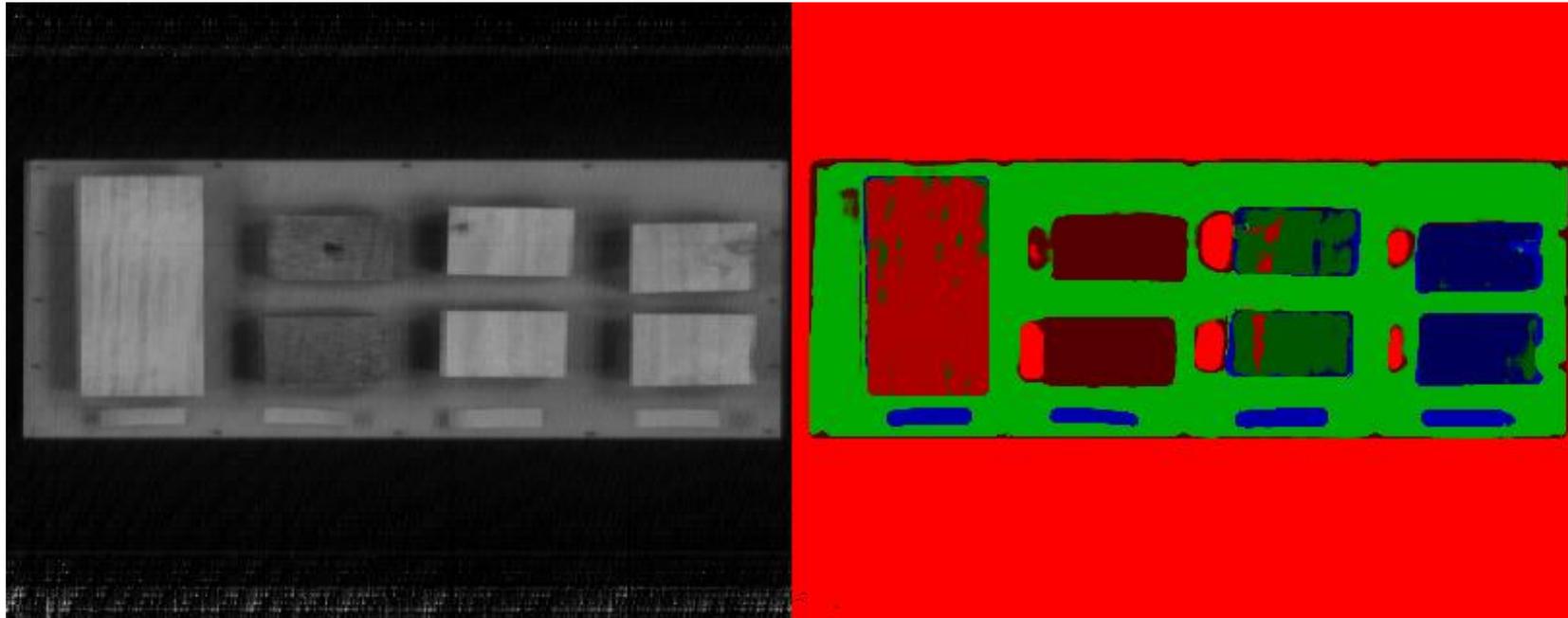
- Kanonische dyadisch Dekomposition



Störstofferkennung in Altholz

Auswertung (4)

Ergebnis der Linearen Diskriminanzanalyse

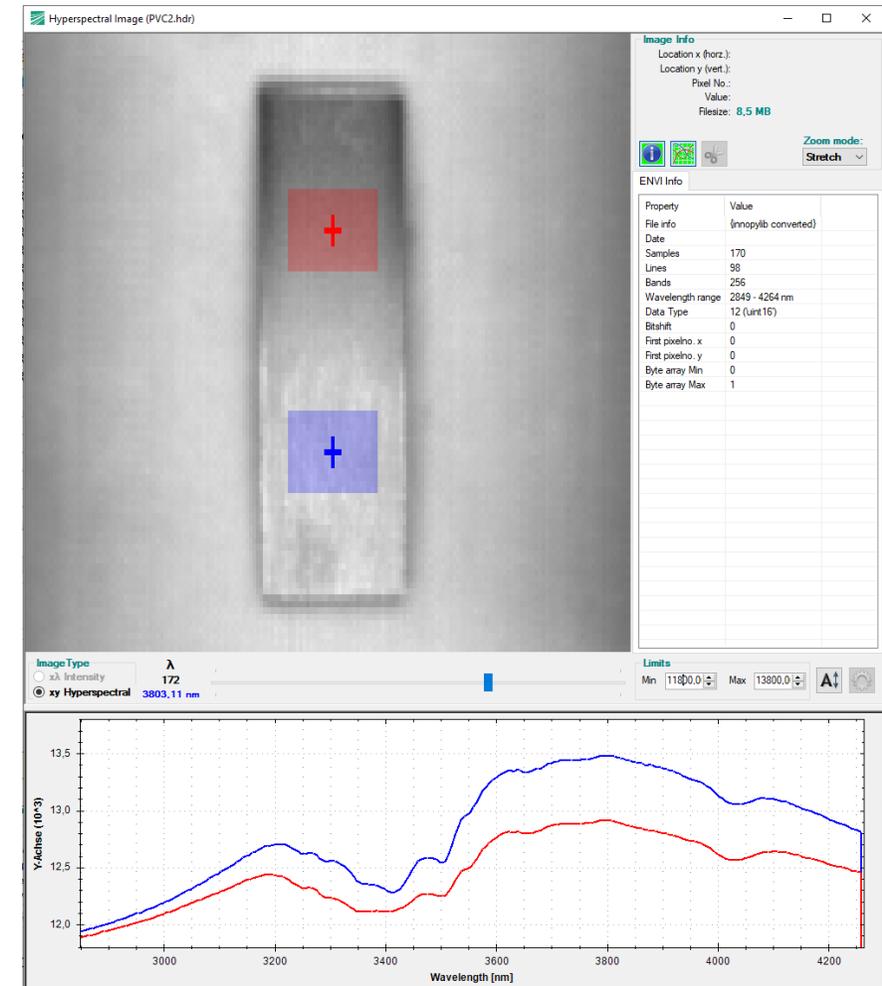
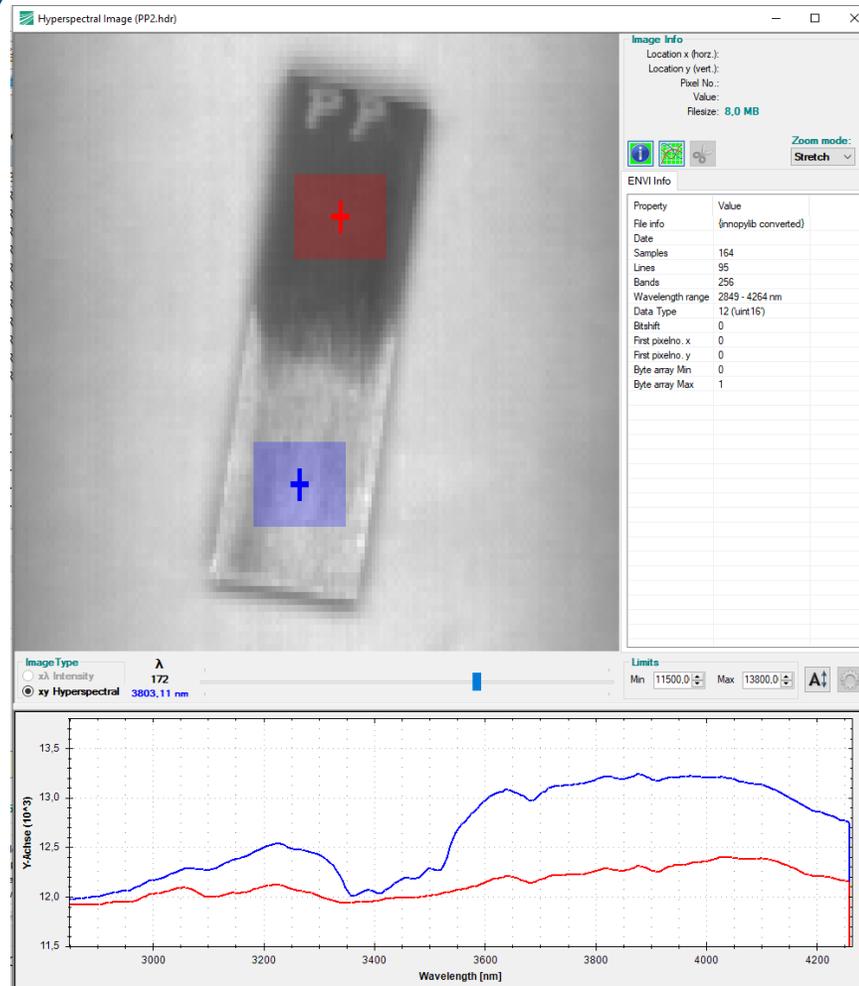


Störstofferkennung in Altholz

MWIR-Ergebnisse (1)

Bildgebende MWIR-Spektroskopie

- Kantenanleimer
- Links: PP
- Rechts: PVC
- Oben: Originalzustand
- Unten: nach Aufrauung
- Unterscheidung PP-PVC möglich

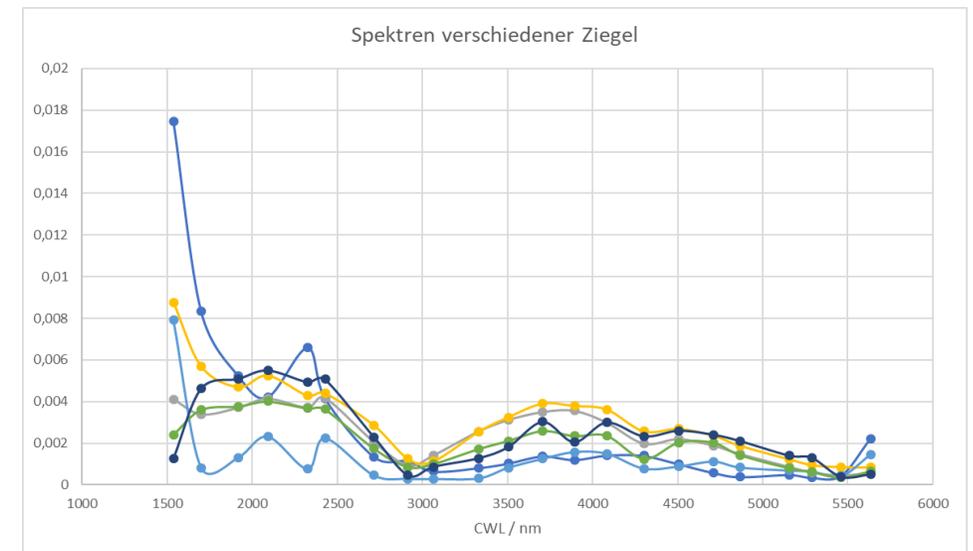


Ausblick

Projekt »SeSoBa«: Sensorgestützte Sortierung von Bauschutt

Ziel des Projektes:

- Innovatives Recycling- und Verwertungsverfahren
 - Steigerung der Ressourceneffizienz von Bau- und Abbruchabfällen
- Entwicklung verbesserter Sortierverfahren
 - NIR und MIR – Spektroskopie
 - MIR: Thermografie-Kamera als Detektor
- Entwicklung neuer Recyclingverfahren für mineralische Materialien
 - Beton, Ziegel, Sandstein etc.



Ausblick

Sortierung von Laubschnittholz

Motivation

- Jahrringmuster wichtig für (automatisch) Bestimmung der Festigkeitsklasse
- Jahrringe bei Laubholz schwer erkennbar
- Oberflächennahe Verschmutzungen können Ergebnisse beeinflussen

Ansatz

- Dichteunterschiede zwischen Spätholz und Frühholz mit aktiver Thermografie sichtbar machen
- Kombination mit VIS, NIR, Körperschall
- Deep Learning zur Auswertung



▪ Buchenholzbrett. Links: Fotografie, rechts: Thermografie

Innovative Bildverarbeitung im Altholz-Recycling

Zusammenfassung (1)

Sperrmüllsortierung

- Bilder im VIS, NIR, Thermographie und Terahertz können gemeinsam aufgenommen und registriert werden
- Unterschiedlicher Sensorsysteme sehen unterschiedliche Probeneigenschaften
 - Informationsgewinn
- Nächste Schritte
 - Anlernen des neuronalen Netzwerkes
 - Weiteres Training im realen Sortierbetrieb



Innovative Bildverarbeitung im Altholz-Recycling

Zusammenfassung (2)

Altholzsortierung

- NIR-Verfahren zur Erkennung von Kontaminationen labortauglich

Weitere thermografische Sortierverfahren

- Sortierung von Bauschutt
 - MIR-Spektroskopie
- Sortierung von Laubschnittholz
 - Aktive Thermografie



Kontakt

Dr.-Ing. Jochen Aderhold

Fachbereich HNT

Tel. +49 531 2155-424

jochen.aderhold@wki.fraunhofer.de

Fraunhofer WKI

Riedenkamp 3

38108 Braunschweig

www.wki.fraunhofer.de

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit
