

# 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)

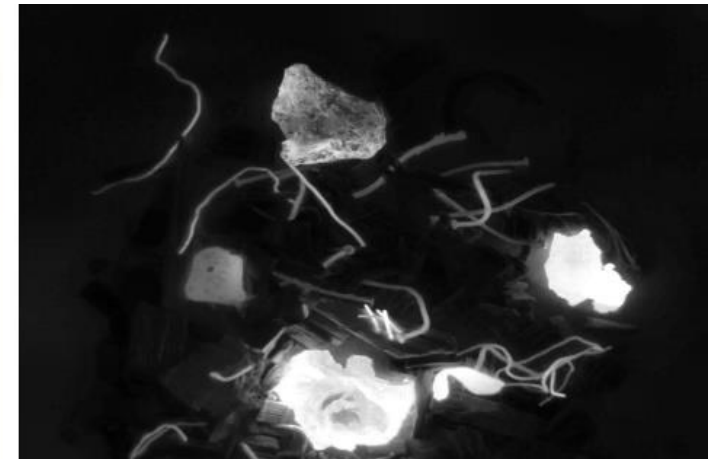
### Stand der Technik bei der Sperrmüllsortierung



# 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

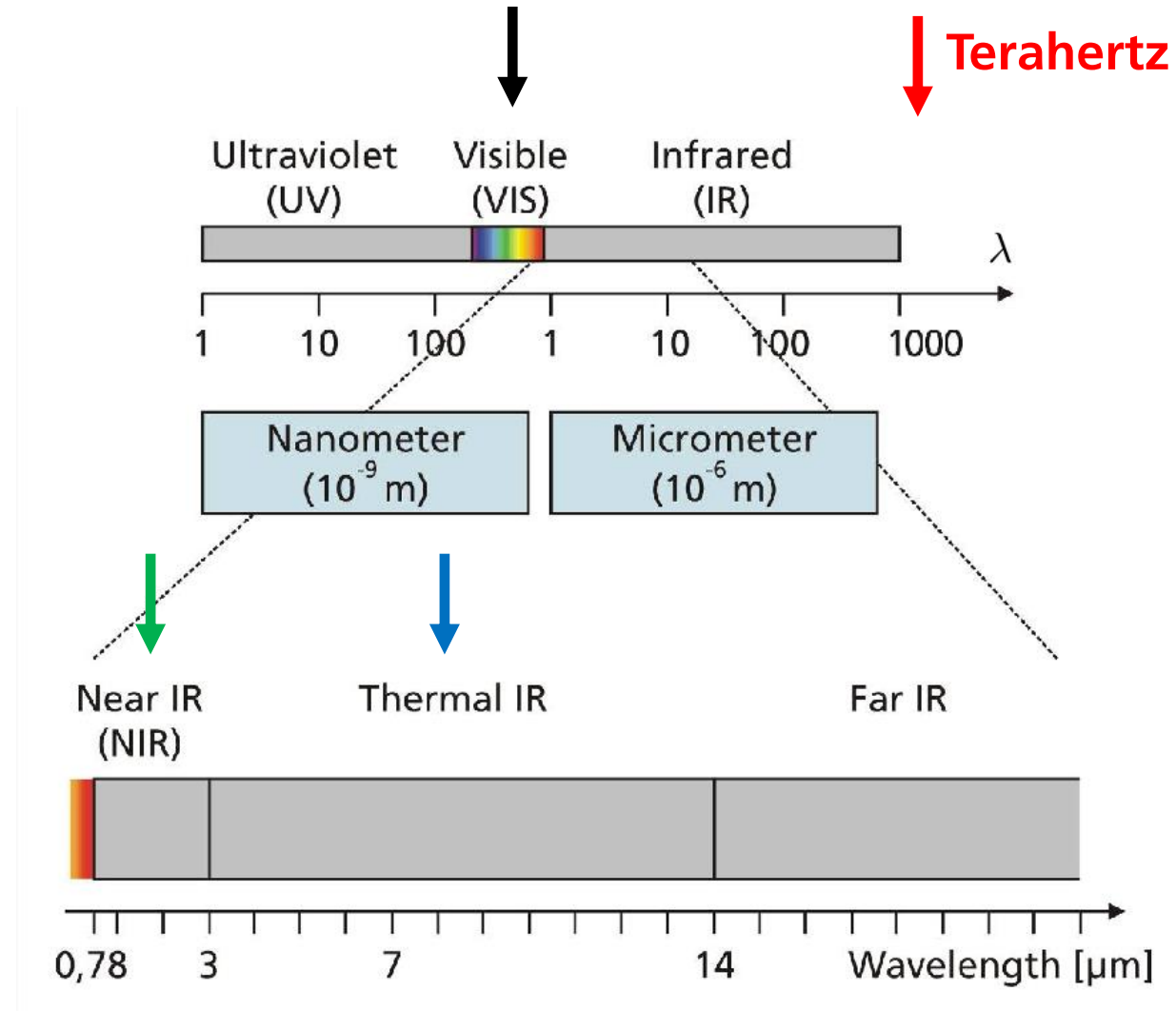


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## Lösungsansatz (2)

### Spektralbereiche

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



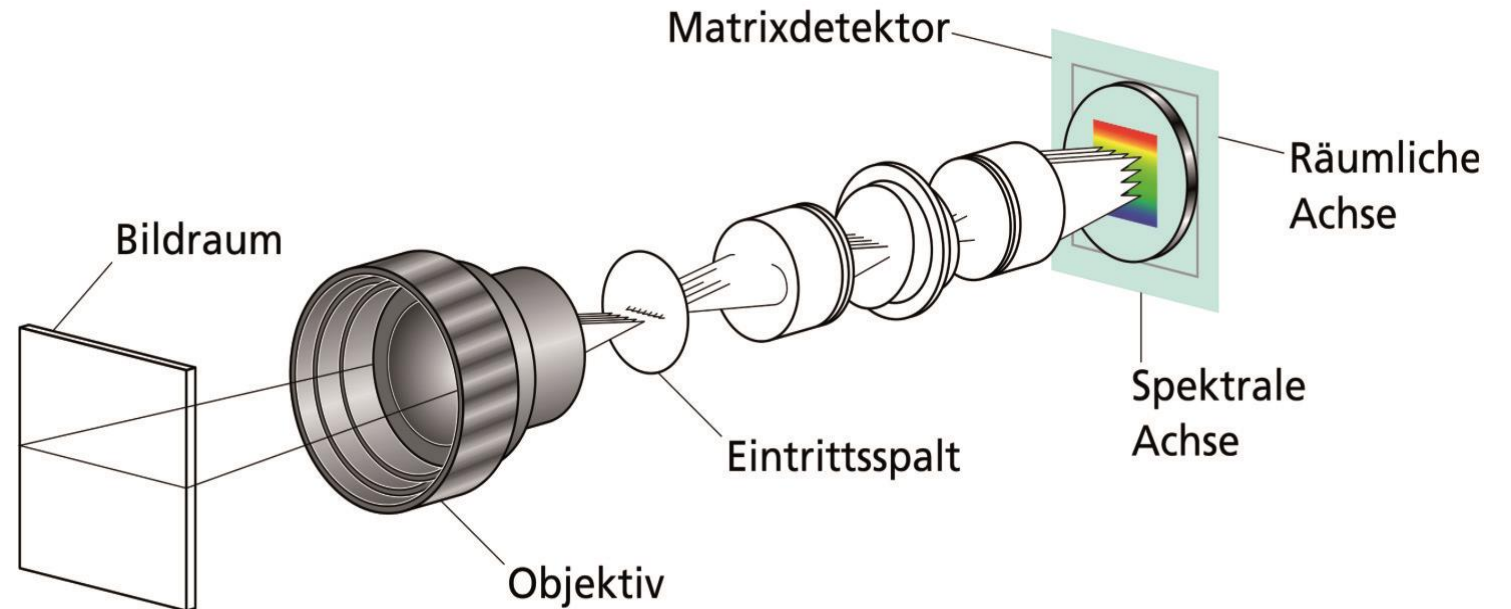


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## 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

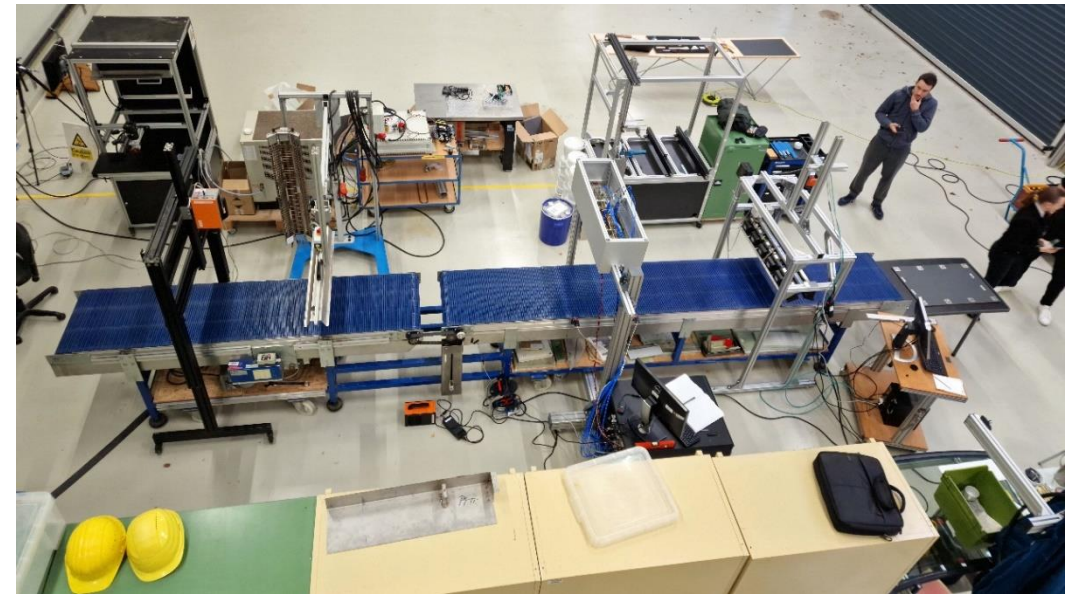
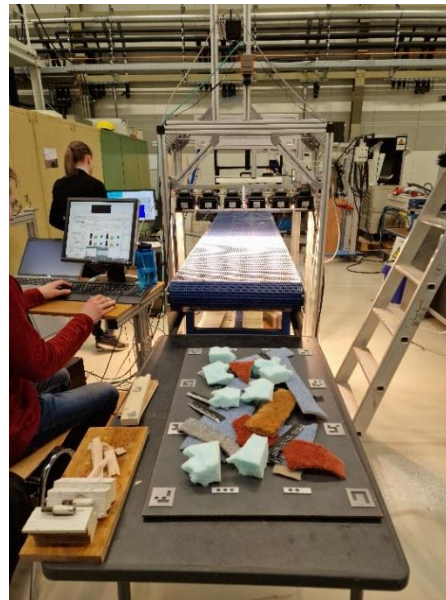


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## 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

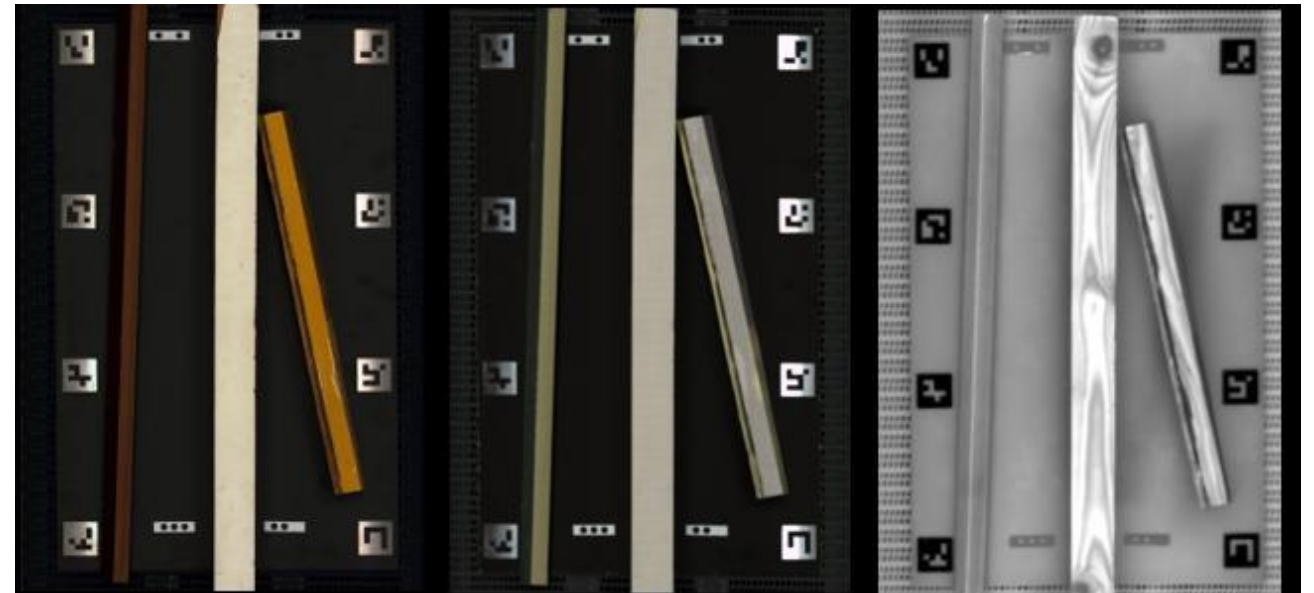


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## Erste Ergebnisse (2)

### Ergebnisse für lackierte Fensterkanten

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

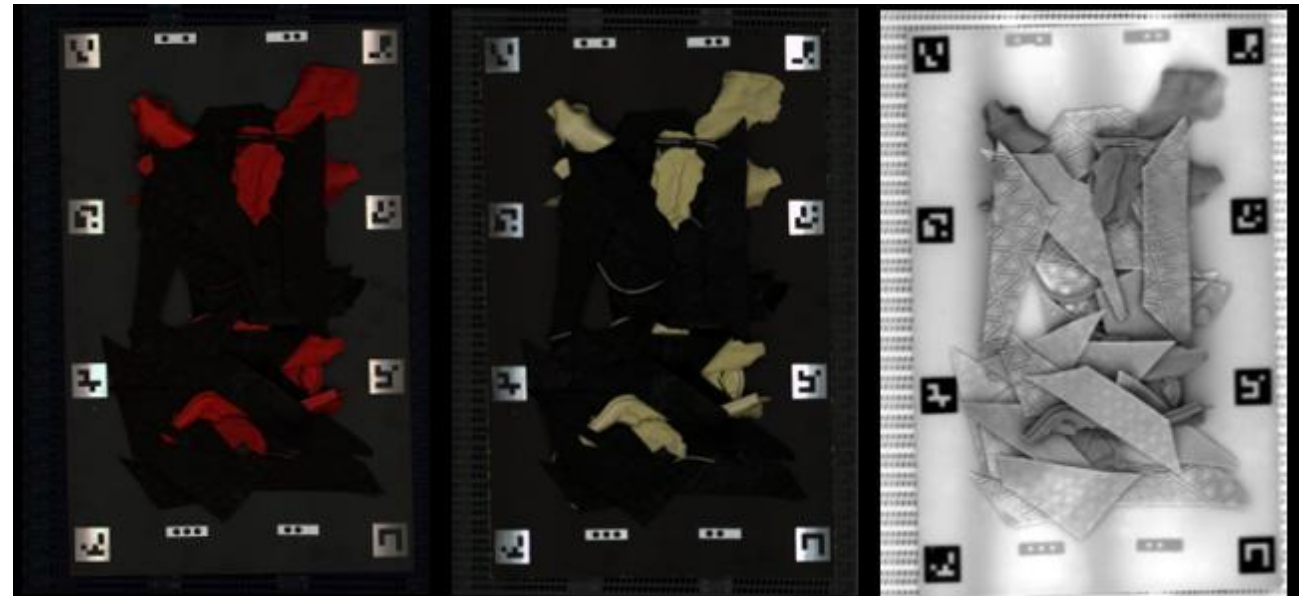


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## 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

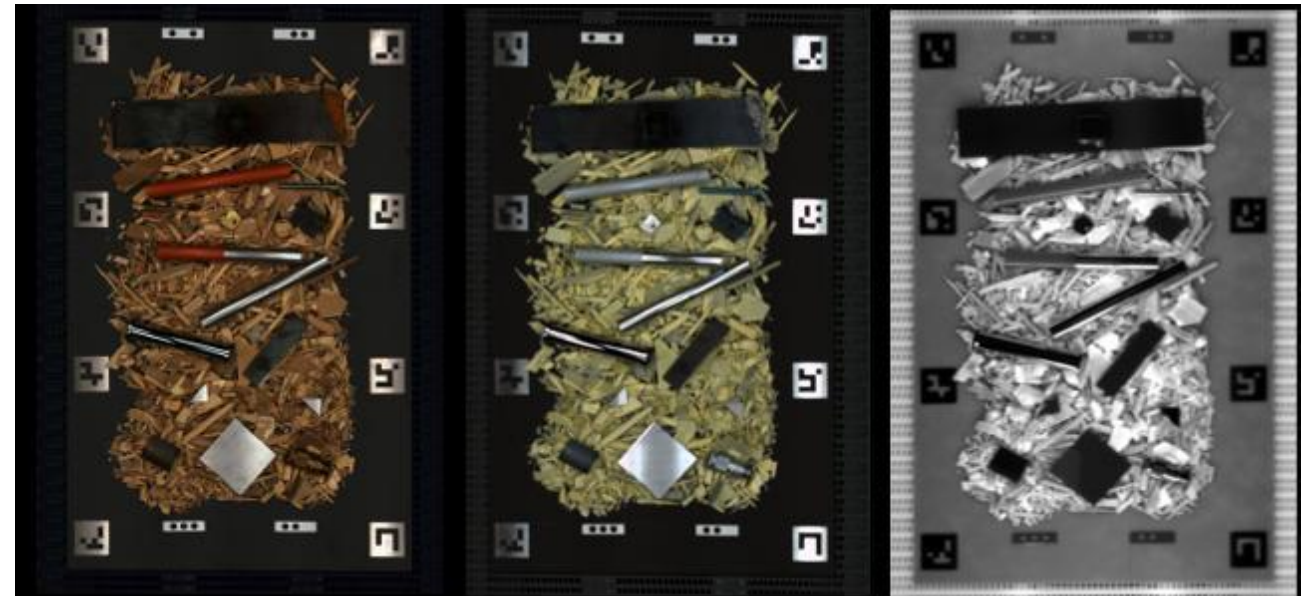


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## 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

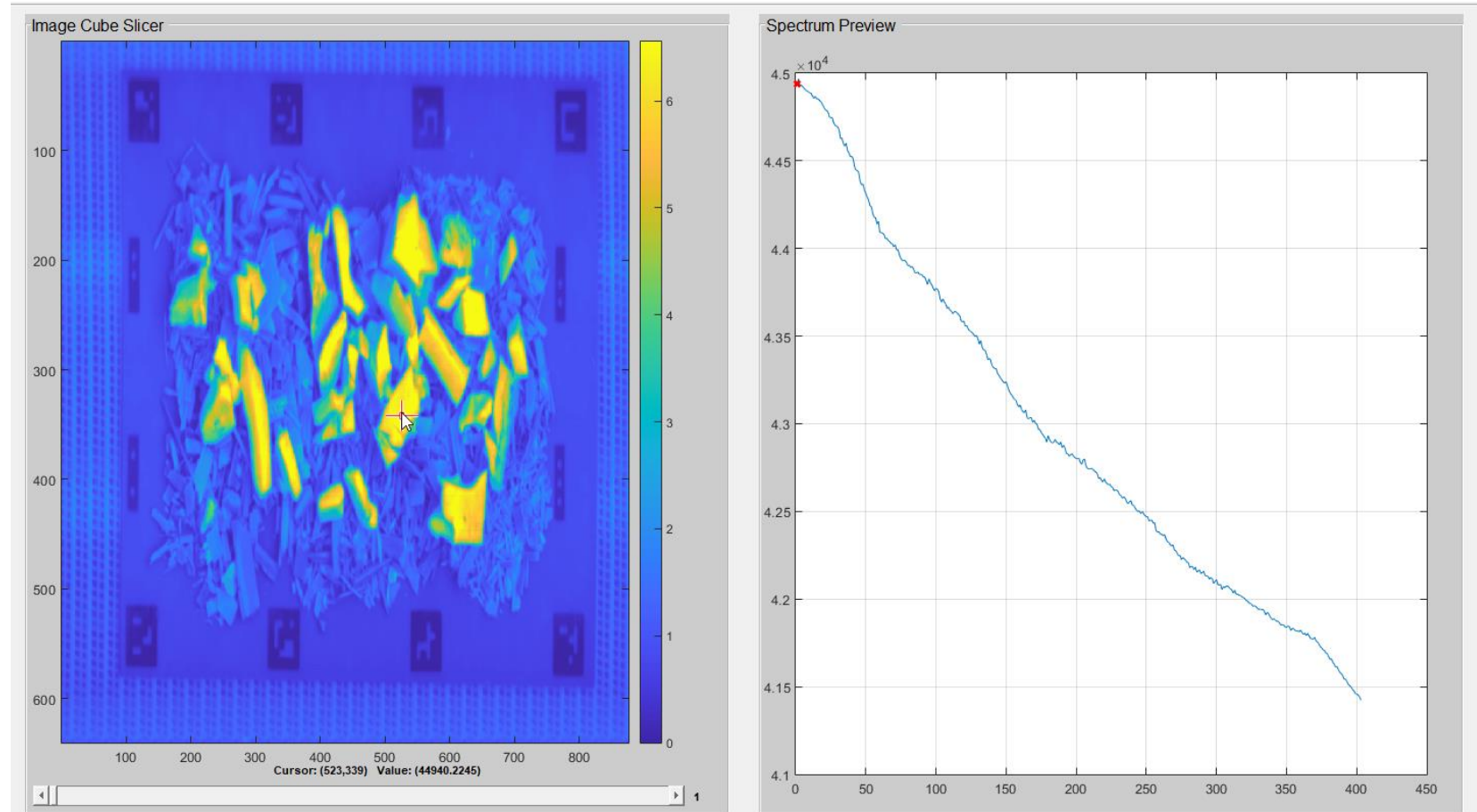


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## Erste Ergebnisse (5)

### Sensorfusion

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

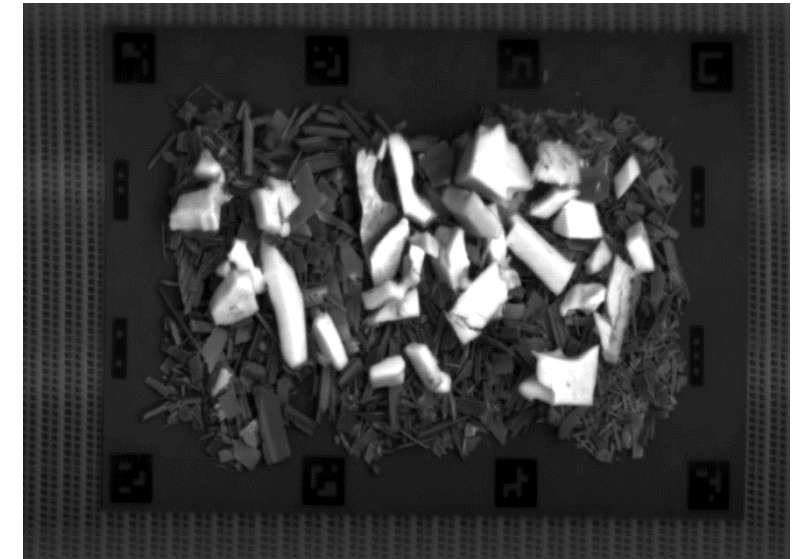
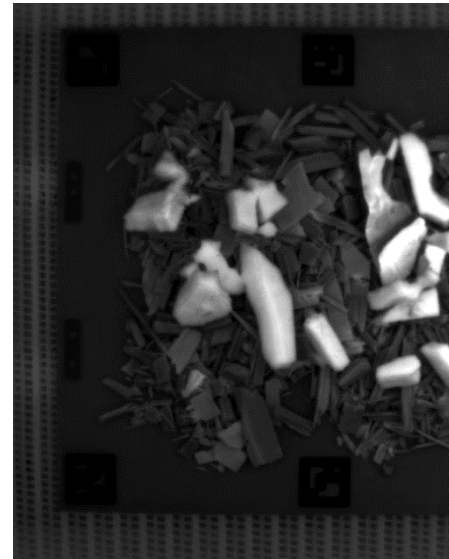


# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## 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





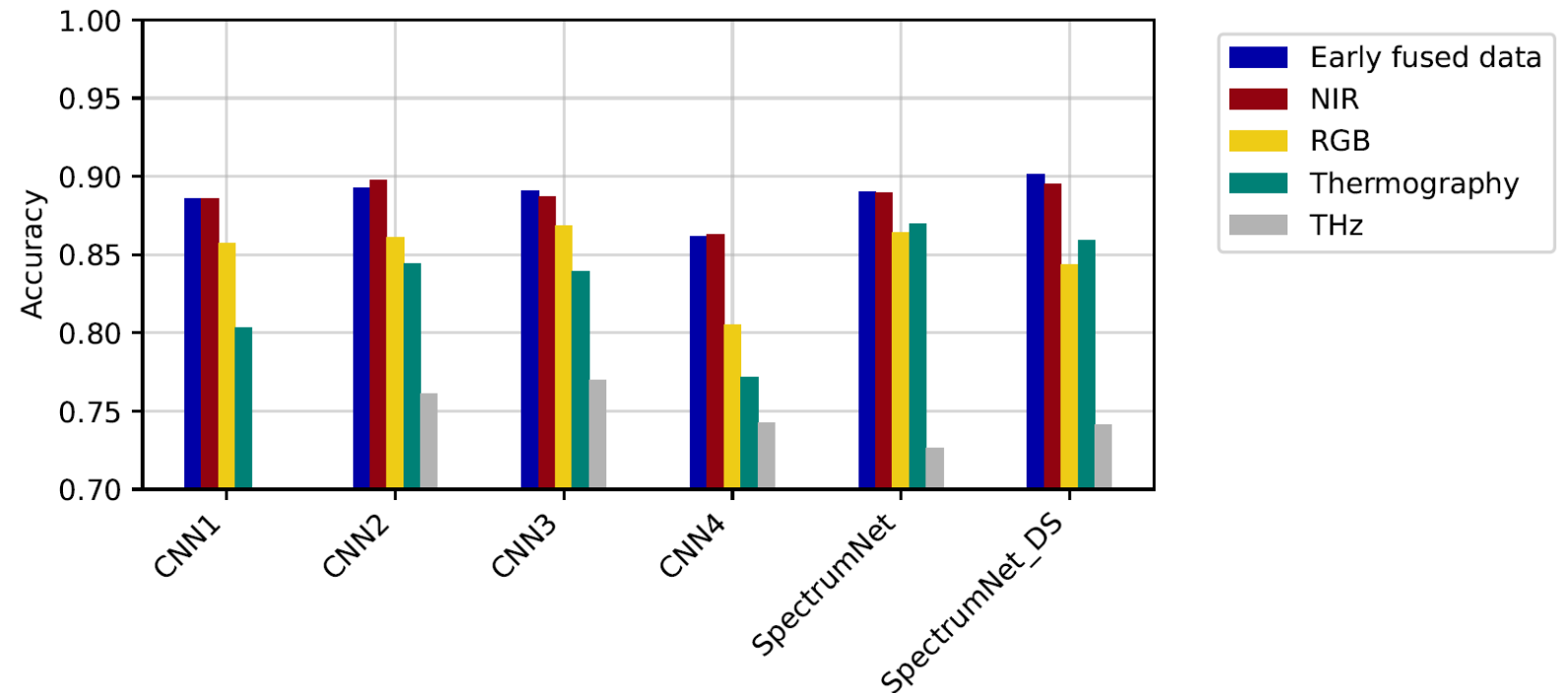
# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

## 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):



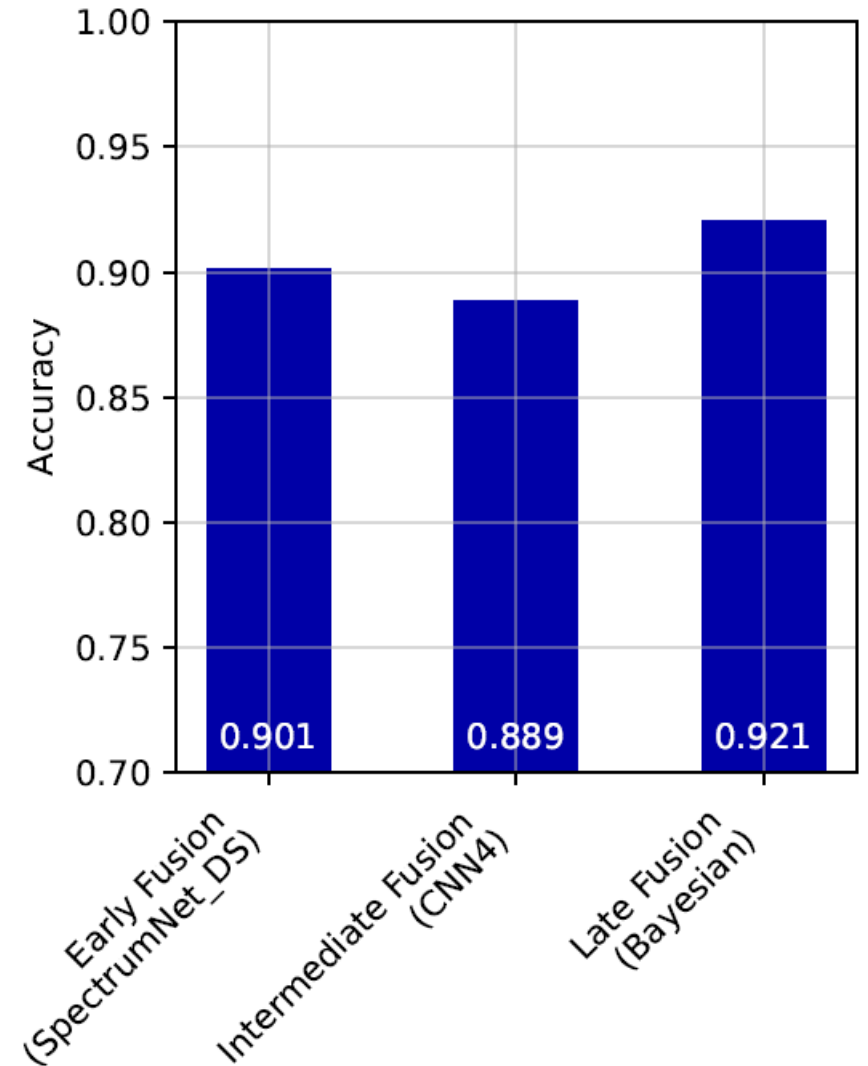
# Altholzgewinnung aus Sperrmüll

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

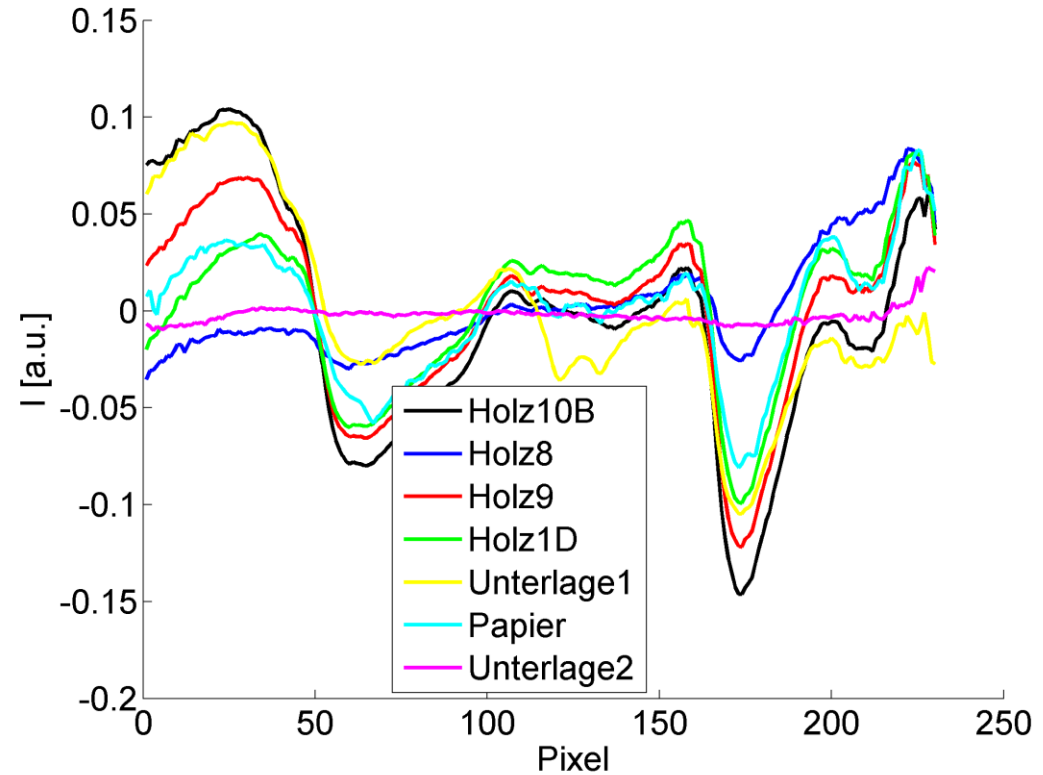




# Störstofferkennung in Altholz

Auswertung (2)

## Mittenzentrierte Rohspektren

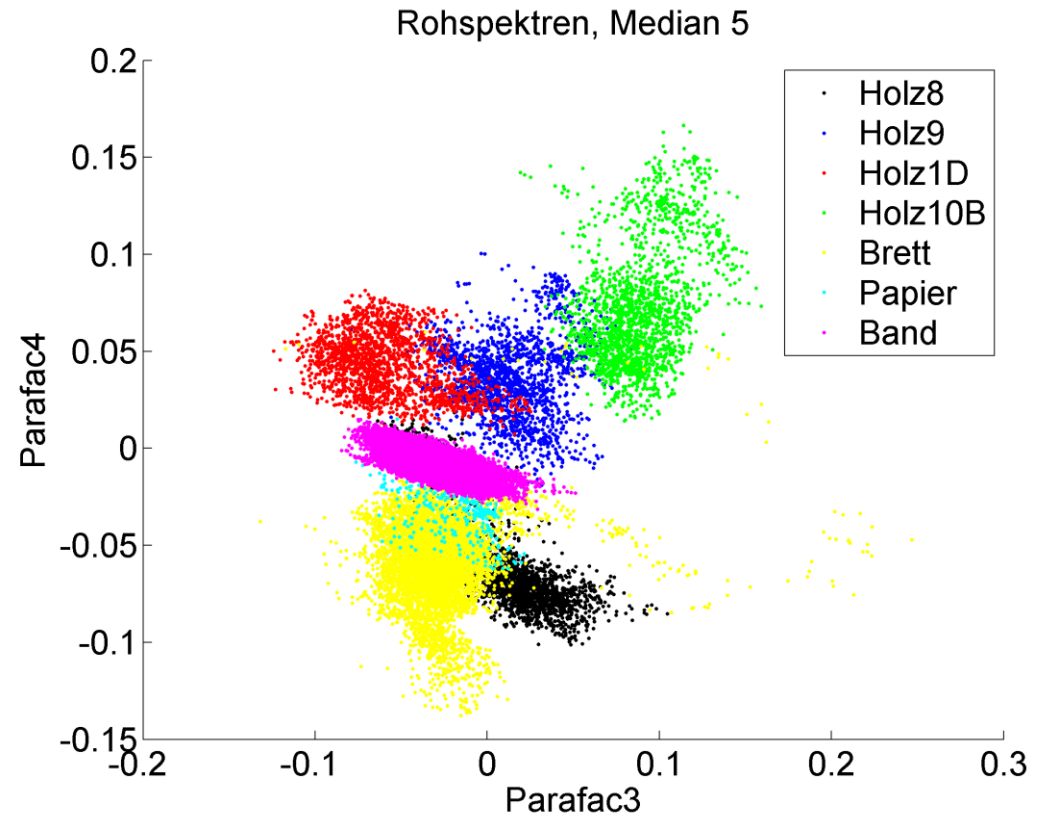


# Störstofferkennung in Altholz

Auswertung (3)

## PARAFAC-Komponenten 3 und 4

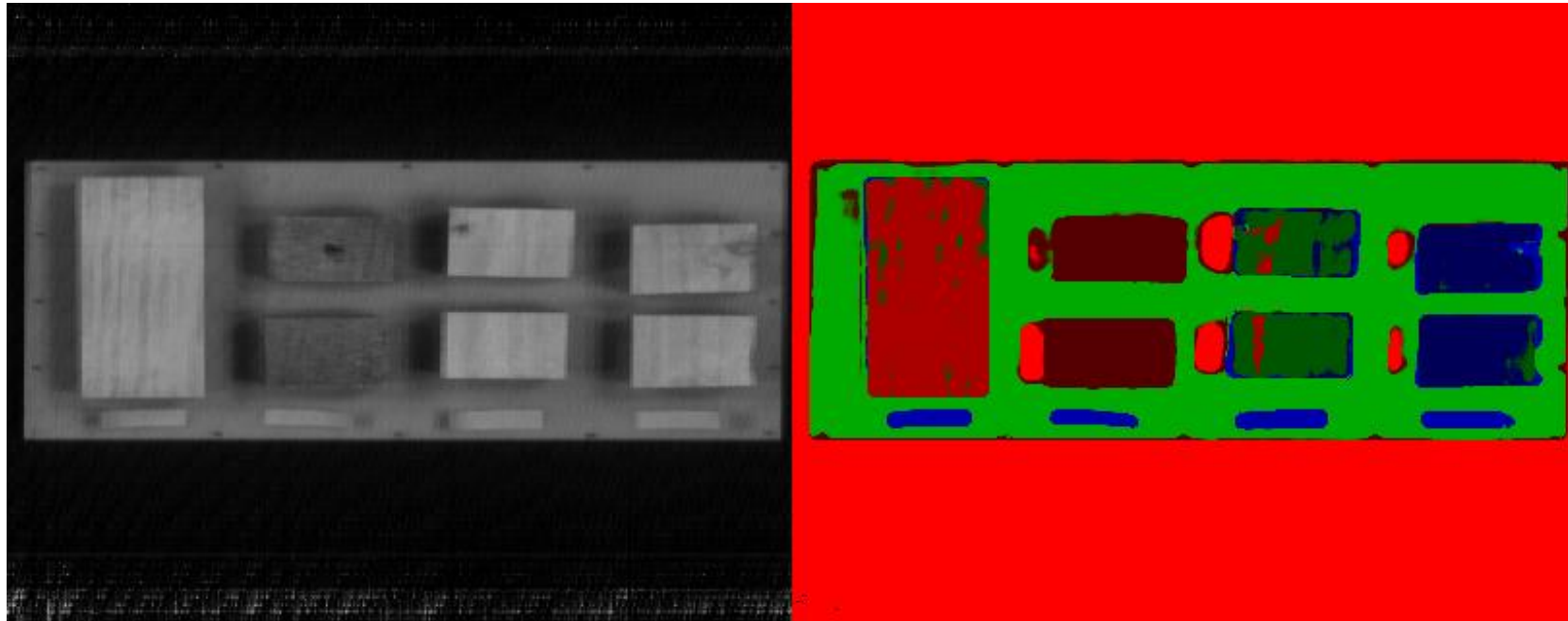
- Kanonische dyadisch Dekomposition



# Störstofferkennung in Altholz

Auswertung (4)

## Ergebnis der Linearen Diskriminanzanalyse

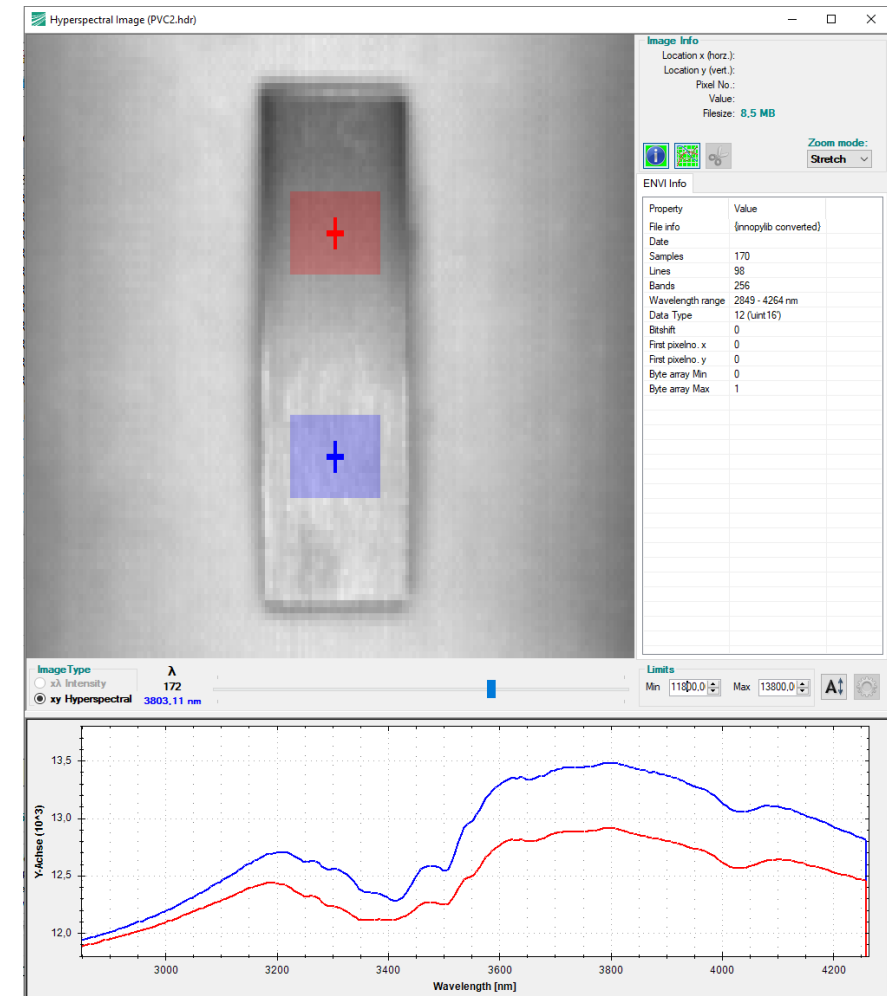
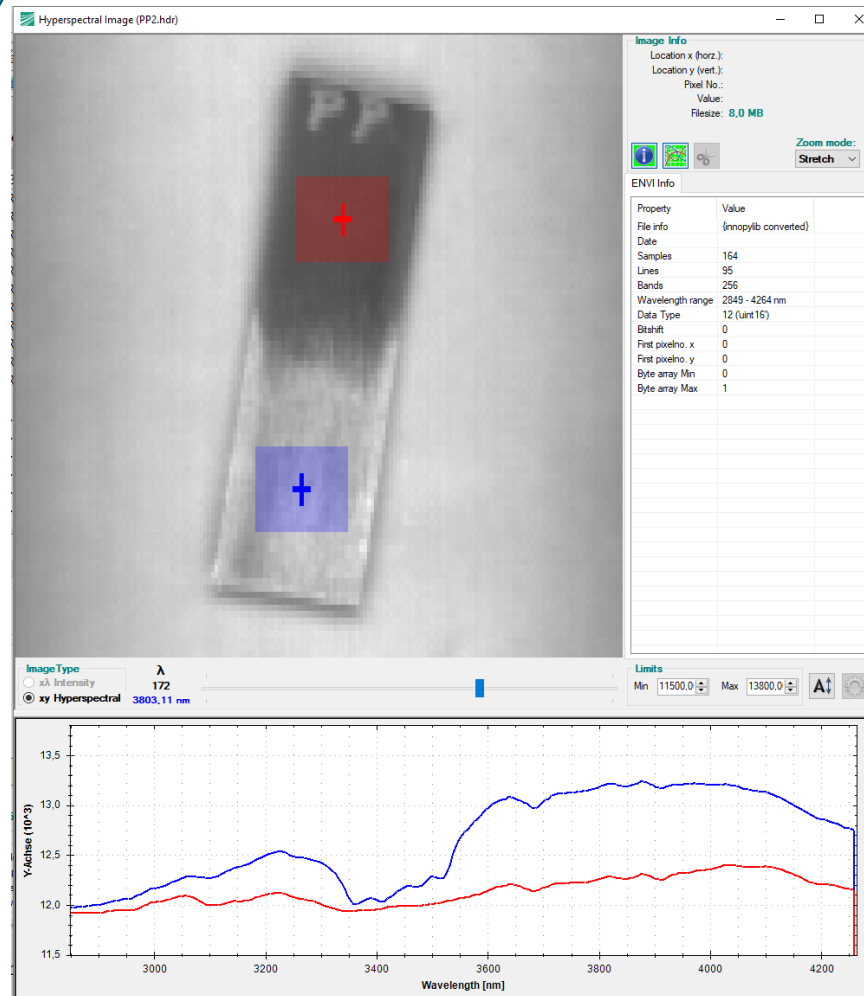


# Störstofferkennung in Altholz

## MWIR-Ergebnisse (1)

### Bildgebende MWIR-Spektroskopie

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

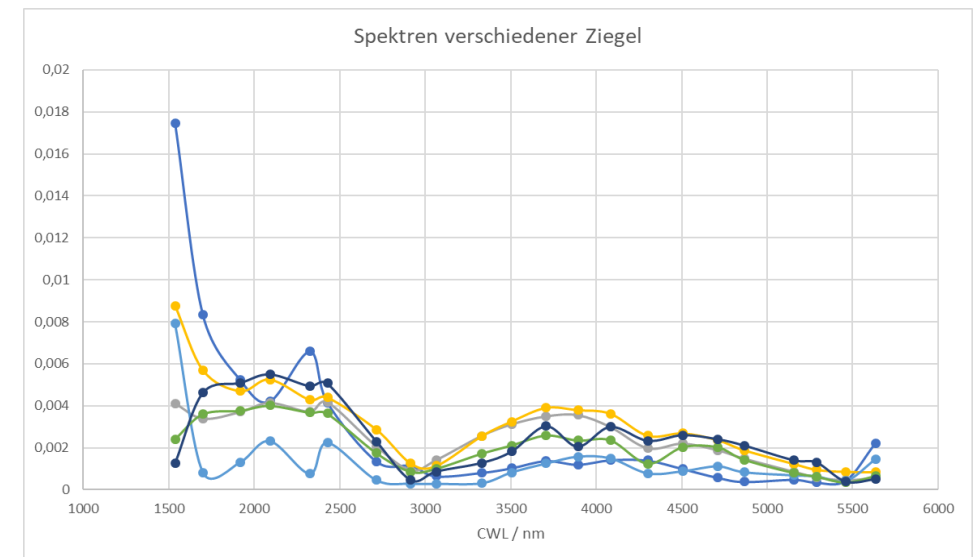


# Ausblick

## 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

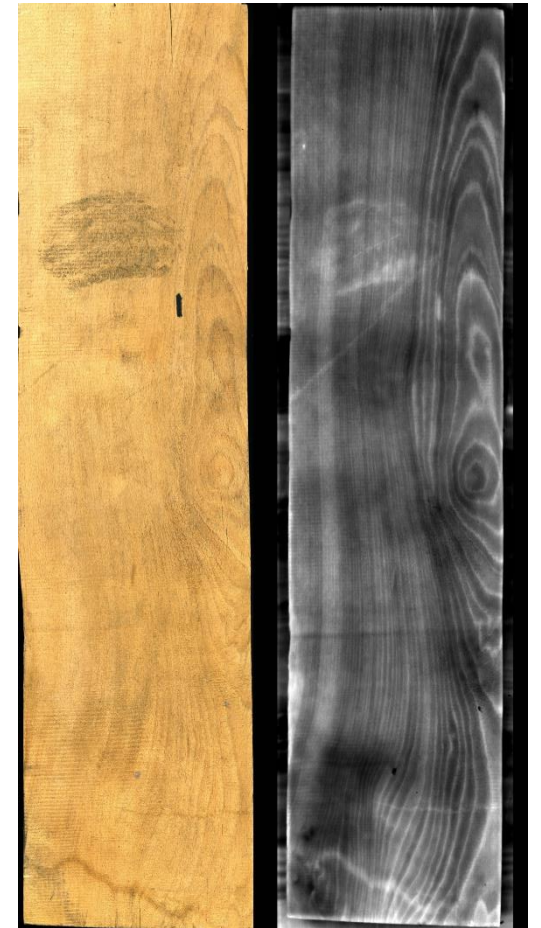
## Sortierung von Laubschnittholz

### 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](mailto:jochen.aderhold@wki.fraunhofer.de)**

Fraunhofer WKI

Riedenkamp 3

38108 Braunschweig

[www.wki.fraunhofer.de](http://www.wki.fraunhofer.de)

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

---