



Deep-Learning-basierte Echtzeiterkennung von Nichteisenmetall-Feinfraktionen mittels RGB-Sensorik

Status quo und Perspektiven für ein sensorbasiertes Qualitätsmonitoring

Fabian Roth, M. Sc.

Dr.-Ing. Alexander Feil

Berlin, 24.03.2026

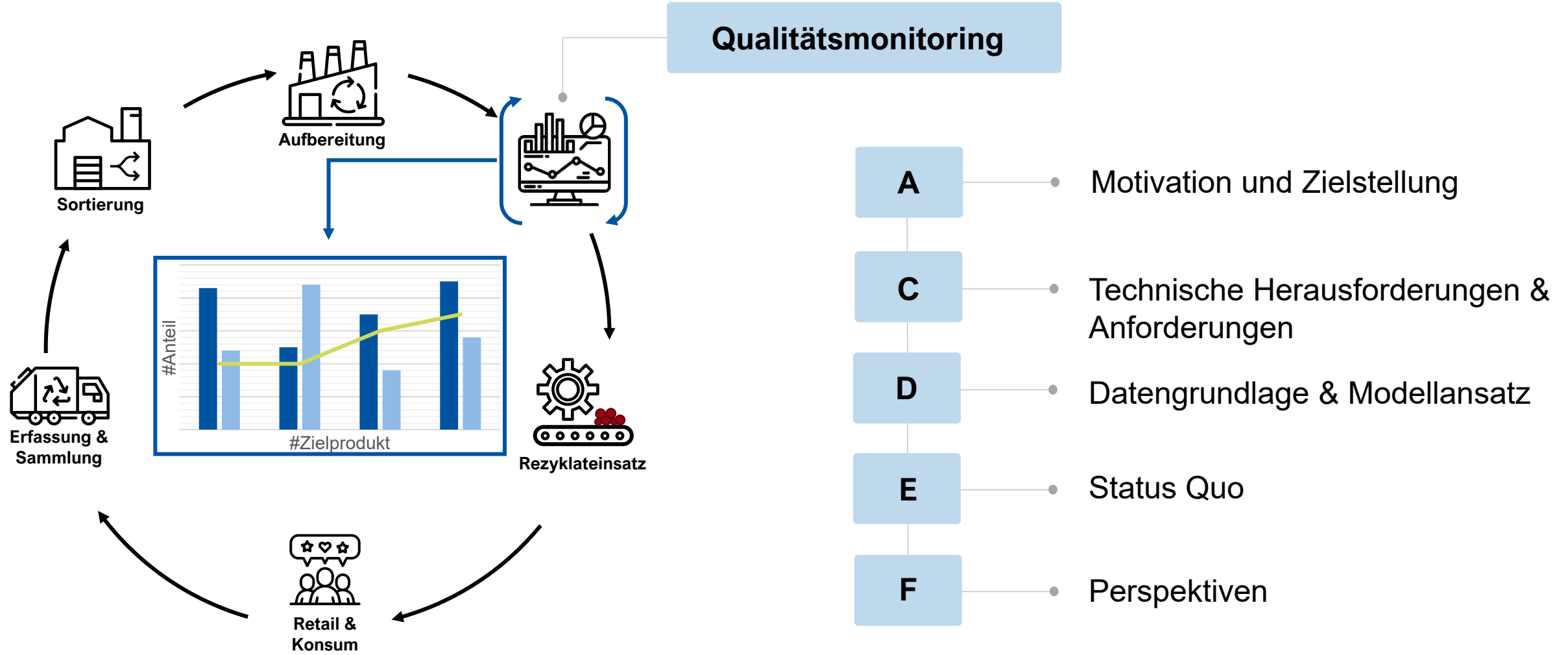
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS)

RWTH Aachen University



Agenda

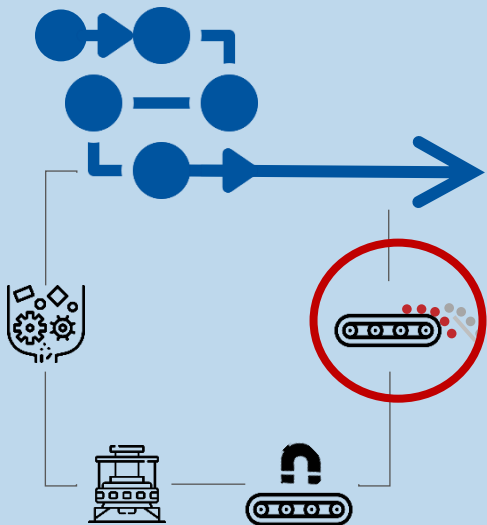
» Kontinuierliche Überwachung von Nichteisenmetall-Feinfraktionen



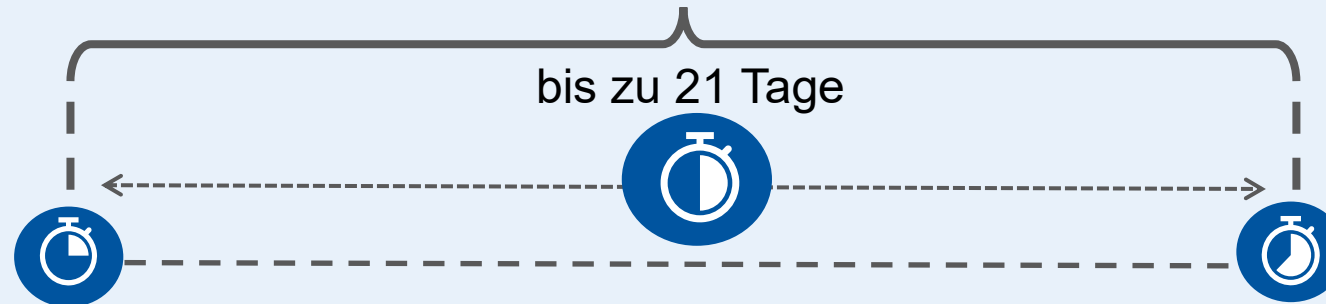
Motivation

» Kontinuierliche Materialflussüberwachung ist mit konventioneller Laboranalytik nicht möglich und somit keine dynamische Prozesssteuerung

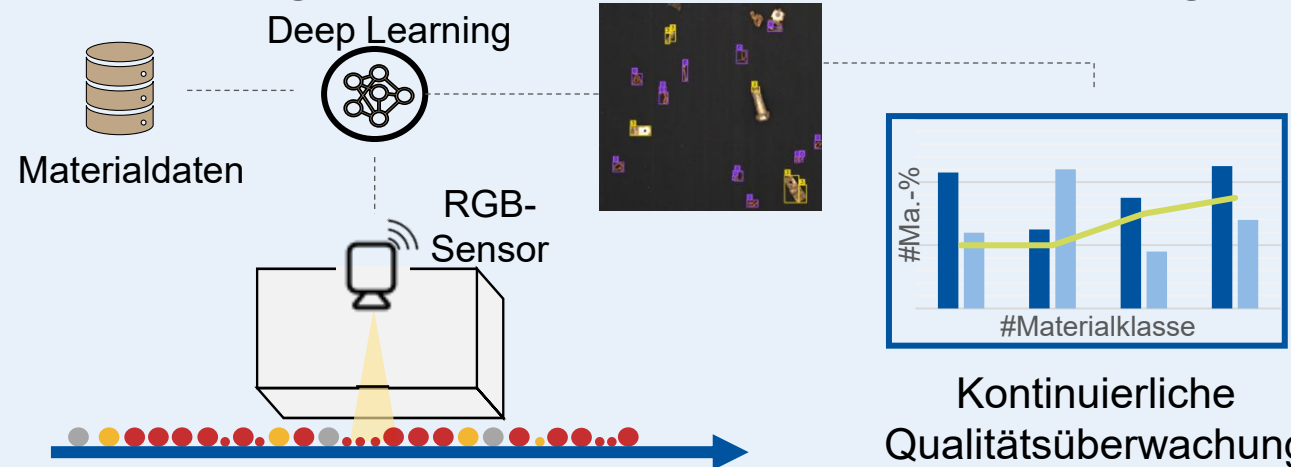
Material- vorbehandlung



Zeitliche Diskontinuität in der Qualitätsbewertung



Prozessintegration als Schlüssel zur Reaktionsfähigkeit



Zeitverzögerte Materialflussüberwachung

Punktuelle
Werkstoffidentifikation



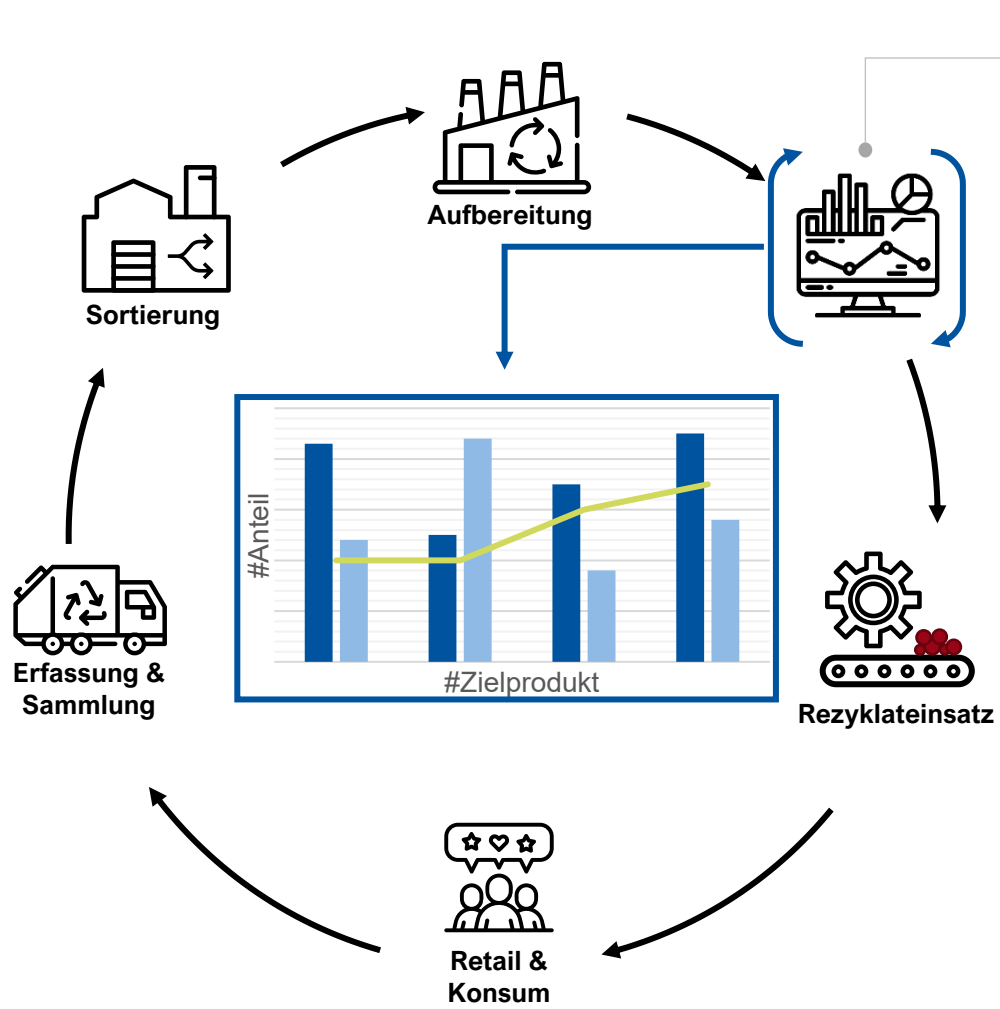
- Materialklasse
- Partikelposition
- Partikelmasse



Stoffliche
Zusammensetzung
(Ma.-%)

Agenda

» Kontinuierliche Überwachung von NE-haltigen Feinfraktionen



- A** • Motivation und Zielstellung
- C** • Technische Herausforderungen & Anforderungen
- D** • Datengrundlage & Modellansatz
- E** • Status Quo
- F** • Perspektiven

Untersuchtes Materialgemisch

» Schreddergut von Elektronikaltgeräten (6-10 mm)

Graumetall



Nicht-Metalle



Messing



Kupfer



Verbunde



Kabel

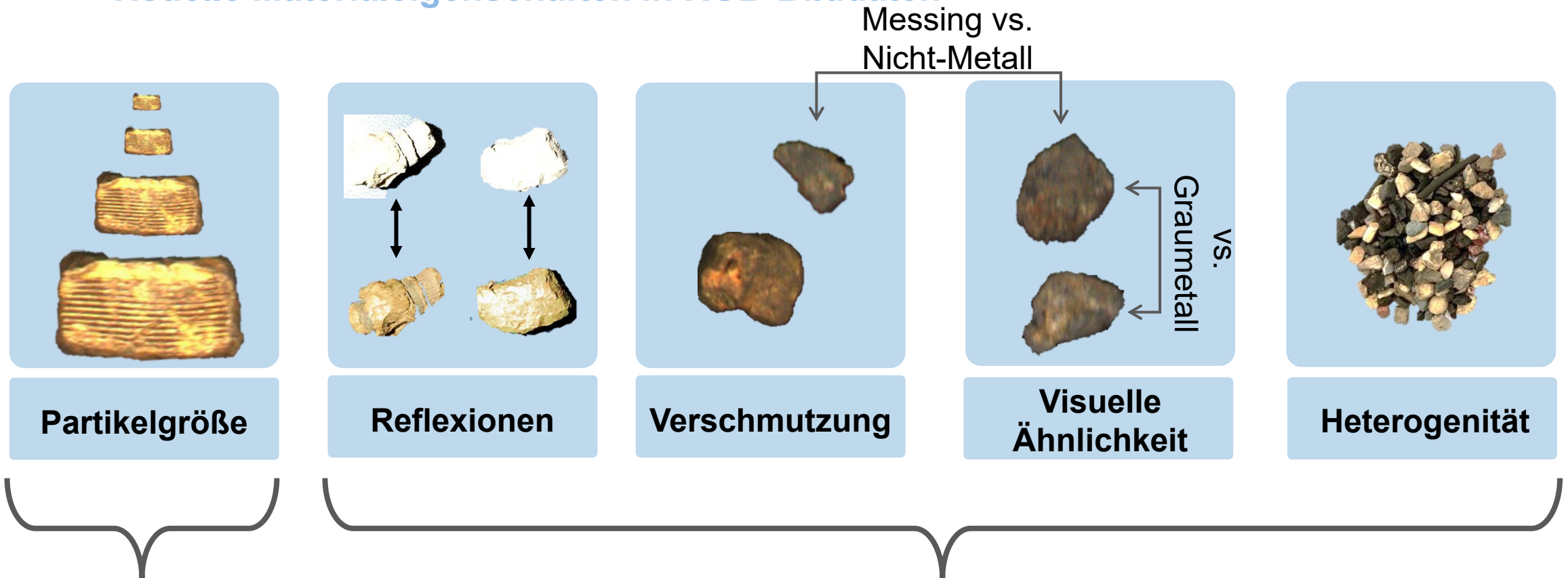


Geringe Partikelgröße, hohe Materialvielfalt,
hohes Wertstoffpotenzial.



Technische Herausforderungen der Echtzeiterkennung II/III

» Visuelle Materialeigenschaften in RGB-Bilddaten



Begrenzte visuelle Information pro Objekt

Erschwerte trennscharfe Klassifikation

Technische Herausforderungen der Echtzeiterkennung III/III



Ausleuchtung



Direkt

Diffus



Sensorauflösung



Gurtfarbe

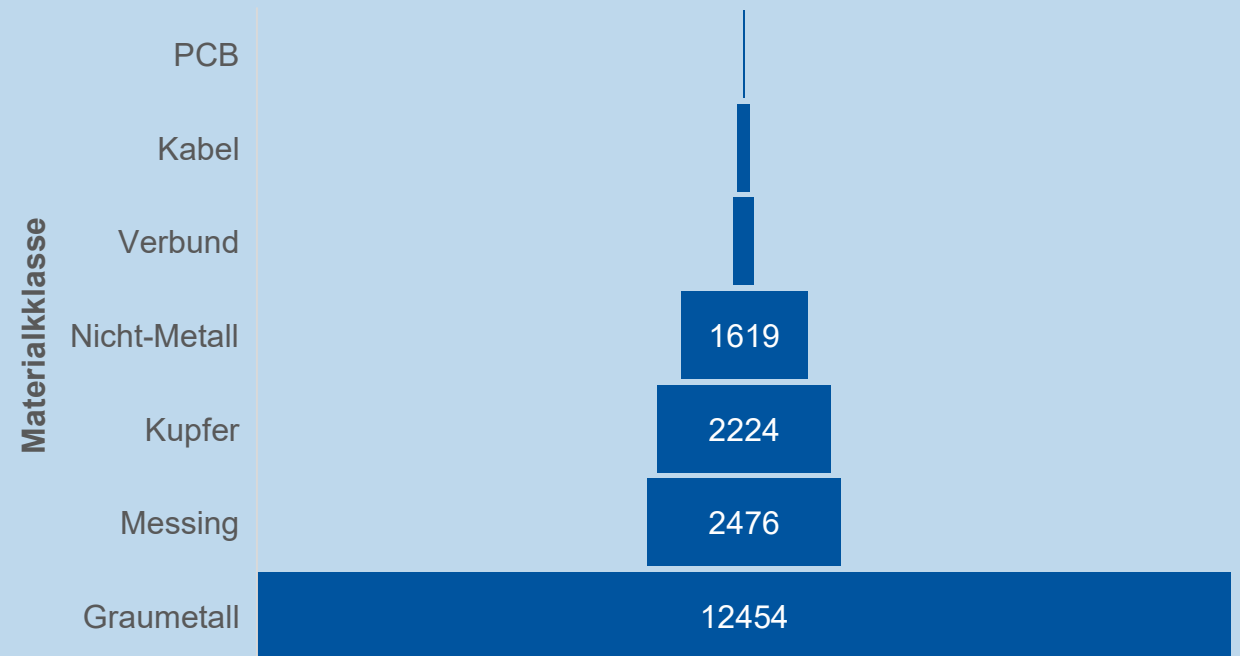


Partikelüberlagerung

Prozessbedingte Einflüsse

Partikelverteilung

■ Anzahl der Partikel



Unter-Repräsentation von Materialklassen

Ergebnisse basieren auf laufenden Arbeiten (Manuskript "Under Review").

Zeitliche Anforderungen an die Inline-Analyse

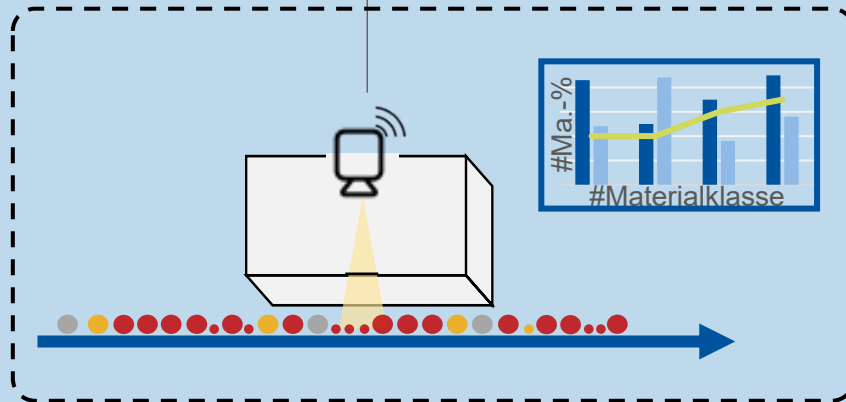
» Echtzeitfähigkeit als Voraussetzung für die Prozessintegration

Deep Learning basierte
Partikelerkennung

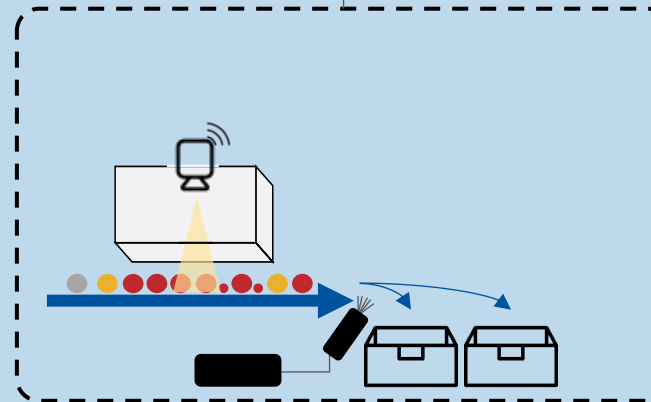


Flexible Reaktionszeit

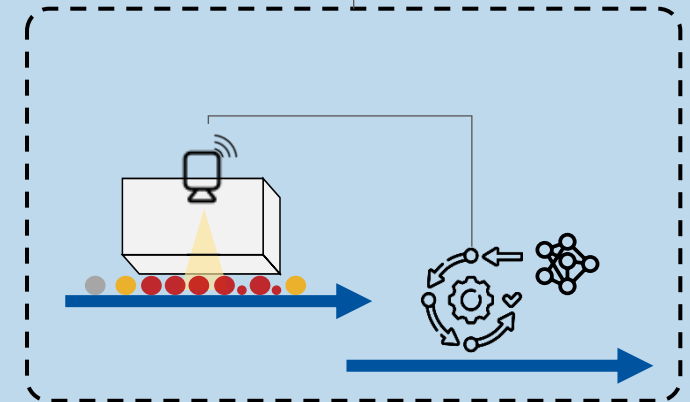
Begrenzte Reaktionszeit



Sensorbasierte Qualitätsüberwachung



Sensorbasierte Sortierung



Adaptive Prozesssteuerung

Vorhersage innerhalb Messabschnitt

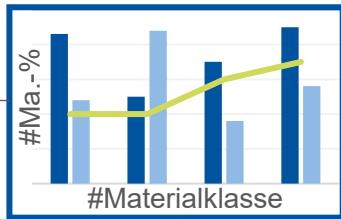
Anwendungsabhängige & Deep Learning-basierte Reaktionsanforderungen

» Kontextabhängige Echtzeitanforderungen

Transparenz & Trendanalyse

Verzögerung tolerierbar

Qualitätsüberwachung



Millisekunden bis Minuten

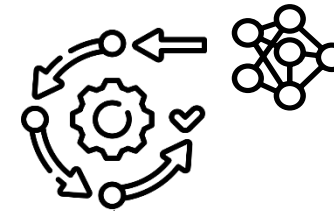
Dokumentation

Kontinuierliche Stabilität

Physische Intervention im Materialstrom

Harte Zeitgrenze durch Förderbandgeschwindigkeit

Sortierung / Prozesssteuerung



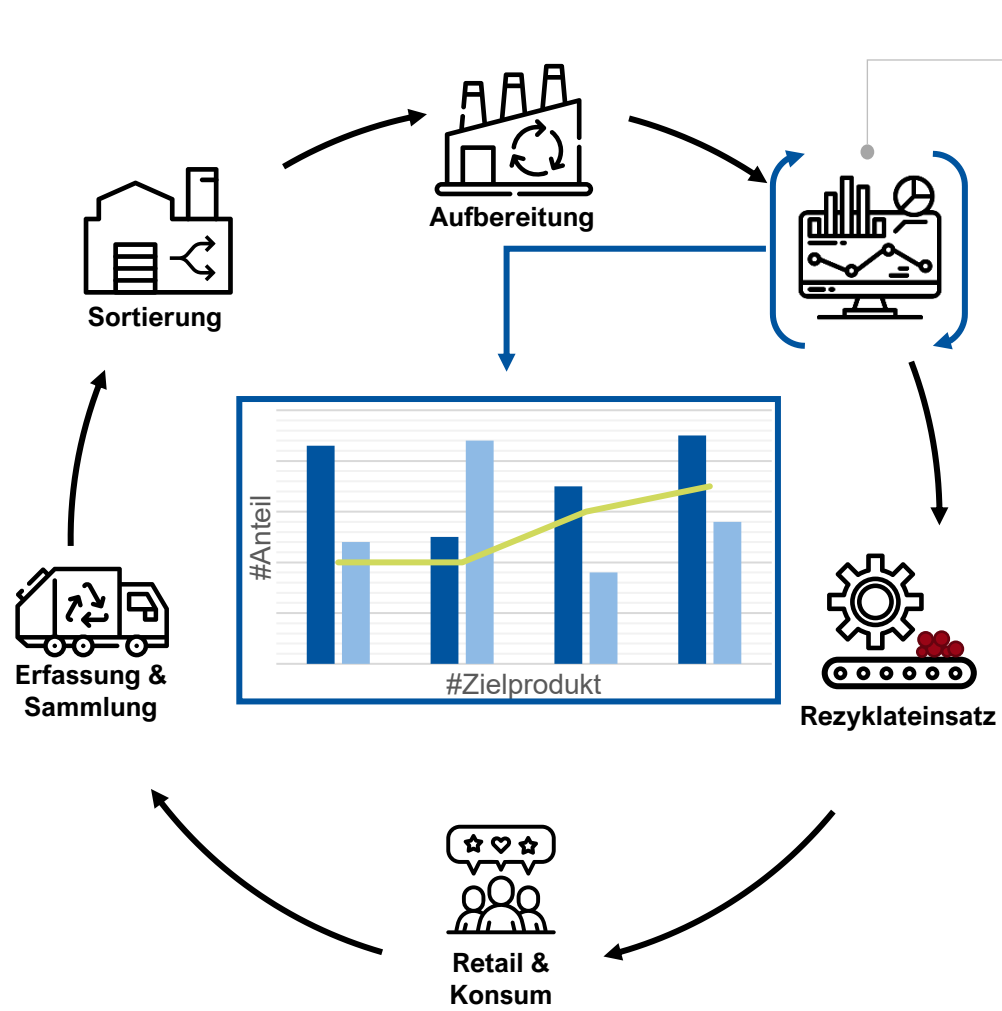
Millisekunden bis Sekunden

Aktorensteuerung (z.B. Düse)

Deterministische, prozesssichere Echtzeit

Agenda

» Kontinuierliche Überwachung von NE-haltigen Feinfraktionen



Qualitätsmonitoring

A

• Motivation und Zielstellung

C

• Technischen Herausforderungen & Anforderungen

D

• Datengrundlage & Modellansatz

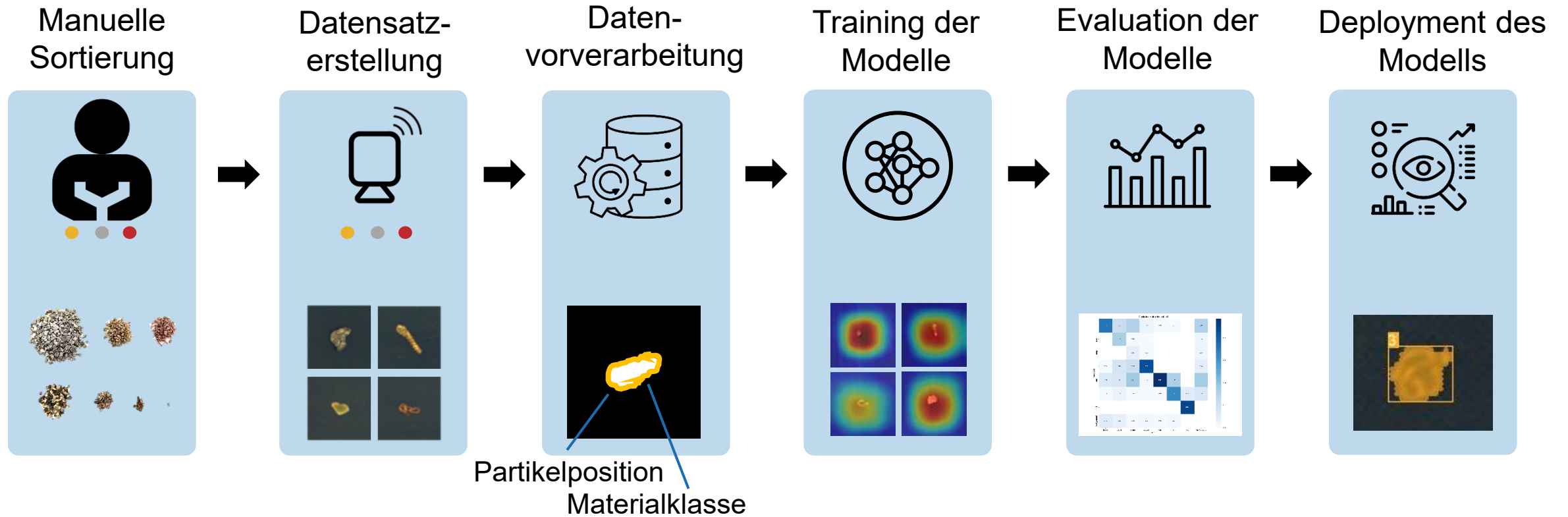
E

• Status Quo

F

• Perspektiven

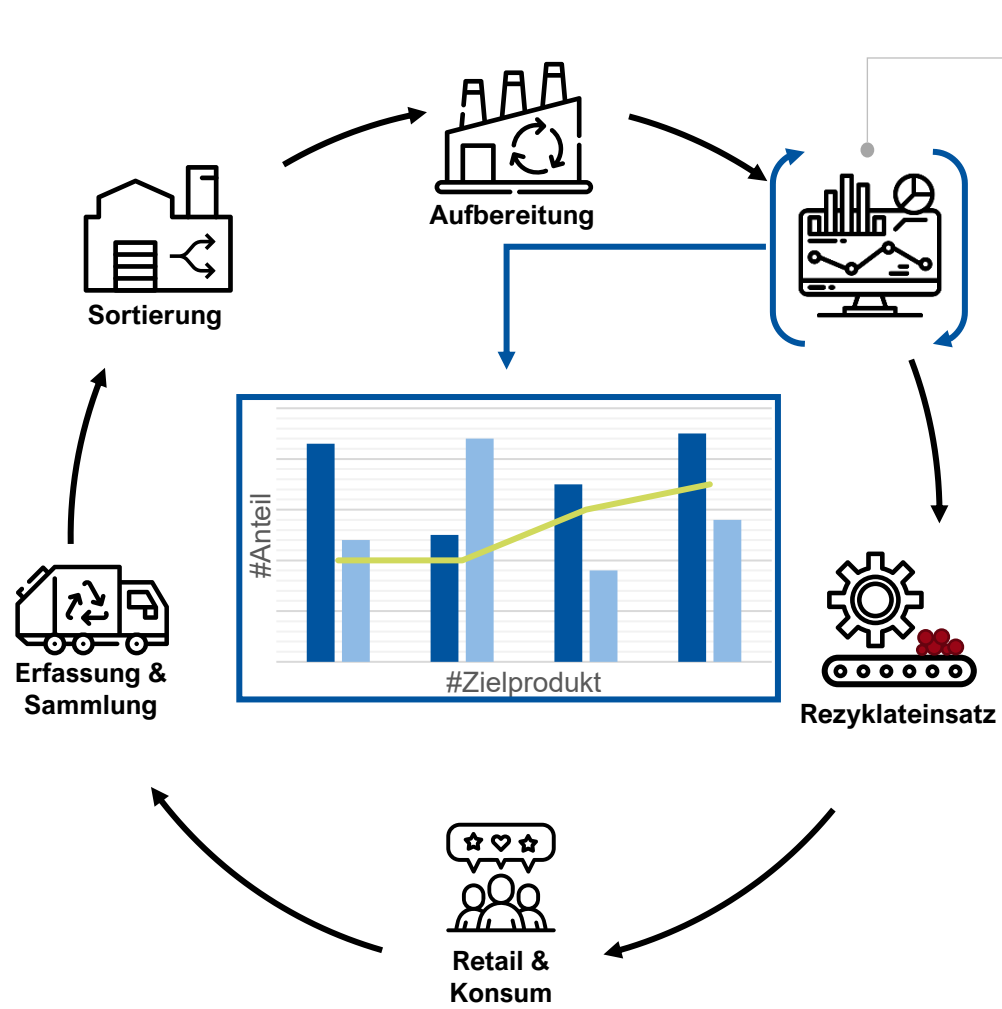
Datengrundlage & Modellansatz



Ergebnisse basieren auf laufenden Arbeiten (Manuskript "Under Review").

Agenda

» Kontinuierliche Überwachung von NE-haltigen Feinfraktionen



Qualitätsmonitoring

A

• Motivation und Zielstellung

C

• Technischen Herausforderungen & Anforderungen

D

• Datengrundlage & Modellansatz

E

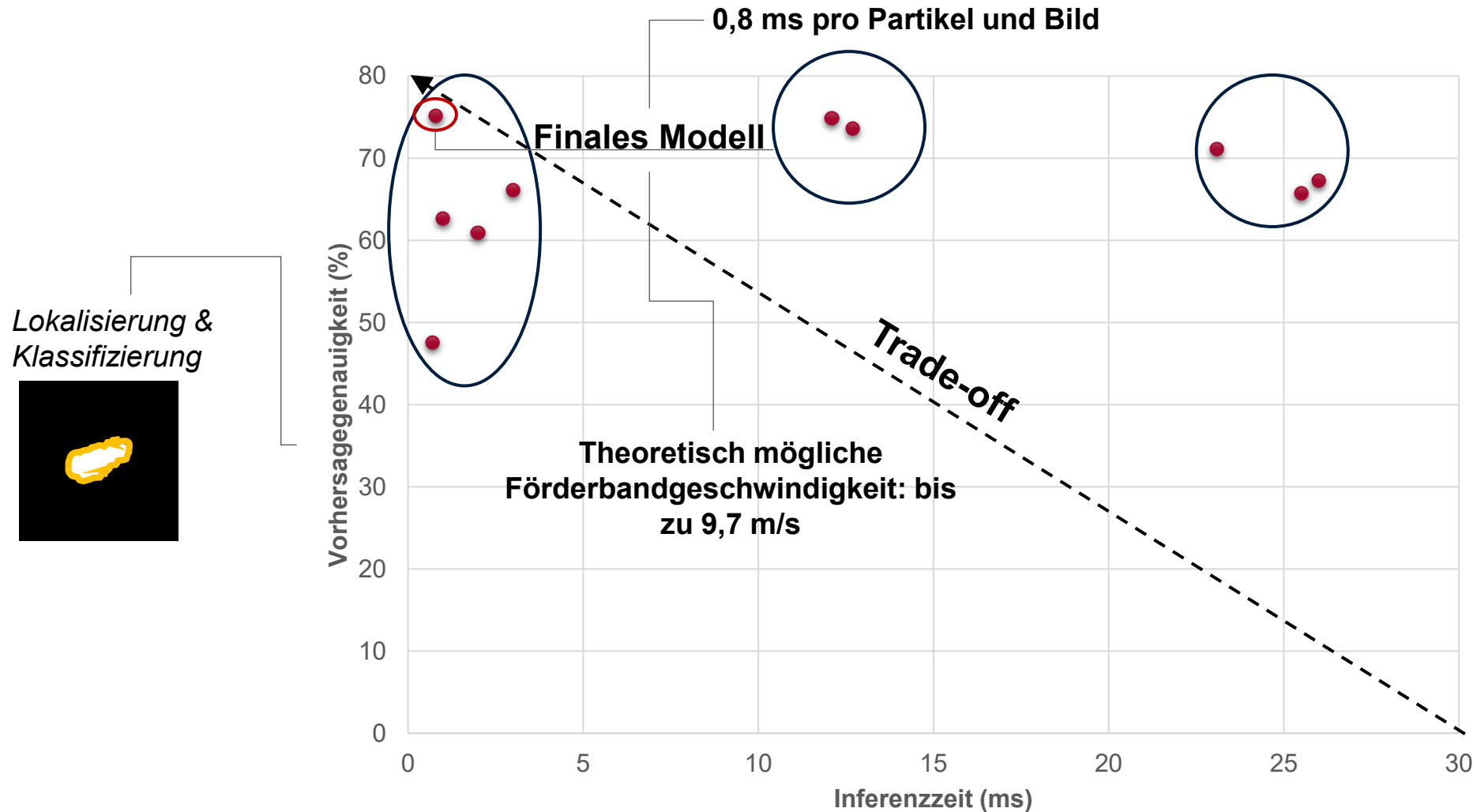
• Status Quo

F

• Perspektiven

Balance zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit

» Trade-off zwischen Vorhersagegenauigkeit und Inferenzzeit



Ergebnisse basieren auf laufenden Arbeiten (Manuskript "Under Review").

Klassifikation von Materialklassen

» Anteil der richtigen Vorhersagen je Klasse an der Gesamtprobe

PCB	0,89						
Graumetall		0,97	0,03	0,32	0,14	0,14	0,36
Kupfer			0,85		0,01	0,16	0,21
Nicht-Metall	0,11	0,01	0,01	0,64	0,02	0,06	0,01
Messing		0,01	0,05	0,01	0,71	0,22	0,30
Kabel			0,01			0,33	
Verbund			0,02				0,09
	PCB	Graumetall	Kupfer	Nicht-Metall	Messing	Kabel	Verbund

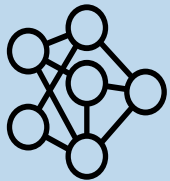
► Konfusionsmatrix

- Zeigt, wo das Modell richtig und falsch liegt (Verwechslung zwischen Klassen)
 - **Spalte** zeigt die tatsächlichen Materialklassen (100%)
 - **Zeile** zeigt die vorhergesagten Materialklassen (>100%)
- Sehr gute Klassifikationsergebnisse ($\geq 85\%$) für die Klassen Kupfer, Graumetall und PCB.

Ergebnisse basieren auf laufenden Arbeiten (Manuskript "Under Review").

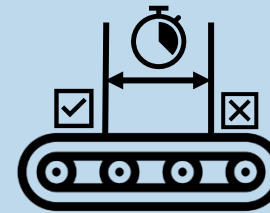
Takeaways

RGB-basierte Deep-Learning-Modelle ermöglichen die Lokalisierung und Klassifizierung von Nichteisenmetall-Feinfraktionen bis zu ~ 75%



Prozessfähigkeit entsteht aus der Balance zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit.

Förderbandgeschwindigkeit definiert das verfügbare Entscheidungsfenster für Prozessintegration

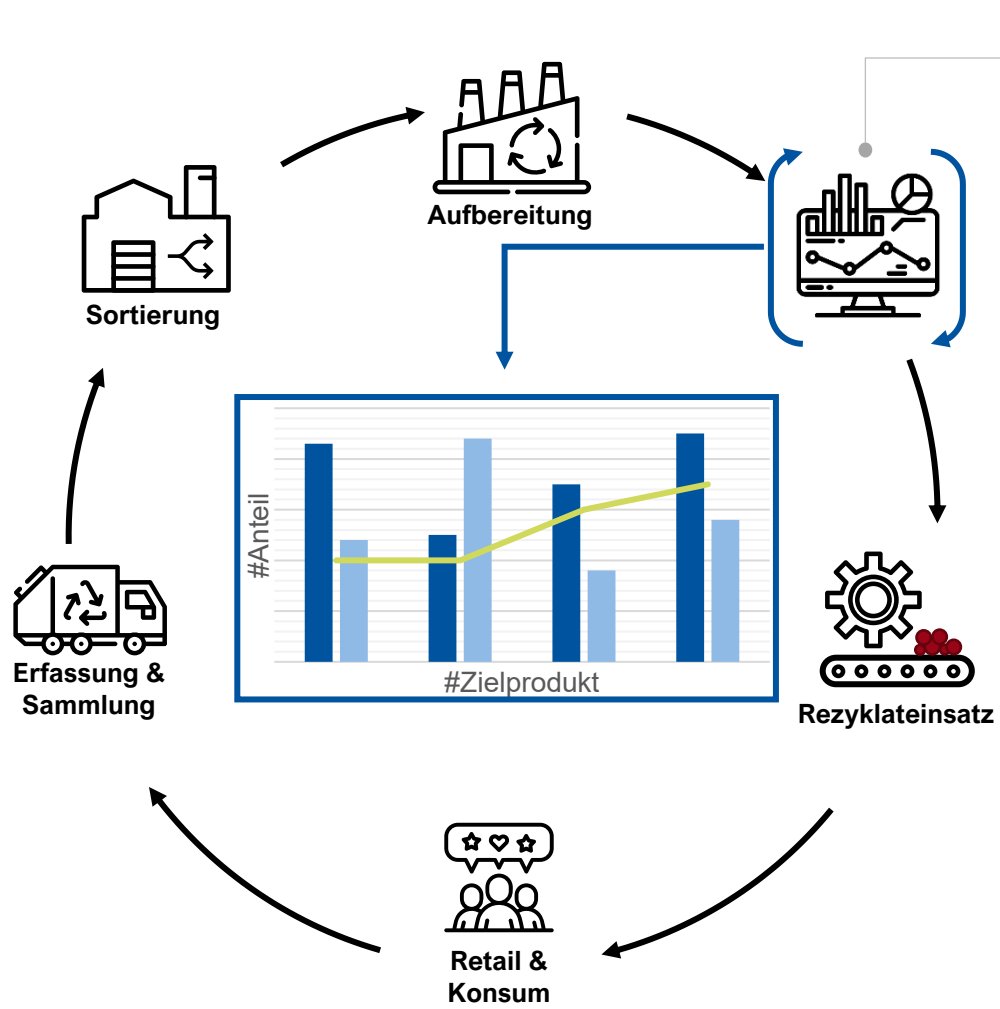


Gemessene Inferenzzeit erlaubt grundsätzlich Echtzeitanwendungen: Überwachung, Sortierung und Prozesssteuerung



Agenda

» Kontinuierliche Überwachung von NE-haltigen Feinfraktionen



Qualitätsmonitoring

A

• Motivation und Zielstellung

C

• Technischen Herausforderungen & Anforderungen

D

• Datengrundlage & Modellansatz

E

• Status Quo

F

• Perspektiven

Perspektiven für ein sensorbasiertes Qualitätsmonitoring

Übertragung von
Modellvorhersagen
(Einzelpartikelaufnahmen)
auf komplexe Materialströme

Verbesserung der
Robustheit gegenüber
realen Prozessbedingungen
für Inline-Anwendungen



Integration in bestehende
Prozessketten

Nutzung kontinuierlicher Daten
zur automatischen Anpassung
von Prozessparametern

Fusion zusätzlicher
Sensordaten zur verbesserten
Materialcharakterisierung



Fabian Roth, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS)

RWTH Aachen University

Wüllnerstr. 2, D-52062 Aachen

Tel.: +49 24180-22778

Mail: fabian.roth@ants.rwth-aachen.de

Web: www.ants.rwth-aachen.de

This work was prepared using data from contract research. The Department of Anthropogenic Material Cycles (ANTS) was commissioned to carry out an open-ended and objective scientific study on the subject of “sensor-based characterization of non-ferrous metals” based on the guidelines of scientific practice. The contract research was commissioned by REMONDIS SmartRec GmbH, a German recycling company as project sponsor.