



Wertstoffcharakterisierung in der Kreislaufwirtschaft

29.11.2024, Graz

09:00 - 12:00 Uhr

www.dih-sued.at

Harald Ganster, Gerhard Jakob
FG Intelligent Vision Applications

Agenda

- Wertstoffe und Kreislaufwirtschaft
- Möglichkeiten der Wertstoffcharakterisierung und Sortierung mittels hyperspektraler Sensorik und KI-basierter Auswertung
- Beispielergebnisse aus der Materialcharakterisierung
- Laborführung mit Materialcharakterisierung im Hyperspektrallabor
- Best Practice Schritte für KMUs
- Fragen und Diskussion

Wertstoffe und Kreislaufwirtschaft

Motivation

4

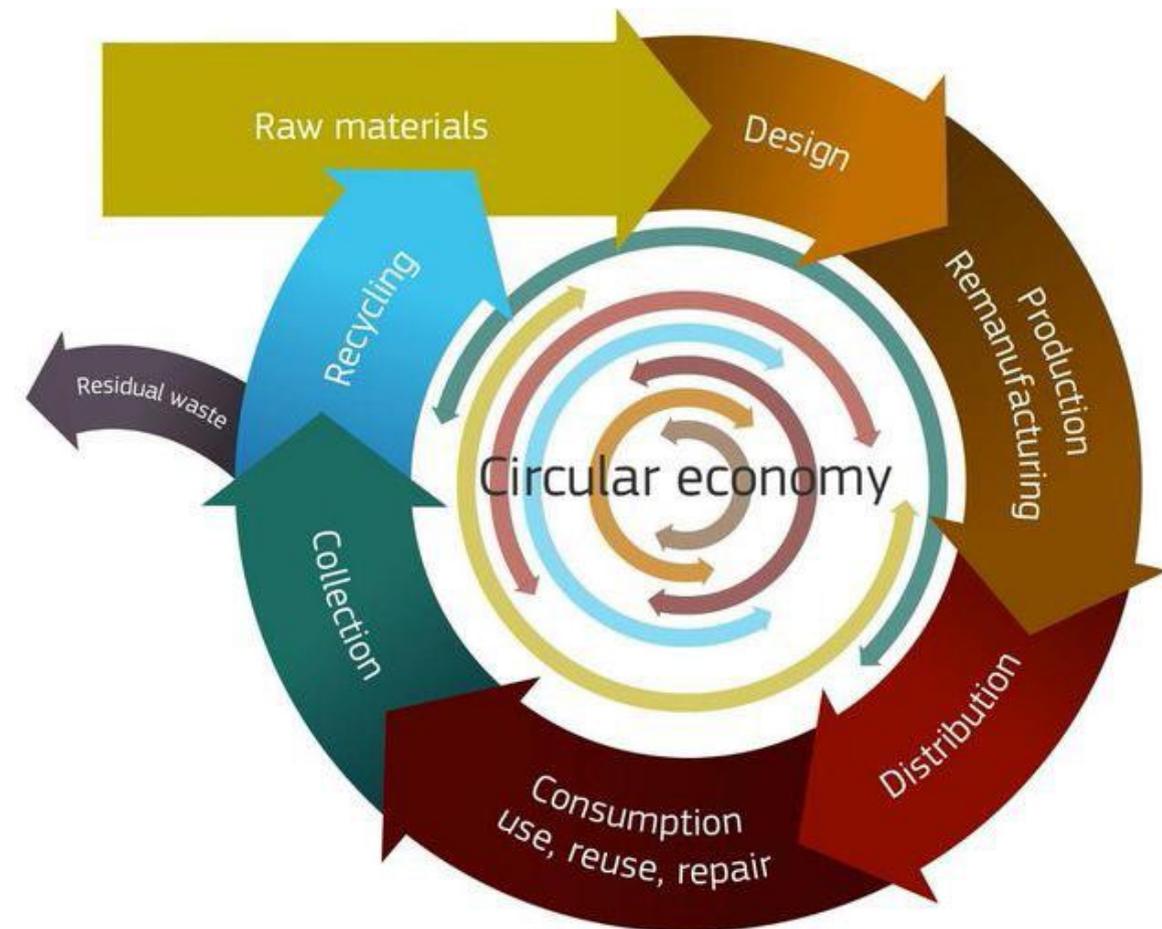
- Limitiert verfügbare Rohstoffe in Kreisläufen unter möglichst geringem Einsatz von Energie und Hilfsstoffen optimal wieder zu verwerten
- Reststoffe werden in einem hohen Ausmaß nicht wiederverwertet
- **Reststoff-Ströme nicht automatisiert identifizierbar und folglich nicht trennbar**



Foto: Greenpeace/Nandakumar S. Haridas
(aus Standard 22. Februar 2021)

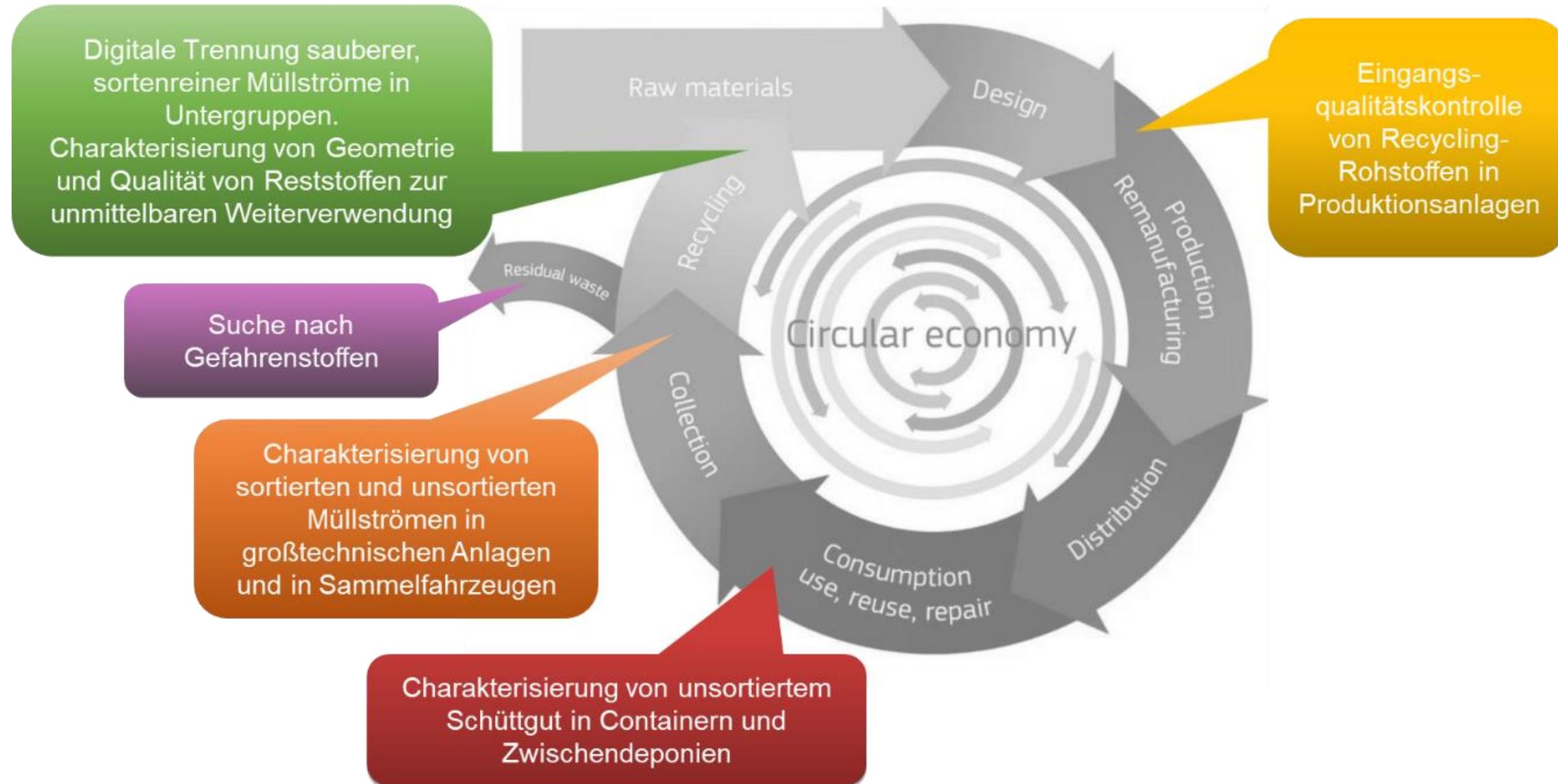
Kreislaufwirtschaft

- EU Circular Economy Action Plan, 2020.
- Nationale Initiativen: Ressourcen schonen & Kosten sparen: Kreislaufwirtschaft alltagstauglich machen
- BMK - Neues Pfandsystem für Österreich: 3-Punkte-Plan vorgestellt
- Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette: **Reduce-Reuse-Recycle-Recover**
- Vereinheitlichung des Recyclingwesens
 - Abfallwirtschaft in den Bundesländern durch jeweilige Landesgesetze
- Smarte Sammlung der Abfälle



Materialcharakterisierung innerhalb der Kreislaufwirtschaft

6



Möglichkeiten der Wertstoffcharakterisierung und Sortierung mittels hyperspektraler Sensorik

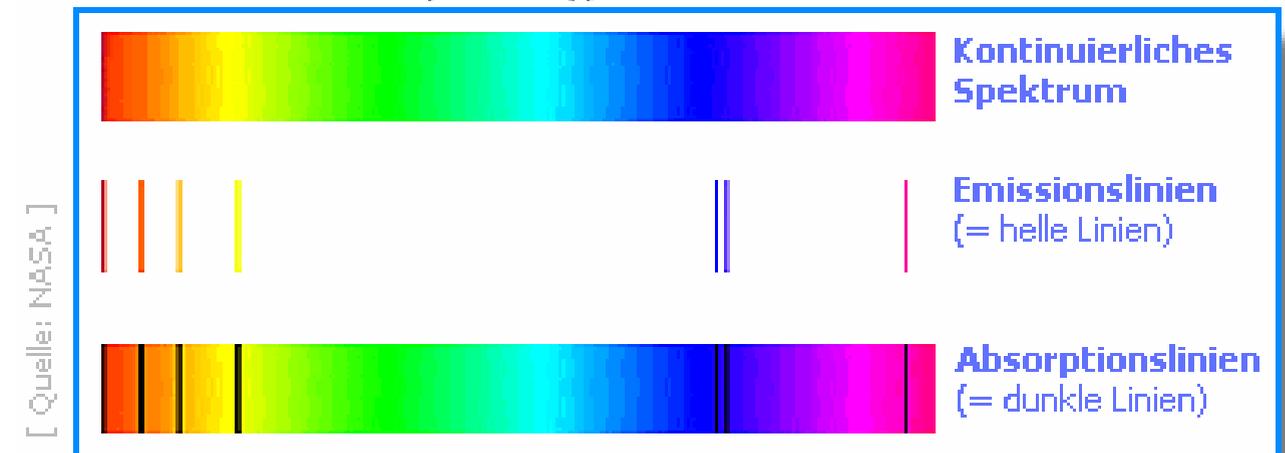
Materialcharakterisierung über Spektralanalyse

8

- Untersuchung von Spektren erlauben Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung einer Probe

- Emission = Eigenstrahlung des Körpers
- Absorption = durchdringendes Licht wird vom Körper absorbiert

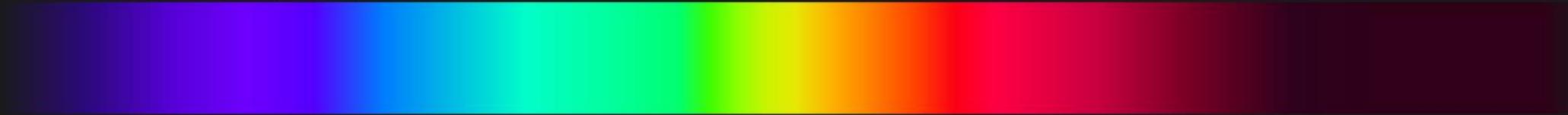
Abb.: Verschiedene Spektra-Typen im Überblick



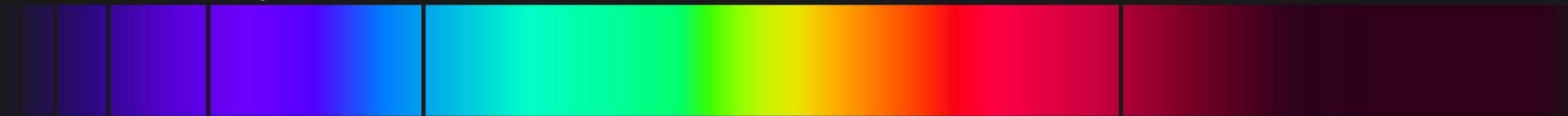
- Klassische Anwendungen in Astronomie und Fernerkundung
- Vermehrt auch in Industrie, Recycling oder Qualitätskontrolle bei Lebensmitteln

Absorptionsspektren

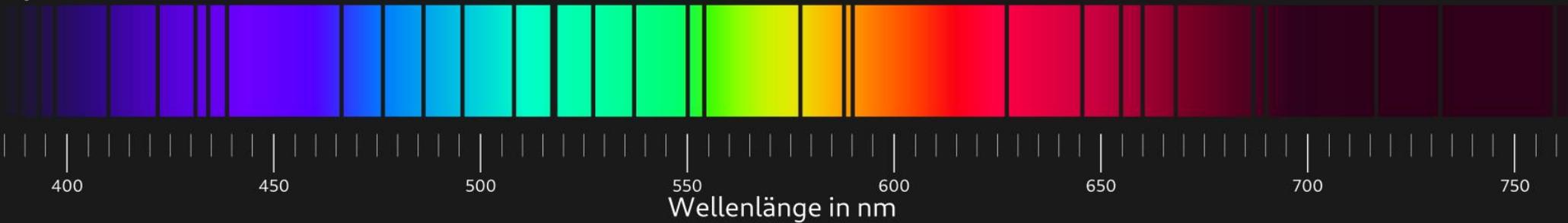
Das vollständige Spektrum des für Menschen sichtbaren Lichts:



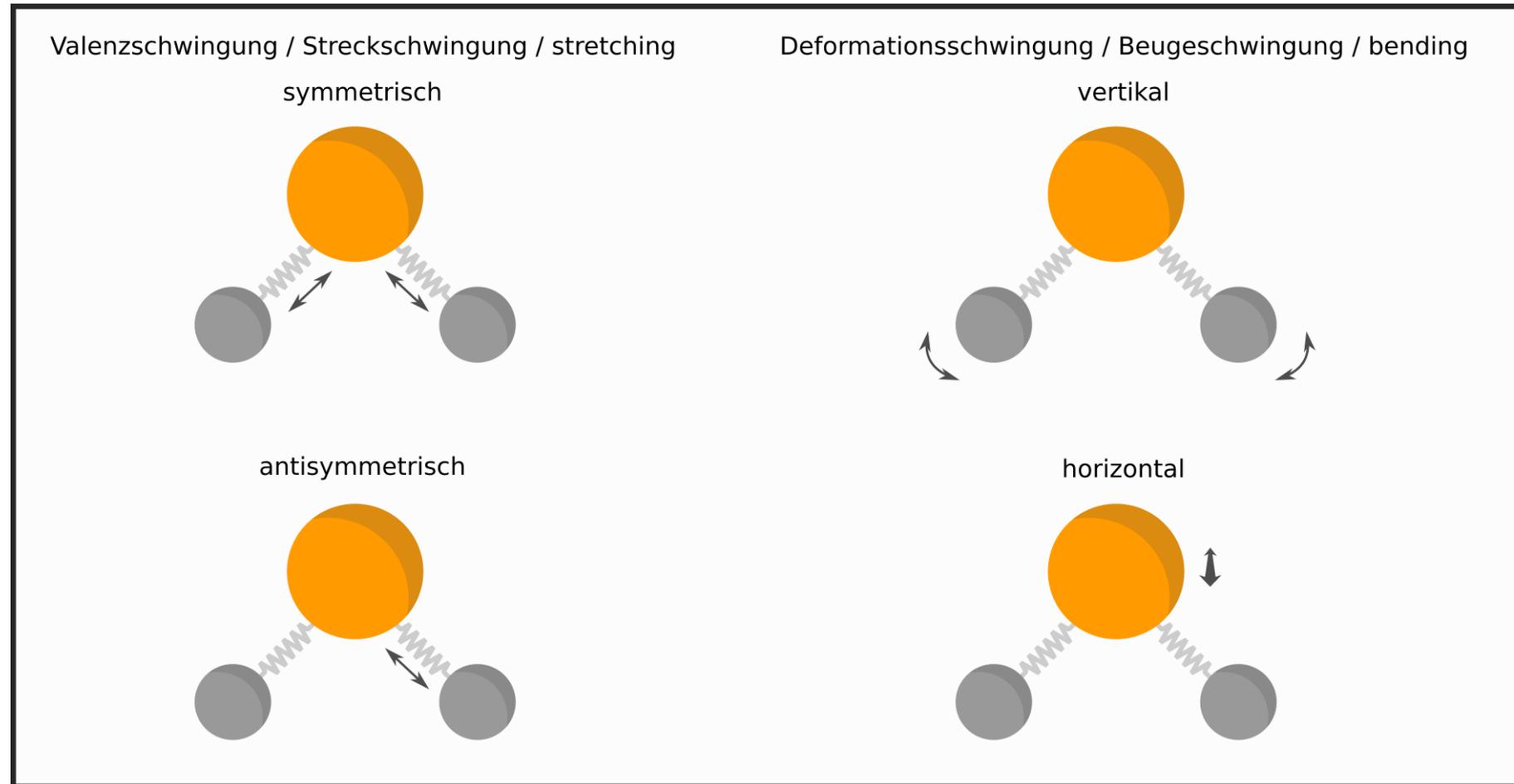
Absorptionsspektrum des Elements Wasserstoff:



Spektrallinien der Sonne

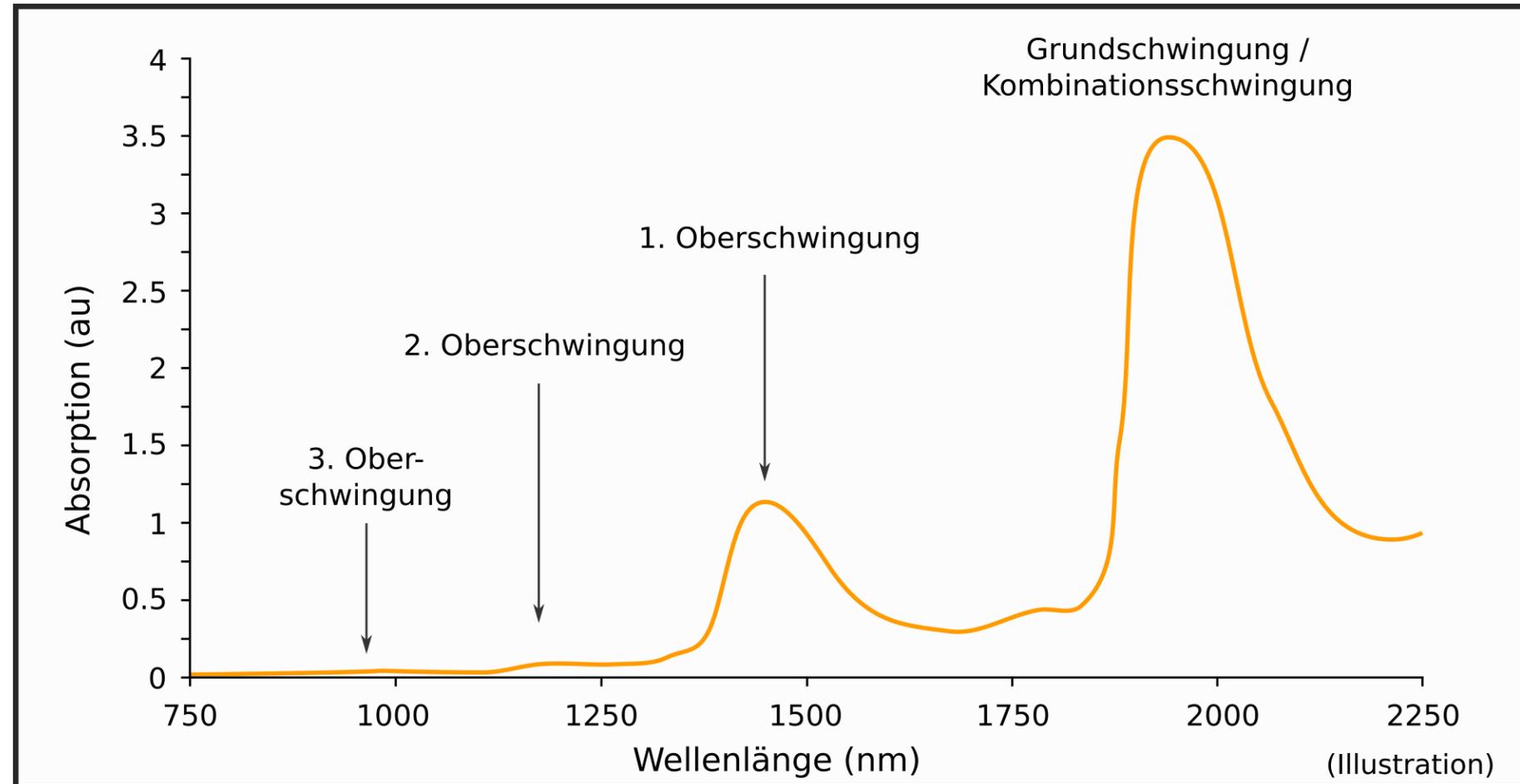


Molekülschwingungen



Quelle: Silicann Systems GmbH, <https://www.silicann.com/blog/beitrag/unterschied-vis-nir-spektroskopie/>

Wasser im NIR Spektrum



Quelle: Silicann Systems GmbH, <https://www.silicann.com/blog/beitrag/unterschied-vis-nir-spektroskopie/>

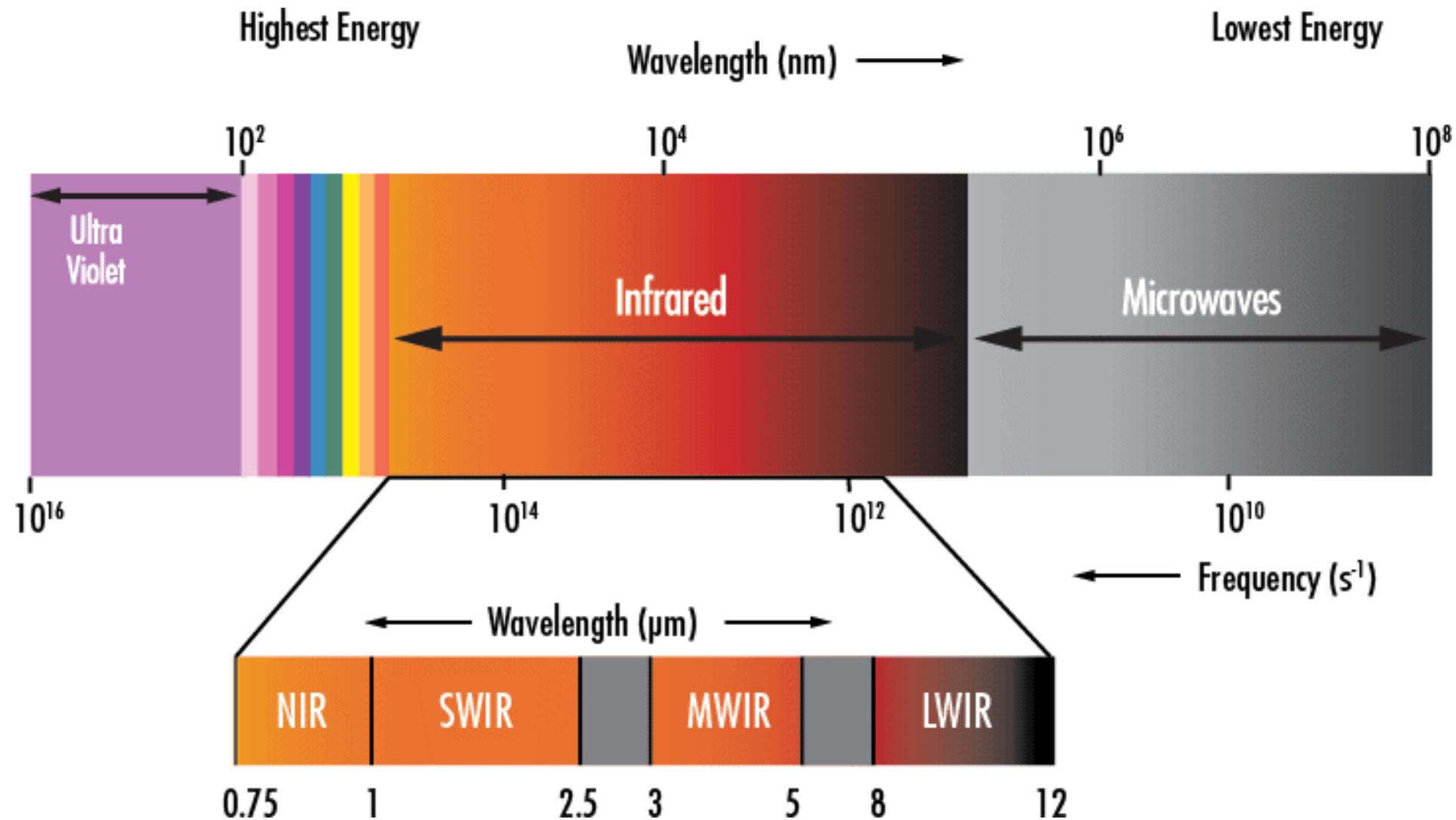
Was ist Hyperspektrale „Bildanalyse“?

- **Klassische Bildaufnahme**
 - Bild mit 3 Farbkanälen (rot – grün - blau)
 - Im (für den Menschen) sichtbaren Bereich des Lichts

- **Hyperspektrale Bildaufnahme**
 - Licht wird in seine Bestandteile zerlegt – mehrere 100 „Farbkanäle“
 - Analyse vom UV- bis zum mittelwelligen Infrarotbereich
 - Jedes Material hat eine einzigartige spektrale Signatur
 - Auswertung mittels maschinellen Lernens bzw. künstlicher Intelligenz

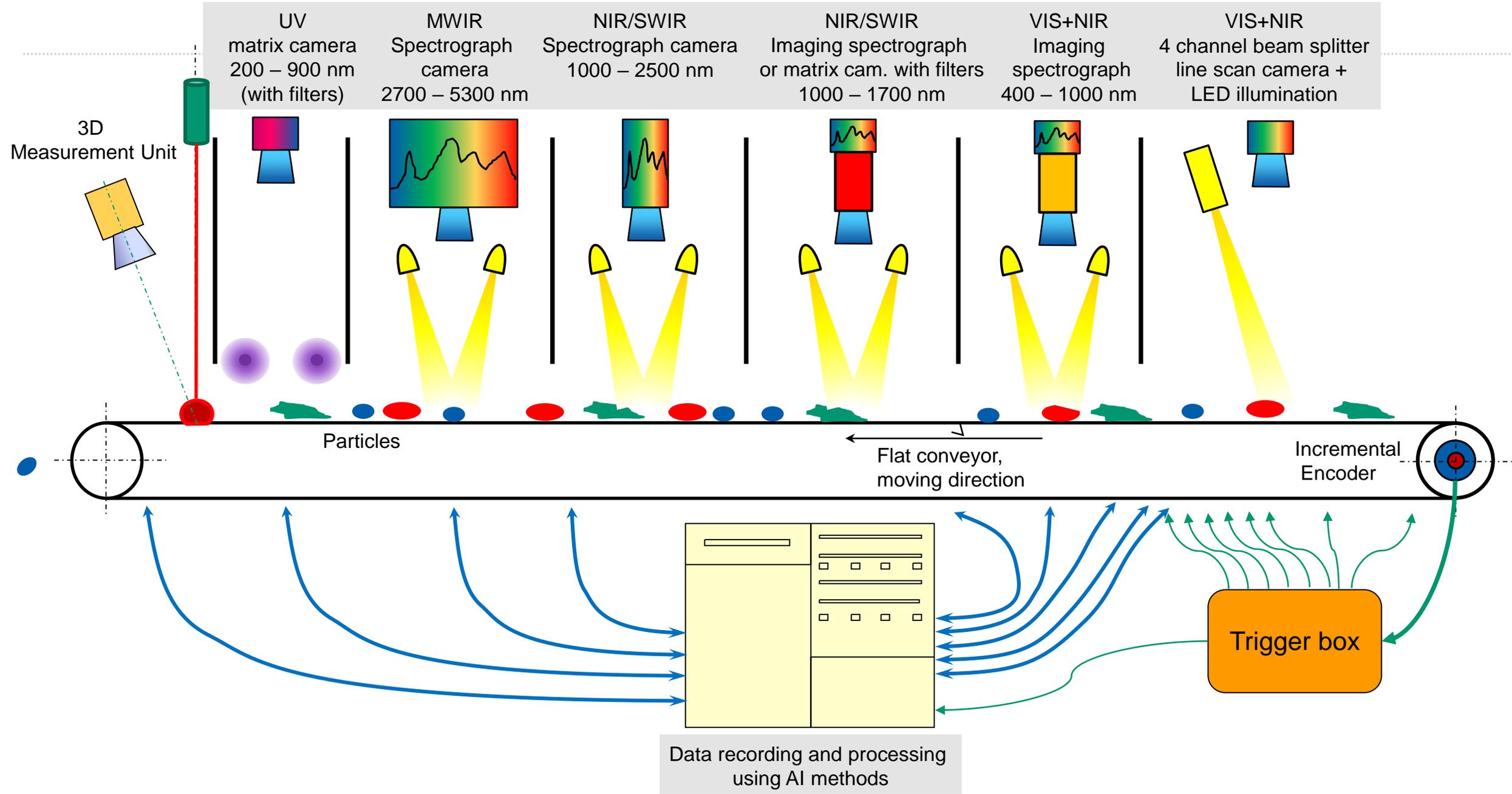
Elektromagnetisches Spektrum und IR-Wellenlängen

13

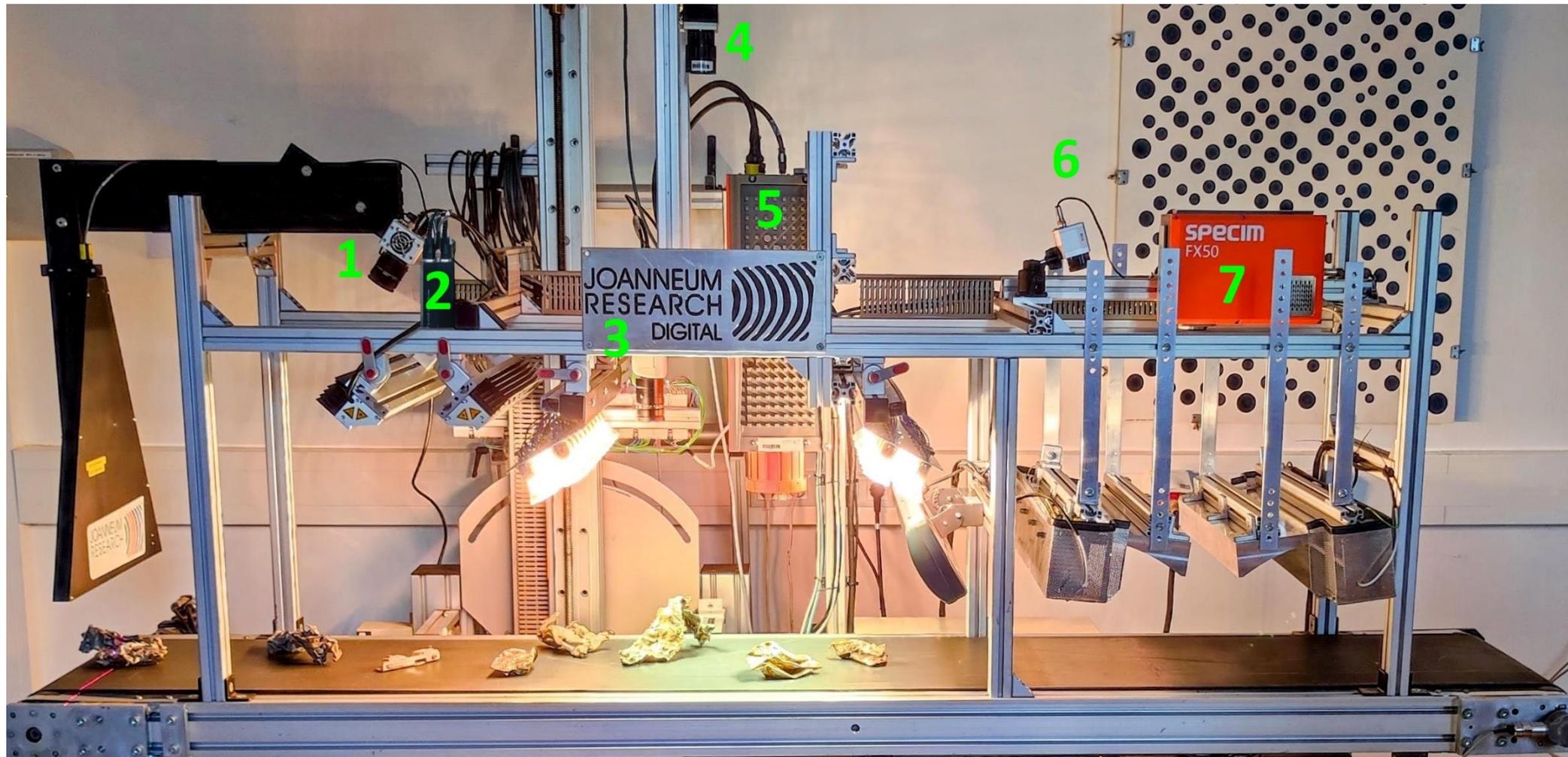


Gesamte Aufnahmekette

14



Datenerfassung mittels Hyperspektralsensorik



No.	Camera	Purpose
(1)	AT C4	3D Profile
(2)	JAI SW-2001Q	RGB + NIR imaging
(3)	AVT Mako G419 + ImSpector N10	HSI 400 – 1000 nm
(4)	PhotonFocus SWIR + ImSpector N17E	HSI 850 – 1700 nm
(5)	Specim SWIR	HSI 1000 – 2500 nm
(6)	Optris PI640	Thermal imaging
(7)	Specim FX50	HSI 2700 – 5300 nm

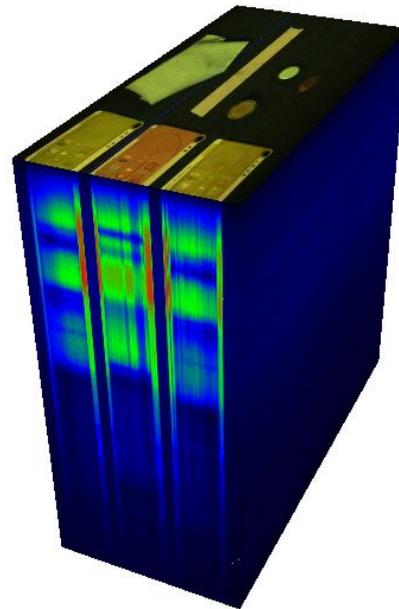
Was ist Hyperspektrale Bildanalyse? Datenfusion

16

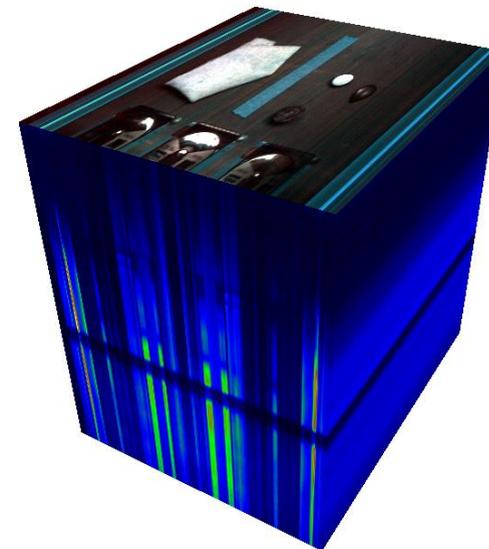
VIS



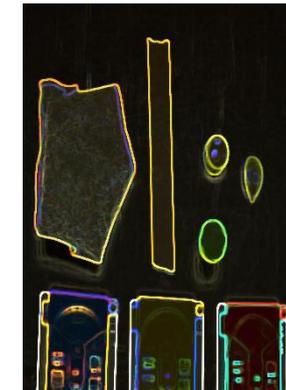
NIR/SWIR



MWIR

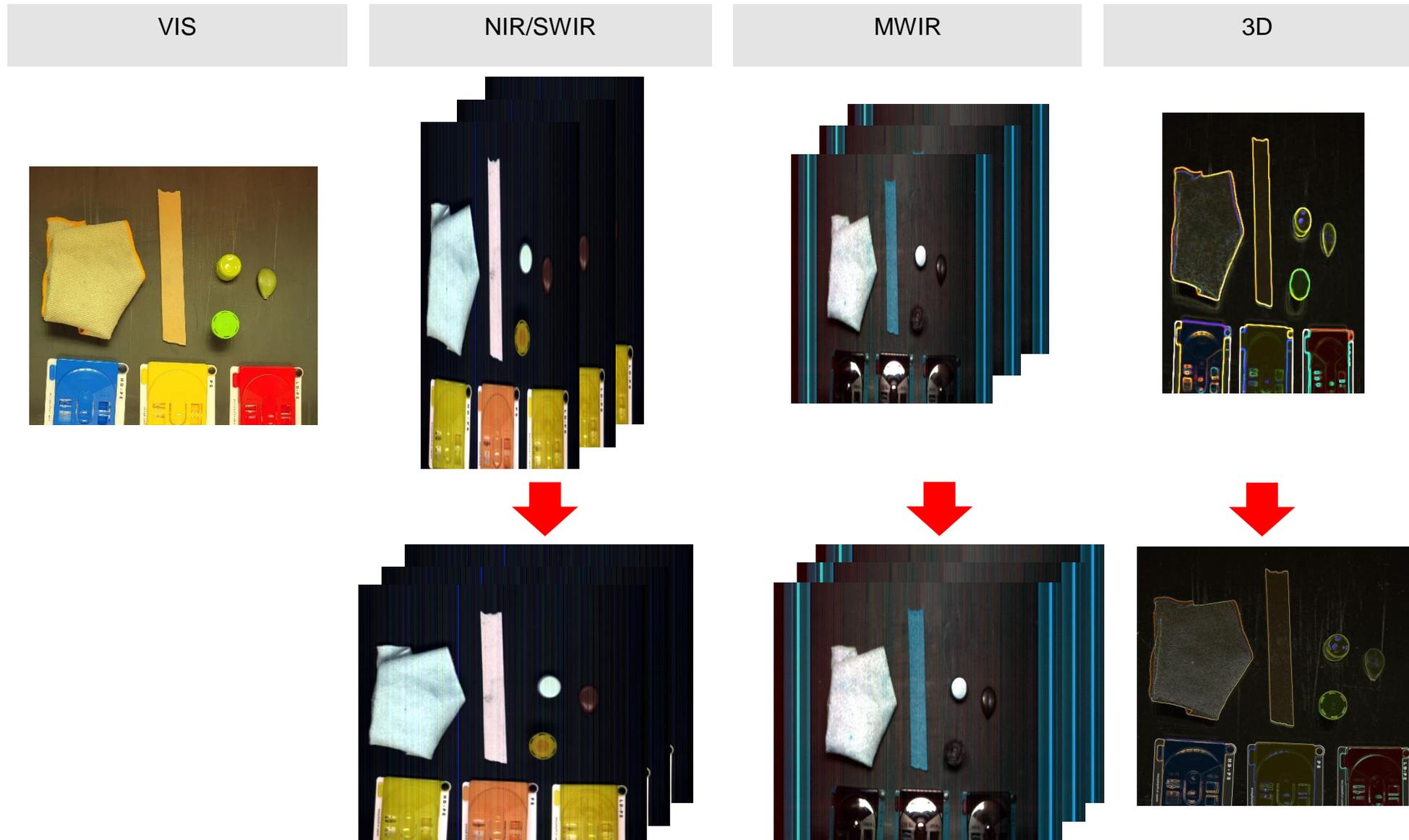


3D

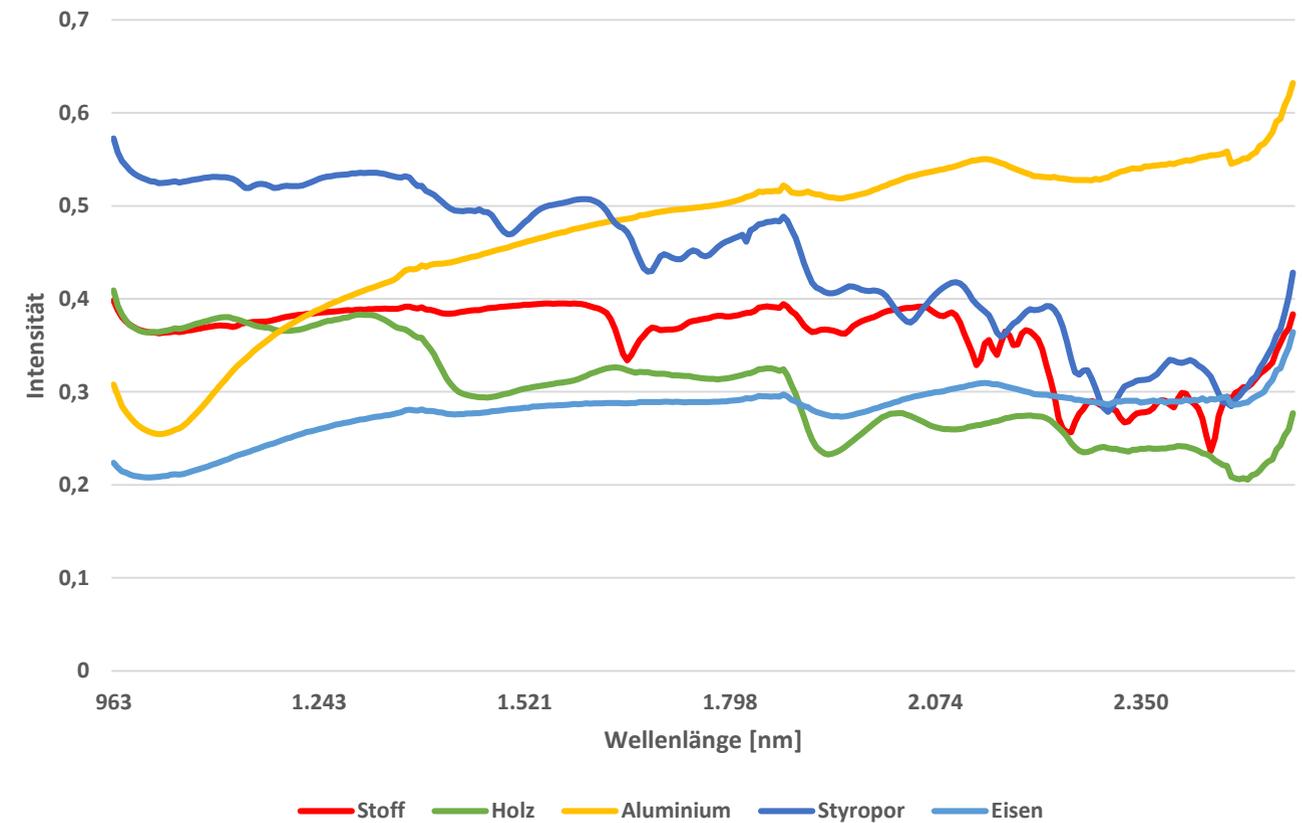
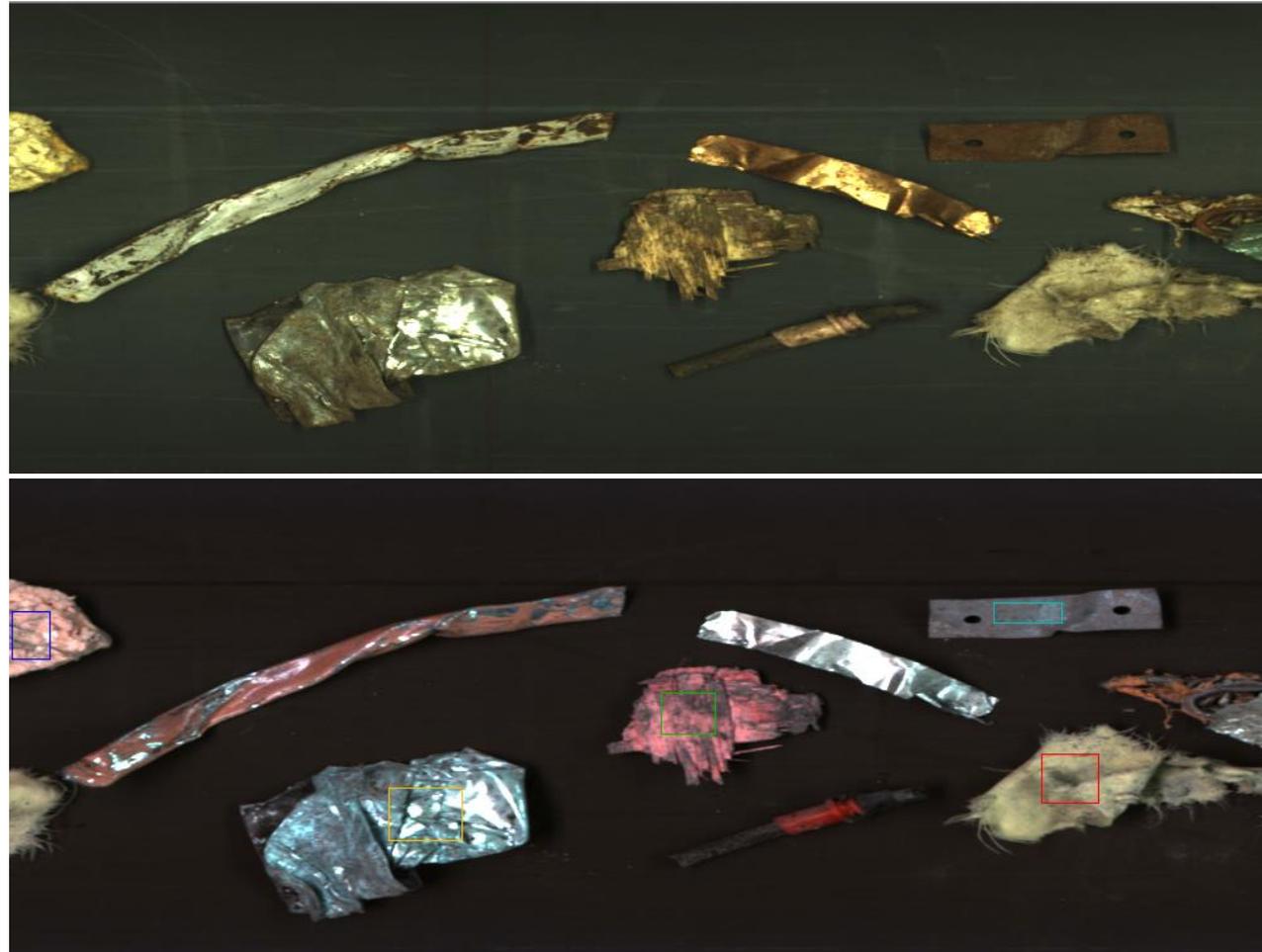


Was ist Hyperspektrale Bildanalyse? Datenregistration

17



Was ist Hyperspektrale Bildanalyse? Beispiel Projekt InSpecScrap

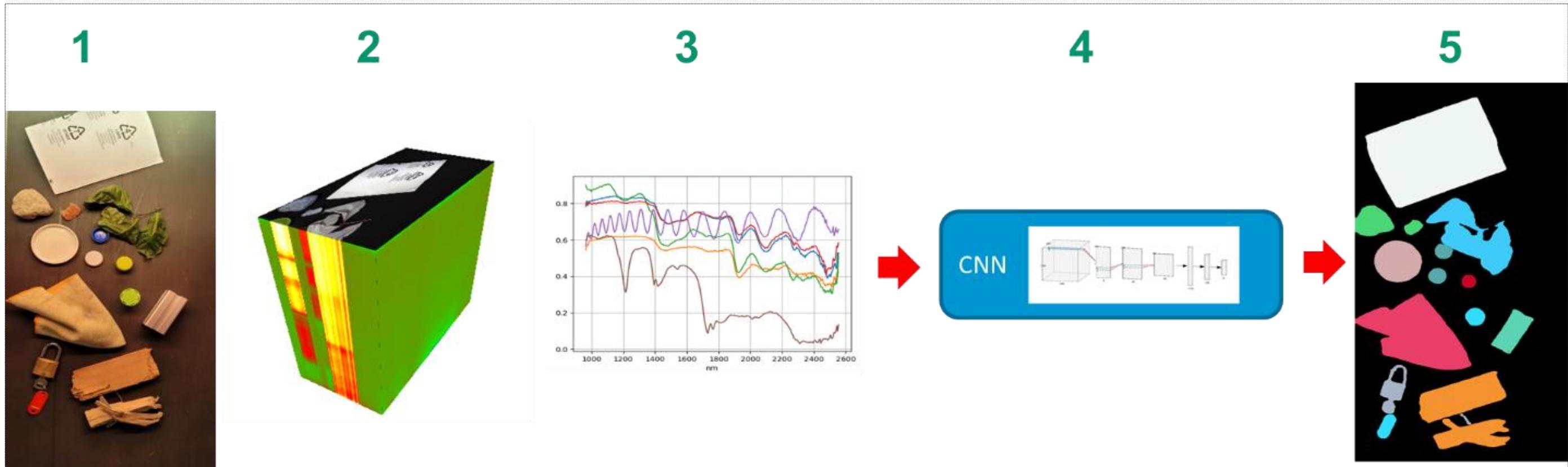


Wertstoffcharakterisierung mittels hyperspektraler Sensorik und KI-basierter Auswertung

KI-basierte Analysen

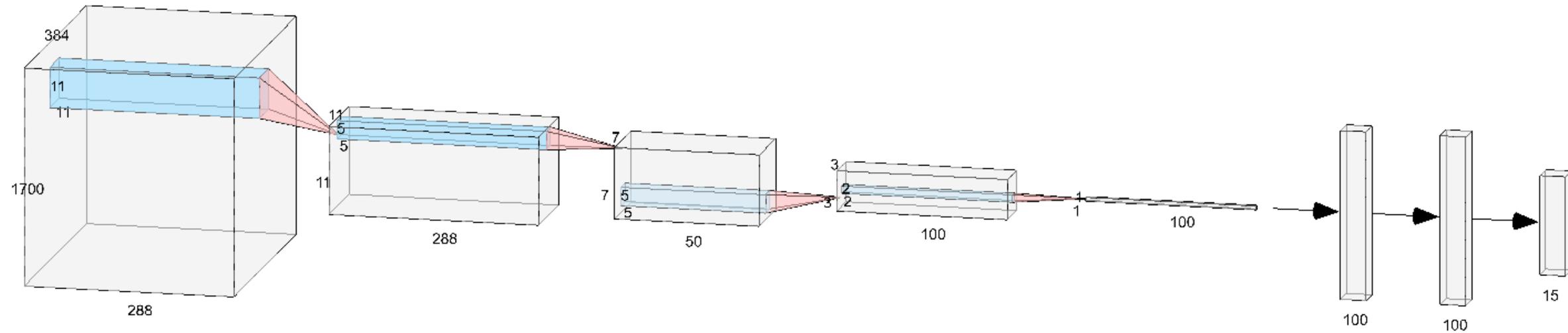
- **Klassifikation unterschiedlicher Material(-fraktionen) auf Basis von Hyperspektraldaten und CNN**
 - Z.B. Sortierung
- Modellierung mittels Regressionsansätzen
 - Rückschlüsse auf Materialparameter
 - Feincharakterisierung
- **Dimensionalitätsreduktion auf der Basis von Explainable AI (XAI)**
 - Identifikation signifikanter Wellenlängen
 - Fokus auf Unterscheidbarkeit
 - Beschleunigung für direkte Industrieanwendung
- Datenerweiterung und generative KI

KI-basierte Hyperspektralklassifikation



CNN für Hyperspectral Imaging

■ Subset: SWIR



Conv2D

Test Mixed Material

- Subset: SWIR
- Confusion matrix

Patchsize	11x11
Batchsize	128
Epoch	200
LR	0,001
No. of iter.	3

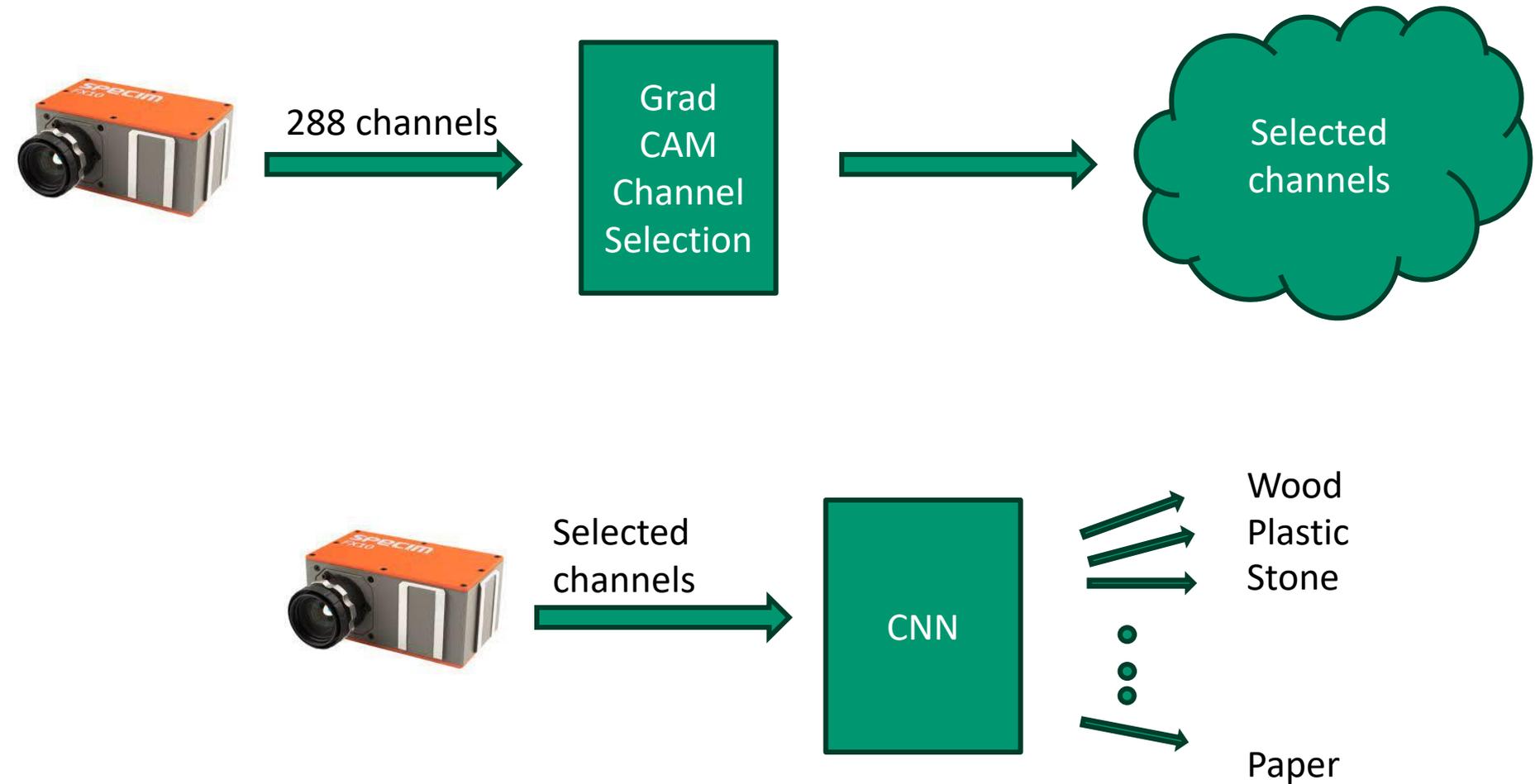


Material	Class	Bio	Fabric	Metal	Paper	PI-ABS	PI-ASA	PI-HD-PE	PI-LD-PE	PI-PA6	PI-POM	PI-PS	PI-TPE-S	Plastic	Wood	Background
	Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Conf. matrix	Conv1D	70,00	99,35	90,91	75,00	98,73	95,51	97,65	97,40	96,39	90,14	96,63	100,00	100,00	100,00	98,73
	Conv2D	80,00	98,05	93,18	50,00	98,73	97,75	98,82	94,81	93,98	94,37	98,88	100,00	100,00	98,57	98,55
	Conv3D	90,00	99,35	88,64	91,67	92,41	100,00	97,65	100,00	97,59	85,92	95,51	100,00	100,00	100,00	98,91

Dimensionalitätsreduktion auf der Basis von XAI

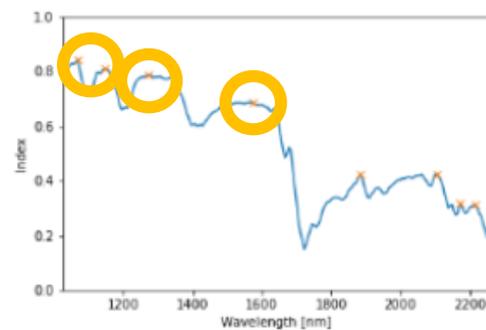
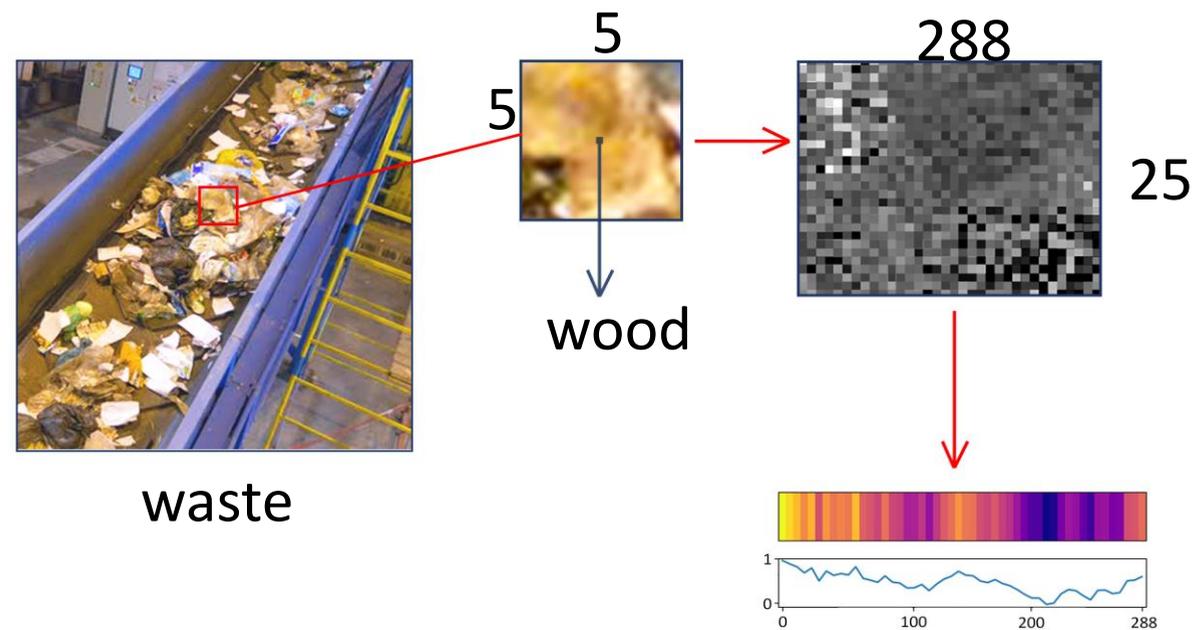
Motivation:

- Verringerung der Prozesszeit und des Rechenaufwands (billigere Hardware, Echtzeit)
- Verlängerung der Lebensdauer der Kamera

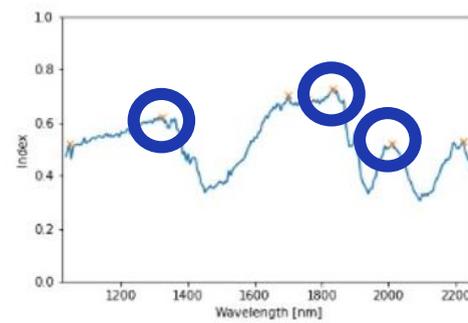


Dimensionalitätsreduktion auf der Basis von XAI

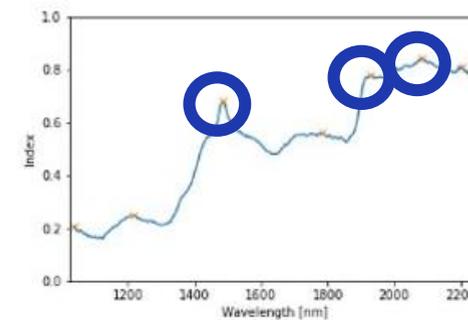
Verwendung von Grad-CAM



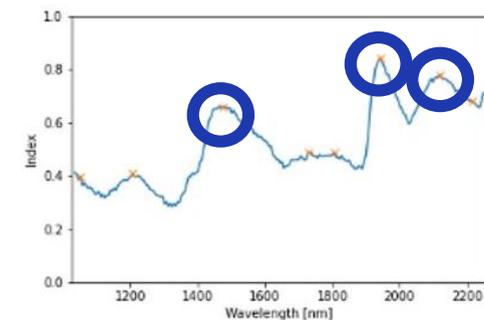
(e) Plastic



(d) Paper

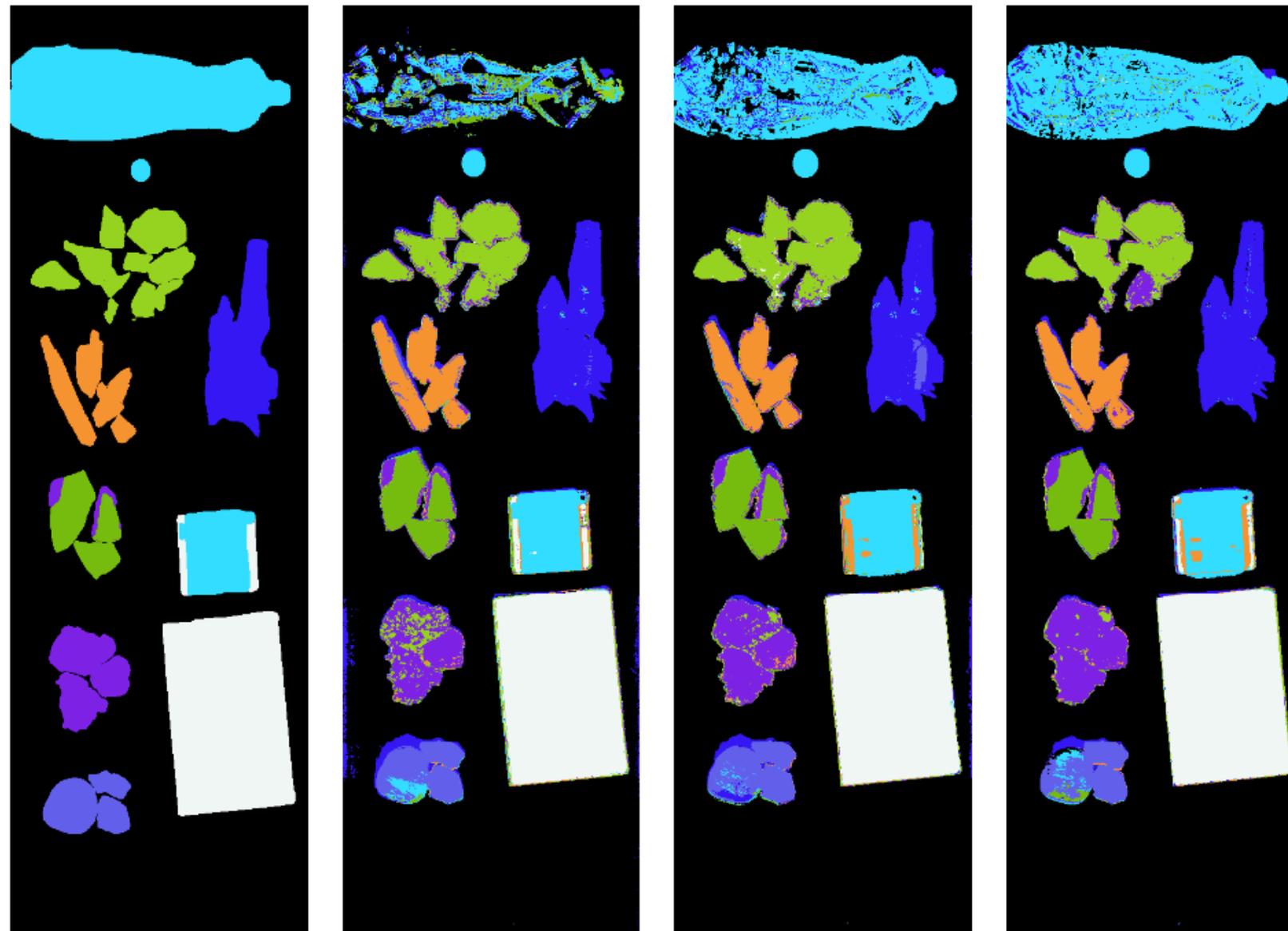


(h) Type 3 Processed Wood



(i) Wood

Dimensionalitätsreduktion auf der Basis von XAI



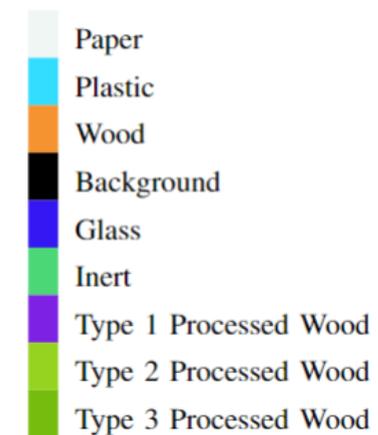
(a) Ground Truth

(b) Single Wavelength

(c) Top 4 Wavelengths

(d) All Wavelengths

- Analyse der einzelnen Wellenlängen
- Kombination der 4 wichtigsten Wellenlängen
- Benchmark für alle Wellenlängen (288 Kanäle)



Dimensionalitätsreduktion auf der Basis von XAI

Class	One Important Wavelength	Four Important Wavelengths	All Wavelengths
Paper	98.35%	99.84%	99.28%
Plastic	38.94%	74.49%	82.71%
Wood	94.58%	96.10%	95.47%
Background	96.60%	96.77%	96.94%
Glass	97.74%	91.99%	97.35%
Inert	84.83%	89.14%	80.24%
Type 1 Processed Wood	78.27%	91.34%	95.65%
Type 2 Processed Wood	92.15%	94.00%	88.04%
Type 3 Processed Wood	95.44%	95.43%	95.25%

Table 1. Accuracy of Material Classification Using Different Wavelength Sets

Beispielergebnisse aus der Materialcharakterisierung

Kreislaufwirtschaft

circPLAST- mr



DIGICOLL

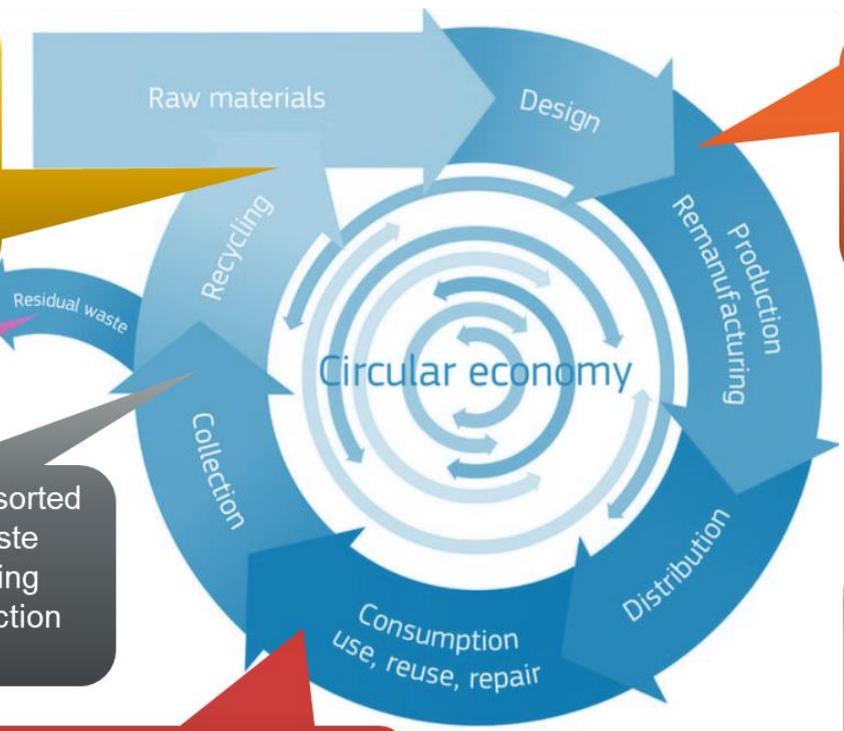
SmartScanner

Digital separation of clean, unmixed waste streams into subgroups. Characterization of geometry and quality of residual materials for immediate reuse.

Search for hazardous or toxic substances

Characterization of sorted and unsorted waste streams in recycling plants and in collection vehicles

Characterization of unsorted bulk material in containers and intermediate storage sites

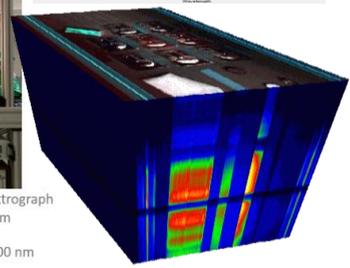
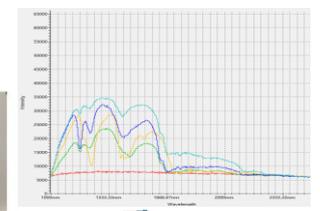
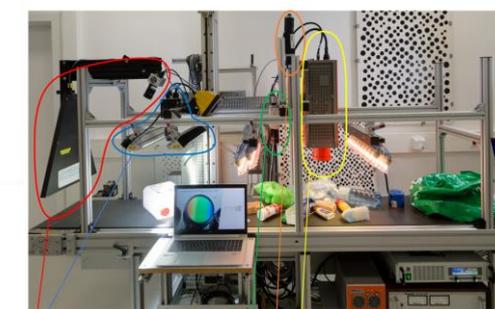


Input quality control of recycled raw materials in production facilities

InSpecScrap



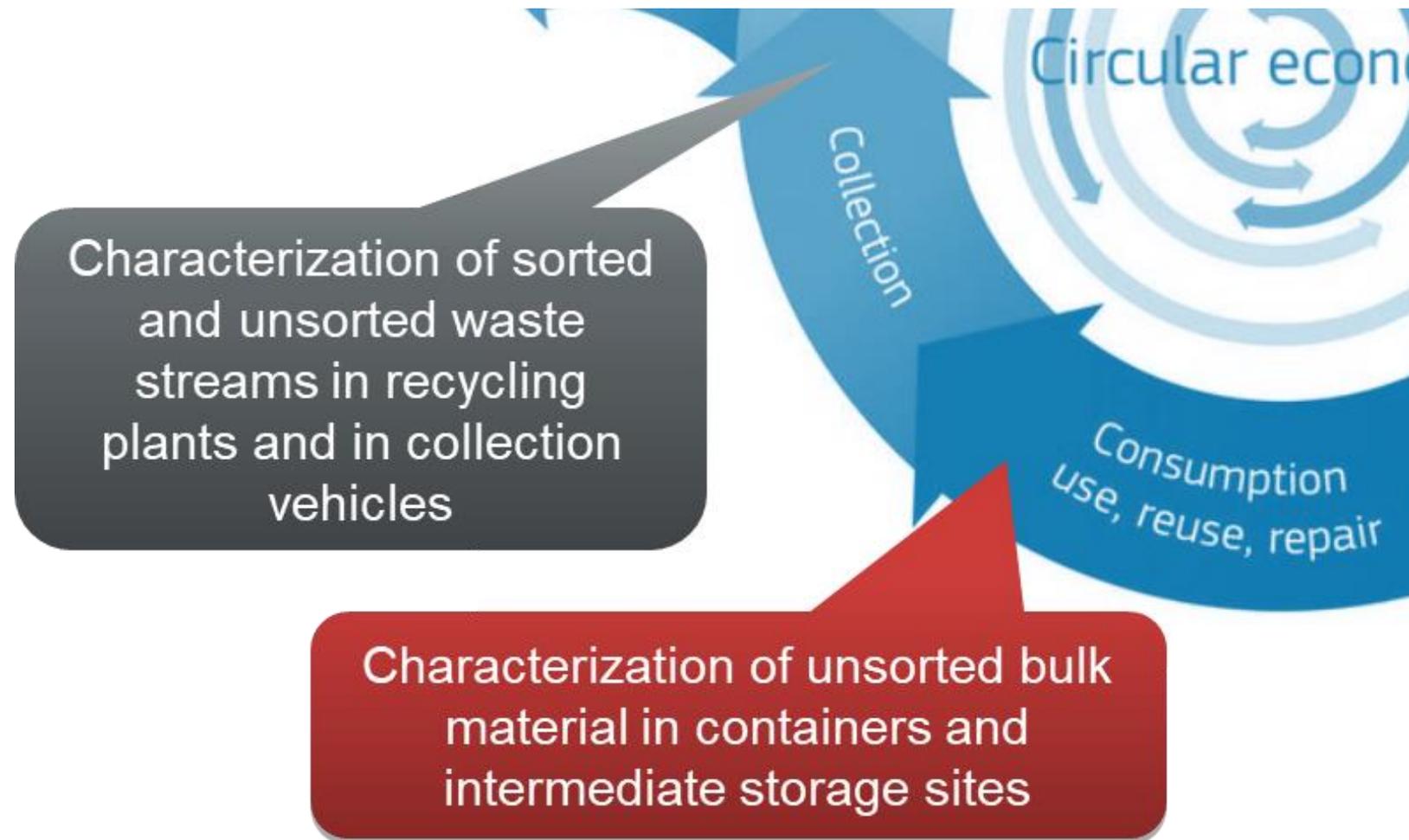
FV KI4ResOpt



VIS+NIR Zeilenkamera mit VIS+NIR LED Beleuchtung
3D Lichtschnitt System
SW/NIR Imaging Spektrograph 1000 – 2500 nm
SW/NIR Spektrograph mit SW/NIR Kamera 1000-1700 nm
VISNIR Spektrograph mit CMOS Kamera 400 – 1000 nm

Charakterisierung von Abfallströmen

Sammlung und Sortierung



DigiCOLL - Smart Digital Waste Collection



- **Erkennung von recycelbaren Wertstoffen** in den Mülltonnen
- **Erkennung von Fehlwürfen** (z. B. Kunststoffe im Biomüll)
 - Multisensor Fusion
 - Farbbild
 - Multispektral Kamera
 - 3D Volumenbild
 - GPS

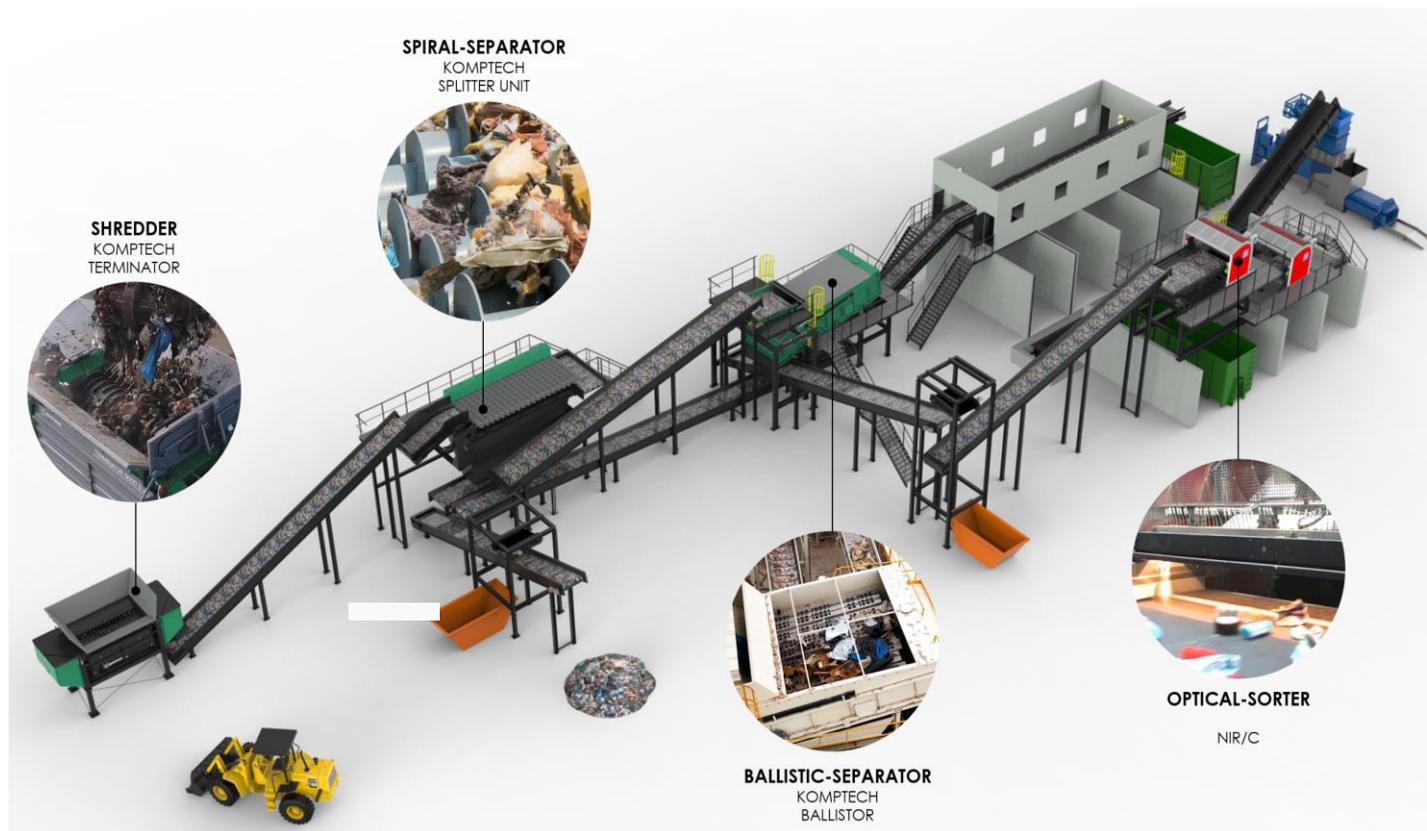
Stoffanalyse



- glass
- battery
- paper
- metal
- hazardous_substance
- spraycans
- organic
- residual
- ignore
- garbage_bag_other
- garbage_bag_yellow
- PET
- blown_bottle
- plastic_other
- garbage_bag_transpa
- garbage_bag_organic
- electronics

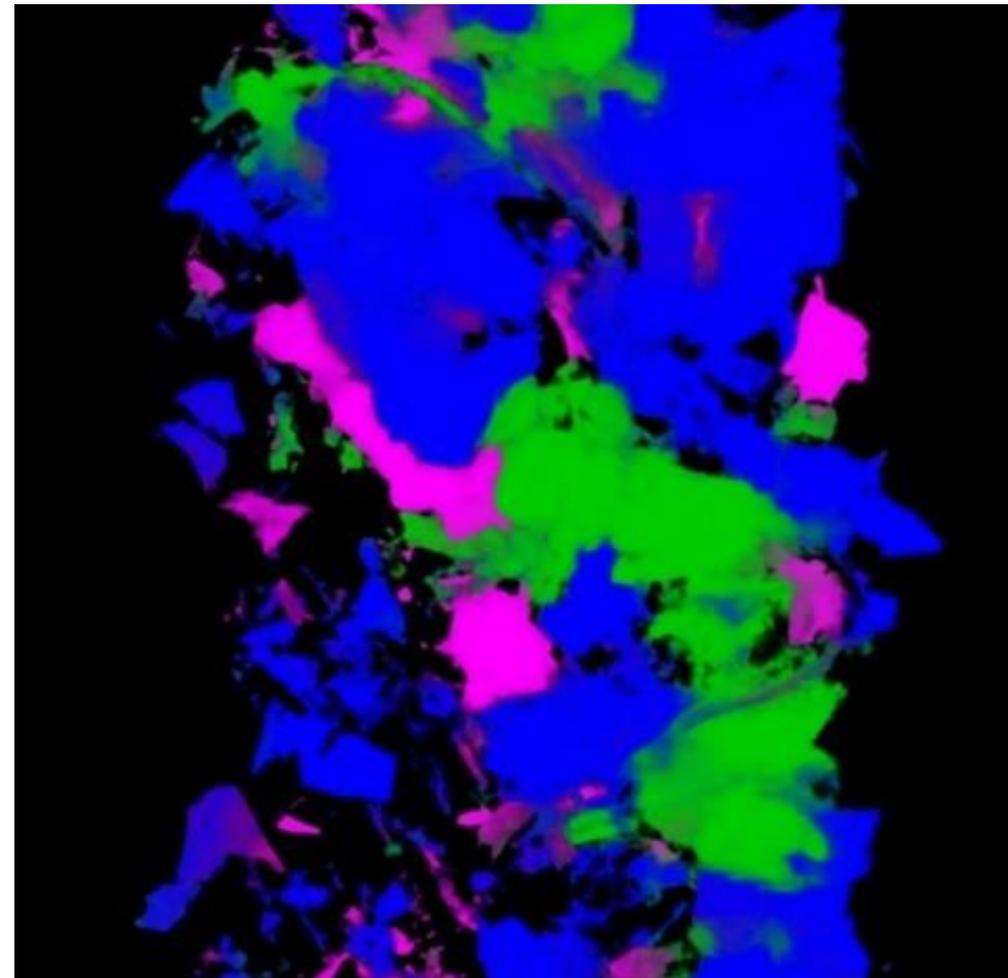


KI-Waste - Kombinierte Bildverarbeitung und Zeitreihenanalyse für die KI-gestützte Abfallaufbereitung



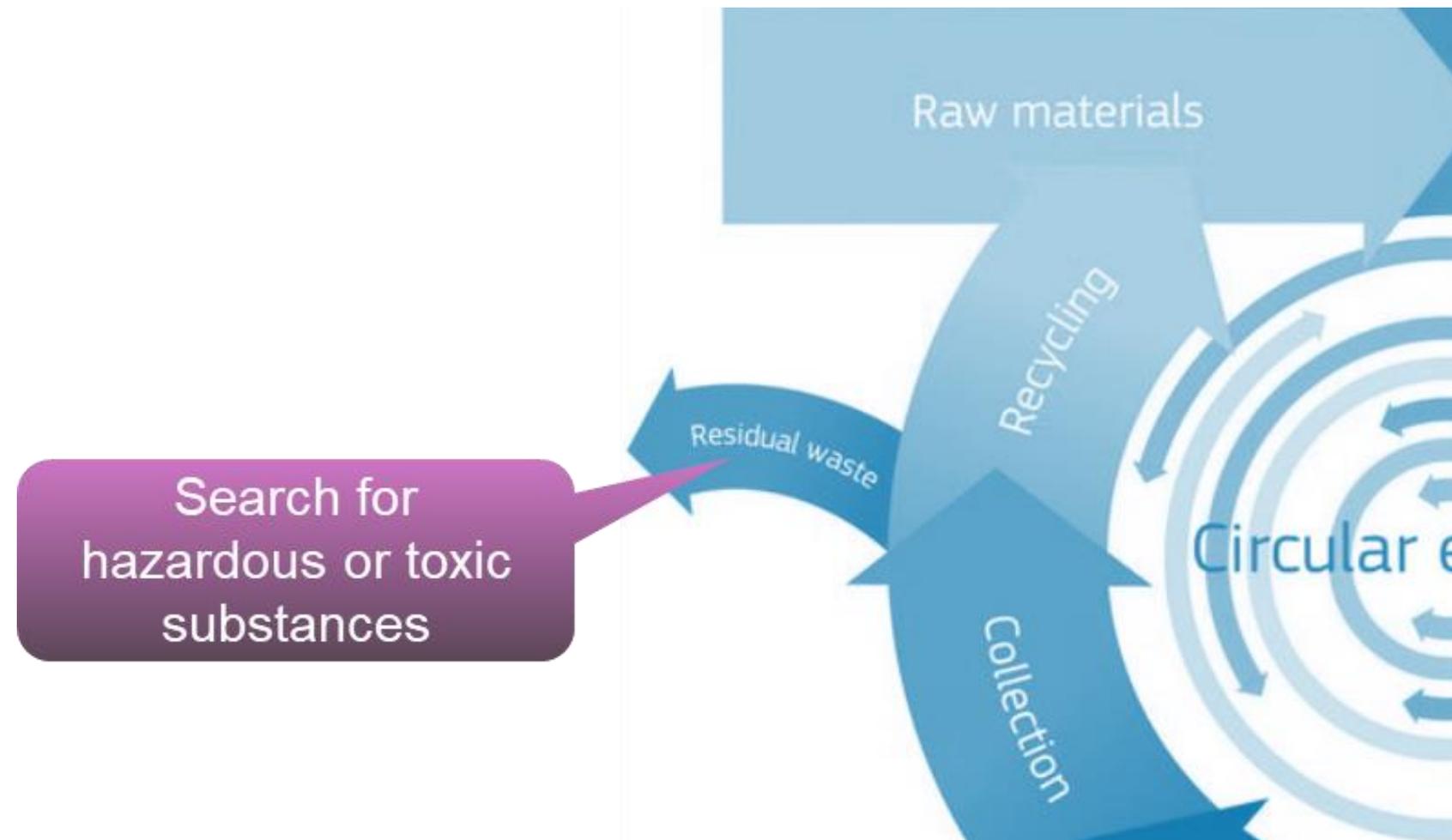
- **Materialcharakterisierung in Abfallaufbereitungsanlage**
 - KI-basierte Analyse um Abfall zu erkennen und zu unterscheiden
 - Optimierung der Messgenauigkeit und Messposition
- **Effizienzsteigerung der Anlage und Erhöhung der Recyclingrate**
 - Kombination von Bilddaten mit Anlagendaten
 - KI-basierte Prozessoptimierung

Stoffanalyse

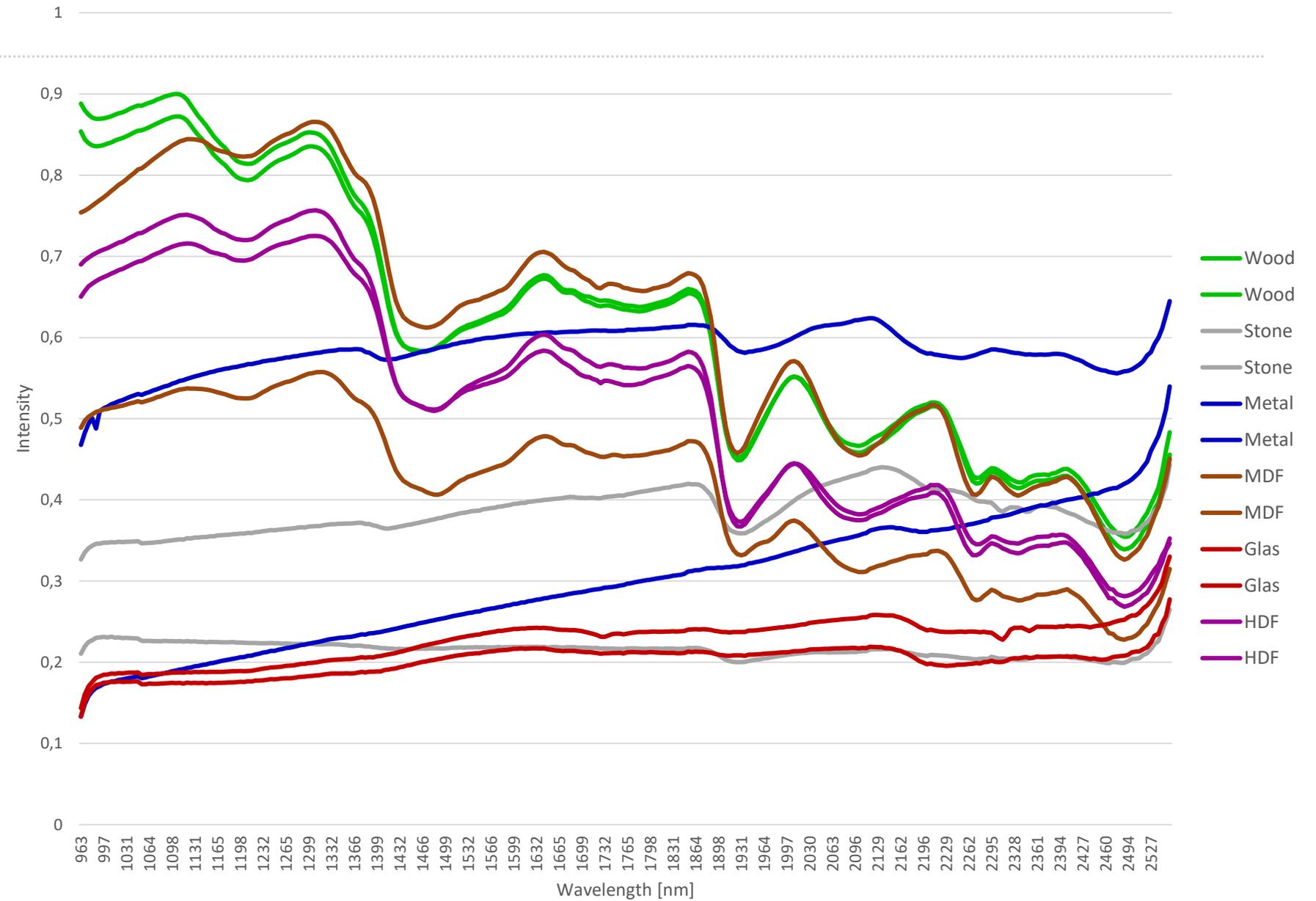
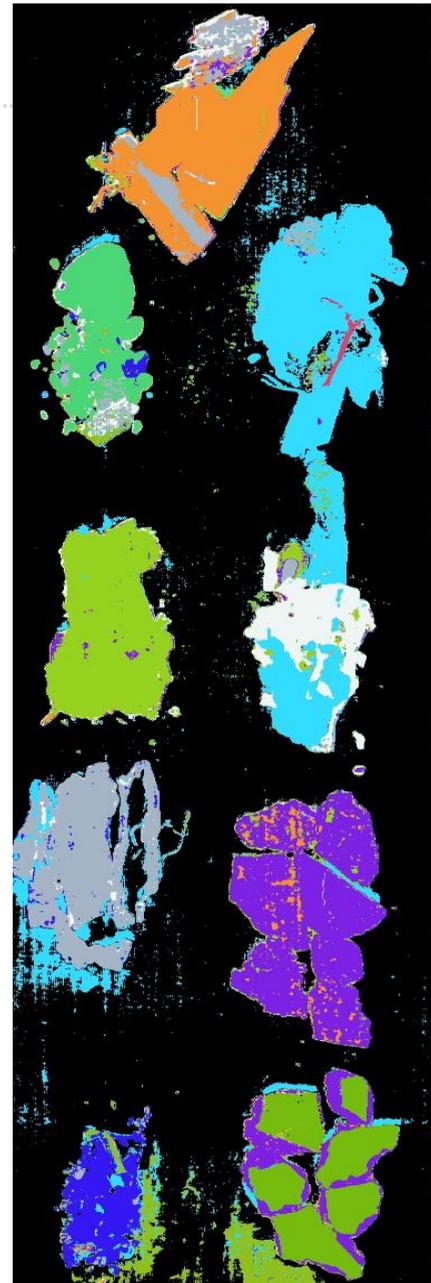
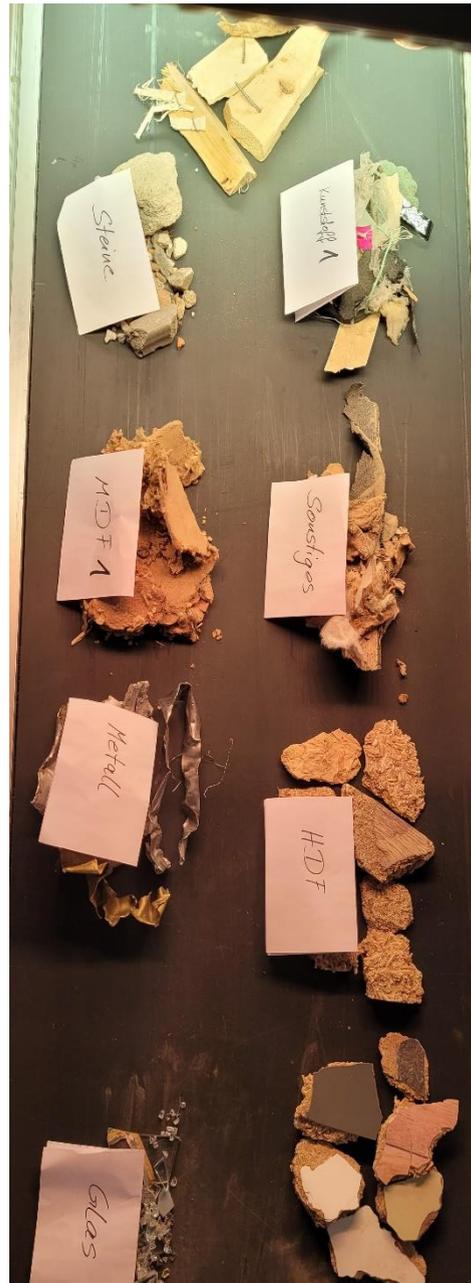


Plastik (grün)
Holz (cyan)
Textil (rosa)
Papier (blau)

Suche nach Störstoffen Holz und Bauwesen

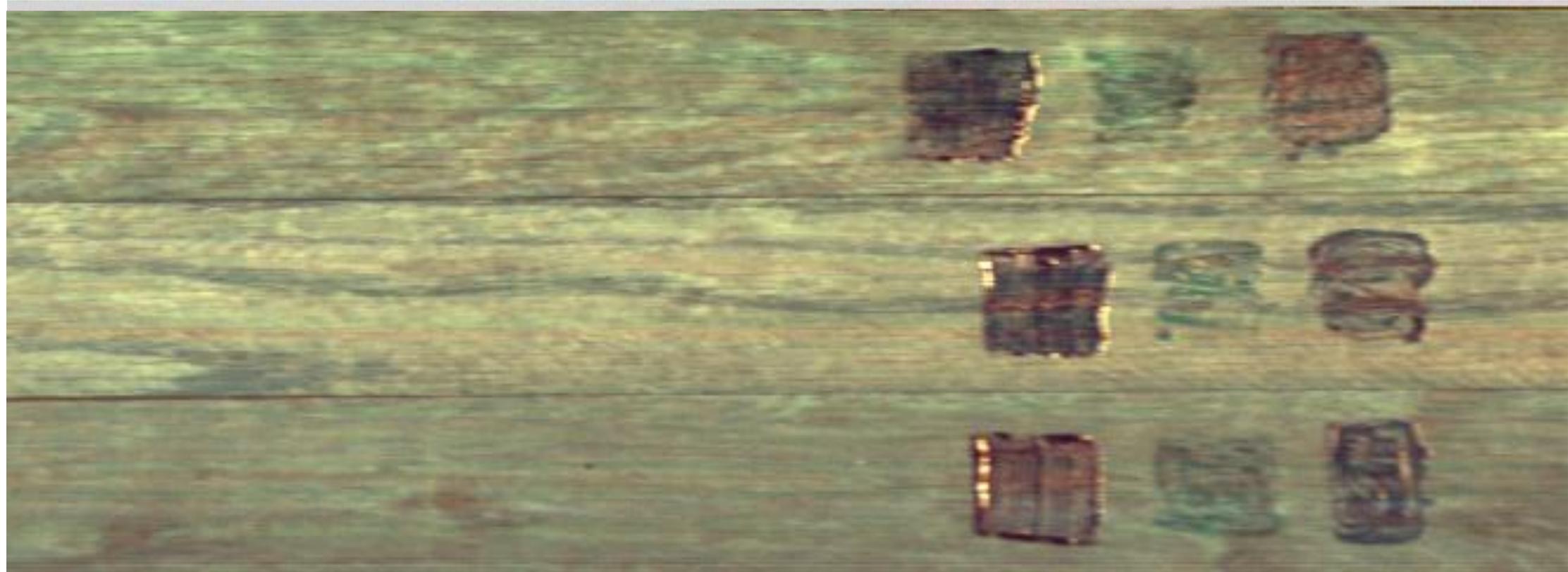


Bestimmung von Störstoffen in Restholzfraktionen



Beispiel Holz

Bewertung von Kleber Auftrag



Epoxy Kraftkleber Leim

Beispiel Holz Erkennung von Feuchtigkeit



Beispiel Holz Erkennung von Feuchtigkeit

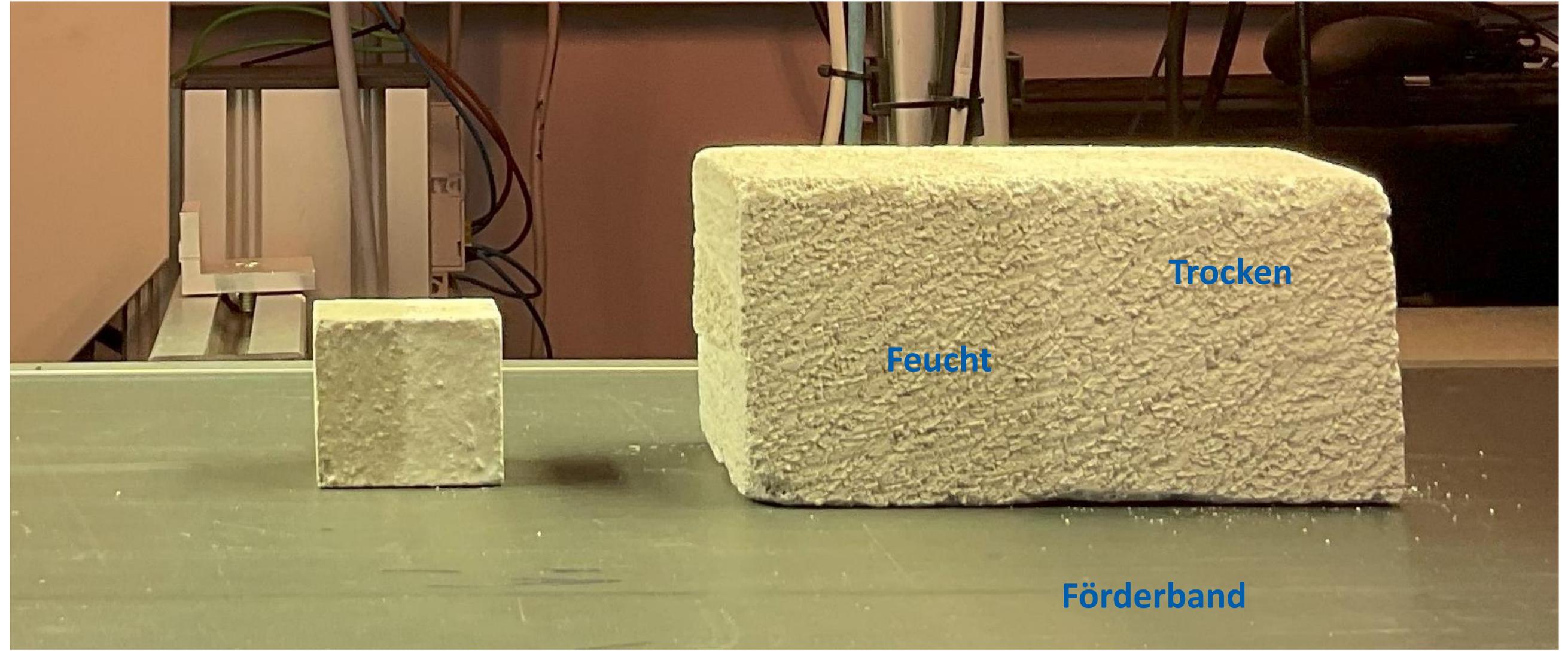


BMK Leitprojekt KRAISBAU



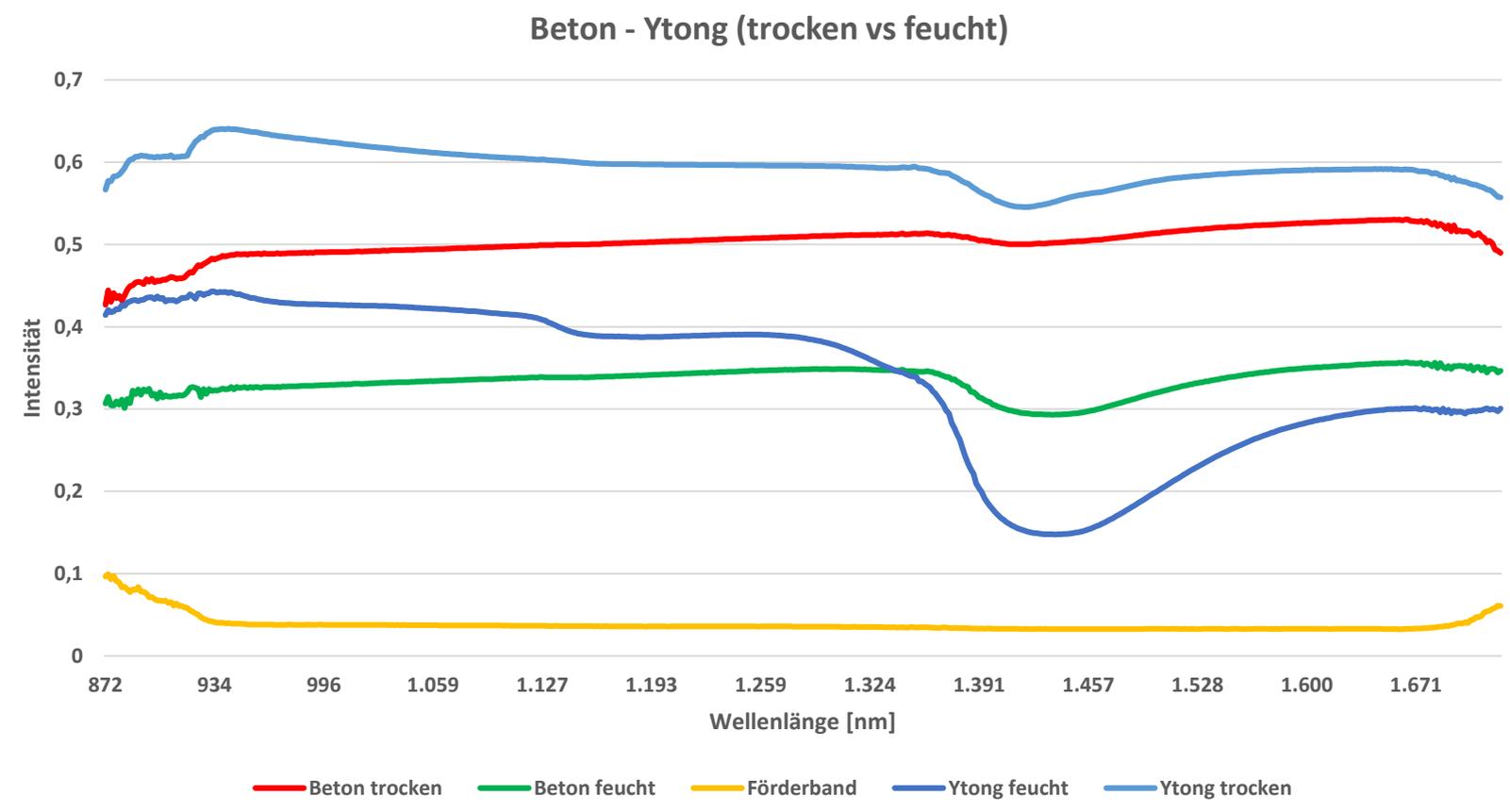
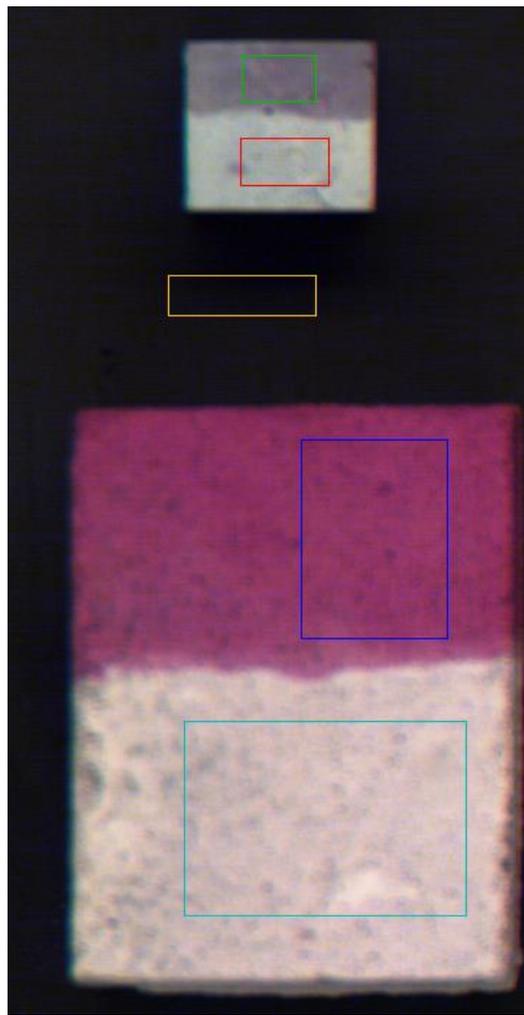
- Ziele
 - Gebäude(-teile) vom (Bau-)Anfang bis zum Lebensende digital abbilden
 - Prozessstandardisierung
- Beitrag der Hyperspektralanalyse
 - Möglichkeit der Materialcharakterisierung
 - Messung verschiedene Materialmerkmale

BMK Leitprojekt KRAISBAU Feuchtigkeitsmessung



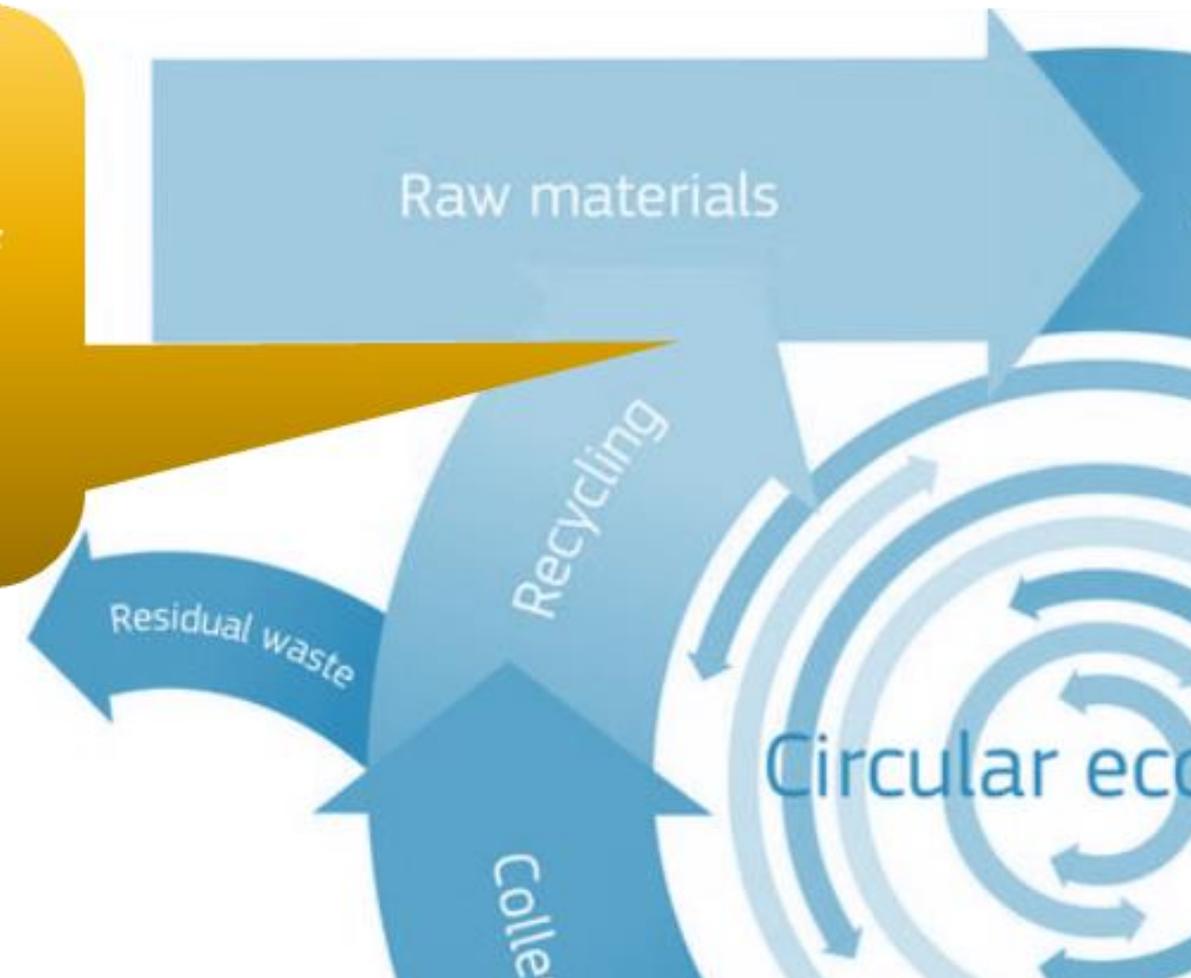
BMK Leitprojekt KRAISBAU

Feuchtigkeitsmessung



Charakterisierung in Subgruppen Kunststoffe und Textilien

Digital separation of clean, unmixed waste streams into subgroups. Characterization of geometry and quality of residual materials for immediate reuse.



Leitprojekt: circPlast-mr

Mechanisches Recycling von Kunststoffen



PETE
POLYETHYLENE
TEREPHTHALATE
Cosmetic containers
Plastic bottles
Mouthwash bottles
Prepared food trays



HDPE
HIGH DENSITY
POLYETHYLENE
Detergent bottles
Grocery Bags
Milk Bottles
Shampoo bottles



V
POLYVINYL
CHLORIDE
Garden hose
Window frames
Blood bags
Blister packs



LDPE
LOW DENSITY
POLYETHYLENE
6 pack rings
Cling film
Bread bags
Squeezable bottles



PP
POLYPROPYLENE
Bottle caps
Packaging tape
Cereal liners
Straws



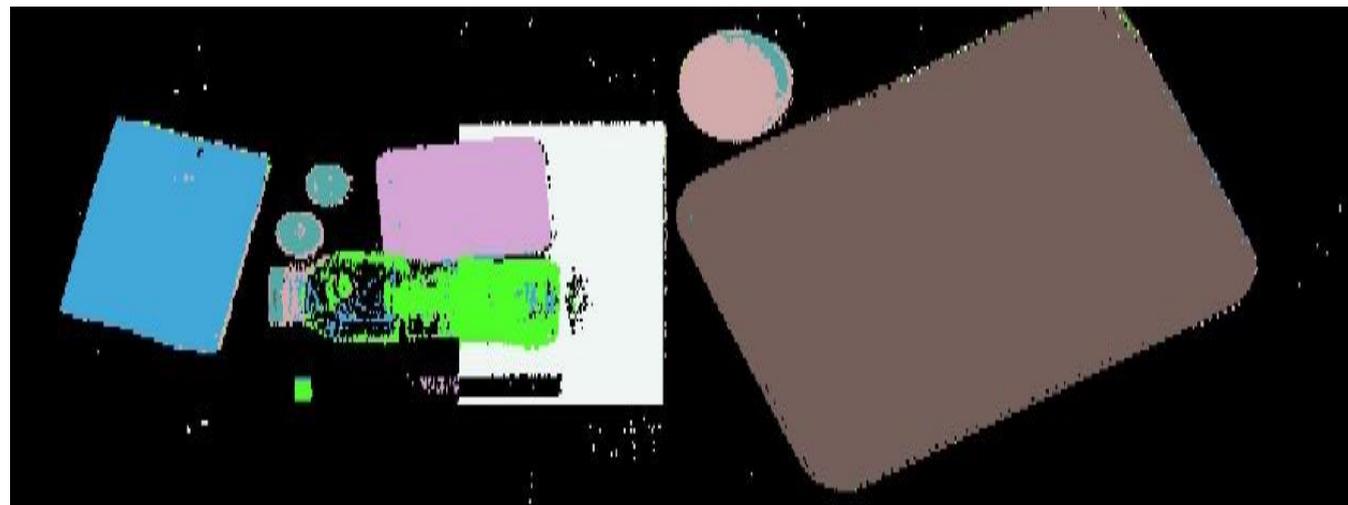
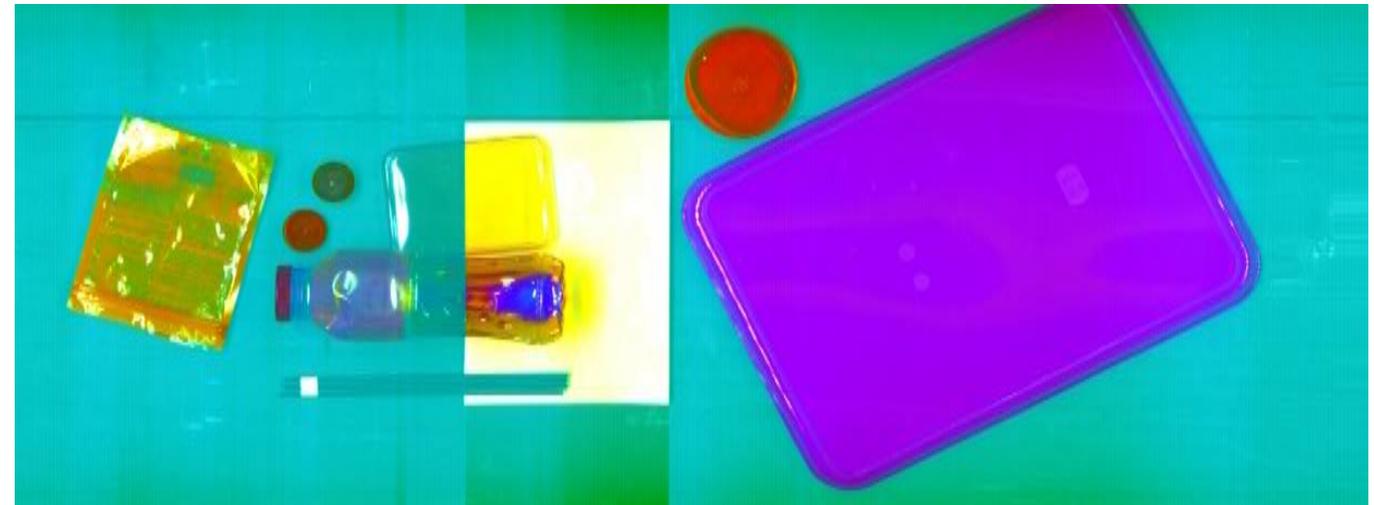
PS
POLYSTYRENE
Disposable coffee cups
Styrofoam
Plastic cutlery
Foam packaging



OTHER
POLYCARBONATE
Baby bottles
Water cooler bottles
Fiberglass
Tupperware

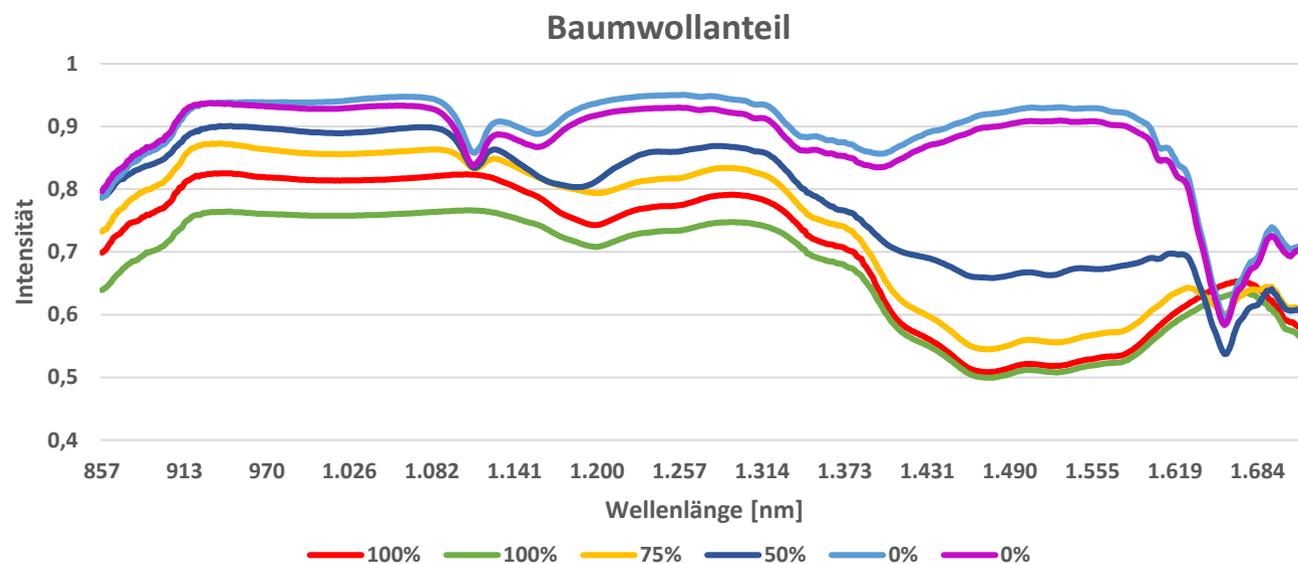
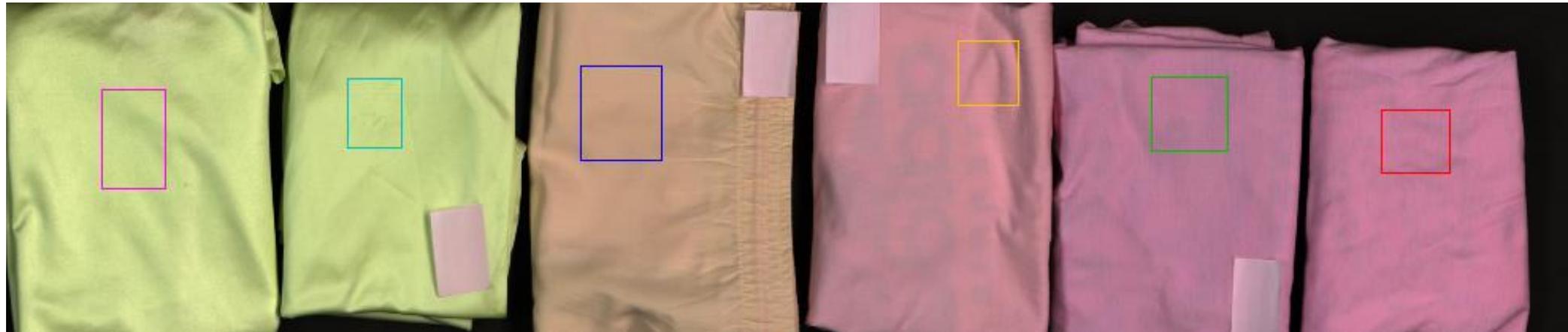


Charakterisierung für Grob- und Feinsortierung



Textilien

Baumwolle vs. Polyester

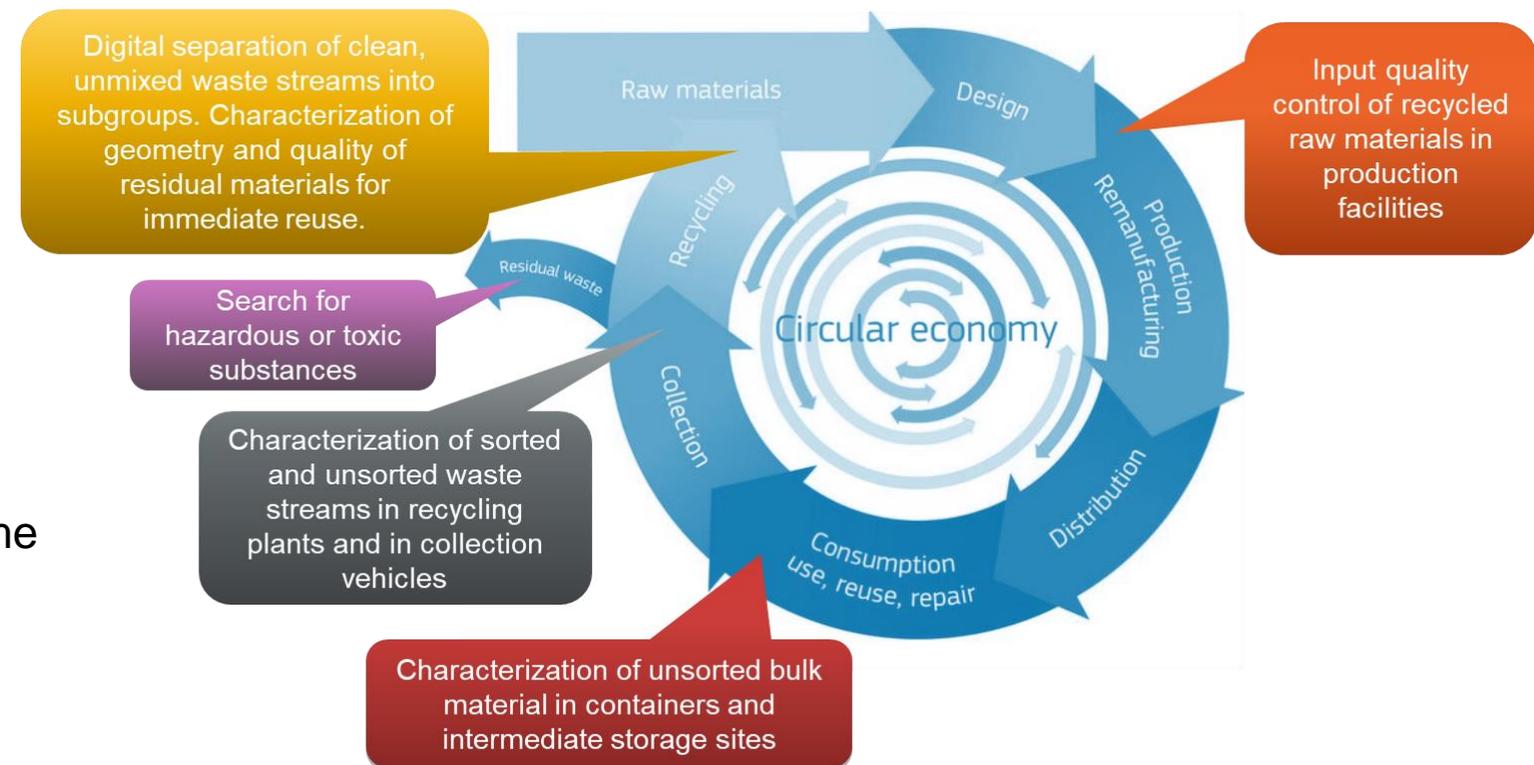


Sammlung, Aufbereitung und
automatisierte Sortierung von
gemischten Nicht- ReUse-fähigen
Textilien

Zusammenfassung und Best Practice Schritte für KMUs

Zusammenfassung

- **Hyperspektrallabor**
 - Umfassende Sensorik zur Erfassung der Materialparameter von UV – MWIR (200nm-5300nm)
 - Angepasste Beleuchtung und Kalibration
 - Referenzmaterial für Wertstoffkategorien
 - Mittels (KI) Analysen Anpassung und Auswertung für die industrielle Umsetzung
- **Wertstoffcharakterisierung für die Kreislaufwirtschaft**
 - Rohstoffe über alle möglichen Wertstoffströme
 - Produktion benötigt hohe Reinheitsgrade (>95%, >99%)
 - KI-basierte Multispektralanalyse ermöglicht Identifikation/Sortierung von Wertstoffen



Best Practice für KMUs

- **Problemstellung KMU:** Qualitätssicherung bzw. Materialcharakterisierung in intensiver Abstimmung mit dem KMU
- **Auswahl und Bereitstellung Samples:** Seitens KMU soll repräsentatives Probenmaterial für die Labortests zur Verfügung gestellt werden
- **Labortests:** Analyse des beigestellten Probenmaterials im Hyperspektrallabor durch JR (evtl. auch gemeinsam mit KMU).
- **Umsetzungskonzept KMU:** Auf Basis der Laborerkenntnisse wird seitens JR ein Umsetzungsplan für eine Wertstoffcharakterisierung für das KMU erstellt.
- **Projektumsetzung:** Laboranalysen, Studie, Direktbeauftragung oder auch kooperative Forschungsprojekte

Laborführung mit Materialcharakterisierung im Hyperspektrallabor

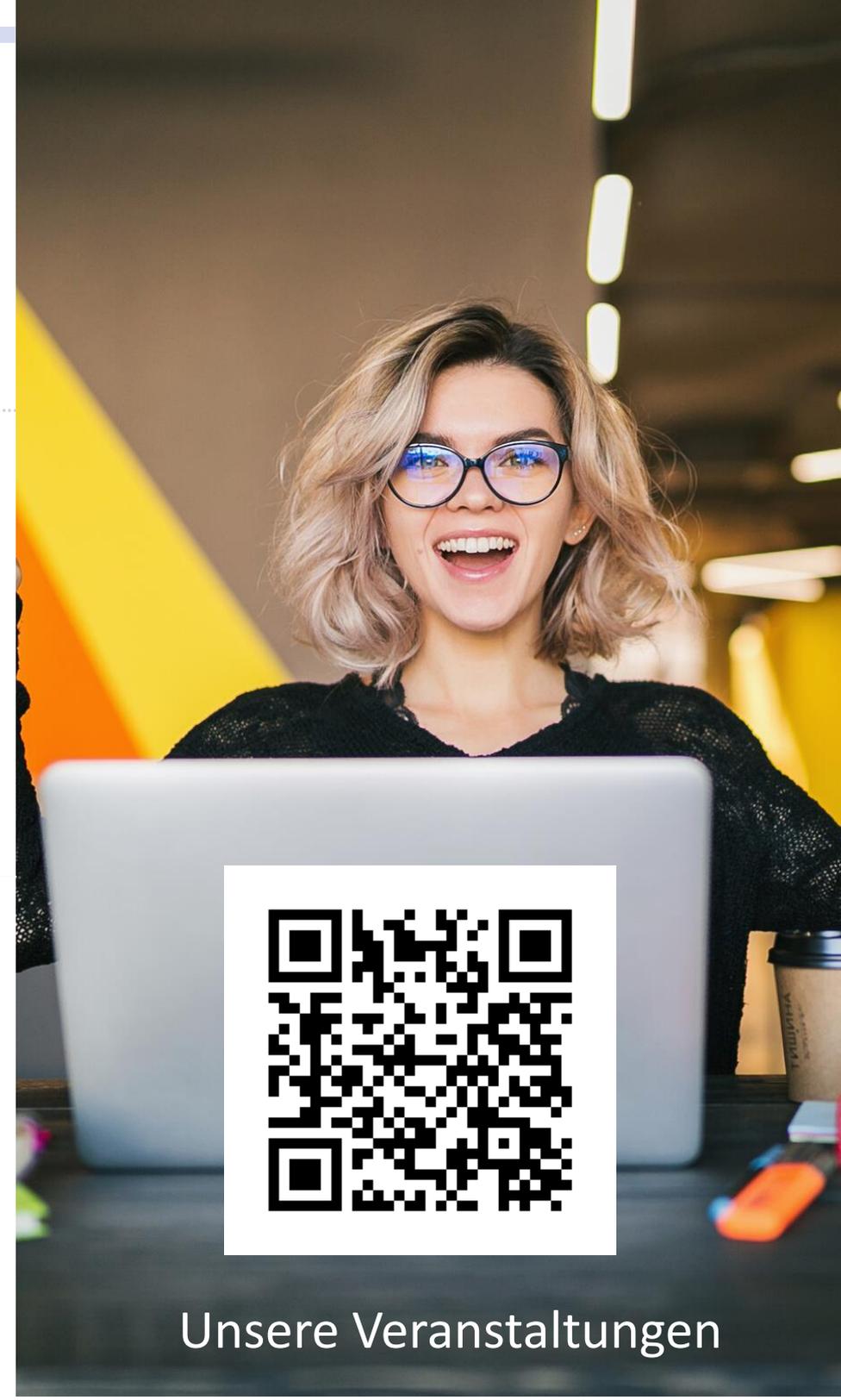
Fragen und Diskussion

Digitalisierung für KMU möglich machen.

Informationsveranstaltungen * Workshops * Digitale Innovation

DER DIGITAL INNOVATION HUB SÜD ALS
KOSTENLOSES SERVICE FÜR KMU

www.dih-sued.at/Veranstaltungen



Unsere Veranstaltungen

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

JOANNEUM RESEARCH
Forschungsgesellschaft mbH

DIGITAL– Institut für Informations-
und Kommunikationstechnologien

Steyrergasse 17, 8010 Graz
Tel. +43 316 876-5000
digital@joanneum.at

www.joanneum.at/digital

