

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)“

## OptiRoDig

Kai Steinmüller, RHM

Maximilian Hoffmann, RHM

Abschlusskonferenz  
am 23. – 24. Juni 2022

**III RHM III**  
*Die Rohstoffhändler*

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN  
*Offen im Denken*

Hochschule  
Kempten  
University of Applied Sciences

**Lohmann**  
*Qualität in Edelstahl*

# Gliederung

- Ausgangs- / Problemlage
- Projektziele
- Forschungsergebnisse und Möglichkeiten des Transfers

# Ausgangs- / Problemlage

- Heute Gießerei- und Stahlindustrie ca. 45 % des Rohstoffbedarfs durch Sekundärrohstoffe abgedeckt
- „OptiRoDig“ Entwicklung eines digitalen Netzwerksystems zwischen der Recyclingindustrie und Schmelzwerken
- Bereitstellung umfangreicher Analysedaten verfügbarer Sekundärrohstoffe – Metallschrotte
- So können Schmelzwerke geeignete Rohstoffe beschaffen, Schmelzprozesse optimieren
- Somit gezielt höhere Anteile an Sekundärrohstoffen einsetzen

# Ausgangs- / Problemlage

## Unterschiedliche Schrotttypen



*Blechreste*



*Knochen /  
Restblöcke*



*Abschläge und Schmiedereste*



*Hackschrott*



*WA-Stahl-Stückschrott*



*Schredderschrott*

alle Fotos: © Friedr. Lohmann GmbH

# Projektziele

## Schmelzprozess – Charakterisierung der Schrotttypen

### Beispiel Schrottcharakterisierung

Materialnummer	02030-000039	02020-000034	02030-000039
Probe Name	Kreislauf 1.2367 Abschläge	Lohmann 1.2343	Kreislauf 1.2367 Knochen/Restbl.
Optik*	homogen	homogen	heterogen
Name Materialcharakterisierung	2367	2343	2367
Trennbar*	ja	Ja	ja
Wasser*	nein	nein	nein
Magnetischer Anteil* [%]	99	99	99
min. Abmessung*	20 - 50 cm	20 - 50 cm	20 - 50 cm
max. Abmessung*	50 - 100 cm	50 - 100 cm	100-150 cm
durchs. Abmessung*	50 - 100 cm	50 - 100 cm	50 - 100 cm
min. Gewicht*	0 - 50 kg	0 - 50 kg	0 - 50 kg
max. Gewicht*	200 - 250 kg	200 - 250 kg	200 - 250 kg
durchs. Gewicht*	100 - 150 kg	100 - 150 kg	100 - 150 kg
Schüttdichte* [t/m <sup>3</sup> ]	3.1	3.1	1
Beschichtung (Zn, Sn, ...)*	nein	nein	nein
Anhaftung (Folie, Dreck, ...)*	nein	nein	nein

### Klassifikation anhand Geometrie / Herkunft

- *Fremdschrott*
  - Platten
  - Hackschrott
  - Schredder
- *Kreislaufschrott*
  - Abschläge
  - Stücke Restblock
  - "Knochen"

### Klassifikation anhand Gewicht und Schüttdichte

- *Leicht*
  - Schüttdichte < 1,3 t/m<sup>3</sup>
- *Leicht-Medium*
  - 1,3 t/m<sup>3</sup> ≤ Schüttdichte < 2,5 t/m<sup>3</sup>
- *Medium*
  - 2,5 t/m<sup>3</sup> ≤ Schüttdichte < 3,5 t/m<sup>3</sup>
- *Schwer*
  - 3,5 t/m<sup>3</sup> ≤ Schüttdichte

# Projektziele

## Cloud-Anwendung

- In cloudbasierter Web-Anwendung Optimierungen von Schmelzen hinsichtlich Kosten über einen Simplex-Algorithmus
- Schutz der Daten durch Log-In:
  - Nutzer können eigene Daten hinzufügen und verändern
  - Daten anderer Nutzer können nicht eingesehen werden.
- Alle Werkstoffe aus dem „Werkstoffschlüssel Stahl“ können als Zielwerkstoffe ausgewählt werden. Eigene Werkstoffe können auch hinzugefügt werden.

Optimierungstool

Material & Menge

WERKZEUGSTAHL - CR-MO, CR-MO-V, MO-V	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3202	5000	<input type="checkbox"/>	1.3202	5000
WERKZEUGSTAHL - W-V, CR-W-V	<input type="checkbox"/>	1.3207		<input type="checkbox"/>		
WERKZEUGSTAHL MIT NI	<input type="checkbox"/>	1.3208		<input type="checkbox"/>		
WERKZEUGSTAHL - SONSTIGE LEGIERUNGEN	<input type="checkbox"/>	1.3209		<input type="checkbox"/>		
SCHNELLARBEITSSTAHL MIT CO	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3230		<input type="checkbox"/>		
SCHNEIDARBEITSSTAHL OHNE CO	<input type="checkbox"/>	1.3241		<input type="checkbox"/>		

Restriktionen

STÜCKSCHROTT [%]:  SPÄNE [%]:  SCHLAMM [%]:  STAUB [%]:   NUR EIGENE LAGERBESTÄNDE EINBEZIEHEN.

Ergebnis Σ OPTIMIERUNG STARTEN

BERECHNUNGSZEIT: 1,819 SEKUNDEN ← →

Die Berechnungen konnten erfolgreich beendet werden. Es wurde eine optimale Lösung gefunden. ↓ EXPORTIEREN

Charge	Form	Kosten [EUR/kg]	Beschreibung	1.3202 [kg]	Gesamtkosten [EUR]	C [%]	Si [%] ↑	Mn [%]
WERKZEUGSTAHL - CR-MO, CR-MO-V, MO-V	Späne	0,5	WERKZEUGSTAHL - CR-MO, CR-MO-V, MO-V	3,08	1,54	0	0	0
WERKZEUGSTAHL - W-V, CR-W-V	Stübschrott	0,69	WERKZEUGSTAHL - W-V, CR-W-V	1309,56	903,6	0	0	1,1
WERKZEUGSTAHL MIT NI	Stübschrott	0,89	WERKZEUGSTAHL MIT NI	52,37	46,61	99,5	0	0
WERKZEUGSTAHL - SONSTIGE LEGIERUNGEN	Stübschrott	9,6	WERKZEUGSTAHL - SONSTIGE LEGIERUNGEN	28,15	270,28	0	0	2,97
SCHNELLARBEITSSTAHL MIT CO	Stübschrott	0,68	SCHNELLARBEITSSTAHL MIT CO	2,58	1,75	8,2	0,57	0
SCHNEIDARBEITSSTAHL OHNE CO	Stübschrott	4,03	SCHNEIDARBEITSSTAHL OHNE CO	120	483,6	0	0	0
WERKZEUGSTAHL - CR-MO, CR-MO-V, MO-V	Stübschrott	21,85	WERKZEUGSTAHL - CR-MO, CR-MO-V, MO-V	72,28	1579,36	0	0	0
WERKZEUGSTAHL - W-V, CR-W-V	Stübschrott	3,35	WERKZEUGSTAHL - W-V, CR-W-V	1585,56	5311,63	0,8	0,3	0,3
WERKZEUGSTAHL MIT NI	Stübschrott	0,1	WERKZEUGSTAHL MIT NI	233,43	23,34	0	0	0
WERKZEUGSTAHL - SONSTIGE LEGIERUNGEN	Stübschrott	0,1	WERKZEUGSTAHL - SONSTIGE LEGIERUNGEN	177	17,7	0	0	0
SCHNELLARBEITSSTAHL MIT CO	Stübschrott	3,04	SCHNELLARBEITSSTAHL MIT CO	1416	4304,64	0	0	0
		Preis pro Tonne [EUR/t]:		5000	12944,05	1,3	0,1	0,4

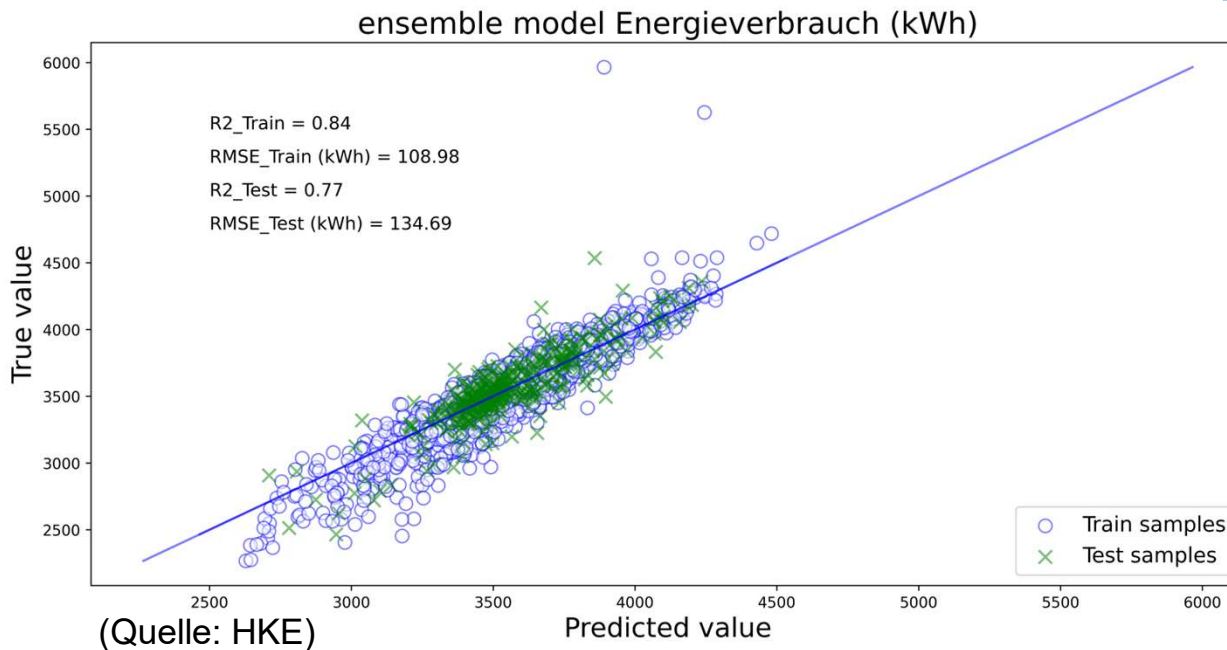
Ergebnis einer Optimierung in der Webanwendung (verkürzte / verzerrte Darstellung (Quelle: UDE))

# Projektziele - Prozessmodellierung – Datenbasis

- Zielgröße „IFEnergy“ (kWh)
- Inputparameter („Features“)
  - Prozesszeiten und Delays (min)
  - Gattierung (kg)
  - Zusammenstellung der Gattierung / Schrotttypen
  - Theoretische chemische Analyse (%)
  - Schmelzenthalpie der eingesetzten Rohstoffe (kWh/t)
  - Individuelle Mengen der jeweiligen Rohstoffe (kg)
- Daten von ca. 4000 individuellen Schmelzen der Stahlsorten 1.2343, 1.2379 & 1.3343

# Projektziele - Prozessmodellierung – Ergebnis

Model	RMSE* (kWh)	R <sup>2</sup>
<b>ensemble</b>	<b>134.69</b>	<b>0.77</b>
CatBoost	158.82	0.72
Neuronales Netz	159.33	0.70
XGboost	162.46	0.69
Random Forest	163.77	0.65
Lineare Regression	214.33	0.40
k-nearest neighbors	247.71	0.19



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t=n} (y' - y)^2}$$

R<sup>2</sup> = Bestimmtheitsmaß

RMSE = Root-Mean-Square Error



# Projektziele - Web-App zur Prognose Schmelzenergieverbrauch (ML)

Optirodig - ML v0.19



Prognose des Energieverbrauches (kWh) beim Schmelzen von Stählen im Induktionsofen mit maschinellem Lernen.  
 Bzgl. der Stahlsorte und dem Halbzeug-Typ gelten folgende Labels für die Auswahl:

Halbzeug-Typ (Label)

1220V = 0 | 1320V67 = 1 | 1420V677 = 2 | 2T = 3

Stahlsorte (Label)

Warmarbeitsstahl: 1.2343 = 0 | Werkzeugstahl: 1.2379 = 1 | Schnellarbeitsstahl: 1.3343 = 2

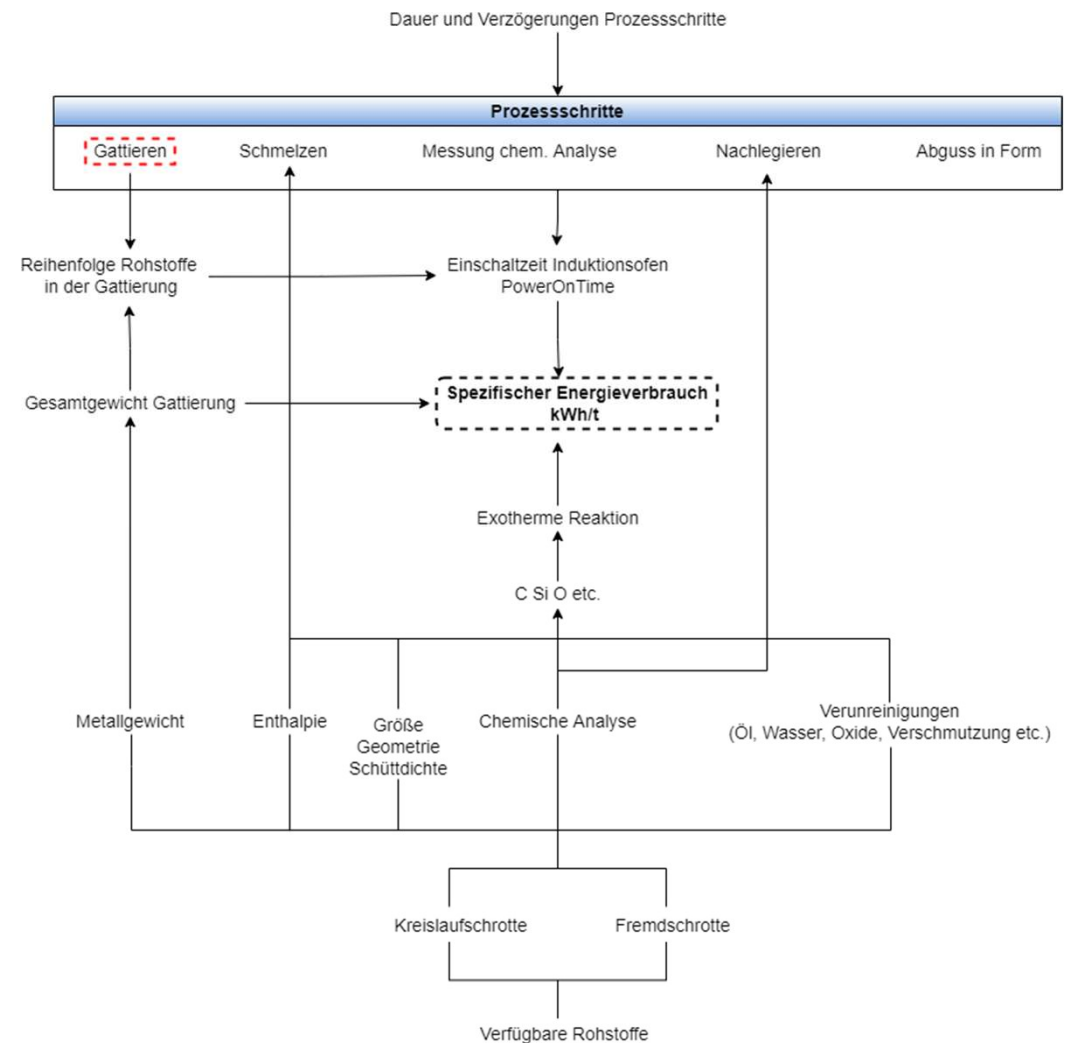
Welche Stahlsorte soll gegossen werden (Label)? <input type="text" value="2"/>	Prognostizierter Energieverbrauch in kWh <span style="float: right;">1.4s</span> <input type="text" value="[3649]"/>
Welcher Halbzeug-Typ soll gegossen werden (Label)? <input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="Ersteller"/>
TotalDuration_min [min] <input type="text" value="127"/>	
IFTotalTime_min [min] <input type="text" value="98"/>	
IFPowerOnTime_min [min] <input type="text" value="80"/>	
IFTappingWeight [kg] <input type="text" value="6735"/>	
IFTappingTemperature [°C] <input type="text" value="1525"/>	
C [%] <input type="text" value="1 &lt;"/>	

Ausschnitt aus Web-App mit welcher der Benutzer bei Eingabe relevanter Daten eine Prognose mithilfe von ML über den Schmelzenergieverbrauch bekommt.

(Quelle: UDE)

# Forschungsergebnisse - Schmelzprozess Induktionsofen - Einflussfaktoren

- Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch beim Schmelzen im MF-Induktionsofen:
  - Direkte Faktoren der verfügbaren Schrotte (z.B. Geometrie, Schüttdichte, chemische Analyse, Verunreinigungen)  $\Rightarrow$  **Einschmelzverhalten**
  - Indirekte Faktoren wie z.B. Prozess-Delays, welche zu einer längeren Einschaltzeit des Ofens führen
- Schmelzen ist ein nicht-linearer Prozess (z.B. Wärmeverlust durch Strahlung bei geöffnetem Ofendeckel steigt mit  $T^4$ )
- U.A. deshalb ist die datenbasierte Modellierung mit Methoden wie z.B. linearer Regression schwierig bis unmöglich  $\Rightarrow$  **Motivation für ML**



# Möglichkeiten des Transfer

- Mit Erkenntnissen über die Einsparung von Energie und CO<sub>2</sub>-Ausstoß sowie der Erhöhung des Anteils an Sekundärrohstoffen ergibt sich Potential für Schmelzbetriebe
  - Vertrauen, Akzeptanz in Branche muss geschaffen werden, auch bzgl. Sicherheit von Daten und Datenschutz in Cloud
  - Großer Aufwand und wenig Nutzen für Schrotthändler, daher wenig intrinsische Motivation aufgrund von hohem Mehraufwand / Kosten
- Transfer vom Forschungsprojekt in die Industrie erschwert, da Lieferanten verhalten sind

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Bei Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung:

- Projektkoordinator: Kai Steinmüller (RHM), [k.steinmueller@rhm-rohstoffe.de](mailto:k.steinmueller@rhm-rohstoffe.de)
- Wissenschaftliche Fragen:
  - Machine Learning: Tim Kaufmann (HS Kempten), [tim.kaufmann@hs-kempten.de](mailto:tim.kaufmann@hs-kempten.de)
  - Simplex-Algo / Cloud-Umgebung: Shikun Chen (Uni Duisburg), [shikun.chen@uni-due.de](mailto:shikun.chen@uni-due.de)