

Kempten, 05. März 2024



## **Abschlussbericht für das Forschungsprojekt:**

# **Steigerung der Ressourceneffizienz von Gießereien durch ganzheitliche Digitalisierung betrieblicher Prozesse - REFFpro**

Aktenzeichen:	35438/01 - 21
Projektbeginn	21.09.2020
Bewilligungsempfänger:	Kemptener Eisengießerei Adam Höönig AG
Verfasser:	Prof. Dr. Dierk Hartmann Florian Huber, M.Sc.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Zusammenfassung.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Einleitung.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Hauptteil.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 IT-Systemlandschaft und Informationsschnittstellen.....</b>	<b>7</b>
3.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	7
3.1.2 Aufgetretene Herausforderungen.....	10
<b>3.2 Datenmanagement und Umsetzung .....</b>	<b>10</b>
3.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	10
3.2.2 Aufgetretene Herausforderungen.....	14
<b>3.3 Datenanalyse und -auswertung .....</b>	<b>15</b>
3.3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	15
3.3.2 Aufgetretene Herausforderungen.....	22
<b>3.4 Belegungsplanung Formanlage.....</b>	<b>23</b>
3.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	23
3.4.2 Aufgetretene Herausforderungen.....	26
<b>3.5 Entwicklung und Vorhersage- von Entscheidungsmethoden .....</b>	<b>26</b>
<b>3.6 Verifizierung und Validierung .....</b>	<b>27</b>
<b>4. Verbreitung der Projektergebnisse .....</b>	<b>29</b>
4.1 Tagungsbeiträge, Fachausschüsse und Arbeitskreise.....	29
4.2 Publikationen.....	30
<b>5. Fazit.....</b>	<b>31</b>
<b>6. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>32</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Projektplan des REFFpro-Vorhabens .....	5
<b>Abb. 2:</b> Architektur für die Zentralisierung prozessrelevanter Daten .....	8
<b>Abb. 3:</b> Bereitstellung und Analyse eines gussteilbezogenen Energieprofils .....	8
<b>Abb. 4:</b> Übersicht Energiemodell .....	9
<b>Abb. 5:</b> Prozess „Formen“ in der mobilen App .....	11
<b>Abb. 6:</b> Prozess „Gussvorgänge“ in der mobilen App .....	11
<b>Abb. 7:</b> Gussteilbezogenes Energieprofil für einen selektierten Auftrag .....	13
<b>Abb. 8:</b> Verschleiß eines Schmelzriegels .....	15
<b>Abb. 9:</b> Vermessung eines Schmelzriegels .....	16
<b>Abb. 10:</b> Klassifikation des Verschleißzustands eines Schmelzriegels .....	17
<b>Abb. 11:</b> Kalendarische Vorhersage des Verschleißverlaufs eines Schmelzriegels .....	18
<b>Abb. 12:</b> Visualisierung des Verschleißverlaufs anhand elektrischer Daten .....	19
<b>Abb. 13:</b> Grafische Darstellung aller Schritte für die Formstoffaufbereitung (Formautomat) .....	20
<b>Abb. 14:</b> Energieauswertung für die Formstoffaufbereitung (Formautomat) .....	21
<b>Abb. 15:</b> Pie-Chart für die Energieauswertung der Formstoffaufbereitung (Formautomat) ..	21
<b>Abb. 16:</b> Resteisenmengen .....	22
<b>Abb. 17:</b> Skizze des Formautomats .....	24
<b>Abb. 18:</b> Planung für den Formautomat .....	25
<b>Abb. 19:</b> CO <sub>2</sub> -Ausstoß zwischen 2019 und 2022 .....	28

## 1. Zusammenfassung

Gießen ist ein energieaufwendiges Fertigungsverfahren. Die deutsche Gießereiindustrie sieht sich vor die Aufgabe gestellt, einen Beitrag zur Eindämmung des menschengemachten Klimawandels zu leisten. Das Potenzial hierzu ist aufgrund der sehr energieintensiven Prozesse, die diesen Industriezweig kennzeichnen, erheblich. In der gegenwärtigen, von industriellem Wandel geprägten Weltwirtschaftslage steht diese mittelständisch geprägte Branche auch großen ökonomischen Herausforderungen gegenüber. Die Struktur der spezifischen Zulieferer- und Abnehmermärkte, hohe Energiepreise und geringe Umsatzrenditen zwingen Gießereien, die Effizienz ihrer Produktionsprozesse fortlaufend zu vervollkommen. Ressourcensparende Produktion und verantwortungsvoller Einsatz von Energie sind Antworten auf beide Anforderungen: die Verbesserung der Umweltbilanz und die ökonomische Optimierung. Für die Kemptener Eisengießerei gehören sie zu den zentralen Unternehmenszielen.

Vom REFpro-Vorhaben sollten in diesem Sinne neue Impulse ausgehen. Ziel war es, die Umweltverträglichkeit der Produktion kleiner und mittelständischer Gießereien zu optimieren und einen Beitrag zur Verbesserung der Nachhaltigkeit zu leisten. Das Projektvorhaben sah sowohl ökologische als auch ökonomische Potenziale, die mit einer umweltschonenderen Herstellung von Gussteilen einhergeht.

Neben bestehenden und neuen politischen Direktiven (wie beispielsweise dem European Green Deal) nahmen weltwirtschaftliche sowie politische Entwicklungen immensen Einfluss auf die Gießereibranche und folglich auch auf die Kemptener Eisengießerei. Die Corona-Krise und der Krieg in der Ukraine hatten „existenzbedrohende“ Auswirkungen auf Energie- sowie Rohstoffpreise [1, 2]. Eine ökologisch und ökonomische Optimierung bestehender Produktionsverfahren ist für Gießereien zu einem zentralen Faktor geworden.

Die Inhalte des REFpro-Projektes adressierten diese angeführten Ziele und erzeugten aufgrund ihrer (inter-)nationalen Aktualität respektive Brisanz neben großem Zuspruch auch mediales Interesse (beispielsweise von der Süddeutschen Zeitung). Durch das Vorhaben wurden energierelevante Prozessdaten erfasst, dokumentiert, analysiert und mithilfe modernster Data Science Ansätze sowie Künstlicher Intelligenz optimiert. Das Ergebnis stellen webbasierte Assistenzsysteme dar, welche die Mitarbeitenden der Kemptener Eisengießerei dazu befähigen, prozessbezogen und situativ energieoptimierte Entscheidungen zu treffen. Insgesamt konnte das Unternehmen seine CO<sub>2</sub>-Emissionen um durchschnittlich 1.138.200,00 kg reduzieren (verglichen zum Jahr 2019). Diese Einsparungen sind im Wesentlichen auf die Projektergebnisse zurückzuführen. Die Konsortialpartner bewerten die REFpro-Projektergebnisse daher als beachtlichen und nachhaltigen Erfolg.



notwendig. Theoriegeleitet ließ sich anschließend identifizieren, welche Einflussgrößen noch zu erfassen sind, um das Energieprofil eines Gussteils berechnen zu können. Diese Erkenntnisse galt es in ein Prozessmodell zu überführen (dieses ist im Folgenden erläutert). Eine solche Übersicht ermöglichte die Strukturierung und Implementierung einer Prozessdatenbank.

Das Datenmanagement und dessen Umsetzung stellte sich bei den Konsortialpartnern als zeitintensivste Aufgabe heraus. Vorgesehen war die Akquise vorhandener Daten, der Einbau zusätzlich notwendiger Sensorik sowie die Planung, Entwicklung und Evaluation einer mobilen App für die vor Ort Erfassung nicht sensorisch messbarer Kenngrößen. Diese Maßnahmen stellen einen zentralen Meilenstein des Projektes dar. Nur durch die Umsetzung dieser ist ein umfassendes und realitätsgetreues Abbild des Energieverbrauchs eines Gussteils generierbar.

Liegen prozessrelevante Haupteinflussgrößen in digitaler und aggregierter Form vor, können Analysen und Wertschöpfungsmaßnahmen erfolgen. Konkret waren in Arbeitspaket 3 eine Untersuchung von Verschleißparametern für Schmelztiegel sowie die Entwicklung eines Prädiktionsmodells vorgesehen. Weiterhin fand eine Auswertung der Daten für die Formstoffaufbereitung (Handformguss) statt.

Der Projektplan adressierte anschließend die Digitalisierung der Belegungsplanung der Formanlage der Kemptener Eisengießerei. Die Prozessexperten nahmen an, dass durch eine geschickte Kombination zu produzierender Aufträge eine Minimierung der Resteisenmenge und somit des benötigten Energieverbrauchs erreichbar ist.

Unter Verwendung der bisherigen Projektergebnisse waren mehrere Assistenzsysteme zu konzipieren und zu implementieren. Diese sollen die Mitarbeitenden der Kemptener Eisengießerei mithilfe von Handlungsempfehlungen dazu befähigen, prozessspezifisch und situativ optimale Entscheidungen zu treffen.

Die Assistenzsysteme und alle weiteren Leistungen waren schließlich durch geeignete Maßnahmen zu verifizieren und zu validieren.

Das letzte Arbeitspaket sah die Projektorganisation sowie die Entwicklung eines Verwertungskonzepts der Projektergebnisse vor.

### 3. Hauptteil

Im Folgenden findet sich eine detaillierte Dokumentation der Vorhabensdurchführung sowie –ergebnisse. Die Namensgebung der jeweiligen Abschnitte orientiert sich an den Arbeitspaketen des Projektplans.

#### 3.1 IT-Systemlandschaft und Informationsschnittstellen

##### 3.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nach eigenen Angaben waren zu Projektbeginn rund 270 unterschiedliche Messstellen und eine große Anzahl bestehender Softwaresysteme (beispielsweise das ERP-System) in verschiedenen Netzwerken bei der Kemptener Eisengießerei vorhanden. Eine Speicherung erfolgte auf unterschiedlichen Servern und Datenbanken in einem heterogenen Format. Aufgrund fehlender Schnittstellen waren diese für die IT-Administration des Unternehmens teils nicht zugänglich (dies galt beispielsweise für das Energiemanagementsystem ECON). Eine Dokumentation der tausenden Datenbanktabellen und den darin enthaltenen Prozessparametern lag nicht vor. Zudem war nicht verifizierbar, welchem Produktionsschritt diese zuzuordnen sind und bei welchen Kennzahlen es sich um energierelevante Haupteinflussgrößen handelt.

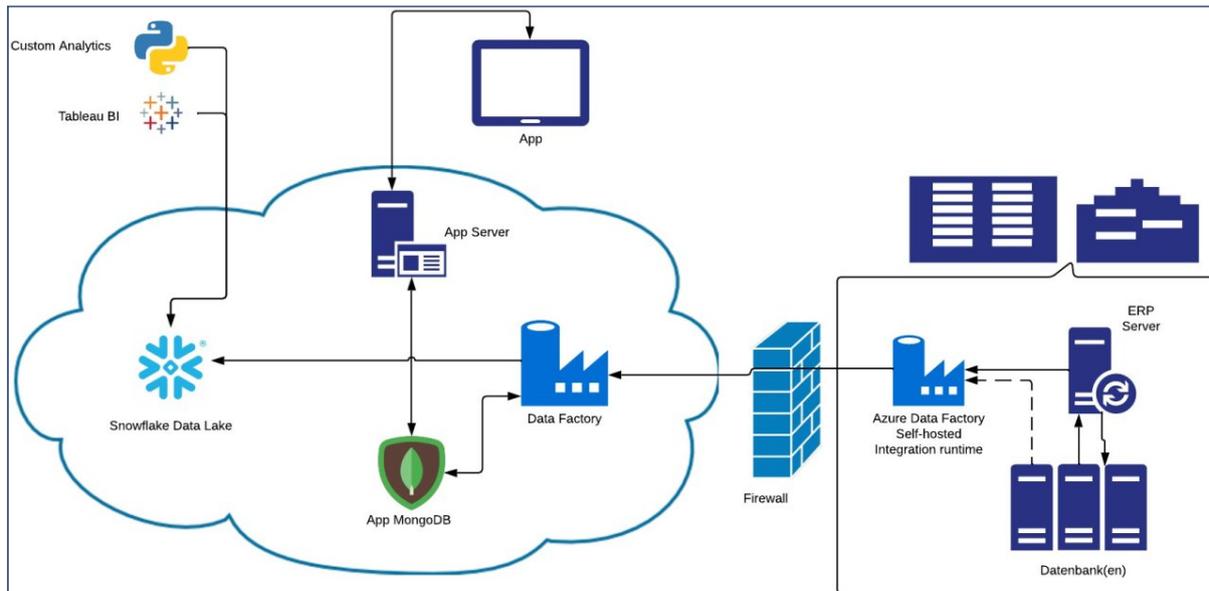
Für die Projektpartner galt es in einem ersten Schritt alle Prozessschritte zu spezifizieren, die Einfluss auf das Energieprofil eines Gussteils nehmen. Identifiziert wurden:

- Kernherstellung
- Formen
- Gattierung
- Schmelzen
- Gießen
- Putzen
- Grundieren
- Sandaufbereitung
- Mischen

Unabhängig der großen Menge vorhandener Messstellen und Softwaresystemen gab es einige Einflussgrößen, die bei der Kemptener Eisengießerei bis dato nicht digital erfasst werden konnten. Diese ließen sich nur durch zielgerichtete und dennoch zeitintensive Untersuchung bestehender Datenbanktabellen identifizieren. Zu nennen ist beispielsweise die Erfassung der nicht vergossenen, planungsbedingten Resteisenmenge pro Schmelztiegel. Für eine energie- und ressourcenschonende Produktion ist diese jedoch relevant. Zwar lässt sich das Eisen erneut verwenden, jedoch ist die im Schmelzprozess aufgewendete Energie verloren. Diese wirkt sich wiederum negativ auf den Carbonfootprint des Unternehmens aus. Die Konsortialpartner spezifizierten eine Liste nicht sensorisch oder digital (beispielsweise durch das ERP-System) verfügbarer Parameter. Besagte Übersicht sollte im folgenden Arbeitspaket für die Planung und Entwicklung einer mobilen App dienen.

Diese stellt eine kostengünstige und effektive Möglichkeit für die Erfassung relevanter Haupteinflussgrößen dar.

Die multiplen Speicherstellen und Heterogenität machte eine prozessspezifische, aber auch –übergreifende Analyse energierelevanter Daten unmöglich. Die Zentralisierung und Zurverfügungstellung dieser Einflussgrößen galt daher als entscheidendes Projektziel. Die Wahl der technologischen Basis fiel auf eine Microsoft Azure Cloud<sup>1</sup>. Sie ermöglicht einen sicheren und unternehmensübergreifenden Zugriff für alle Projektpartner.

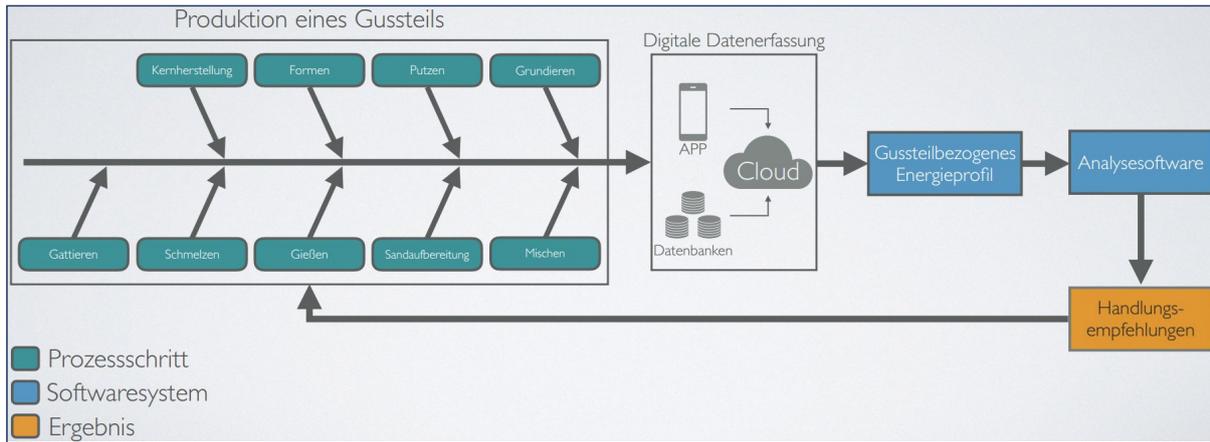


**Abb. 2:** Architektur für die Zentralisierung prozessrelevanter Daten

Abb. 2 zeigt exemplarisch die erstellte Architektur für die Erreichung dieses Projektziels. Auf der rechten Seite sind exemplarisch die Server und Datenbanken der Kemptener Eisengießerei skizziert. Durch die Installation sogenannter „Azure Data Factory Self-hosted integration runtime“ auf den jeweiligen Servern lassen sich alle Prozessparameter in die Microsoft Azure Cloud überführen. Eine Integration der in einer separaten Datenbank gespeicherten App-Daten findet automatisiert statt.

Nach der Zusammenführung ist die Berechnung eines gussteilbezogenen Energieprofils möglich. Dieses liefert für individuelle Gussteile eine Übersicht aufgewendeter Energie pro Prozessschritt. Mithilfe moderner Data Science Anwendungen und Künstlicher Intelligenz sind diese Ergebnisse analysierbar. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich Handlungsempfehlungen generieren, die prozessspezifisch bei der Reduktion benötigter Energiemengen unterstützen sollen.

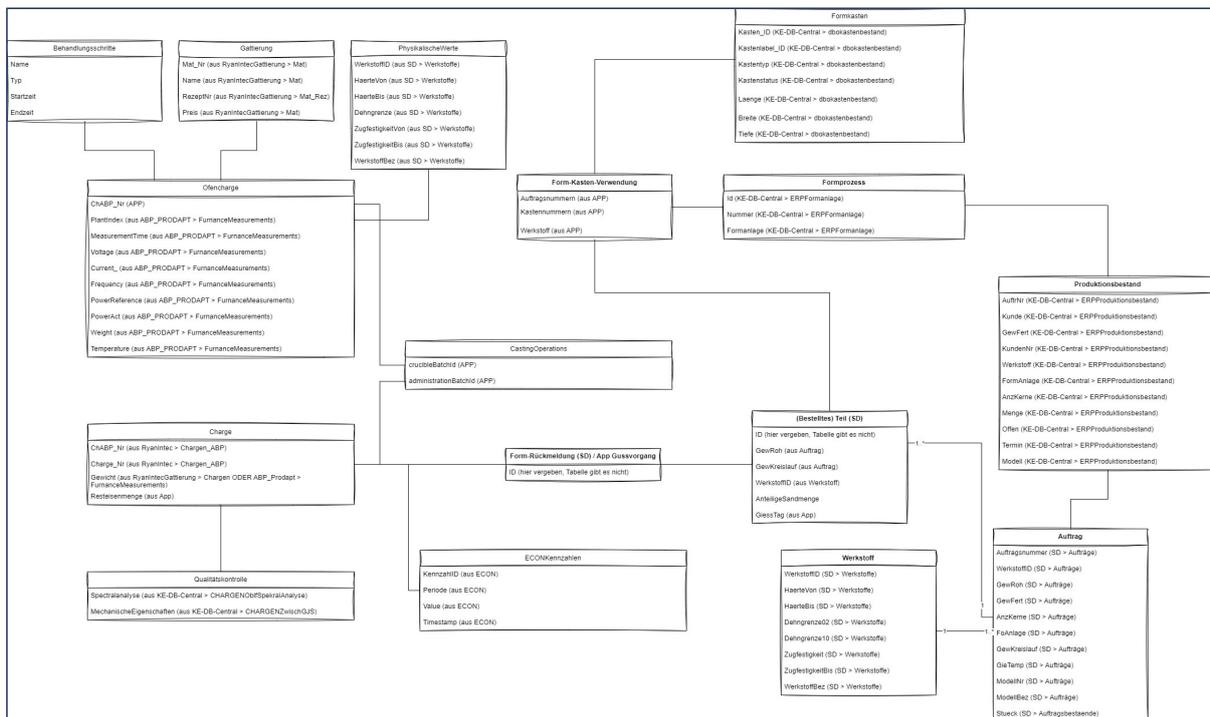
<sup>1</sup> <https://azure.microsoft.com/de-de/>



**Abb. 3:** Bereitstellung und Analyse eines gussteilbezogenen Energieprofils

Abb. 3 fasst das in diesem Abschnitt beschriebene Vorgehen grafisch zusammen und stellt mit seinen Inhalten einen elementaren Ausgangspunkt für das Projektvorhaben dar.

Nicht alle in den tausenden Datenbanktabellen enthaltenen Prozessparameter stellen Haupteinflussgrößen für den Energieverbrauch eines Gussteils dar. Durch die Projektpartner musste dahingehend eine umfassende Übersicht geschaffen werden. Ein erstes Diagramm entstand in den ersten Monaten des Projektes und wurde schrittweise verfeinert respektive adaptiert. Visualisiert ist die finale Version in Abb. 4.



**Abb. 4:** Übersicht Energiemodell

Zu sehen sind unterschiedliche, eigens zu erstellende Datenbanktabellen, die sich aus den heterogenen Daten unterschiedlichster Quellsysteme zusammensetzen. Durch eine Kombination all dieser Informationen ist eine Berechnung des gussteilbezogenen Energieprofils möglich.

### 3.1.2 Aufgetretene Herausforderungen

Die große Anzahl an in der Gießerei installierten Servern und Datenbanken mit heterogenen Daten stellte eine Herausforderung dar. Es galt energierelevante Haupteinflussgrößen zu identifizieren und diese in tausenden Datenbanktabellen zu finden. Viele Parameter waren dabei in multiplen Datenbanken und Tabellen enthalten. In diesem Fall war zu analysieren, woher dieses Datum zu importieren ist (welches ist das primäre Quellsystem). Diese Gegebenheiten führten dazu, dass zwar zu Beginn des Projektes eine erste Übersicht des Energiemodells erstellt werden konnte, diese jedoch während des Projektverlaufs kontinuierlich angepasst werden musste.

## 3.2 Datenmanagement und Umsetzung

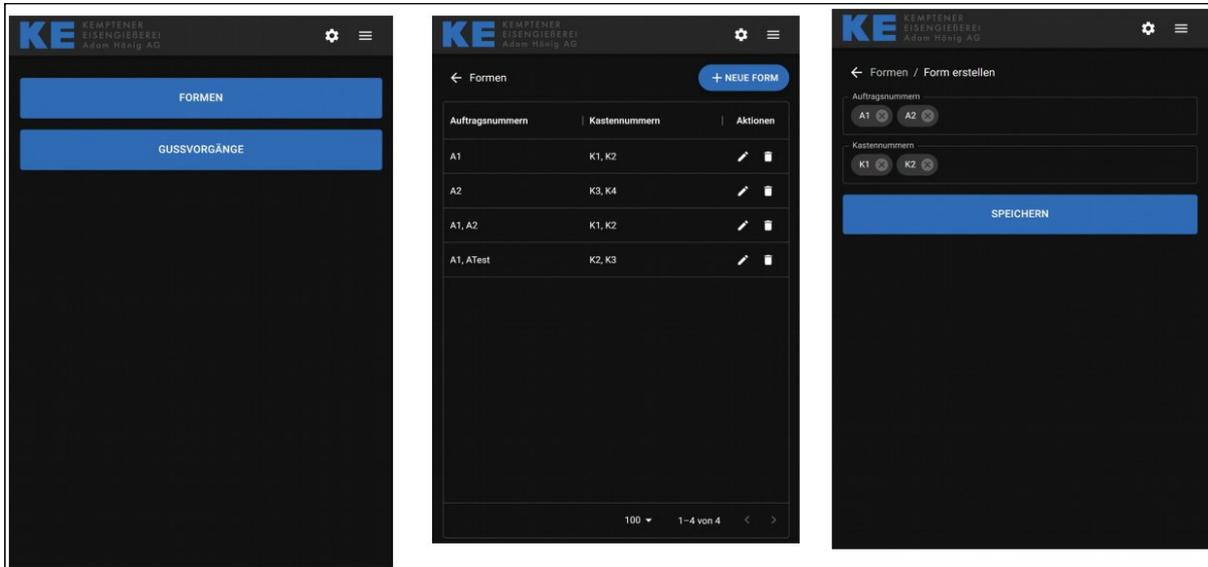
### 3.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das zweite Arbeitspaket fokussiert die technische Realisierung der in Abb. 3 dargestellten Struktur. In einem ersten Schritt sind dafür die Daten aus den jeweiligen Quellsystemen zu akquirieren gewesen. Während der Projektlaufzeit zeigte sich zunehmen, dass der Prozess trotz Automatisierung kontinuierlich zu begleiten und zu erweitern ist. Für eine flächendeckende sensorische Erfassung messbarer Haupteinflussgrößen erweiterte die Kemptener Eisengießerei die Anzahl ihrer Messstellen.

Ein zentraler Meilenstein des Arbeitspakets war die Planung und Realisierung einer Microsoft Azure Cloud, mit deren Hilfe sich alle relevanten Prozessparameter erfassen, zusammenführen und bereitstellen lassen. Wie zuvor erwähnt, installierten die Projektpartner eine Softwarelösung auf den diversen Quellsystemen, um eine automatisierte, konstante und sichere Übertragung der Daten in die Cloud zu ermöglichen. Die Konzepthaus Web Solutions GmbH wird nach Abschluss des Projektes die Betreuung und Wartung dieser Softwarelösungen übernehmen und dafür sorgen, dass die Ergebnisse der Projektarbeiten für die Kemptener Eisengießerei auch künftig nutzbar und technisch auf dem neuesten Stand sind.

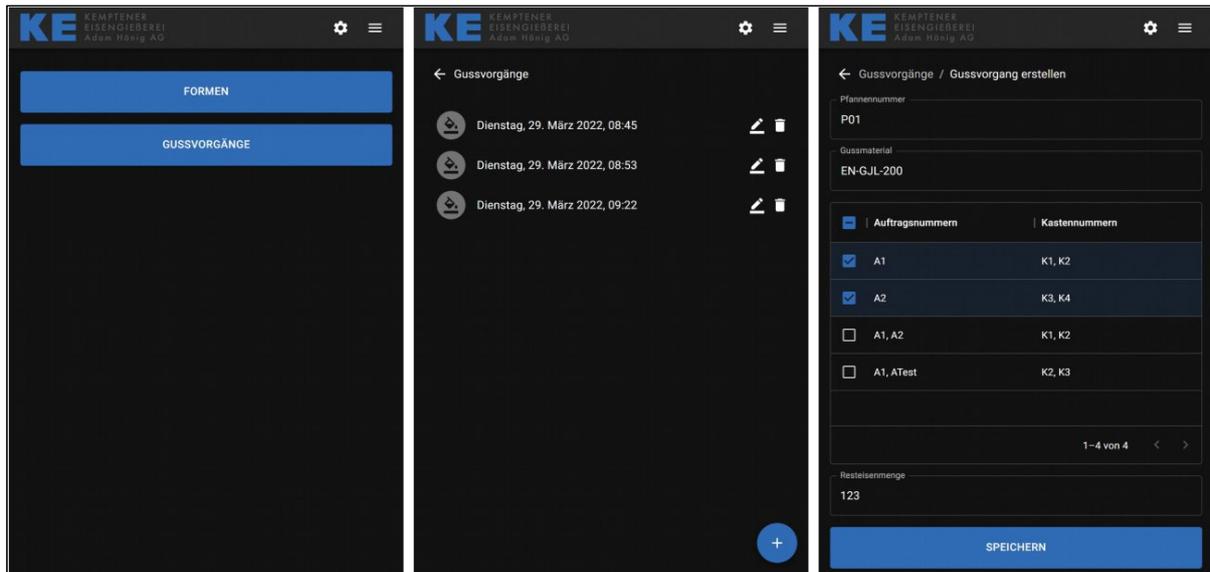
Jedoch ist eine Erfassung aller relevanten Parameter durch Sensorik nicht möglich. Das mittelständisch orientierte Unternehmen setzt in einigen Bereichen auf manuelle Arbeitsschritte. Dies gilt beispielsweise für die Erfassung der Resteisenmengen. Diese ergeben sich planungsbedingt und sind nicht vollständig vermeidbar. Da sie im Rahmen des Projektes durch die Mitarbeitenden dokumentiert werden mussten, kam es laut Gießereileitung auch ohne gezielte Maßnahmen zu einer deutlichen Verringerung der Resteinmenge. Die Einsparung ergab sich durch eine offene Kommunikation mit den verantwortlichen Mitarbeitern der Kemptener Eisengießerei und durch die Notwendigkeit möglichst sparsam mit Energie und Rohstoffen umzugehen. Zur Dokumentation nicht messbarer Kennwerte konzipierten und implementierten die Konsortialpartner eine mobile App. Sie ermöglicht eine lückenlose Dokumentation energierelevanter Prozesse. Für die Speicherung eingetragener

Prozessparameter dient eine Datenbank, deren Inhalte in die Prozessdatenbank übertragen werden. Gemeinsam mit der Gießereileitung, der IT-Leitung und einigen Prozessexperten erfolgte eine Evaluation und kontinuierliche Weiterentwicklung der App.



**Abb. 5:** Prozess „Formen“ in der mobilen App

Abb. 5 und 6 bieten einen Einblick in die Benutzeroberfläche. Um den Produktionsablauf nicht durch langwierige und komplexe Eingaben zu verzögern, ist diese bewusst einfach gestaltet. Die zuerst genannte Grafik zeigt, wie innerhalb der App Aufträge zu vorhandenen Formkästen zugeordnet werden können. In einem Kasten können sich ein bis beliebig viele Aufträge befinden (entsprechend der produktionsbedingten Beschränkungen). Zusätzlich finden diverse produkt- sowie qualitätsrelevante Prüfungen statt. So ist es beispielsweise nicht möglich, Aufträge mit unterschiedlichem Werkstoff in einem Formkasten miteinander zu kombinieren. Diese Funktion schützt vor Fehlern im Planungsprozess und vermeidet somit aktiv vor einem Produktionsausschuss, die wiederum zu unnötigen CO<sub>2</sub>-Emissionen führt (und eine Nachproduktion erfordert).



**Abb. 6:** Prozess „Gussvorgänge“ in der mobilen App

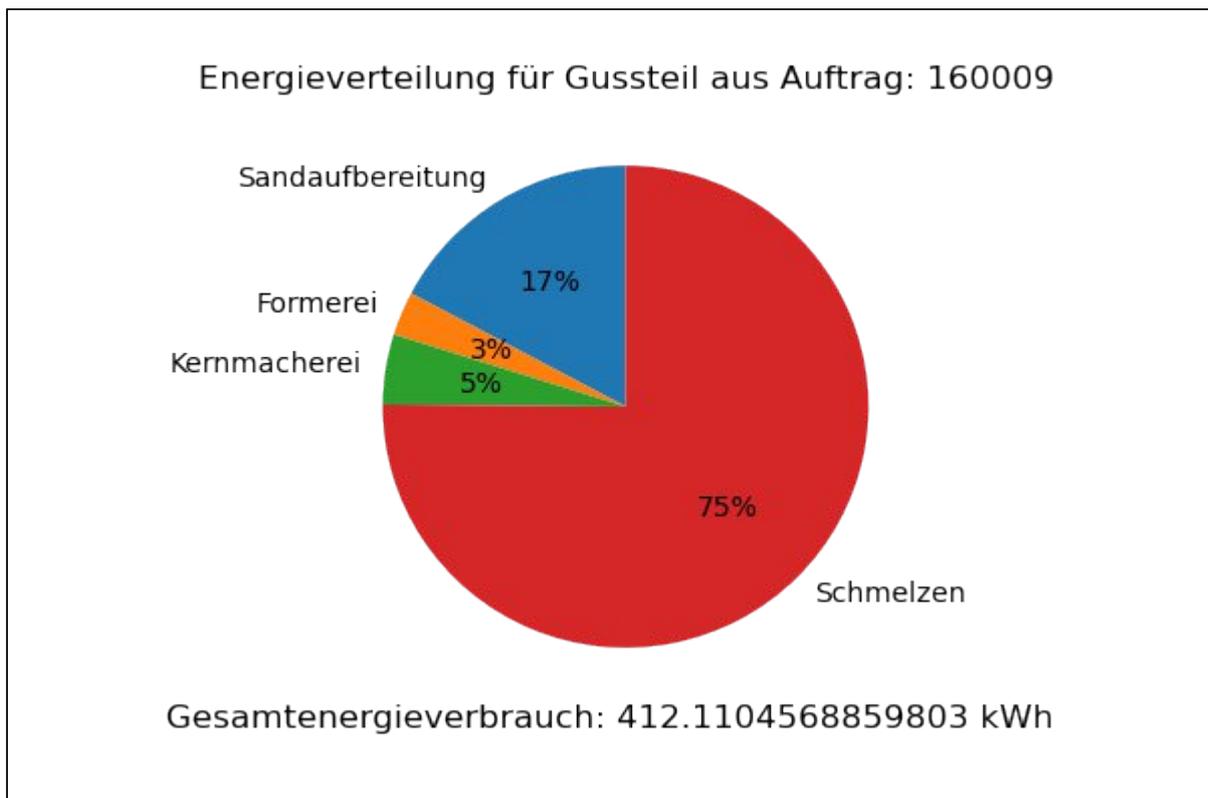
Abb. 6 hingegen zeigt, wie Gussvorgänge mithilfe der Benutzerschnittstelle dokumentierbar sind. Die zuvor angelegten und mit Aufträgen verknüpften Formen sind hier auswählbar. Anschließend leitet die App in eine Eingabemaske weiter. Hier ist die Pfannenummer einzutragen. Der zu gießende Werkstoff wird entsprechend der im Kasten befindlichen Aufträge angezeigt. Zusätzlich können die Mitarbeitenden der Kemptener Eisengießerei die Resteisenmenge in der Pfanne sowie zwei Chargennummern eingeben. Die Gießerei hat bis dato zwei solcher Identifikationsnummern. Einmal aus dem ERP-System und einmal aus der Ofensteuerung. Eine maschinelle Verknüpfung und somit eine lückenlose Nachverfolgbarkeit der Gussteile war aus diesem Grund bisher nicht möglich.

Eine Analyse und Verknüpfung aller Haupteinflussgrößen war in dem für Arbeitspaket 2 angegebenen Zeitraum noch nicht möglich. Die individuellen Quellsysteme ließen sich nur iterativ und teils nur nach Erweiterung um benötigte Schnittstellen anbinden. Da dieser Meilenstein maßgebend für die Generierung des gussteilbezogenen Energieprofils ist und somit ein, wenn nicht das zentrale Projektergebnis darstellt, haben die Projektpartner die Anbindung und Zusammenführung der Daten kontinuierlich verfolgt. Schrittweise ließ sich das in Abb. 4 gezeigte Energiemodell entwickeln.

Die zuvor identifizierten Prozessschritte, die es bei der Herstellung eines Gussteils notwendig sind, lassen sich energetisch unterschiedlich granular abbilden. Für das Gießen selbst sind keine nennbaren Energieverbräuche vorhanden. Sowohl in der Kernmacherei als auch in der Formerei ist keine gussteilspezifische Nachverfolgung möglich (da beispielsweise die Kerne nicht markiert sind). Die Stromverbräuche eingesetzter Maschinen können tagesaktuell und anteilig berücksichtigt werden. Die benötigte Energie der Sandmischer ist nur im Verbund mit weiteren Maschinen für die Formstoffaufbereitung nachvollziehbar. Beim Putzen und Grundieren sind auch für eine anteilige Bestimmung des Energieverbrauchs nicht genügend Messstellen vorhanden. Pro Gussteil sind die folgenden Prozessschritte gut nachvollziehbar:

- Kernherstellung
- Formen
- Schmelzen
- Sandaufbereitung

Anhand der Daten der Schmelzöfen konnte bei der Kemptener Eisengießerei ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 0,58 kWh pro geschmolzenem Kilogramm Eisen ermittelt werden. Die Gießereileitung hat diese Kennzahl nachvollzogen und für korrekt befunden. Wie zu erwarten, nimmt der Schmelzprozess energetisch den größten prozentualen Anteil im Gesamtenergieprofil eines Gussteils ein. Abb. 7 verdeutlicht dies an einem exemplarisch selektierten Auftrag. Das Rohgewicht (Eisen) des Gussteils liegt bei 400 kg.



**Abb. 7:** Gussteilbezogenes Energieprofil für einen selektierten Auftrag

Es wird deutlich, dass der Schmelzprozess 75% des Energieverbrauchs ausmacht. Der energetische Aufwand für die Formerei (mit 3%) und die Kernmacherei (mit 5%) sind hingegen vergleichsweise gering. Überraschend hingegen sind die hohen Energiekosten bei der Sandaufbereitung. Sie machen 17% des Gesamtenergieverbrauchs für das Gussteil dieses Auftrags aus. Insgesamt sind ca. 412 kWh notwendig, um ein solches Teil zu fertigen.

Diese gussteilbezogenen Energieprofile lassen sich für alle Aufträge der Kemptener Eisengießerei erstellen. Für die Prozessexperten ist somit nachvollziehbar, wie viel Energie in einem Gussteil steckt und wo die größten Potenziale für Optimierungsansätze stecken. Umfassende Datenanalysen sind planmäßig im folgenden Arbeitspaket vorgesehen.

### 3.2.2 Aufgetretene Herausforderungen

Arbeitspaket 2 stellte sich als größte Herausforderung des Projektvorhabens heraus. Die technische Umsetzung respektive Anbindung der Quellsysteme ließ sich aufgrund einer vorausschauenden Planung gut umsetzen. Die Zusammenführung der energierelevanten Prozessparameter im Sinne von Abb. 4 kostete hingegen deutlich mehr Zeit als ursprünglich geplant. Nachdem die Identifikation der Haupteinflussgrößen in den tausenden Datenbanktabellen abgeschlossen war, galt es diese zusammenzuführen. Die Datenbanken sind ursprünglich nicht daraus ausgelegt gewesen, eine prozessübergreifende Datenanalyse zu ermöglichen. So gibt es in der Kemptener Eisengießerei beispielsweise zwei unterschiedliche Chargennummern, die einmal durch das ERP-System durch die Arbeitsvorbereitung und einmal durch die Ofensteuerung von ABP vergeben werden. Obwohl es sich um denselben Auftrag handelt, ließen sich diese bis dato digital nicht zusammenführen. Diese Verknüpfung findet in der entwickelten Prozessdatenbank mithilfe in der App erfassten Eingaben statt. Andernfalls wäre keinerlei Zuordnung der energieintensiven Ofendaten mit allen weiteren Prozessdaten möglich.

Weiterhin sind einige Einflussgrößen einem Gussteil nicht unmittelbar und individuell zuordenbar. Insbesondere ist hier die Formstoffaufbereitung zu nennen. Der beim Ausleeren eines Formkastens angefallene Formsand wird über verschiedene Förder-, Zerkleinerungs-, Kühl- und Entstaubungseinrichtungen in Vorratsbunker transportiert. Formkästen werden über den Tag und in der Nacht laufend entleert. Die entsprechend anfallenden Formstoffmengen vermischen sich in diesem Prozessablauf sehr schnell und so ist es nicht möglich, auf das einzelne Gussteil individuelle Kennzahlen zu erheben. Für verwendete Sandkerne können zwar die Energiedaten der Kernproduktion erfasst werden, jedoch fließt der Kernsand beim Ausleeren in den allgemeinen Formstoffkreislauf ein. So ist auch hier eine individuelle Aufschlüsselung nicht möglich. Da es sich bei der Formstoffaufbereitung jedoch um einen bedeutend energieintensiven Prozess handelt, wird für die erforderlichen Einflussgrößen wochenaktuell ein statistischer Mittelwert errechnet, welcher dann über einen weiteren Rechenschritt unter Berücksichtigung der von der Arbeitsvorbereitung errechneten für das Gussteil notwendigen Sandmenge dem jeweiligen Gussteil zugeordnet wird.

Die mobile App stellt einen zentralen Bestandteil des Projektes dar und ist zwingend notwendig, um eine lückenlose Verknüpfung und Dokumentation energierelevanter Haupteinflussgrößen zu realisieren. Zu Beginn standen einige sehr handwerklich orientierte Mitarbeiter mit langjähriger Erfahrung dieser Neuentwicklung überaus skeptisch gegenüber. Gerade die jungen Mitarbeitenden ließen sich jedoch schnell von der Idee überzeugen und halfen durch Verwendung der App einen Mehrwert aufzuzeigen und Akzeptanz zu schaffen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass alle Herausforderungen durch Zusammenarbeit der Projektpartner überwunden und das Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

### 3.3 Datenanalyse und -auswertung

#### 3.3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das dritte Arbeitspaket fokussiert die Analyse und Auswertung verfügbarer Daten. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Ermittlung eines Energiemodells für den Schmelzofen sowie für die Formstoffaufbereitung.

#### Energiemodell für den Schmelzofen

Für Ersteres entwickelte ABP im Laufe des Projektes eine eigene Datenbank. Bestehende Speicherlösungen verdichten die Daten nach vorgegebenen Zeitintervallen, um die zu speichernde Datenmenge zu reduzieren. Eine solche Zusammenführung verhindert jedoch eine genaue Auswertung relevanter Kenngrößen. Die Bereitstellung einer eigenen Ofendatenbank war daher von Nöten. Bei beiden Schmelzöfen der Kemptener Eisengießerei handelt es sich um Twin-Anlagen mit je zwei Tiegeln. Eine sensorische Datenaufnahme außerhalb des ABP eigenen Softwaresystems ist somit ausgeschlossen, da nur der Gesamtverbrauch der jeweiligen Anlage, nicht aber einzelner Tiegelchargen nachvollziehbar ist.

Anhand der verfügbaren Daten ist es möglich, die pro Tag geschmolzenen Chargen energetisch nachzuvollziehen. Auch seltene Störungen respektive Ausfälle sind anhand der visualisierten Energieverbräuche nachvollziehbar. Die Fehlermeldungen sind in diesem Fall jedoch der Benutzerschnittstelle der ABP-Software zu entnehmen.

Verschleißbedingt müssen die Tiegel der Schmelzöfen regelmäßig ausgetauscht werden. Mit der Zeit bilden sich besonders im unteren Bereich Auswaschungen und Risse. Abb. 6 zeigt auf der linken Seite einen neuen Tiegel. Rechts ist er am Ende seines Lebenszyklus zu sehen.

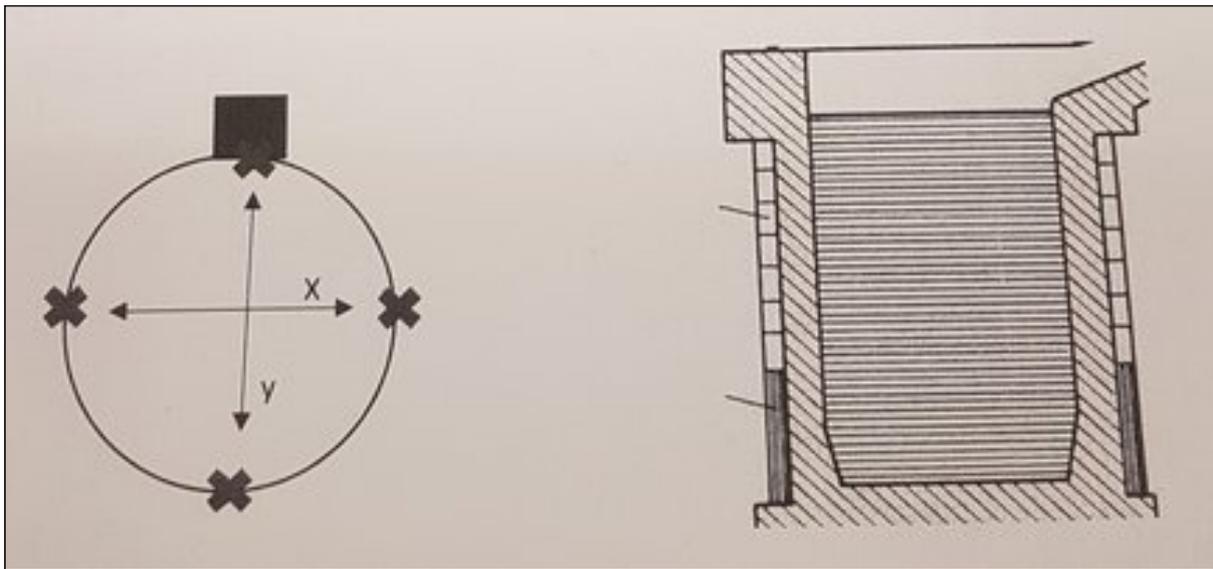


**Abb. 8:** Verschleiß eines Schmelztiegels

Diese durch Verschleiß entstandenen, oftmals mit dem Auge nicht sichtbaren Beschädigungen im Schmelztiegel können ein Risiko für die Mitarbeitenden darstellen, wenn sie unentdeckt bleiben. In der Zeit vor dem REFFpro-Projekt untersuchten Mitarbeitende der Kemptener Eisengießerei in festgelegten Intervallen regelmäßig den Schmelztiegel durch eine Sichtprüfung und dokumentierten zum Produktionsende alle Veränderungen im Tiegel. Die Aufnahme dieser Kennwerte war überaus herausfordernd, da der Tiegel zum Zeitpunkt der Prüfung noch mehrere

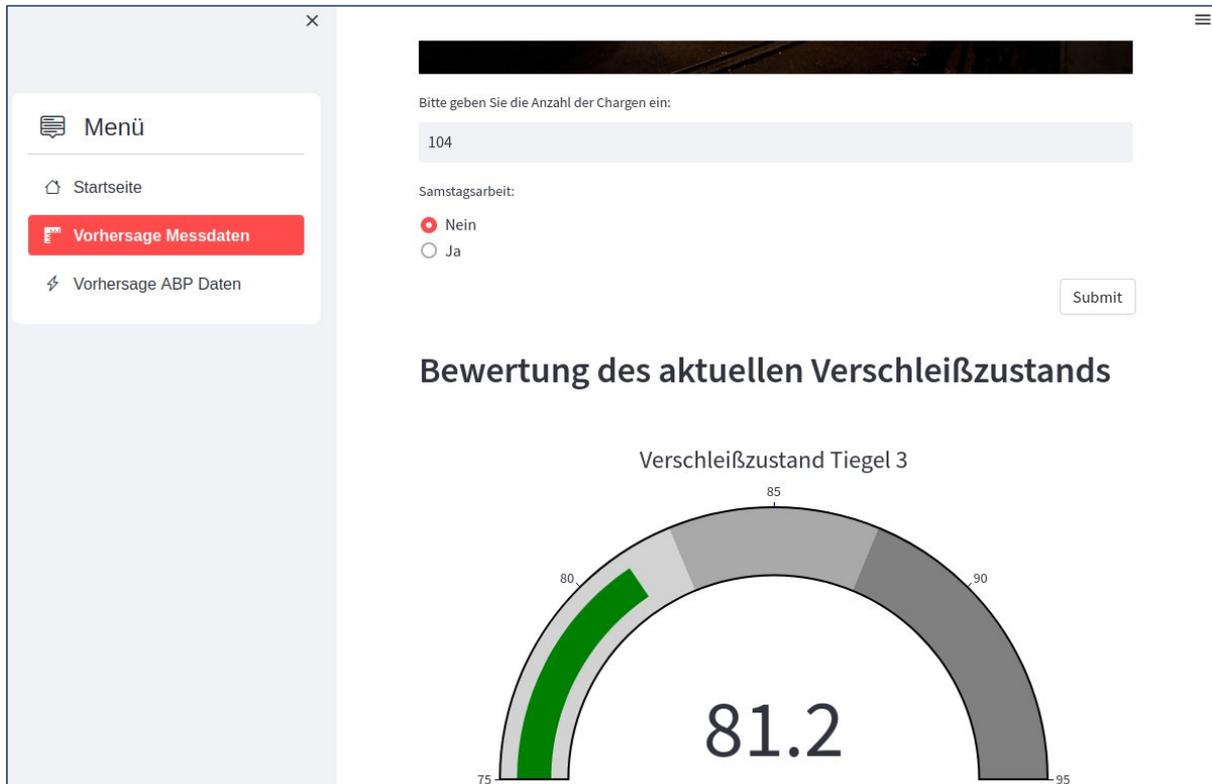
hundert Grad heiß war und bereits für die Produktion am Folgetag vorbereitet werden musste.

Da der Tausch eines Tiegels mit hohen Material- und Energieaufwänden verbunden ist, besteht großes ökologisches sowie wirtschaftliches Interesse daran, so viele Chargen wie möglich ohne Erneuerung zu schmelzen. Dabei muss die Sicherheit der Mitarbeitenden selbstverständlich gewährleistet bleiben. Die Projektpartner haben daher einen Schmelztiegel über seinen Lebenszyklus hinweg manuell vermessen, um die Veränderungen (bspw. Auswaschungen) im Zeitverlauf nachvollziehbar zu machen. Am Markt bestehende und automatisierte Messsysteme sind mit hohen Kosten verbunden und für die Kemptener Eisengießerei nicht wirtschaftlich. Mit einer eigens gebauten Vorrichtung wurde der Tiegel horizontal und vertikal auf fünf Höhen (0cm, 50cm, 100cm, 250cm, 500cm, 1000cm) vermessen, wie Abb. 9 verdeutlicht.



**Abb. 9:** Vermessung eines Schmelztiegels

Anhand dieser Datengrundlage ließ sich ein Machine Learning Modell für die Prädiktion von Zeitreihendaten trainieren. Damit ist sowohl eine Bestimmung des aktuellen Verschleißzustands, als auch die Vorhersage des künftigen Verschleißverlaufs möglich. Um den Mitarbeitenden der Kemptener Eisengießerei einen einfachen Zugang zu diesem Projektergebnis zu bieten, wurde eine Webseite entwickelt, die in Abbildung 10 bis 12 einsehbar ist. Neben einer Startseite gibt es zwei Hauptbereiche, die über das Navigationsmenü auf der linken Seite verfügbar sind. Eine Klassifikation ist demnach anhand händisch gemessener, aber auch anhand von ABP elektrisch gemessener Daten möglich. Bei der Vorhersage anhand manueller Messungen ist die Anzahl der momentan geschmolzenen Chargen sowie die Auswahlmöglichkeit „Samstagsarbeit“ einzugeben.



**Abb. 10:** Klassifikation des Verschleißzustands eines Schmelztiegels

Abb. 10 zeigt beispielhaft eine solche Klassifikation. Über ein Speedometer ist der Zustand des Schmelztiegels auf einen Blick erkennbar. Die Vorhersage des weiteren Verschleißverlaufs und eine kalendarische Übersicht sind in Abb. 11 einsehbar. Die Kemptener Eisengießerei kann den Austausch der Schmelztiegel nun vorausschauend planen. Eine manuelle Sichtkontrolle bleibt weiterhin notwendig, da mithilfe des Verfahrens keine Risse identifizierbar sind.

Auch anhand elektrischer Tiegeldaten ist eine Bestimmung des Verschleißzustands und eine Vorhersage zukünftiger Verläufe möglich, wie Abb. 12 aufzeigt. Diese beinhalten neben einer ID, dem Anlagen- und Tiegelindex sowie einem Zeitstempel die folgenden Messwerte:

- Spannung
- Stromstärke
- Frequenz
- Leistung (Ist und Soll)
- Temperatur
- Werkstoff
- Diverse Temperaturen des Kühlkreislaufs

Es gibt Situationen respektive Datenmesspunkte, anhand derer die Verschleißvorhersage sehr gut funktioniert. Das Beispiel in der Grafik verdeutlicht dies. In Abschnitt 3.3.2 findet sich eine ausführliche Beschreibung, warum dies nicht immer der Fall ist.

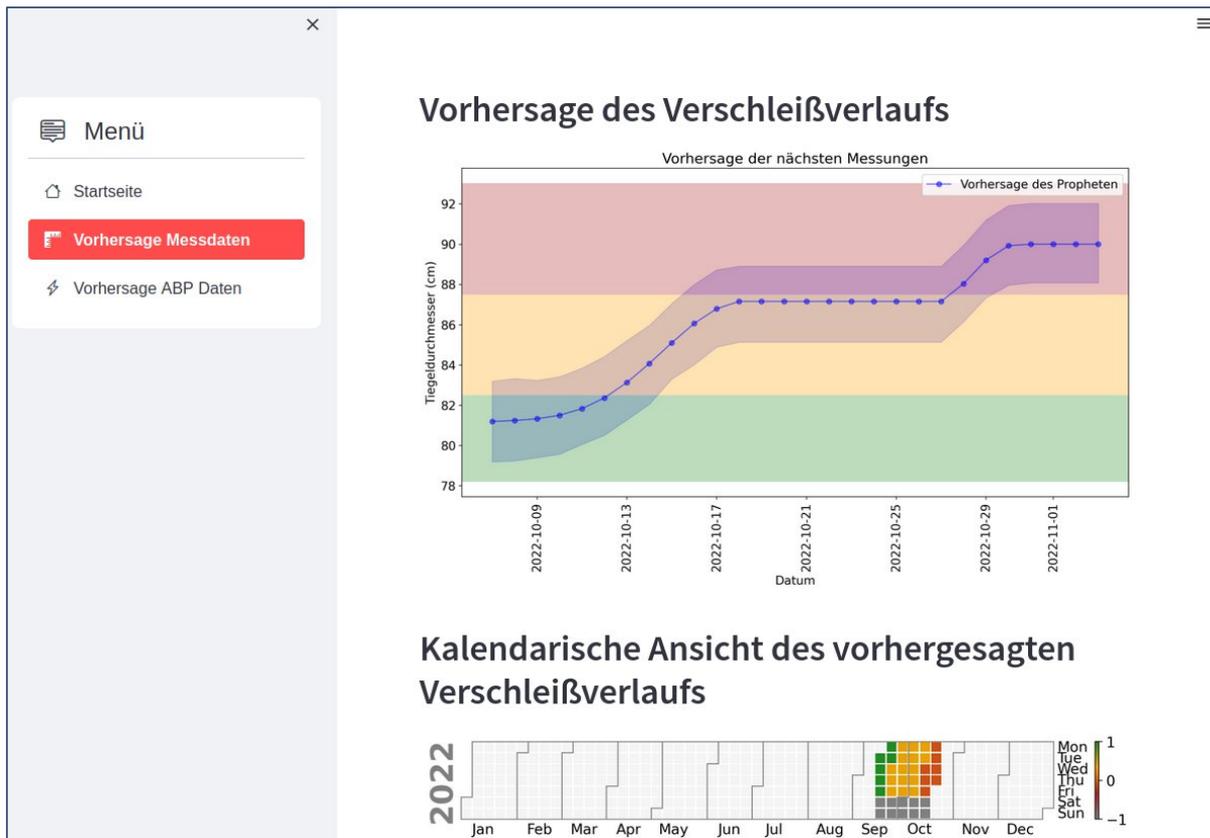


Abb. 11: Kalendarische Vorhersage des Verschleißverlaufs eines Schmelztiegels

Die Kemptener Eisengießerei hat die bereitgestellte Webanwendung evaluiert und die Klassifikationen sowie Vorhersagen für sehr gut befunden.



**Abb. 12:** Visualisierung des Verschleißverlaufs anhand elektrischer Daten

## Energiemodell für die Formstoffaufbereitung

Ein weiterer zentraler Aspekt des Arbeitspakets stellt die Erstellung eines Energiemodells für die Formstoffaufbereitung der Kemptener Eisengießerei dar. Sowohl bei der Auswertung des gussteilbezogenen Energieprofils als auch bei der Optimierung der Belegungsplanung der Formanlage fiel auf, dass die Formstoffaufbereitung einen nicht unerheblichen Anteil des Gesamtenergieverbrauchs eines Gussteils ausmacht. Abb. 7 verdeutlicht dies anhand eines realen Auftrags.

Bei der Kemptener Eisengießerei gibt es zwei Aufbereitungskreisläufe, die einmal den Handformguss und zum anderen den Maschinenformguss versorgen. Beide Sandkreisläufe wurden dokumentiert und sind in einer Grafik festgehalten. Die folgende Erläuterung fokussiert sich auf die Sandaufbereitung für den Formautomaten. Alle Untersuchungen erfolgten auch für den Handformguss, sind jedoch hier nicht explizit beschrieben, um Wiederholungen zu vermeiden.

Abb. 13 stellt alle Verarbeitungsschritte respektive Maschinen für die Aufbereitung des Formstoffs für den Formautomaten dar. Mithilfe des Energiemanagements der Gießerei ließen sich diese mit vorhandenen Energiemessstellen verknüpfen. Da nicht jeder Verarbeitungsschritt durch eine individuelle Messstelle erfassbar ist, werden die Energieverbräuche mehrerer Maschinen teils durch einen gemeinsamen Sensor aufgenommen.

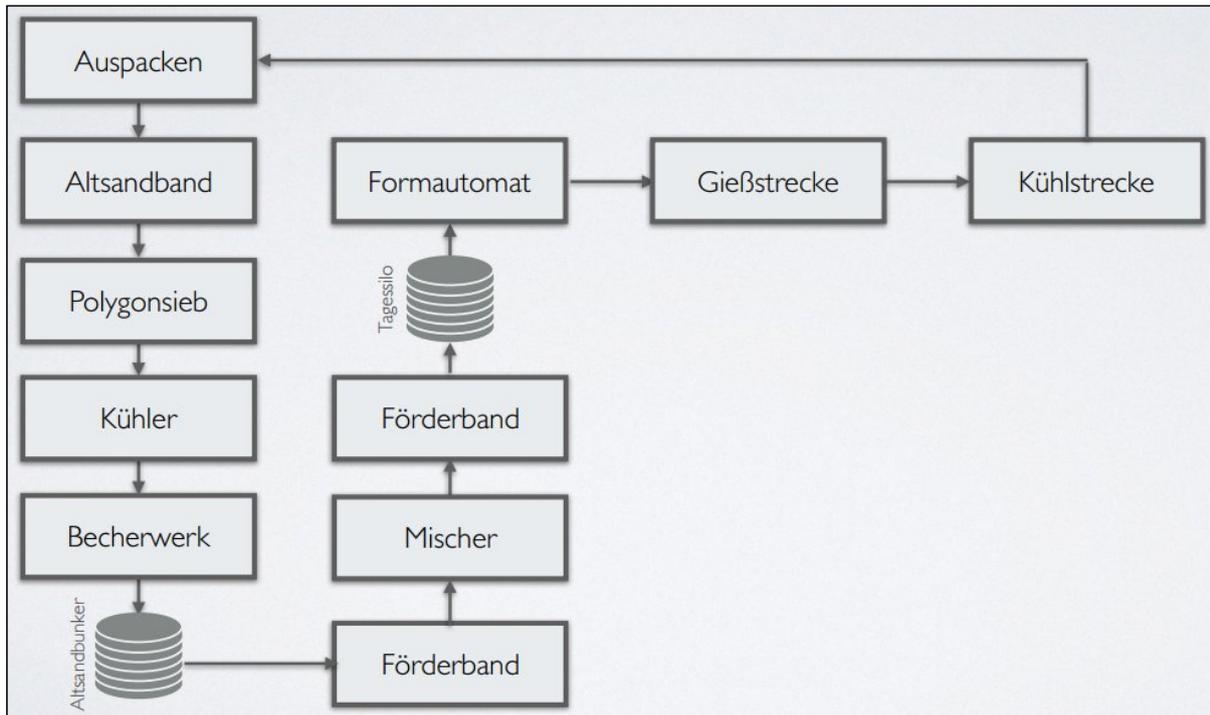


Abb. 13: Grafische Darstellung aller Schritte für die Formstoffaufbereitung (Formautomat)

Um den Mitarbeitenden der Kemptener Eisengießerei den Zugang zu den erfolgten Analysen zu erleichtern und sie zu befähigen, eigene Untersuchungen durchzuführen, haben die Projektpartner die für die Analyse des gussteilbezogenen Energieprofils entwickelte Webanwendung erweitert. Ein Ausschnitt ist in Abb. 14 dargestellt. Die Auswertungsmethode (Automatenguss oder Handformguss) ist genau wie ein beliebiger Zeitraum (sofern Energiedaten für diesen vorliegen) wählbar. Die mit diesen Prozessen verknüpften Messstellen werden automatisiert hinzugefügt.

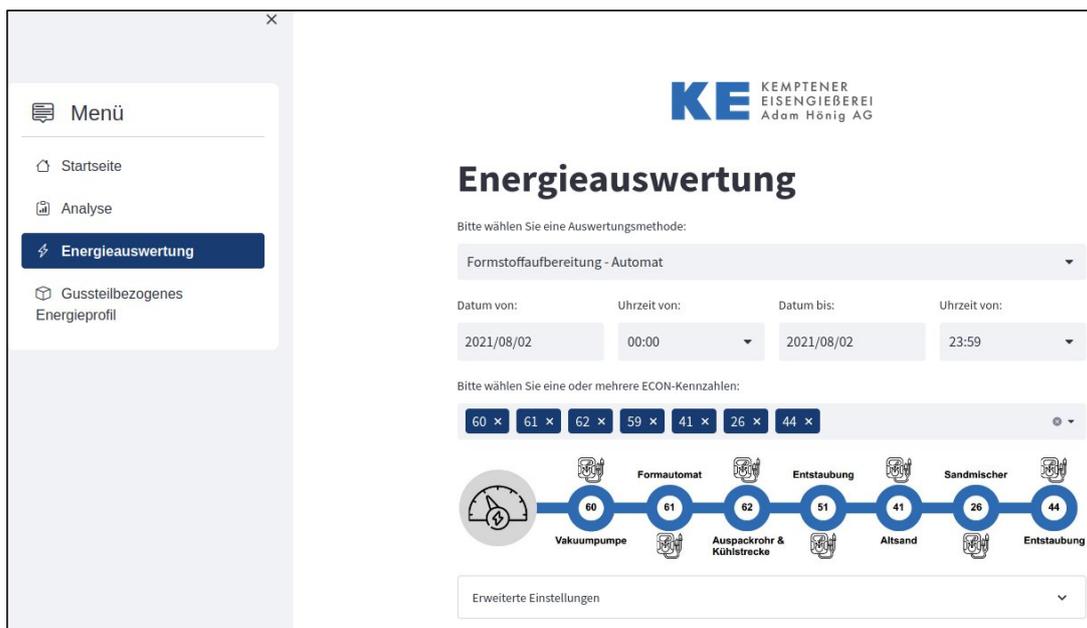


Abb. 14: Energieauswertung für die Formstoffaufbereitung (Formautomat)

Anhand diverser automatisch erzeugter Grafiken können die Mitarbeitenden die Energieverbräuche der einzelnen Maschinen individuell und im Vergleich untersuchen.



**Abb. 15:** Pie-Chart für die Energieauswertung der Formstoffaufbereitung (Formautomat)

Abb. 15 stellt dies exemplarisch dar. Abgebildet ist ein Pie-Chart, das einen prozentualen Vergleich von Energieverbräuchen pro Messstelle (in einem Zeitraum von 24 Stunden) darstellt. Die Zahlen innerhalb der Legende referenzieren spezifische Messstellen, deren Bezeichnungen in Abb. 14 einsehbar sind (so verweist beispielsweise Messstelle 26 auf den Sandmischer). Die Kemptener Eisengießerei erhält somit eine Übersicht und Sortierung relevanter Messstellen. Die Mitarbeitenden prüfen nun, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um prozess- bzw. maschinenspezifisch Energie einzusparen. In Bezug auf die zuvor genannte Messstelle 26 wird beispielsweise untersucht, ob sich die Zeit für das Mischen des Sandes reduzieren lässt.

### Detektion hoher Resteisenmengen

Durch die Datenerfassung über die entwickelte mobile App wurde festgestellt, dass die Kemptener Eisengießerei teils hohe Resteisenmengen erzeugt. Zwar lässt sich dieses erneut einschmelzen, die zuvor investierte Energie geht jedoch verloren und hat dementsprechend sowohl ökologische als auch ökonomische Konsequenzen in Form von Stromkosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und einer uneffektiven Auslastung des Schmelzbetriebs. Letztere Problematik zieht weitere Herausforderungen in der Auftragsplanung und Logistik nach sich.

Datum	Modellnr	Auftragsnr	Stückzahl	Kastennr	Formen	Uhrzeit	Guss Uhrzeit	Charge	Gießzeit (s)	Resteisen (kg)
12.12.2023	049	160005	1	K169,172		10:30	16:15	330	24	200
12.12.2023	491	160009	1	K165,K166		12:15	15:41	430	32	0
12.12.2023	0035.6	162150	1	K127,K128		05:30	15:30	130	19	700
12.12.2023	2654/00	158046	1	K232,K234		06:30	13:37	230	37	250
12.12.2023	866	161041	1	K463,K379		07:00	08:55	110	28	200
12.12.2023	595	159873	1	K326,K328		07:30	16:25	330	26	0
12.12.2023	960	153922	1	K326,K328		07:30	16:25	330	26	0
12.12.2023	236	161236	1	K326,K328		07:30	16:25	330	26	0
12.12.2023	443	162596	1	K129,K130		08:00	11:45	120	27	100
12.12.2023	0023.6	158348	1	K129,K130		08:00	11:45	120	27	100
12.12.2023	611	156215	1	K129,K130		08:00	11:45	120	27	100
12.12.2023	630	163556	1	K472,K516		08:30	15:34	430	33	0
12.12.2023	809	161042	1	K472,K516		08:30	15:34	430	33	0
12.12.2023	952	162162	1	K472,K516		08:30	15:34	430	33	0
12.12.2023	921	161953	1	K472,K516		08:30	15:34	430	33	0
12.12.2023	M848/1	158671	1	K144		09:00	16:15	330	27	0
12.12.2023	M839/1	161068	1	K147		09:00	16:15	330	27	0

**Abb. 16:** Resteisenmengen

Abb. 16 zeigt dies für einen ausgewählten Gießtag. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Aufträge aus dem Handformguss. Für die 17 Aufträge des Tages entstanden insgesamt 1,65 t an Resteisen (siehe Spalte ganz rechts). Anhand des zuvor errechneten Faktors von 0,58 kWh pro Kilogramm geschmolzenem Eisen ergibt sich für diesen Gießtag ein Energieverlust von 957 kWh durch Resteisen. Bei 248 Arbeitstagen im Jahr 2023 (Bundesland Bayern) ergibt sich ein Gesamtverlust von 237.336,00 kWh pro Jahr. Selbst wenn man die Resteisenmengen dieses repräsentativen Gießtags auf 60% reduziert und den Energieverlust mit den Arbeitstagen des Jahres 2023 multipliziert, ergeben sich 142.401,6 kWh an Einsparungspotenzial pro Jahr. Eine vollständige Reduktion wird anhand planungs- und produktionsbedingter Restriktionen nicht möglich sein.

Resteisenmengen lassen sich auftragsbedingt nicht vollständig vermeiden. Die Kemptener Eisengießerei arbeitet jedoch bereits in einem eigenfinanzierten Folgeprojekt daran, die Auftragsplanung zu automatisieren und gleichzeitig Verluste durch Resteisen stark zu reduzieren.

### 3.3.2 Aufgetretene Herausforderungen

Nach Annahme des Ofenherstellers ABP sollte der elektrische Wirkungsgrad der Induktionsöfen mit zunehmend geschmolzenen Chargen abnehmen<sup>2</sup>. Es wird ergo mehr Energie benötigt, wenn der Tiegel verschlissen ist. Die Projektpartner konnten das so nicht feststellen. Dagegen wurde offensichtlich, dass der Wirkungsgrad sehr stark von der Gattierung (Stückigkeit der Einsatzstoffe, Roheisen, Schrotte und Kreislauf) abhängt. Auch der Füllstand des Tiegels zu einem Zeitpunkt  $t$  hat entscheidenden Einfluss auf diesen. Anhand der elektrischen Tiegeldaten (Strom, Frequenz etc.) ließ sich der Verschleißzustand wider Erwarten und entgegen der Aussage von ABP nicht eindeutig klassifizieren. Anhand der verfügbaren Daten aus der Ofensteuerung war es nicht möglich, einen von diesen Einflussparametern

<sup>2</sup> Quelle: Stefan Andorf, Service Sales Engineer Modernization bei der ABP Induction Systems GmbH

bereinigten Wirkungsgrad zu bestimmen. Da der Tiegelverschleiß einen Einfluss auf den spezifischen Energieeinsatz haben muss und zudem ein gut prognostizierter Verschleißzustand die Möglichkeit bietet, Tiegelnutzung und –wechselzeitpunkt technisch und ökonomisch optimal zu organisieren, wird an dieser Aufgabenstellung auf der Grundlage der hier gewonnenen Erkenntnisse auch nach Ende des Projektes gearbeitet.

Als weitere Herausforderung sind die manuellen Messungen der Schmelztiegel zu nennen. Die Kemptener Eisengießerei gattiert jeden Schmelztiegel nach Abguss der letzten Charge für den kommenden Produktionstag. Eine Vermessung ist daher nur kurz vor der Befüllung des Ofens möglich. Die Schmelztiegel sind zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht vollständig abgekühlt. Die vorherrschenden Temperaturen sind enorm. Der Boden der Schmelztiegel aufgrund des grellen Lichts nicht sichtbar. Die Mitarbeitenden müssen sich für die Messung über den Tiegel beugen und durch Unterstützung einer Kranvorrichtung und des eigens entwickelten Werkzeugs vermessen. Diese Tätigkeit stellte zwar wichtige Datengrundlagen für das Projekt bereit und resultierte in einem viel benutzten Assistenzsystem, jedoch war sie aufgrund der widrigen Umgebungsbedingungen bei der Mitarbeitenden wenig beliebt. Eine dauerhafte Messung ist daher ausgeschlossen. Die bestehende Datengrundlage ist allerdings ausreichend und erfordert zum aktuellen Zeitpunkt keine Erweiterung.

### **3.4 Belegungsplanung Formanlage**

#### **3.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die Kemptener Eisengießerei besitzt eine alte Formanlage. Eine Datenerhebung mithilfe von Sensorik respektive durch die Maschinensteuerung ist aufgrund des Alters der Anlage nicht möglich. Abb. 17 zeigt die Anlage in Form einer Skizze.

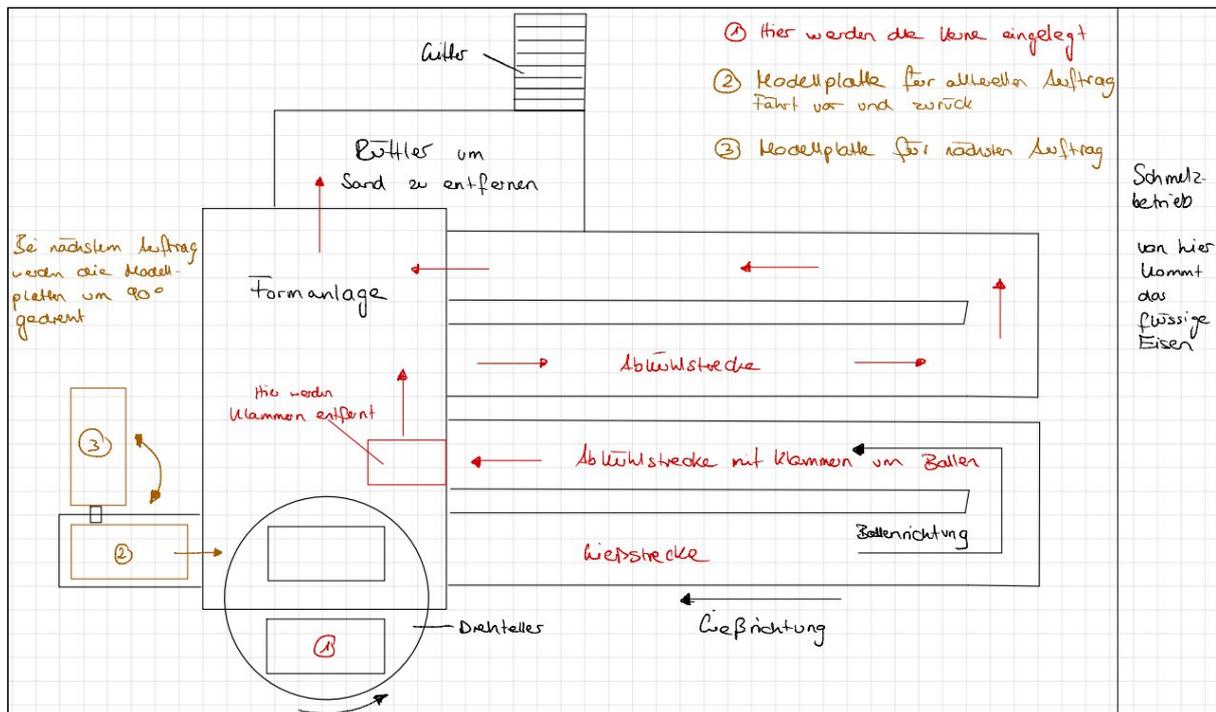


Abb. 17: Skizze des Formautomats

Auf der linken Seite befinden sich die Modellplatten für den aktuellen und den nächsten Auftrag. Die mit Nummer 2 gekennzeichnete Platte fährt vor und zurück. Mithilfe eines Drehtellers wird die Platte manuell geschwenkt und durch Mitarbeitende händisch mit Kernen bestückt. Nach Eindrehen der Platte erzeugt der Formautomat einen Kasten und schießt Formstoff in diesen. Durch ein Förderband werden sie befördert und kühlen unterdessen ab. Am Ende der Strecke werden die Gussteile ausgepackt und mithilfe eines Rüttlers von Sand befreit. Die Gießstrecke befindet sich auf der (in Abb. 17) untersten Bahn entgegen der Flussrichtung des Förderbands. Das flüssige Eisen wird in einer Pfanne an die Formanlage befördert. Ihr Fassungsvermögen beträgt 600 kg. Die Mitarbeitenden der Kemptener Eisengießerei befüllen nach und nach die Ballen mit flüssigem Eisen. Es ist nicht ersichtlich, wie viel Eisen sich zu einem bestimmten Zeitpunkt genau in der Pfanne befindet. Weiterhin ist unklar, wie viel Eisen genau in einen Ballen zu gießen ist. Neigt sich der Pfanneninhalt nach einigen Gussvorgängen dem Ende, ist durch den Mitarbeitenden eine Entscheidung zu treffen. Ist die Eisenmenge nicht ausreichend, entsteht Ausschuss. Üblicherweise geben die Mitarbeitenden Resteisen in der Pfanne daher zurück in den Schmelzbetrieb und kühlt dort aus. Das abgekühlte und erstarrte Resteisen lässt sich selbstverständlich wieder weiter verarbeiten und neu einschmelzen. Die investierte Energie geht jedoch unweigerlich verloren.

Ein wichtiges Ziel für die Prozessexperten der Gießerei war es daher, diese Resteisenmengen zu reduzieren. Die Idee der Projekexperten umfasste eine digitale Planung der Aufträge des Formautomats für eine Woche. Durch eine geschickte Kombination dieser ließe sich Energie einsparen. Für die Planung gibt es eine Vielzahl von Entscheidungskriterien respektive Restriktionen. So sind verständlicherweise nur

Aufträge zu selektieren, die in dieser Produktionswoche fertigzustellen sind. Sofern zeitlich möglich, dürfen auch Aufträge aus der kommenden Wochen einbezogen werden. Weiterhin müssen einige Aufträge, abhängig von Eisenmenge und vor allem Geometrie, über Nacht auf der untersten Bahn des Förderbands abkühlen. Fährt man diese darüber hinaus, würde das noch flüssige Eisen aus den Kästen heraus laufen und das Gussteil wäre nicht mehr brauchbar und somit Ausschuss. Da es eine große Menge weiterer Einflussparameter und Restriktionen gibt, gestaltet sich die Wochenplanung für den Formautomat als zeitaufwendig und überaus komplex. Die Planung basiert teils auf Daten der Arbeitsvorbereitung, häufig jedoch auch auf nicht quantifizierbarem Erfahrungswissen von Mitarbeitenden.

Gemeinsam haben die Projektpartner eine moderne Webanwendung entwickelt, mit deren Hilfe sich diese Herausforderung angehen lässt. Als Grundlage dient eine Liste zu fertigender Aufträge aus dem ERP-System der Kemptener Eisengießerei. Ein komplexes und selbst entwickeltes Verfahrensmodell ist in der Lage, das vorliegende Optimierungsproblem unter den gegebenen Umgebungsvariablen zu lösen. Nach Fertigstellung der Webanwendung und Evaluation mit den Prozessexperten der Gießerei wurde festgestellt, dass eine geschickte Kombination von Aufträgen zur Reduktion von Resteisenmengen nicht die optimale Lösung darstellt, um Energie einzusparen. Es fiel auf, dass bei jedem Tausch der Modellplatte (links unten in Abb. 17) zwei Leerbällen entstehen. Auch wenn diese nicht mit Eisen zu befüllen sind, wird Formstoff in die Kästen geschossen. Wie schon im vorherigen Arbeitspaket beschrieben, ist die Sandaufbereitung bei der Kemptener Eisengießerei vergleichsweise teuer. Pro Leerbällen entstehen 5 kWh für die anschließende Formstoffaufbereitung. Bei zwei Leerbällen pro Auftragswechsel und 0,58 kWh für das erneute Einschmelzen eines Kilogramms Resteisen. Es lohnt sich daher nicht in allen Fällen, den Auftrag zu wechseln.

Die Projektpartner stellten daher ein zweites Planungsverfahren bereit, das hinsichtlich dieser Erkenntnis optimiert.



Abb. 18: Planung für den Formautomat

Abb. 18 zeigt eine solche Planung entsprechend der gegebenen Umweltrestriktionen für einen bestimmten Produktionstag mithilfe eines Gantt-Charts. Auf der linken Seite sind die Identifikatoren eingeplanter Aufträge zu sehen. In der untersten Spalte sind

die Zeitpunkte der Modellplattenwechsel (siehe links unten in Abb. 17) einsehbar. Die Aufträge sind nach Werkstoffen aneinandergereiht. Es ist bei der Planung von zentraler Bedeutung, die Aufträge so zu organisieren, dass die gesamt benötigte Eisenmenge rechnerisch exakt drei oder ein Vielfaches dieser Zahl darstellt. Die Kemptener Eisengießerei besitzt vier Schmelztiegel mit einem Volumen von drei Tonnen oder sechs Tonnen. Die Zusammensetzung geplanter Aufträge muss folglich immer dem Volumen eines oder mehrerer Schmelztiegel entsprechen, damit keine Resteisenmengen entstehen (die Aufträge der Handformerei werden unabhängig geplant und können hier nicht berücksichtigt werden). Die Auftragsplanung berücksichtigt das Lieferdatum der Gussteile und favorisiert jene, die früher auszuliefern sind. Zuletzt sind Aufträge geplant, die nicht über die unterste Bahn des Förderbands hinausfahren dürfen. Die Anzahl der Plätze ist hierbei beschränkt, was durch die automatisierte Planung zu berücksichtigt ist.

### 3.4.2 Aufgetretene Herausforderungen

Die überraschend hohen Kosten eines leeren Ballens (mit Formsand, aber nicht mit flüssigem Eisen befüllt) erforderten von den Projektpartnern eine Weiterentwicklung des zu diesem Zeitpunkt bestehenden Planungsalgorithmus. Durch die Anlage bedingt sind Leerballen nicht zu vermeiden. Das häufige Wechseln eines Auftrags zur Reduktion von Resteisenmengen erfordert häufige Modellwechsel und resultiert folglich in einer großen Menge leerer Ballen. Es ist daher oftmals sinnvoller, größere Resteisenmengen in Kauf zu nehmen und den Auftrag nicht zu wechseln. Aus Sicht der Projektpartner handelte es sich dabei um eine wichtige Erkenntnis, auch wenn diese für die Prozessexperten überraschend war. Die hohen Kosten für die Formstoffaufbereitung stellen ein Potenzial für künftige Einsparungsmaßnahmen dar. Wie Abb. 15 verdeutlicht, lassen sich die einzelnen Energieverbraucher visualisieren und miteinander vergleichen. Durch diese genannten Assistenzsysteme kann die Kemptener Eisengießerei gezielt Änderungen vornehmen. Entsprechende Maßnahmen sind zum aktuellen Zeitpunkt in Planung.

### 3.5 Entwicklung und Vorhersage- von Entscheidungsmethoden

Die Entwicklung von Vorhersage und Entscheidungsmethoden erfolgte durch die Projektpartner parallel zu den bereits beschriebenen Aktivitäten vorheriger Arbeitspakete. Sie wurden in Form unterschiedlicher Assistenzsysteme zur Verfügung gestellt. Um Wiederholungen zu vermeiden, werden sie an dieser Stelle nur namentlich angeführt:

- Assistenzsystem zur Anzeige und Auswertung gussteilbezogener Energieprofile und individueller Herstellungsprozesse,
- Assistenzsystem für die Klassifikation und die Vorhersage des Tiegelverschleißes,
- Assistenzsystem für die Optimierung der Belegungsplanung des Formautomats.

### **3.6 Verifizierung und Validierung**

Mit Abschluss jedes Arbeitspakets respektive nach Bereitstellung eines entwickelten Assistenzsystems mit zugehörigen Handlungsempfehlungen erfolgte sowohl eine Verifizierung (stimmen die Funktionalitäten mit den Anforderungen überein) als auch eine Validierung (Überprüfung der Nutzungsziele der Anwendung).

#### **Gussteilbezogenes Energieprofil und Energieauswertung von Herstellungsprozessen**

Die entwickelte mobile App ist mithilfe der Mitarbeitenden der entsprechenden Abteilungen sowie der IT und Gießereileitung der Kemptener Eisengießerei überprüft worden. Gemeinsam mit den anderen Projektpartnern folgten daraufhin Weiterentwicklungen zur Bereitstellung neuer Funktionalitäten.

Alle Berechnungen für das gussteilbezogene Energieprofil sowie das zugehörige Assistenzsystem für eine Einsicht respektive den Vergleich von Energieverbräuchen diverser Herstellungsprozesse ist vom Energiemanagement sowie der Gießereileitung überprüft und abgenommen worden.

#### **Klassifikation und Vorhersage des Tiegelverschleißes**

Die Vorhersage des Verschleißverlaufs eines Schmelztiegels ließ sich durch eine Überprüfung des prädizierten Tiegeltauschs mit dem tatsächlichen Tauschdatum überprüfen. Die Vorhersage war dabei in mehreren Evaluationsschleifen ausreichend genau.

#### **Optimierung der Belegungsplanung des Formautomats**

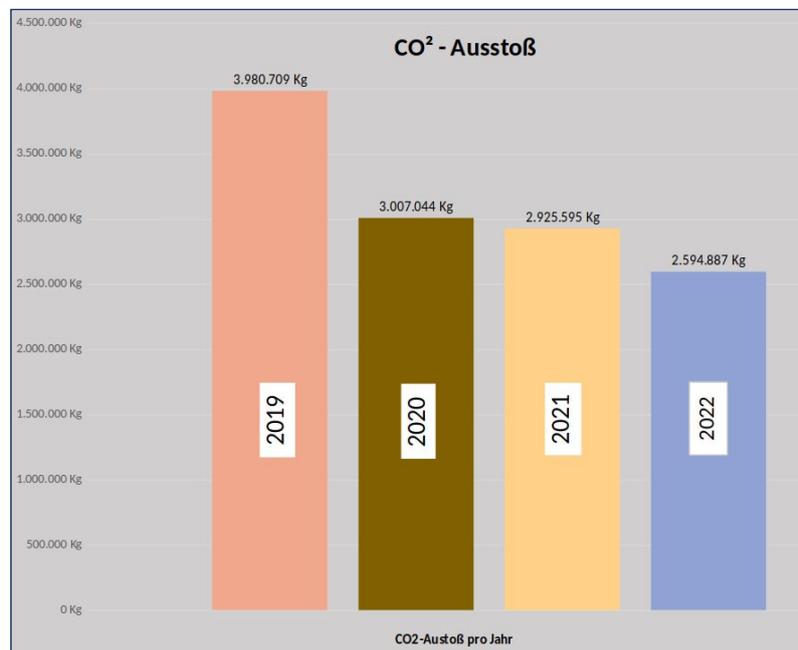
Eine Überprüfung der Planung des Formautomats ist ebenfalls erfolgt. Nach Entwicklung des ersten Algorithmus wurde in einer Evaluation festgestellt, dass die hohen Energiekosten für Leerballen, die bei einem häufigen Auftragswechsel entstehen, in der Planung berücksichtigt werden sollte. Der bestehende Algorithmus wurde weiterentwickelt und von der Arbeitsvorbereitung der Kemptener Eisengießerei abgenommen.

#### **Einsparung von CO<sub>2</sub>**

Allgemein wirken sich Energie- sowie Rohstoffeinsparungen auf die Ökonomie der Gießerei aus. Im Fokus steht jedoch auch die Auswirkung des Projektes auf die ökologischen Aspekte. Abb. 19 zeigt den vom Energiemanagement errechneten CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Kemptener Eisengießerei zwischen den Jahren 2019 und 2022. Das REFFpro-Projekt startete im Jahr 2020. Im Vergleich zum Jahr 2019 konnten 973.665,00 kg CO<sub>2</sub> eingespart werden. Dies ist als großer Erfolg zu bewerten und übertrifft die im Projektantrag geschätzte Einsparungsmenge um 849,655 t.

Gegenüber dem Vergleichsjahr 2019 konnte in den Folgejahren der CO<sub>2</sub>-Ausstoß maßgeblich reduziert werden. 2022 war dieser um 1.385.822,00 t geringer als im Vergleichsjahr. Die Projektpartner sehen diese massiven Einsparungen als vollen Erfolg an.

Die Gießereileitung der Kemptener Eisengießerei ist sich sicher, dass REFFpro Maßnahmen entscheidend zu den CO<sub>2</sub>-Einsparungen beigetragen und darüber hinaus viel Bewusstheit für eine umweltfreundlichere Produktion geschaffen hat. Viele Optimierungs- und Einsparungsmaßnahmen sind auch nach Abschluss des Projektes weiterhin im Einsatz und neue in Vorbereitung (bspw. die Untersuchung der Formstoffaufbereitung). Somit ist also auch in den Folgejahren mit weiteren Einsparungen durch das Projektvorhaben zu rechnen.



**Abb. 19:** CO<sub>2</sub>-Ausstoß zwischen 2019 und 2022

## 4. Verbreitung der Projektergebnisse

In diesem Abschnitt findet sich eine Auflistung der zur Projektlaufzeit präsentierten Tagungsbeiträge sowie der besuchten Fachausschüsse und Arbeitskreise. Weiterhin ist eine Liste mit Publikationen enthalten.

Die Projektpartner haben die angeführten Veranstaltungen nicht nur besucht, sondern die Ergebnisse von REFFpro aktiv präsentiert und diskutiert. So konnte ein Branchentransfer stattfinden.

Auf Einladung der DBU erfolgte so beispielsweise eine Präsentation bei dem Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress (Kongress BW) des Landes Baden-Württemberg und in einer Webinarreihe zur Steigerung der Energieeffizienz durch künstliche Intelligenz (KI). Zusätzlich nahmen die Projektpartner am Fachausschuss Eisenguss und dem Arbeitskreis des Bdguss teil. Bei Letzterem entstand der „BDG Kompass – Gießerei 4.0“, an dem die Projektpartner entscheidend mitgewirkt haben. Weithin zu nennen sind Teilnahmen an Webinarreihen von Bayern Innovativ sowie die Mitentwicklung der „Roadmap zur Vision: 2045 - Zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung“ als Diskussionsgrundlage mit dem Bayerischen Staatsministerium. Vor diesem trugen die Projektpartner die REFFpro-Ergebnisse ebenfalls vor. Als letztes sind Teilnahmen an Branchenveranstaltungen wie der Barbaratagung in München und der GIFA 2023 zu nennen.

Darüber hinaus erfolgten Publikationen in Fachjournalen und sogar der Süddeutschen Zeitung.

### 4.1 Tagungsbeiträge, Fachausschüsse und Arbeitskreise

- Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress (Kongress BW) des Landes Baden-Württemberg. Oktober 2021. Stuttgart.
- Eine Brücke zwischen Wissenschaft und Industrie – Aus der Forschung in die Praxis (Webinarreihe). Bayern Innovativ. Februar 2022. Online. <https://www.bayern-innovativ.de/de/veranstaltung/aus-der-forschung-in-die-praxis#!rueckblick>
- Roadmap zur Vision: 2045 - Zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung (als Diskussionsgrundlage mit Branchenvertretern und dem Bayerischen Staatsministerium). Bayern Innovativ . März 2022. <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/roadmap-vision-2045>
- Steigerung der Energieeffizienz durch künstliche Intelligenz (KI) – Berichte aus der Praxis (Webinarreihe). Deutsche Bundesstiftung Umwelt: #DBUdigital Online-Salon. Juni 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=iVTQI3d1cnk>
- Vorstellung des REFFpro-Projektes vor Studierenden der Hochschule Kempten. Juni 2022.
- Fachausschuss Eisenguss (Teilnahme und Präsentation der Ergebnisse). Oktober 2022.
- Barbaratagung (Teilnahme und Poster-Präsentation des Projektes). Dezember 2022.

- Bdguss Arbeitskreis Gießerei 4.0 (Teilnahme an unterschiedlichen Sitzungen des Bdguss, bei denen das REFFpro-Projekt vorgestellt und bisherige Ergebnisse mit der Fachgemeinschaft besprochen wurden). 2022 und 2023.
- Vorstellung des REFFpro-Projektes im Rahmen eines Workshops (in Anlehnung an die Roadmap zur Vision 2045). Bayern Innovativ und Bayrisches Staatsministerium. Januar 2023.
- Präsentation des Projektes auf der GIFA. 2023.
- Barbaratagung (Teilnahme und Poster-Präsentation des Projektes). Dezember 2023.

## 4.2 Publikationen

- Mit Digitalisierung die Produktion nachhaltiger gestalten (Fachartikel). Eine Brücke zwischen Wissenschaft und Industrie – Aus der Forschung in die Praxis. Bayern Innovativ. Februar 2022.
- Roadmap zur Vision: 2045 - Zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung (als Diskussionsgrundlage mit Branchenvertretern und dem Bayrischen Staatsministerium). Bayern Innovativ . März 2022. <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/roadmap-vision-2045>
- Wie künstliche Intelligenz beim Energiesparen hilft (Interview und Veröffentlichung). Süddeutsche Zeitung. September 2022. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/ki-energie-sparen-deutschland-industrie-1.5650707>
- Vernetzt – Das Innovationsmagazin von Bayern Innovativ 2023-01 (Artikel über das REFFpro Projekt). Januar 2023.
- Giesserei Ausgabe 7 2023 - KI-getriebene Handlungsempfehlungen für Gießprozesse. 2023.
- Kempten iron foundry: We want to take the future into our own hands. Foundry Planet. Mai 2023. <https://www.foundry-planet.com/d/kempten-iron-foundry-we-want-to-take-the-future-into-our-own-hands/>

## 5. Fazit

Das Forschungsprojekt REFFpro hatte zum Ziel, die Umweltverträglichkeit kleiner und mittelständischer Gießereien zu optimieren und einen Beitrag zur Verbesserung der Nachhaltigkeit zu leisten. Aufgrund aktueller politischer und weltwirtschaftlicher Entwicklungen, welche die deutsche Gießereiindustrie stark beeinflussen, erreichte das Projekt großen Zuspruch und auch mediales Interesse.

Durch unterschiedliche Maßnahmen hat das Projektkonsortium energierelevante Prozessdaten identifiziert, zentralisiert und gespeichert. Mithilfe eigens entwickelter Assistenzsysteme, die auf modernen Data Science Ansätzen sowie Algorithmen der Künstlichen Intelligenz basieren, lassen sich die Energieverbräuche von Gussteilen identifizieren und auch analysieren. Die Assistenzsysteme unterstützen die Mitarbeitenden der Kemptener Eisengießerei dabei, prozessoptimale Entscheidungen zur Reduktion von Energie- und Ressourcenverbräuchen zu treffen. Weitere Assistenzsysteme für die Klassifikation und Vorhersage des Schmelztiegelverschleißes sowie für die Optimierung der Belegungsplanung am Formautomaten stellen mit ihren Handlungsempfehlungen weitere Einsparungsmaßnahmen dar.

Aus ökologischer Perspektive konnte die Kemptener Eisengießerei ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen um durchschnittlich 1.138.200,00 kg reduzieren (verglichen zum Jahr 2019). Diese Einsparungen sind (neben weiteren Aspekten) auf die Projektergebnisse zurückzuführen. Die Konsortialpartner bewerten REFFpro daher als beachtlichen und nachhaltigen Erfolg. Die bereitgestellten Projektergebnisse finden mittlerweile Anwendung in der Gießerei und tragen auch künftig zu prozessoptimalen Entscheidungen bei. Auch über die Laufzeit hinaus gibt es weitere Untersuchungen und Projekte, welche die Kemptener Eisengießerei aufgrund der in REFFpro gewonnen Erkenntnisse kontinuierlich und ohne Unterbrechung weiterführen möchte.

## 6. Literaturverzeichnis

[1] Die Gießerei-Industrie in Deutschland, bdguss, <https://www.guss.de/organisation/bdg/branche>, aufgerufen am: 09.01.2024

[2] Energiekosten werden zur Gefahr für den Erhalt der Unternehmen, bdguss, <https://www.guss.de/organisation/presseinformation/ukraine-umfrage>, aufgerufen am: 09.01.2024