



Verbesserung des Recyclings von Bau- und Abbruchabfällen: Einsatz von KI-basierter Prozesssteuerung und automatisiertem Qualitätsmanagement mittels sensorbasiertem Inline-Monitoring von Korngrößenverteilungen

Lieve Göbbels¹, Nils Kroell¹, Karoline Raulf¹, Steffen Häberle², Jesko Merkel³, Jason Rambach⁴

¹ *Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS), RWTH Aachen University, Wüllnerstraße 2, 52062 Aachen*

² *KLEEMANN GmbH, Manfred-Wörner-Straße 160, 73037 Göppingen*

³ *Point 8 GmbH, Rheinlanddamm 201, 44139 Dortmund*

⁴ *Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Trippstadter Straße 122, 67663 Kaiserslautern*

* Korrespondierende Autorin: lieve.goebbels@ants.rwth-aachen.de





1. Motivation



2. Ergebnisse Vorstudie



3. KIMBA-Projekt



4. Industrieperspektive + Fazit



1. Motivation



2. Ergebnisse Vorstudie



3. KIMBA-Projekt

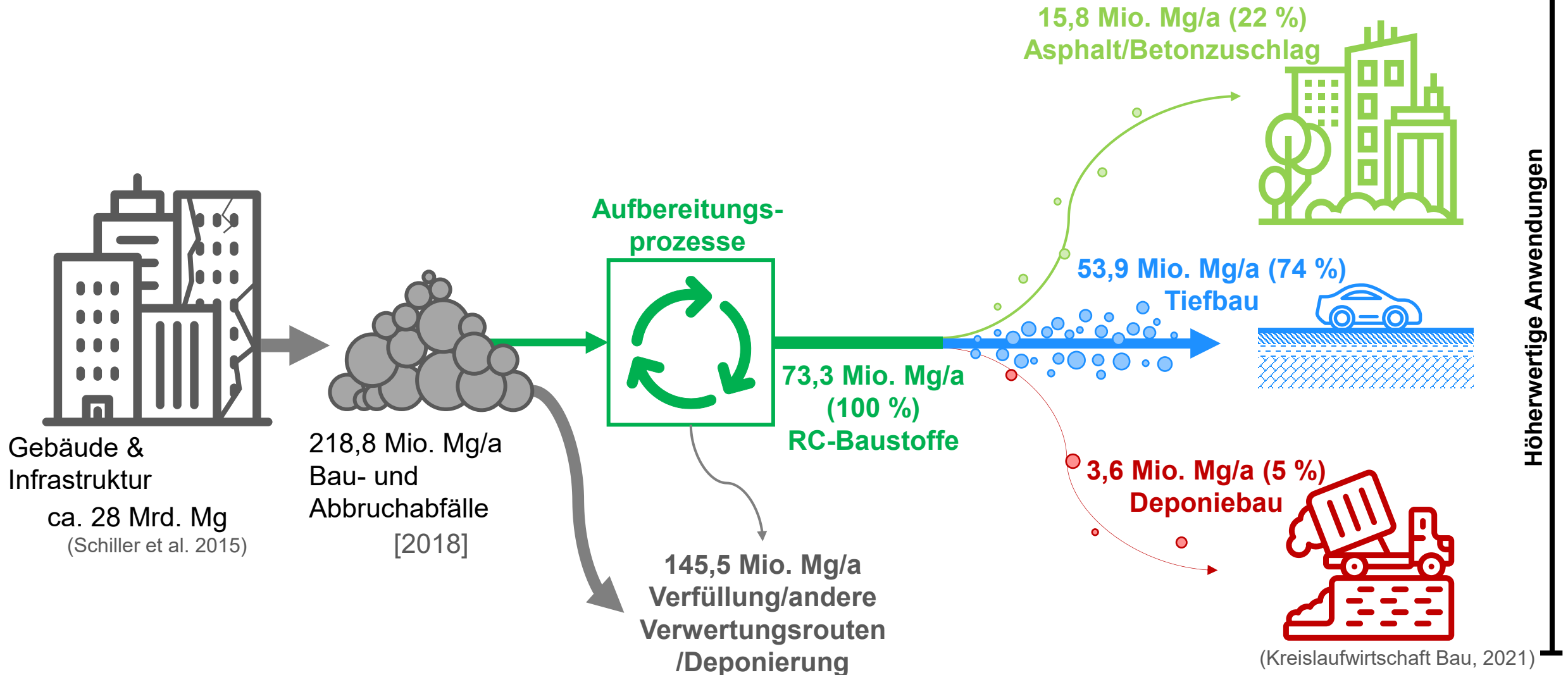


4. Industrieperspektive + Fazit

Motivation I/III



» Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland



Motivation II/III

» Anforderungen an RC-Baustoffe



Bspw. DIN EN 12620

- ▷ **Korngrößenverteilung (KGV)**
- ▷ Kornform
- ▷ Materialzusammensetzung
- ▷ Kornrohichte
- ▷ Widerstand gegen Zertrümmerung
- ▷ Widerstand gegen Verschleiß
- ▷ ...



Umweltstation Würzburg (80 Ma.-% Rezyklat)



Motivation III/III

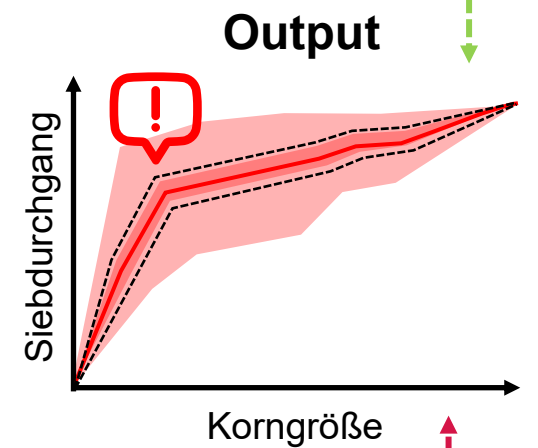
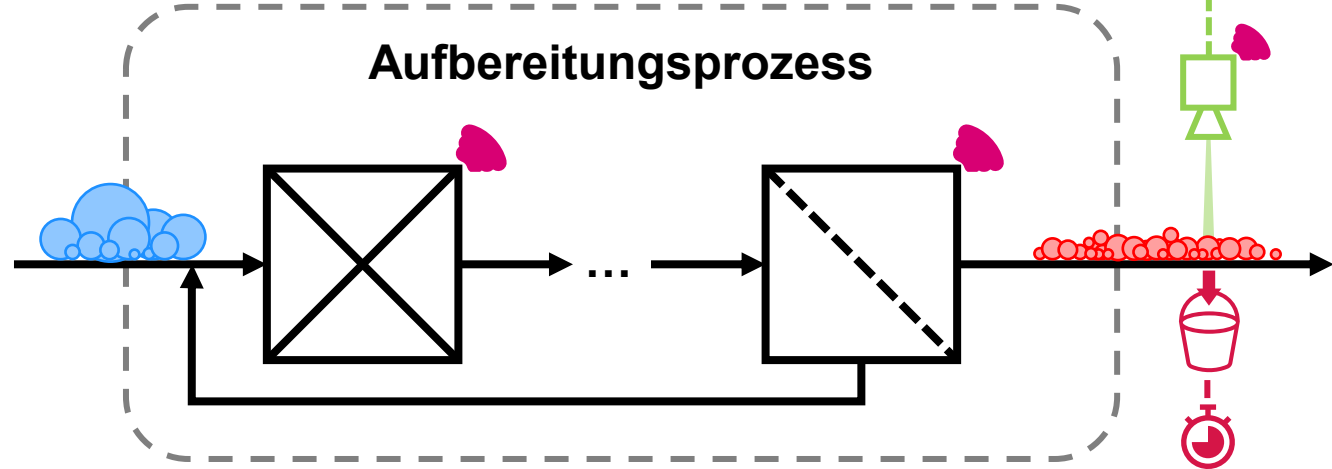
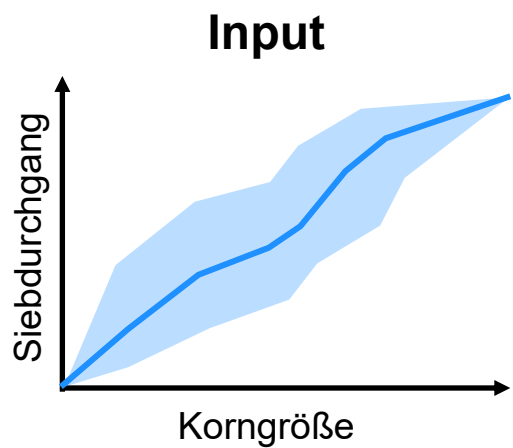


» Sensorbasierte Stoffstromcharakterisierung


**Sensorbasiertes
Qualitätsmonitoring**


**Adaptive
Prozesssteuerung**

 **Machine Learning** 



 **Zeitverzug**  **Probenahme-
fehler**  **Personal-
kosten**

 **Manuelle
Siebanalyse** 





1. Motivation



2. Ergebnisse Vorstudie



3. KIMBA-Projekt

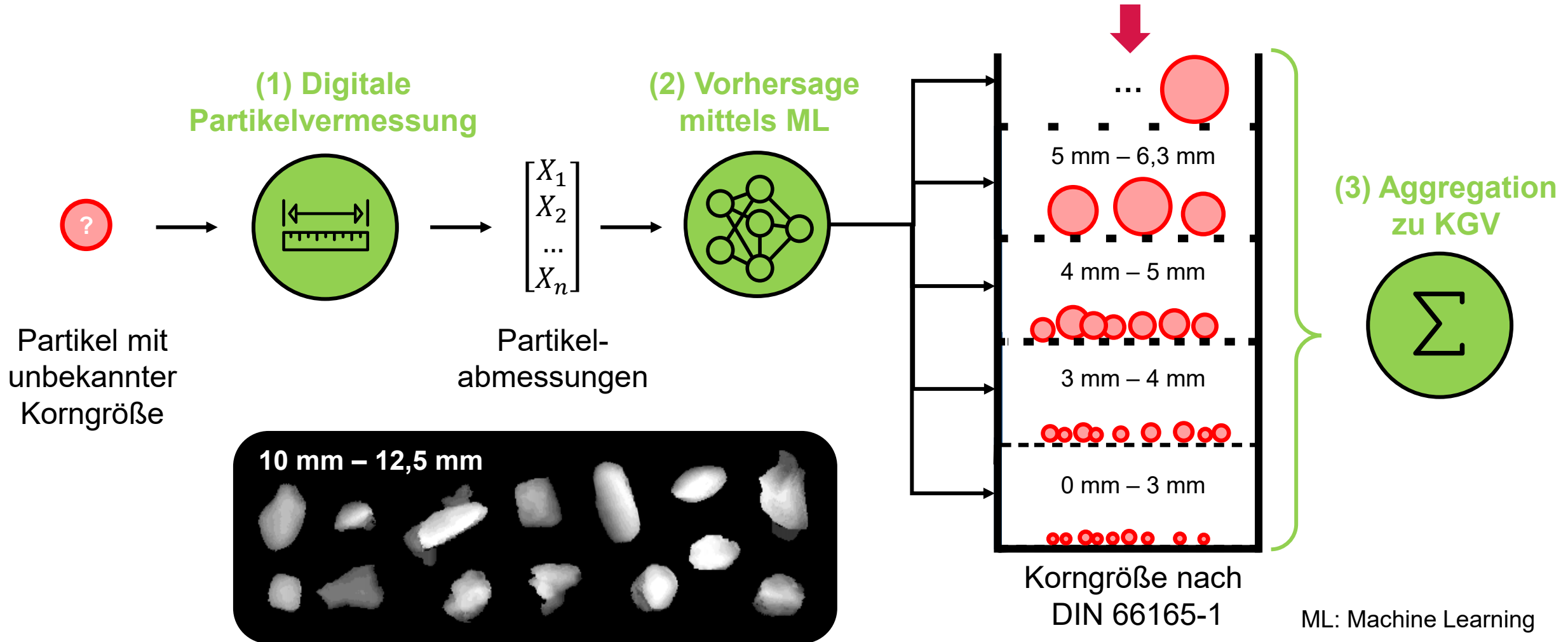


4. Industrieperspektive + Fazit

Problemstellung und Lösungsansatz



» Sensorbasierte Vorhersage von Korngrößenverteilungen (KGVs)

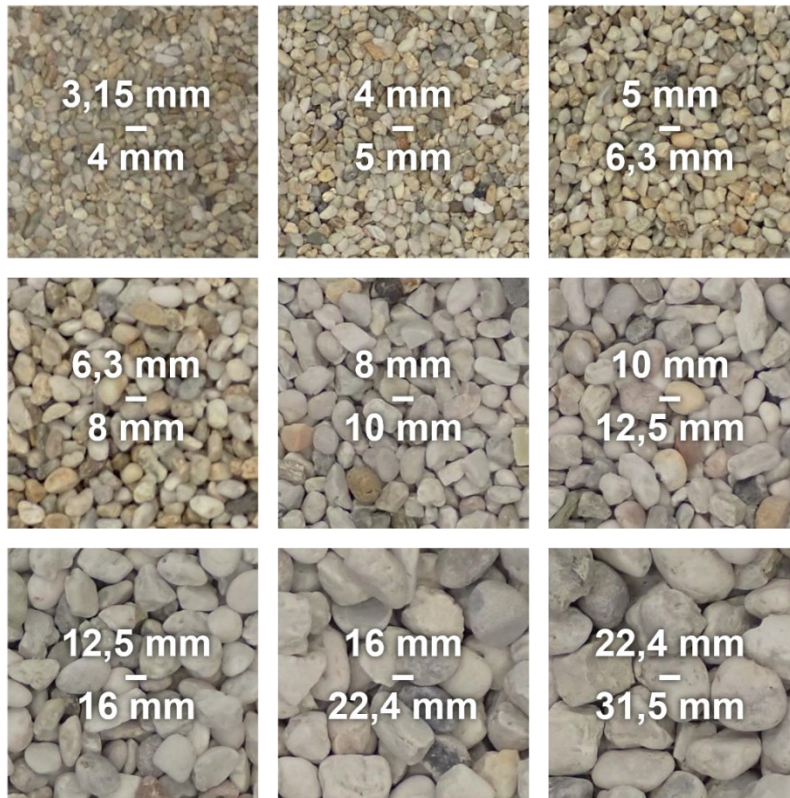


Material und Methode I/II



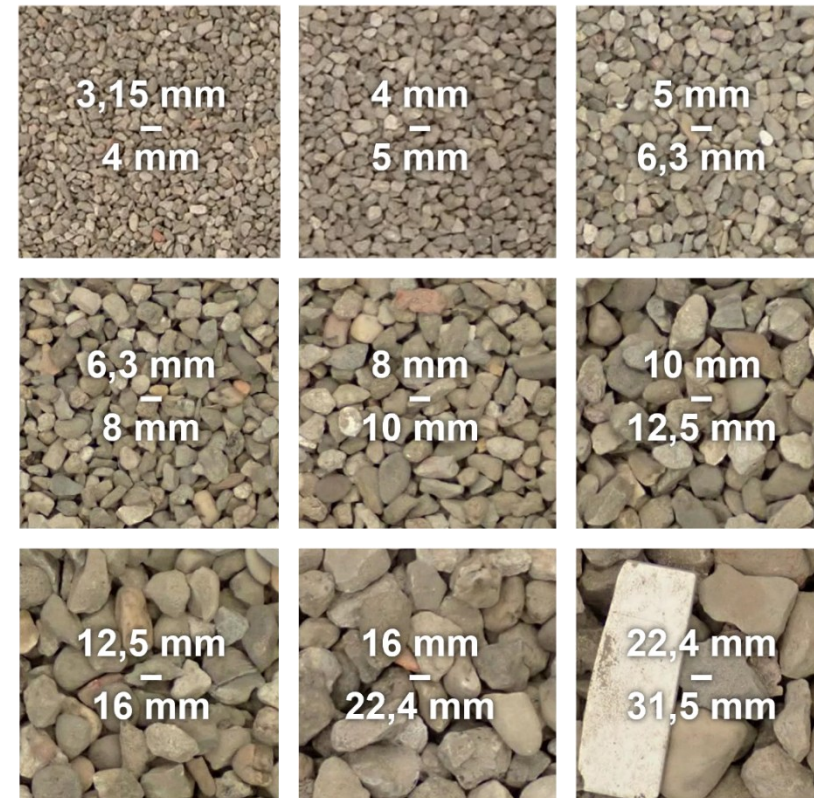
» Versuchsmaterial nach Probenvorbereitung

Primärer Quarzkies (PRIM)



PRIM: 78.575 Partikel

RC-Material (RCM)



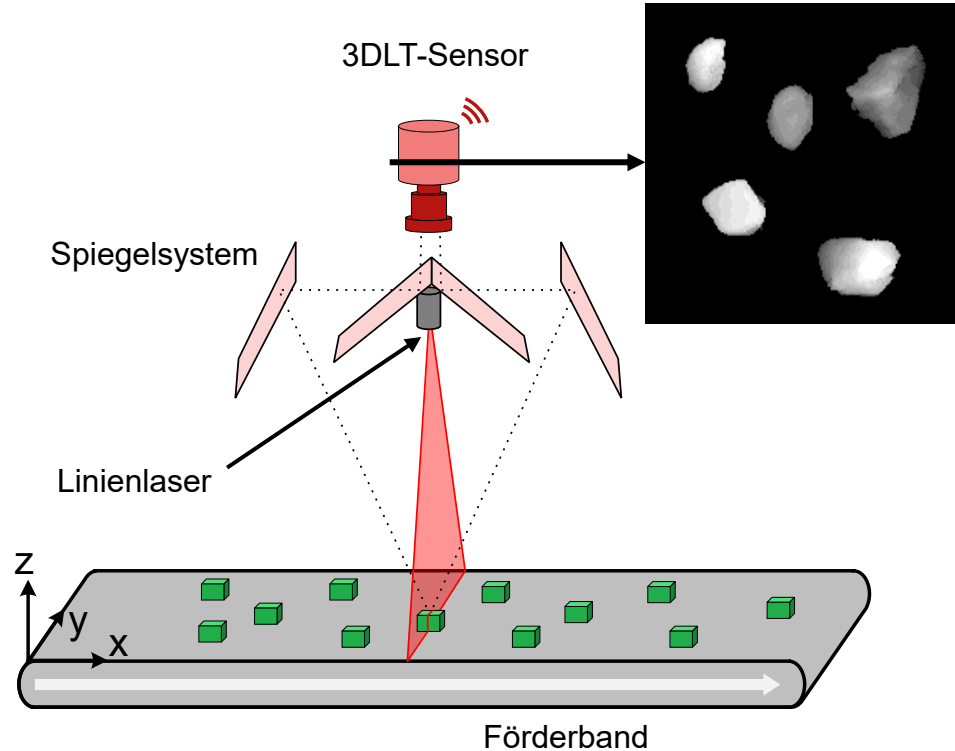
RCM: 102.736 Partikel

Material und Methode II/II

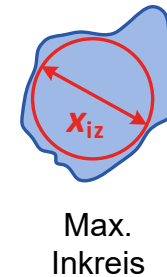
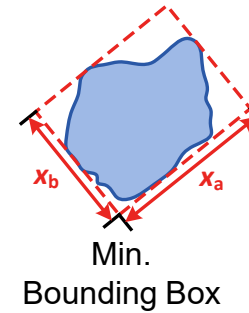
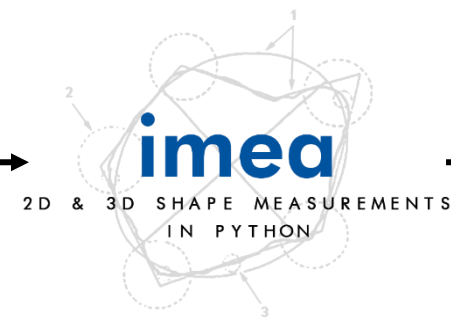


» Partikelvermessung und Datensatzerstellung

3D Lasertriangulation (3DLT)

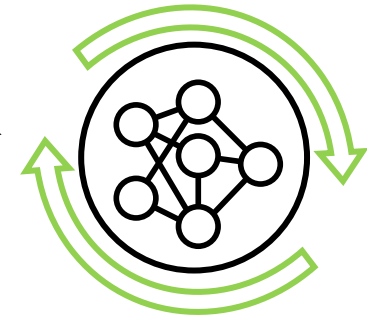


Partikelvermessung



...

Machine Learning



Linear: Lineare Regression

PLS: Partial Least Squares

RF: Random Forest

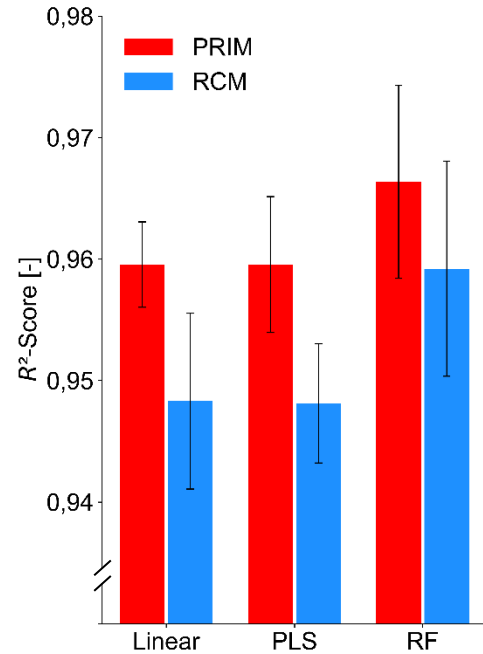
```
pip install imea
imea.readthedocs.io
doi.org/10.21105/joss.03091
```

Ergebnisse und Diskussion I/II

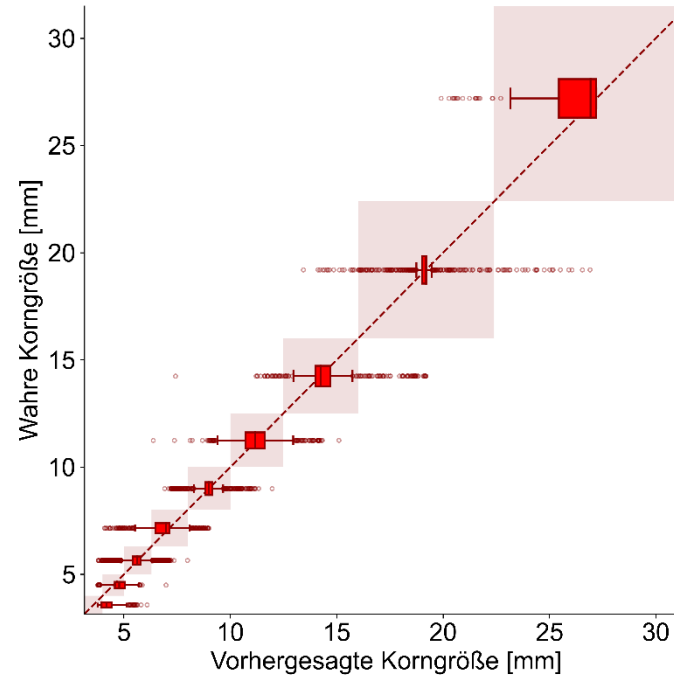


» Erzielte Vorhersagegenauigkeiten

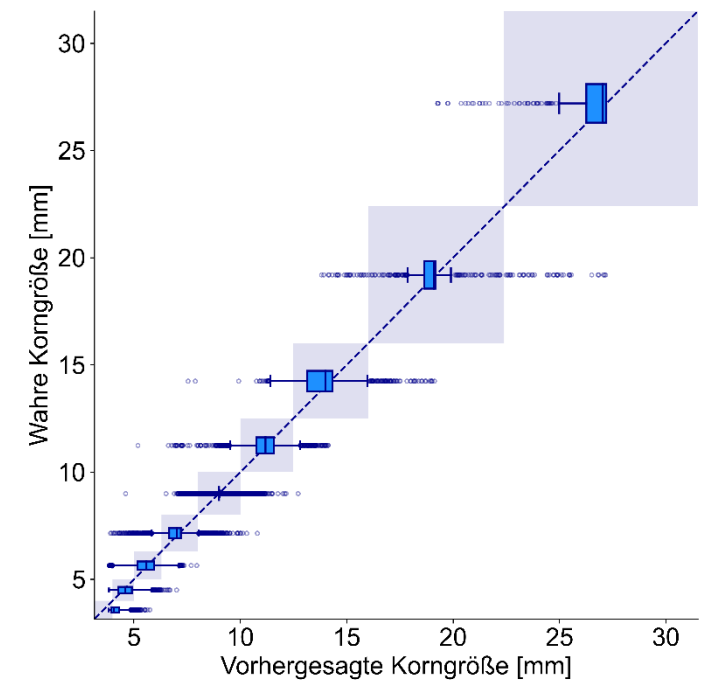
(a) R^2 -Scores



(b) Vorhersagen RF & PRIM



(c) Vorhersagen RF & RCM



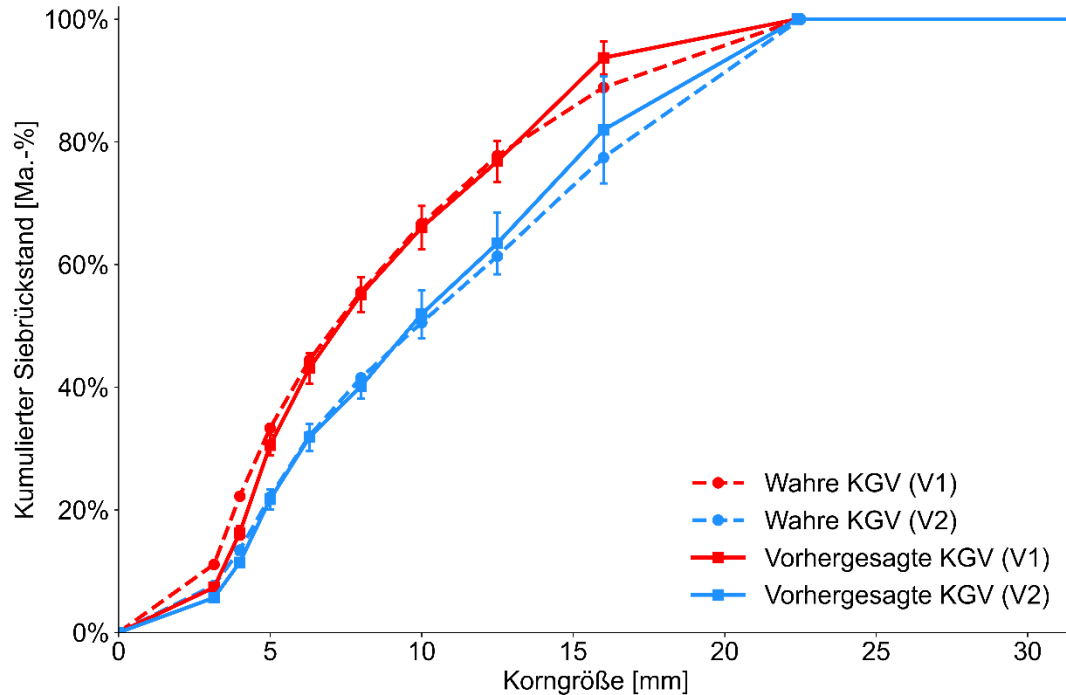
⇒ Präzise Vorhersage der Korngröße ($R^2 > 95\%$) möglich
⇒ Vorhersage der korrekten Kornklasse in $> 70\%$ der Fälle

Ergebnisse und Diskussion III/II

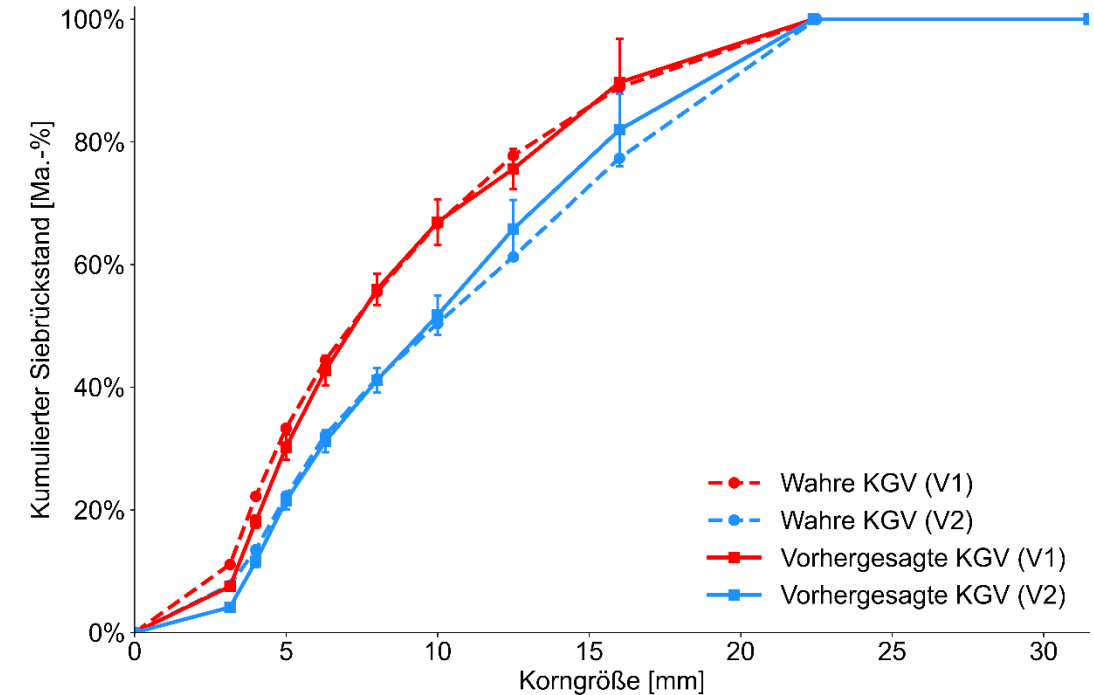


» Aggregation auf Stoffstromebene und Vorhersage von Korngrößenverteilungen

(a) Vorhersage KGV PRIM



(b) Vorhersage KGV RCM



⇒ Präzise Vorhersage der Korngrößenverteilung
mittlerem Fehler von $\pm 1,4$ Ma.-%



1. Motivation



2. Ergebnisse Vorstudie

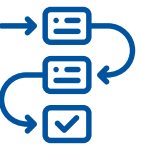


3. KIMBA-Projekt



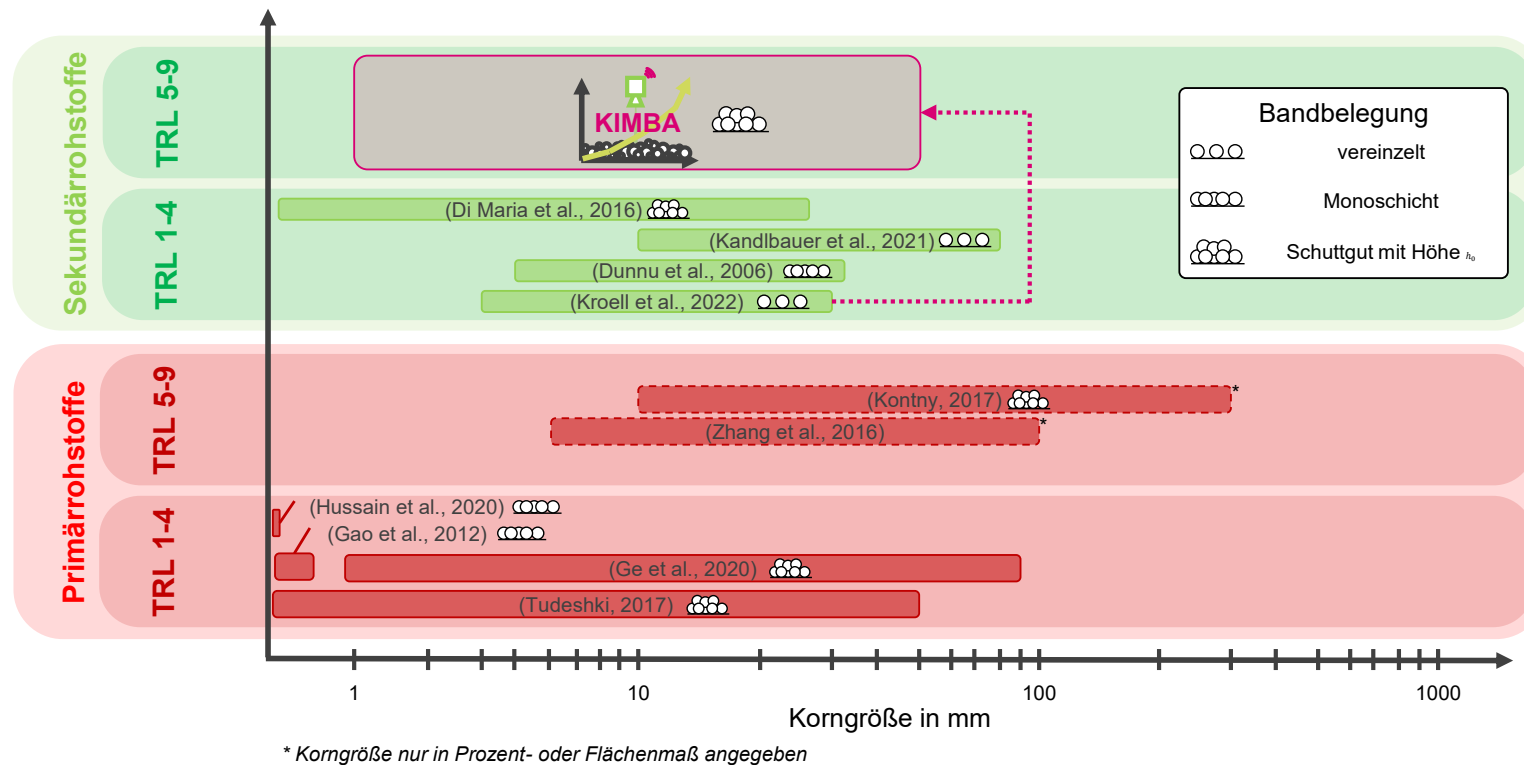
4. Industrieperspektive + Fazit

Forschungsvorhaben KIMBA



» KI-basierte Prozesssteuerung und automatisiertes Qualitätsmanagement im Recycling von Bau- und Abbruchabfällen durch sensorbasiertes Inline-Monitoring von Korngrößenverteilungen

Adressierte Forschungslücke:



Eckdaten:

- **Förderrichtlinie:** Digital.Greentech
- **Fördermittelgeber:** BMBF
- **Projektlaufzeit:** 09/2023 – 08/2025 (2 Jahre)
- **Projektbudget:** 1,5 Mio. € (1,2 Mio. € Förderung)

GEFÖRDERT VOM

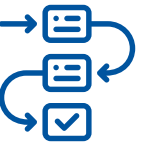
FONA

Forschung für Nachhaltigkeit



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung





Industrie



MAV Krefeld GmbH

- ▶ Aufbereitung und Verwertung von mineralischer Abfälle



Point 8 GmbH

- ▶ Datengetriebene Lösungen für den Anlagen- und Maschinenbau



Kleemann GmbH

- ▶ Hersteller raupenmobiler Brech- und Siebanlagen



Universitäten & Grundlagenforschung



Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe, RWTH Aachen

- ▶ Circular Economy & sensorbasierte Stoffstromcharakterisierung



Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Augmented Vision

- ▶ Bildbasierte KI auf Basis von 2D- und 3D-Sensoren



Lehrstuhl für International Production Engineering and Management, Universität Siegen

- ▶ Einsatz von KI im Produktionsmanagement



Assoziierte Partner



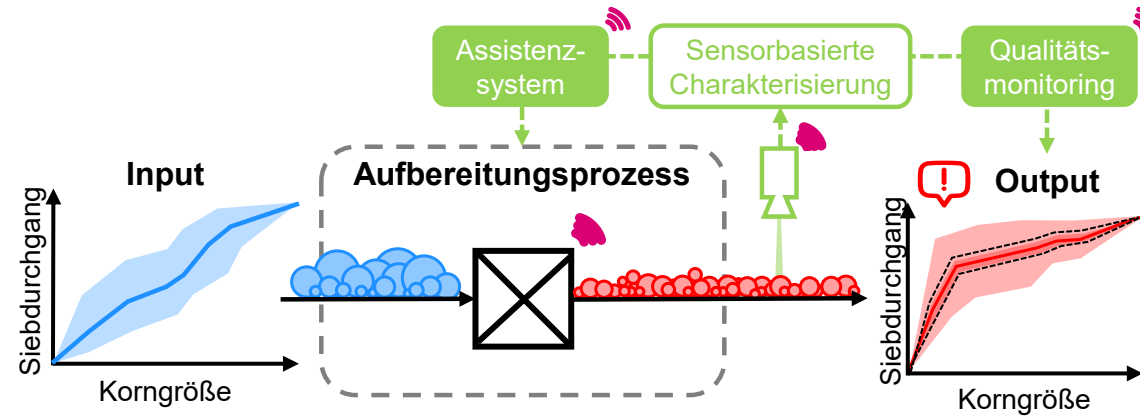
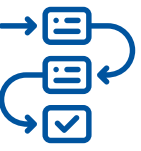
vero - der Baustoffverband

- ▶ Vertretung von ca. 600 Unternehmen aus allen Zweigen der Baustoff- und Rohstoffindustrie



Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

- ▶ Vertretung von 3.500 vorrangig mittelständischen Mitgliedsunternehmen



(1) Machbarkeitsnachweis des **Inline-KGV-Monitorings** (TRL 6-7)



(2) Demonstration & Validierung **sensorbasiertes Inline-Qualitätsmonitoring** (TRL 6-7)



(3) Demonstration **KI-basiertes Assistenzsystem**: Vorschlag optimierter Prozessparameter (TRL 5-7)



1. Motivation



2. Ergebnisse Vorstudie

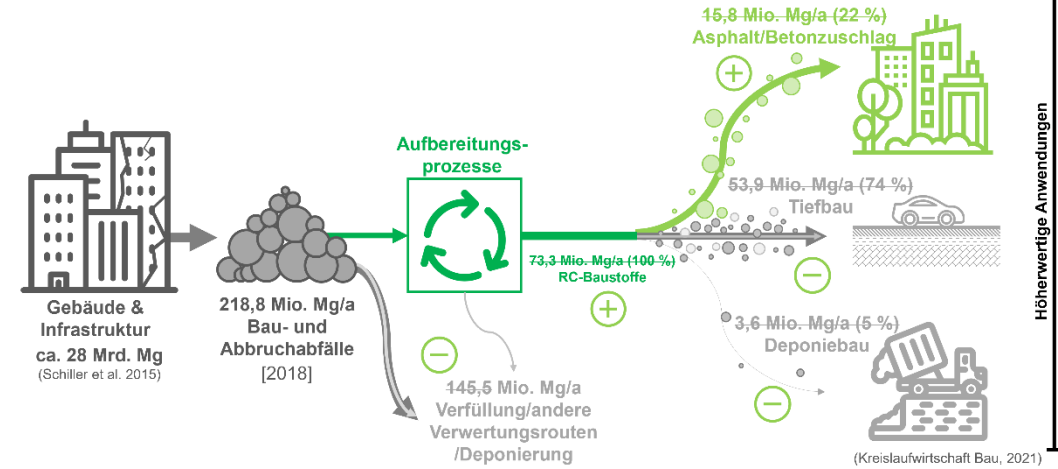
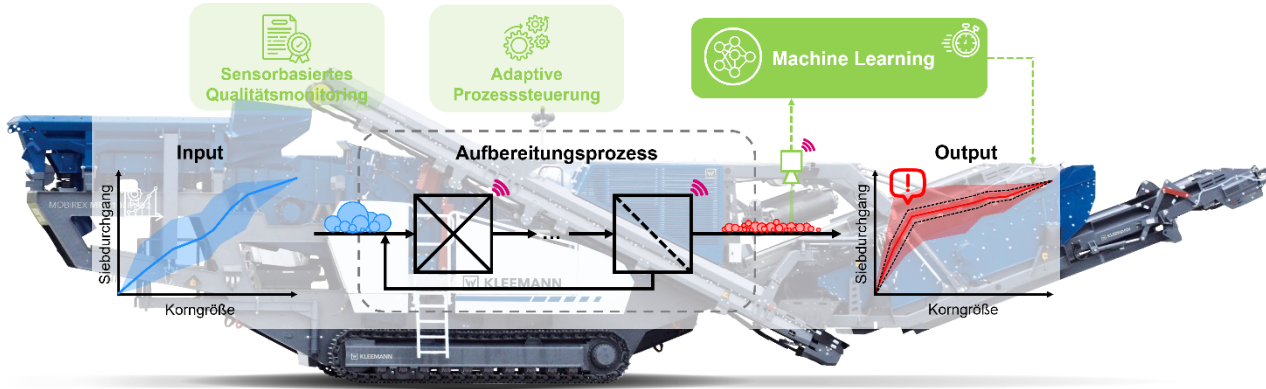
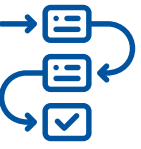


3. KIMBA-Projekt

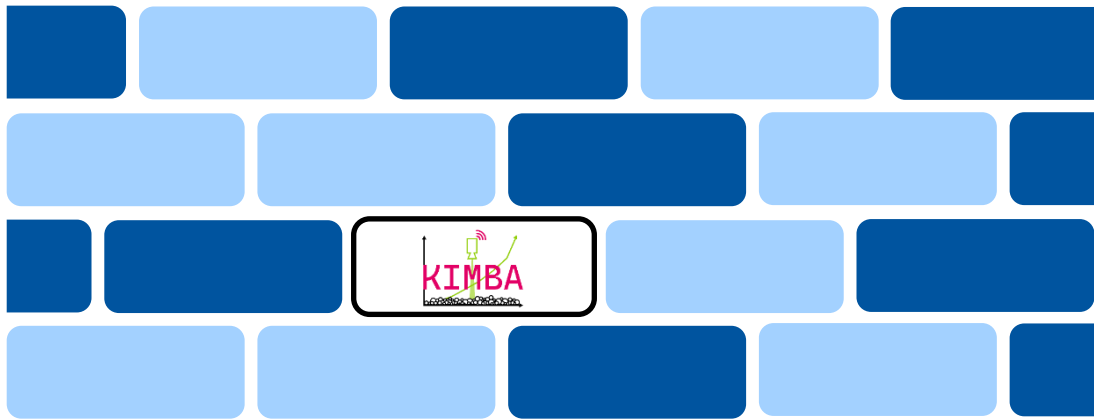


4. Industrieperspektive + Fazit

KIMBA – aus der Forschung in die Industrie



Höherwertige Anwendungen



Bausteine zur Erreichung einer höheren RC-Akzeptanz

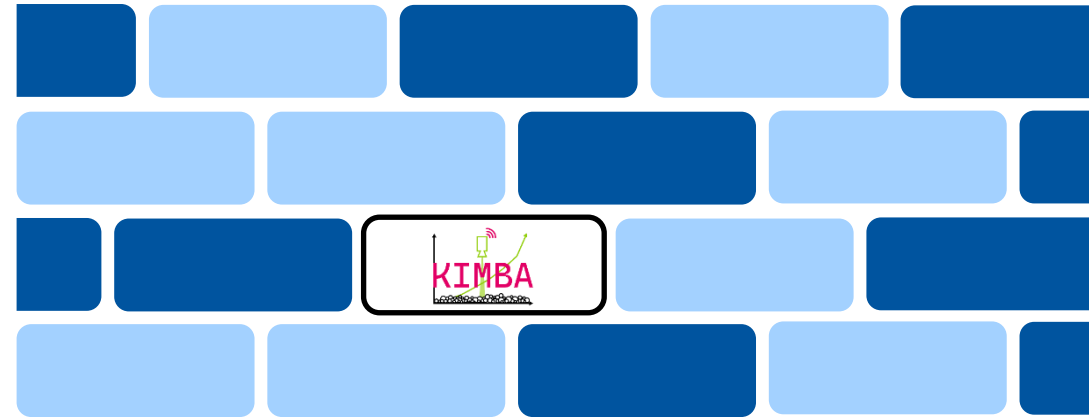
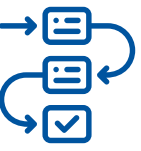
Ziel KIMBA: TRL 5-7

20% Qualität durch KGV

Höhere Transparenz



KIMBA – aus der Forschung in die Industrie



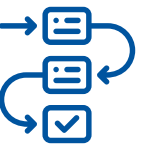
Ersatzbaustoff Verord.: Verpflichtende chemische Analyse, aktuell 4-5 Monate Wartezeit



Sortierung des Materials



Abbruchpraxis



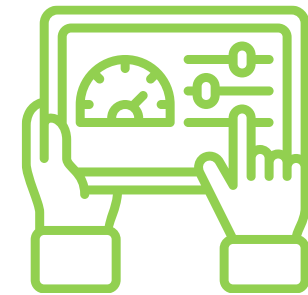
► **Echtzeitbewertung** der Korngrößenverteilung von Recyclingbaustoffen

- Neue **Vermarktungsmöglichkeiten** für Aufbereitungsanlagen und digitale Lösungen
- Konstante **Produktqualität**
- Besser **Datenlage** zu produzierten Endprodukten



► **Assistenzsystem** vereinfacht die Anlagenbedienung

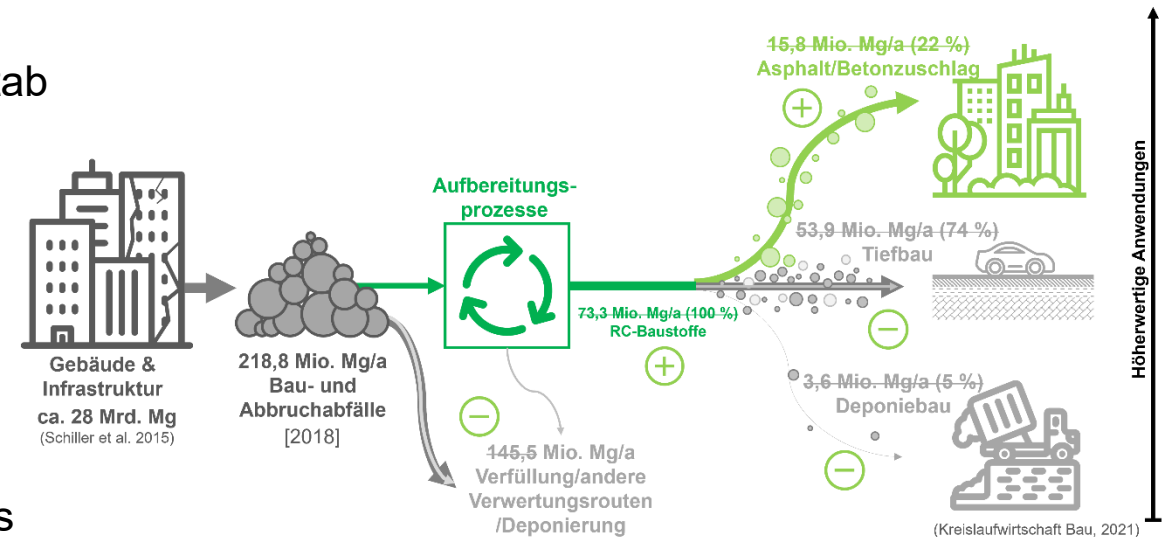
- Aufbereitungsanlagen werden **komplexer** bei gleichzeitigem Fachkräftemangel
- Effizientere Anlagennutzung und damit Reduzierung des **CO₂-Fußabdrucks**
- Erschließung neuer **Marktsegmente** im Dienstleistungssektor



Zusammenfassung und Ausblick



- ▶ Vielversprechende Ergebnisse aus der Vorstudie
- ▶ Projektziele und Fokuspunkte
 - Automatisierung Inline-Qualitätsmonitoring im Anlagenmaßstab
 - ▶ repräsentative Qualitätsanalysen
 - Entwicklung eines prototypischen, KI-basierten Assistenzsystems
 - ▶ Schnelle und effiziente (Re)parametrisierung zur Qualitätserhaltung
 - Erhöhung des Einsatzes von RC-Baustoffen für hochwertiges Recycling
- ▶ Relevanz für der Industrie





GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Forschung für Nachhaltigkeit



RWTHAACHEN
UNIVERSITY



KLEEMANN

point8
data matters.

Lieve Göbbels, M. Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS)

RWTH Aachen University

Wüllnerstr. 2, 52062 Aachen

Tel.: +49 241 80-95707

E-Mail: lieve.goebbels@ants.rwth-aachen.de

Web: www.ants.rwth-aachen.de

Dr. Steffen Häberle

Leiter Vorentwicklung

KLEEMANN GmbH

Manfred-Wörner-Str. 160, 73037 Göppingen

Tel.: +49 7161 206-233

E-Mail: steffen.haeberle@kleemann.info

Web: www.kleemann.info

Dr. Jesko Merkel

Managing Director

Point8 GmbH

Rheinlanddamm 201, 44139 Dortmund

Tel.: +49 151 27009340

E-Mail: jmerkel@point-8.de

Web: www.point-8.de

