Teil 1 Kurzbericht

WIR! – KOI	
Verbundprojekt	DIZPROVI
Teilprojekte	Digitaler Zwilling(DZ) & Virtuelle Instandhaltung (VI)
Zuwendungsgeber	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkenzeichen	03WIR0105B
Projeklaufzeit	01.04.2021 - 30.04.2024
Berichtszeitraum	01.04.2021 - 30.04.2024

Berichtspflichtiger	Lausitz Energie Kraftwerke AG Leagplatz 1 03050 Cottbus
Gesamtprojektleitung	Constanze Tschöpe
Teilprojektleitung	Jan Koltermann Jan1.koltermann@leag.de

Ziele

Ziel des Projektteils “VI” ist die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur vorausschauenden Instandhaltung in Industrieanlagen, um die Restlebensdauer einzelner Komponenten zu ermitteln und die Fahrweise der Anlage so zu optimieren, dass die Restlebensdauer an ein gegebenes Betriebsfenster angepasst wird. Dazu wird ein Prototyp, der Algorithmik und Sensorik beinhaltet, konstruiert und entwickelt und anhand zweier typischer Einsatzfälle (industrielle Mahlanlagen und rotierende Maschinen) sowie dessen Eignung in Langzeitversuchen demonstriert.

Im Rahmen des Projektteils „DZ” sollen Verfahren der Modellerstellung auf Basis von datengetriebenen Modellkomponenten (Maschinelles Lernen) sowie Verfahren des Maschinellen Lernens zur Feineinstellung (Kalibrierung) der (physikalischen) Modellkomponenten entwickelt werden. Die entwickelten Verfahren werden in einem Prototyp implementiert.

Die Ergebnisse der Projektteile „VI“ und „DZ“ werden abschließend zur „Konzeption eines gemeinsamen Prototyps“ genutzt. Durch die Zusammenführung des vollständigen Anlagenmodells mit Schadensmodellen von Anlagenkomponenten ist eine übergreifende Bewertung von Fahrweisen der Anlage für die Schadens-entwicklung der Anlagenkomponenten möglich. Es werden Wege aufgezeigt, wie das Anlagenmodell durch Kostenmodelle erweitert werden kann, um auch externe Einflussfaktoren, wie Verfügbarkeiten von Instandhaltungspersonal, Marktpreise des Anlagenprodukts, Materialverfügbarkeit zu berücksichtigen. Durch die Kombination all dieser Informationen wird eine vollständige Betrachtung der Anlagen-instandhaltung möglich, die Entwicklung von einer zustandsbezogenen über eine vorausschauende Instandhaltung hin zu einer „marktorientierten, vorausschauenden Instandhaltung“.

Die Aufgaben der LEAG im Projekt waren fokussiert auf das praktische Knowhow des Anlagenbetriebs und die Diskussion der praktischen Handhabung von KPIs. Schwerpunkte von LEAG im Teilprojekt „Datenbasierte Optimierung von Industrieprozessen“ waren u. a.

- Einbringen von Betreiber-Knowhow (domänenspezifisches Wissen sowie Prozessverständnis),
- Bereitstellung von realen Daten aus dem Prozessleitsystem des Kraftwerks Box Q,
- Beteiligung am Entwurf von Datenanalysen,
- kritische Diskussion und Validierung der entwickelten Datenanalysen
- Bereitstellen der Infrastruktur für zusätzliche Messinsensoren und deren Datenverarbeitung im Kraftwerk

Ablauf

Die LEAG ist an beiden Teilprojekten mit seinen individuellen Arbeitspaketen und Teilarbeitspaketen beteiligt und arbeitet gemeinsam mit einem oder mehreren Projektpartnern an den Inhalten.Dieser kollaborative Ansatzerforderte eine enge und vertrauenswürdige Zusammenarbeit, bot andererseits durch die unterschiedlichen Herangehensweisen viel Potential. Die Leag als Kraftwerksbetreiber fungierte dabei in erster Linie als Bindeglied zwischen den beiden Teilprojekten und den fachlich unterschiedlichen Akteuren.

Mittels Workshops wurden die Partner mit dem bereitgestellten Datensatz aus dem Kraftwerk Boxberg vertraut gemacht. Dieser ist mit ca. 3TB und 22.000 Zeitreihen aus über 10 Jahren Kraftwerksbetrieb sehr umfangreich und bedarf eines tieferen Verständnisses relevante Messstellen auszuwählen. In Zusammenarbeit mit dem Kraftwerk Boxberg wurden für den Teil VI die Probleme an den Kohlemühlen und Quenscherpumpen näher beschrieben, die nötigen Messstellen identifiziert sowie die zusätzliche messtechnische Instrumentierung geplant und umgesetzt.

Im Bereich DZ wurden mit Workshops das bei der Leag bestehende physikalische Systemmodel des Kraftwerks Boxberg den Partnern vorgestellt und zur weiteren Bearbeitung übergeben. Nach einer umfangreiche Einführung in der Handhabung und Bedienung des komplexen Systemmodells waren die Projektpartner in der Lage, das Modell eigenständig zu auszuführen. In enger Abstimmung mit dem Kraftwerk wurden die Überhitzer und dazugehörigen Einspritzungen als Untersuchungsgegenstand ausgewählt. Daraufhin erfolgte die Auswahl der notwendigen Datenbasis. Um den innovativen Projektansatz zu verfolgen, wurde die Entwicklung einer neuartigen Schnittstelle (SMArtIInt - Simple Modelica Artificial Intelligence Interface Library) vorangetrieben und erfolgreich fertig gestellt.

Verzögerungen beim Projektstart sowie Corona bedingte Einschränkungen bei Beschaffung und Einbau der Messinfrastruktur führten zu einer kostenneutralen Verlängerung um drei Monate bis zum 30.04.2024.

Ergebnisse

Im Teilprojekt DZ ist zunächst eine eine Schnittstelle zur Einbindung von Tensorflow KI-Modellen in die Modelica Umgebung als Grundlage der Entwicklung eines Prototypen erfolgreich umgesetzt worden.. Unter der federführenden Entwicklung von XRG steht zum Abschluss des Projektes die SMArtIInt Modelica Bibliothek zur Verfügung. Aufbauend darauf wurden in Zusammenarbeit mit CombTec GmbH und der Hochschule Zittau Görlitz die Daten Für die Überhitzer und Einspritzungen gesichtet und für die Verarbeitung in KI Modellen vorbereitet. Die entstandenen KI-Modelle wurden im Zusammenspiel mit dem physikalischen Kraftwerksmodel getestet und bewertet. Ein wichtiger Baustein für die Überführung der Ergebnisse in die alltäglichen Arbeit mit hybriden Modellen stellt die Untersuchungen zur Verallgemeinerung der Ergebnisse durch eine Dimensionsanalyse mit dem

Buckingham π-theorem dar. Abschließend liegt der LEAG ein Workflow vor, unter welchen Kriterien ein physikalisches System freigeschnitten werden muss und unter welchen Randbedingungen eine KI-Modellierung sinnvoll in ein bestehendes physikalisches Model eingefügt werden kann.

Im Teilprojekt VI wurde eine Versuchsinfrastruktur im Kraftwerk Box Q an den Kohlemühlen und Quenscherpumpen aufgebaut und mit einem Server für Datenauswertungen verbunden. Außerdem ist dieser mit dem Archivsystem der Prozessleittechnik verbunden. Auf dieser Infrastruktur laufen Analysen, die den Verschleißzustand der Systeme mittels Auswertung der experimentalen Sensoren an den Kohlemühlen und Quenscherpumpen und den Daten aus der Prozessleittechnik berechnen. Besonders bei den Kohlemühlen konnten die 3 Zustände: instandgesetzt, gut und Verschleiß identifiziert werden. Die Infrastruktur steht dem Kraftwerk auch über das Projekt hinaus zur Weiterentwicklung zur Verfügung und wird in einem nachfolgenden Projekt genutzt.

Die Analysen des Piloten haben auch gezeigt, dass die detaillierte Kenntnis der Anlagen und der Tagebautechnologie notwendig ist, um echtes Optimierungspotential gegenüber technischen Zwängen zu identifizieren.

Nutzen

Mit den entwickelten Analysen aus den beiden Teilprojekten ist die Voraussetzung gegeben, die verfahrenstechnische Anlagen systemisch und zeiteffizient mit Hybridmodellen auszustatten und in einer neuen Form der Verschleißsimulation unter Marktbedinungen zu bewerten und zu optimieren. Dieses umfassende Feature ist von den Anlagenbetreibern mehrfach in den Diskussionen auf Fachtagungen der letzten Jahre bei der Vorstellung von Teilsytem-Überwachungssystemen gefordert worden.

Teil 2 Eingehende Darstellung

WIR! – KOI	
Verbundprojekt	DIZPROVI
Teilprojekte	Digitaler Zwilling(DZ) & Virtuelle Instandhaltung (VI)
Zuwendungsgeber	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen	03WIR0105B
Projektlaufzeit	01.04.2021 - 30.04.2024
Berichtszeitraum	01.04.2021 - 30.04.2024

Berichtspflichtiger	Lausitz Energie Kraftwerke AG Leagplatz 1 03050 Cottbus
Gesamtprojektleitung	Constanze Tschöpe
Teilprojektleitung	Jan Koltermann Jan1.koltermann@leag.de

Inhalt

1. Aufgabenstellung 3
2. Projektplanung 4
3. Zahlen und Fakten 6
4. Projektrealisierung 7
5. Verwertung 9
   5.1. Ergebnisse 9
   5.2. Nutzen 13
   5.3. Veröffentlichungen 14
   5.4. Wissenschaftliche Anschluss Fähigkeit 14
   5.5. Wirtschaftliche Anschluss Fähigkeit 14

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektteils “VI” ist die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur vorausschauenden Instandhaltung in Industrieanlagen, um die Restlebensdauer einzelner Komponenten zu ermitteln und die Fahrweise der Anlage so zu optimieren, dass die Restlebensdauer an ein gegebenes Betriebsfenster angepasst wird. Dazu wird ein Prototyp, der Algorithmik und Sensorik beinhaltet, konstruiert und entwickelt und anhand zweier typischer Einsatzfälle (industrielle Mahlanlagen und rotierende Maschinen) dessen Eignung in Langzeitversuchen demonstriert.

Im Rahmen des Projektteils „DZ” sollen Verfahren der Modellerstellung auf Basis von datengetriebenen Modellkomponenten (Maschinelles Lernen) sowie Verfahren des Maschinellen Lernens zur Feineinstellung (Kalibrierung) der (physikalischen) Modellkomponenten entwickelt werden. Die entwickelten Verfahren werden in einem Prototyp implementiert.

Die Ergebnisse der Projektteile „VI“ und „DZ“ werden abschließend zur „Konzeption eines gemeinsamen Prototyps“ genutzt. Durch die Zusammenführung des vollständigen Anlagenmodells mit Schadensmodellen von Anlagenkomponenten ist eine übergreifende Bewertung von Fahrweisen der Anlage für die Schadens-entwicklung der Anlagenkomponenten möglich. Es werden Wege aufgezeigt, wie das Anlagenmodell durch Kostenmodelle erweitert werden kann, um auch externe Einflussfaktoren, wie Verfügbarkeiten von Instandhaltungspersonal, Marktpreise des Anlagenprodukts, Materialverfügbarkeit zu berücksichtigen. Durch die Kombination all dieser Informationen wird eine vollständige Betrachtung der Anlagen-instandhaltung möglich, die Entwicklung von einer zustandsbezogenen über eine vorausschauende Instandhaltung hin zu einer „marktorientierten, vorausschauenden Instandhaltung“.

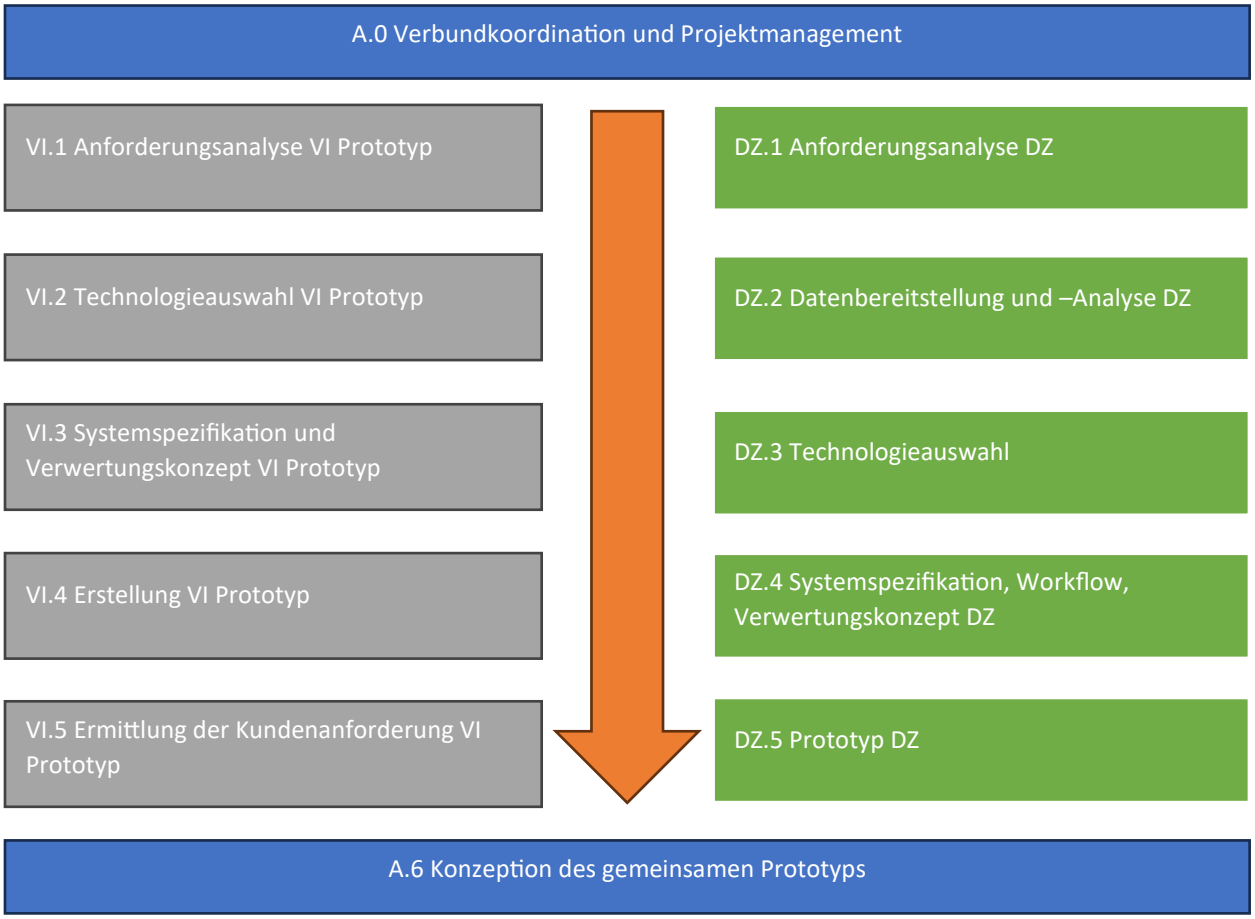
Die Aufgaben der LEAG im Projekt waren fokussiert auf das praktische Knowhow des Anlagenbetriebs und die Diskussion der praktischen Handhabung von KPIs. Schwerpunkte von LEAG im Teilprojekt „Datenbasierte Optimierung von Industrieprozessen“ waren u. a.

- Einbringen von Betreiber-Knowhow,
- Bereitstellung von realen Daten aus dem Prozessleitsystem des Kraftwerks Boxberg BlockQ,
- Beteiligung am Entwurf von Datenanalysen,
- kritische Diskussion und Validierung der entwickelten Datenanalysen
- Bereitstellend er Infrastruktur für zusätzliche Messinfrastruktur und Datenverarbeitung im Kraftwerk

2. Projektplanung

Das Projekt gliedert sich in zwei Teilprojekte mit jeweils 5 logisch aufeinander aufbauenden Arbeitstakten und einen abschließenden Paket zur Zusammenführung der Ergebnisse.

Die Arbeitspakete waren:



Die Arbeitspakete, die ganz oder teilweise durch LEAG bearbeitet wurden, sind nachfolgend dargestellt. Die gesetzten Meilensteine sowie deren Status sind separat in Tabelle zu finden.

Arbeitspakete (AP)	**Kurzbeschreibung**	**Arbeitsstand Ist in [%]**
DZ1.1	Analyse Istzustand: LEAG-Kesselmodell, verfügbare Daten, verfahrenstechnische Analyse, Betriebszustände	100%
VI1.1	Anforderungsanalyse für Systeme zur vorausschauenden Instandhaltung für	100%
DZ1.2	Definition möglicher Testfälle mit Hilfe der verfügbaren Daten: typische Operations-/Fehlerfälle (Betriebsverläufe)	100%
VI1.2	Erstellung Lastenheft und Ableiten eines Verwertungskonzept	100%

VI2.1	Datenaufbereitung aus dem Anlagenarchiv Kraftwerk Box Q	100%
DZ2.2	Sichtung und Prüfung der vorhandenen Betriebs- und Anlagendaten	100%
DZ2.3	Aufbau Datenmodell, Datenanalyse (Aufbereitung der Messstellen und Messwerte, Analyse der Betriebszustände und Betriebsverläufe)	100%
VI2.3	Aufbau der Zusätzlichen Versuchsinfrastruktur im Kraftwerk	100%
VI2.4	Analyse von Schadensfällen	100%
VI3.1	Update und Abstimmung Lastenheft für VI Prototyp (Anforderungen Bedienbarkeit, Alarme, Systemanforderungen, Schnittstellen…)	100%
VI3.2	Gemeinsames Konzept für VI von Industriekomponenten	100%
VI3.4	Verwertungskonzept finalsierung	100%
VI4.2	Integration datengetriebene Modelle in Workflow zur Modellierung Verfahrenstechnischer anlagen	100%
DZ4.3	Spezifikation verallgemeinerter Workflow zur Erstellung von DZ-Modellen	100%
VI4.3	**Planung und Durchführung der Feldversuche**	100%
DZ4.4	Prototyp: Update Lastenheft / Systemspezifikation	100%
DZ4.5	Spezifizierung Verwertungskonzept (Patentierung, Lizensierung, Vermarktung, Veröffentlichungen)	100%
DZ5.2	Anpassungen/Optimierung der Systemspezifikation, der abzudeckenden Testfälle und des Prototyps	100%
DZ5.3	**Demonstration** Workflow von Ist- zu Sollzustand anhand des Prototyps	100%
DZ5.4	**Auswertung: erreichte Ziele / Verallgemeinerungsfähigkeit**	100%
A6	Konzept eines gemeinsamen Prototyps: Welche zusätzlichen Aussagen sind mit der Kombination der in den Projektteilen erarbeiten Prototypen und Methoden möglich?	100%

3. Zahlen und Fakten

	Gesamtvorkalkulation	Gesamtnachkalkulation
Personalkosten	71.367,48 €	**63.435,16 €**
Dienstreisen	2.000 €	**0 €**
Invest	4.500€	**0 €**
Summe unmittelbare Vorhabenkosten	77.867€	**63.435,16 €**
Bundesanteil		**25.374,06 €**
Eigenanteil		**38.061,10 €**

Das Vorhaben beanspruchte wie beantragt ausschließlich Personalkosten. Reisekosten konnten aufgrund der Corona-Pandemie-Situation nicht beansprucht werden. Die geplanten Investitionen wurden nicht in Anspruch genommen, da vorhandene Rechenhardware genutzt werden konnte.
Das Kernteam war 1 Mitarbeiter der Gruppe Kraftwerksanalytik. Weitere Fachspezialisten wurden für spezielle Aufgaben, z.B. für die Einrichtung der Datenübertragung im Prozessleitsystem der LEAG, hinzugezogen.
Die ursprünglich geplante Projektlaufzeit wurde fristgerecht um 12 Monate bis 4/24 kostenneutral verlängert.

4. Projektrealisierung

Die Projektbearbeitung wurde am 01.05.2021 mit internen Vorbereitungen, einschließlich Prüfung und Bewertung des Zuwendungsbescheides begonnen (Projekt-Initiierung).

Am 03.05.2021 fand ein LEAG-internes Startgespräch und am 19.05.2021 das Startgespräch mit allen Projektpartnern statt. Wesentliche Inhalte waren die Vorstellung der Projektpartner und deren Aufgaben bzw. Rollen im Vorhaben. Weitere Punkte waren erste Sondierungen zu Vorkenntnissen, Erfahrungen sowie grundlegende Anforderungen im Rahmen der systemischen Modellierung verfahrenstechnischer Anlagen.

Die notwendigen organisatorischen LEAG-internen Abstimmungen, sowie organisatorischen Abstimmungen mit allen Partnern wurden in regelmäßigen JoureFixe-Gesprächen (beginnend im Juni 2021) geführt. Hierbei wurden insbesondere die Anforderungen und Abstimmungen zum Kooperationsvertrag mit allen Partnern und den LEAG-internen Fachabteilungen (Leittechnik, Informationstechnik, Analytik, Controlling, Personal und Recht) und zu Projektorganisation und Werkzeugen der fachlichen Zusammenarbeit (Projekt-Laufwerke, Kommunikationsverteiler, usw.) abgestimmt. Weitere Bearbeitungsschwerpunkte waren die detaillierte interne Vorbereitung und Abstimmung mit den Fachabteilungen (insbesondere Personal, Controlling und Geschäftsfeldförderung) zur Umsetzung der Anforderungen bzw. Nebenbestimmungen aus dem Zuwendungsbescheid.

Ferner wurden erste Schritte zur Bearbeitung und Synchronisierung der fachlichen Vorarbeiten der Partner mit Bezug zum Projekt, Darstellung der grundlegenden Projektziele und wesentliche Erwartungen aus Sicht jedes Partners diskutiert. Am 11.06.2022 hat die LEAG ein Systemmodell des Kraftwerksblockes BOX Q an die Projektpartner übergeben. Vom 06.07.2022 bis 09.07.2022 fand ein Online Workshop zum Thema Systemmodellierung in Modelica und eine Einführung in das Systemmodell BOX Q statt. Darüber hinaus wurden 3 Gesamtprojekttreffen durchgeführt (19.05.2021;09.12.2021; 15.12.2022).

Auf Grund der Beschränkungen (Covid-19) mussten alle externen Gespräche und Abstimmungen als Online-Termine durchgeführt werden. Für die fachlich-technische als auch organisatorische Initiierung des Gesamt-Vorhabens und besonders für die „Team-Bildung" hat diese Einschränkung zweifelsohne zu Verzögerungen bei einem effektiven Projektstart geführt. Eine für die Planung der im Projekt vorgesehenen Messkampagne im Kraftwerk Boxberg musste mehrfach verschoben werden. Auch in Folge kam es immer wieder zu Einschränkungen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten der LEAG bestand darin, Messdaten den Partnern zur Verfügung zu stellen, gemeinsam auszuwerten und zu diskutieren. Das technische Know-How wurde auch in die Entscheidungsprozesse zur Festlegung der zu untersuchenden Anlagenteile in den Verschiedenen Projekteilen eingebracht. So wurden Im Projektteil Virtuelle Instandhaltung (VI) die Kohlemühlen und die Quentscher Pumpen ausgewählt. Die Entscheidung wurde maßgeblich durch die große Datengrundlage und der Anzahl der verbauten Aggregate im Kraftwerk Boxberg beeinflusst. Für den Projektteil Digitaler Zwilling (DZ) wurde der Superheater 4 ausgewählt. Maßgeblich waren hier die physikalische Komplexität der Modellierung und die gute Datengrundlage. Darüber hinaus sind die Superheater im Abgasstrom direkt mit der Leistungsfahrweise der Kohlemühlen verknüpft.

In der Weiteren Projektbearbeitung war es für den Projektteil VI notwendig, die Kohlemühlen und Quentscherpumpen mit zusätzlichen Sensoren auszurüsten. Die besondere Herausforderung war

hier, eine KRITIS konforme Infrastruktur zur Sammlung und Auswertung der Daten aufzubauen und den jeweiligen Projektpartnern zur Nutzung zu überlassen. Darüber hinaus wurde auch ein Kommunikation Kanal zur Leitechnik etabliert um weitere Prozessdaten den Modellen zur Verfügung zu stellen. Im Prozess der Datenmodellierung und Auswertung hat sich die LEAG aktiv an den Diskussionen beteiligt und zusätzliche Instandhaltungsdaten zu den Aggregaten bereitgestellt.

Im Projektteil DZ hat die LEAG in Zusammenarbeit mit CombTec relevante Daten ausgewählt, hinsichtlich iherer Qualität bewertet und für andere Projektpartner nutzbar gemacht. ein besonderes Augenmerk lag hier auf der Plausibilisierung der Verschmutzung der Wärmeübertragungsflächen im Superheater. In Zusammenarbeit mit XRG wurde die KI Schnittstelle zur Modelica Umgebung diskutiert und getestet. Im Rahmen der Hybriden Modellierung der Verfahrenstechnik hat die Untersuchung des Einflusses der Blockregelung auf die Messwerte und das KI-Model einen zentralen Stellenwert.

5. Verwertung

5.1. Ergebnisse

Digitaler Zwilling

Als Basis der Entwicklungen dient das physikalische Model des Kraftwerks Boxberg Block Q. Dies besteht aus ca. 200.000 Gleichungen (siehe Abbildung 1). Mit den Gleichungen werden die verfahrenstechnischen Komponenten und ein großer Teil der für die Regelung des Kraftwerks notwendige Leittechnik beschrieben.

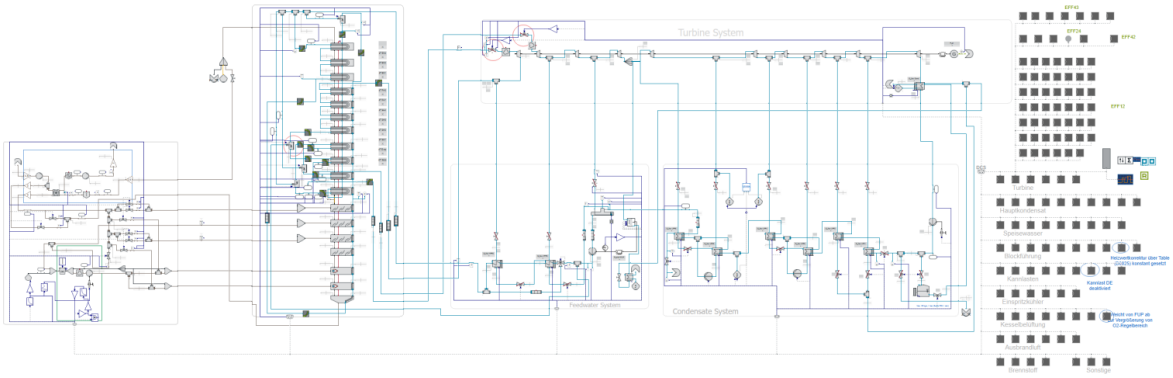


Abbildung 1 Oberste Hiercharchiebene in Modelica vom Modell des Kraftwerkes Boxberg Block Q

Ein physikalisches Systemmodell idealisiert eine reale Anlage, indem es physikalische und empirische Korrelationen verwendet, um das Systemverhalten zu beschreiben. Diese Modelle basieren auf physikalischen Gesetzen und erfordern viel Zeit für Erstellung und Wartung, besonders bei Modifikationen oder Nachkalibrierungen. Datengetriebene Modelle, oft als „KI“-Modelle bezeichnet, bieten einen effizienteren Ansatz, besonders für hochdimensionale Systeme oder schlecht dokumentierte Anlagen. Sie basieren auf großen Datenmengen und identifizieren automatisch Korrelationen. Ihre Flexibilität und Grenzen werden durch die verfügbaren Daten und in den Daten enthaltenen Szenarien bestimmt, was sie anpassungsfähig, aber auch datenabhängig macht. Die Hybride Modellierung kombiniert die Stärken physikalischer und datengetriebener Modelle. Durch die Integration von KI-basierten Komponenten in physikalische Modelle wird die Erstellung und Wartung vereinfacht und beschleunigt. Einzelne Anlageteile können durch KI-Modelle ersetzt werden, die Korrelationen aus Daten extrahieren und ins Modell integrieren, was die Kalibrierung erleichtert und die Genauigkeit erhöht. Der Einsatz von KI-Ersatzmodellen reduziert zudem die Rechenzeit erheblich.

In der hybriden Modellierung gibt es verschiedene Grade der Hybridisierung. Abbildung 2 zeigt die in diesem Projekt umgesetzten Methoden. Ganze Modelle oder Submodelle, wie einzelne Komponenten, können durch Neuronale Netzwerke ersetzt werden. Statt eines gesamten Modells können auch nur Teile, wie Wärmeübertragungsmodelle, ersetzt werden. Zudem kann KI genutzt werden, um die Modellgenauigkeit zu erhöhen, indem konstante Modellparameter oder Korrekturfaktoren dynamisch durch ein Neuronales Netzwerk bestimmt werden.

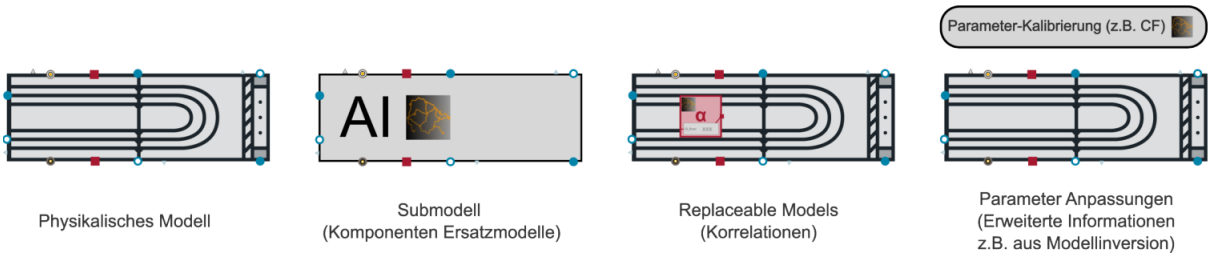


Abbildung 2 Inplementierung verschiedener Hybridisierungsgrade in der Clara Bibliothek am Beispiel eines Superheater

In der Ersten Projektphase wurde mittels Workshop nach geeigneten Modellteilen gesucht, die sich für die Erforschung der Hybriden Modellierung eigenen. Der Schwerpunkt wurde auf den Hochdruck-Überhitzer SH4 (Superheater 4) gelegt. Es wurden ein Blackbox-Modell des Überhitzers (Sub-Model), ein Wärmeübertragungsmodell (Replaceable Model) und der Einfluss des Verschmutzungsgrades (Fouling-Factor) auf die Wärmeübertragung untersucht.

Blackbox-Modell des Überhitzers

In dieser Untersuchung wurde das physikalische Modell des Hochdruck-Überhitzers SH4 durch ein Blackbox KI-Modell ersetzt. Das Feedforward Neuronale Netzwerk hat 6 Eingaben und 4 Ausgaben. Es erhält Massenströme und Drücke der Wasserdampf- und Rauchgasseite, die Eintrittsenthalpie des Wasserdampfes und die Rauchgastemperatur am Eintritt als Eingabewerte. Das KI-Modell sagt die Enthalpiedifferenz des Wasserdampfes, die Temperaturdifferenz des Rauchgases und die Druckdifferenzen voraus.

Für das Modeltraining wurden synthetische Daten mit dem physikalischen Boxberg BlockQModel generiert. Im Blackbox-Modell sind keine Energiebilanzen vorgegeben, sodass diese nicht zwingend erfüllt sein müssen. Der Korrekturwert des Verschmutzungsgrads wird nicht wie gewohnt auf den Wärmestrom angewendet, sondern es werden zwei separate Korrekturfaktoren für die Enthalpiedifferenz und die Temperaturdifferenz verwendet. Der Wärmestrom auf der Wasserdampfseite kann nach einer bestimmten Gleichung berechnet werden. In diesem Modell sind die Wärmeströme der Wasserdampf- und Rauchgasseite nicht gekoppelt, was zu einer Nichteinhaltung der Energiebilanz führen kann. Alternativ könnte ein Wärmestrom bestimmt und damit die Enthalpie- und Temperaturdifferenz des Überhitzers berechnet werden.

Teilmodelle in der hybriden Modellierung

Anstelle des gesamten Wärmetauscher-Modells können auch nur Teilmodelle, wie das physikalische Wärmeübertragungsmodell, durch datengetriebene Modelle ersetzt werden. In diesem Fall wird das physikalische Modell, das auf der Nusselt-Zahl basiert, durch ein KI-Modell ersetzt. Dieses Modell sagt den übertragenen Wärmestrom basierend auf Massenstrom, Enthalpie und Temperatur von Rauchgas und Wasserdampf voraus. Das KI-Modell wurde sowohl im „Closed Loop“ (direkt im SH4-Modell integriert) als auch im „Open Loop“ (ohne Interaktion mit dem Gesamtmodell) getestet. Das KI-Modell wurde mit Messdaten des Überhitzers trainiert, sodass keine nachträgliche Kalibrierung notwendig ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass das KI-Modell im statischen Vollastbereich gut mit dem physikalischen Modell übereinstimmt. Im Teillastbereich ist der vom KI-Modell bestimmte Wärmestrom höher als

der physikalisch berechnete, was auf die Kalibrierung des physikalischen Modells zurückzuführen sein könnte. Der Vergleich von Open Loop und Closed Loop Integration zeigt den Einfluss der Regelung: Bei höherem Wärmestrom wird mehr Kühlwasser eingespritzt, was die Temperatur am Austritt reguliert und den Wärmestrom erhöht.

Fouling-Faktor

Der Fouling-Faktor (CF-Wert) ist ein Korrekturwert für den Verschmutzungsgrad eines Wärmetauschers in der ClaRa-Bibliothek. Dieser symbolisiert die Verschmutzung in der realen Anlage und beeinflusst den Wärmestrom zwischen Rauchgas- und Wasserdampfseite. Der CF-Wert wird durch Modellkalibrierung ermittelt und statisch festgelegt. Diese Untersuchung zielte darauf ab, einen dynamischen Fouling-Faktor zu bestimmen und ein Neuronales Netzwerk mit den generierten dynamischen Daten zu trainieren. Der Verschmutzungsgrad nimmt mit der Zeit zu, was durch den abnehmenden CF-Wert sichtbar wird. Alle 12 Stunden steigt der CF-Wert durch die Aktivierung der Lanzenbläser (Soot Blowing) sprunghaft an, was die Reinigung der Oberflächen und die Verbesserung der Wärmeübertragung zeigt.

Ein stateful-RNN sollte als Basis für den dynamischen Fouling-Faktor verwendet werden, um zeitliche Abhängigkeiten abzubilden. Das Training des Netzwerks war jedoch nicht erfolgreich, da die Vorhersage der Reinigungsintervalle aufgrund unvollständiger Daten und Messungenauigkeiten schwierig war. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Modellinversion zusätzliche Informationen zur Erhöhung der Modellgenauigkeit liefern kann, jedoch vollständige Messdatensätze erforderlich sind.

Virtuelle Instandhaltung

In der Frühen Projektphase wurde im Projektteam in enger Zusammenarbeit mit einem Experten des Kraftwerks Boxberg verschiedene Aggregate bzw. kraftwerkstechnische Teilsysteme evaluiert auf ihre Eignung für die anstehenden Untersuchung geprüft. Besonderes Augenmerk lag auf der Anzahl der Baugruppen, die bestehende Instrumentierung und Verfügbarkeit von Betriebs- und Instandhaltungsdaten. Ein weiteres wichtiges Kriterium war die Übertragbarkeit der gewonnen Erkenntnisse an den Teilsystemen auf andere industrielle Prozesse. Am Ende des Evaluierungsprozesses wurden die Kohlemühlen (8 Stück) und die Quentscherpumpen in der Reha (14 Stück) ausgewählt. Da für alle Aggregate nur stichprobenartige Befundungen mittels Schwingungsmesstechnik vorlagen, wurde entschieden, alle zu betrachtenden Aggregate mit Schwingungsmesstechnik nachzurüsten. All diese Arbeiten wurden besonders durch die strengen Restriktionen in der Corona Pandemie erschwert und kamen zeitweise zum Erliegen.

Aufbau Infrastruktur

In Zusammenarbeit mit ABB wurde ein Instrumentierungskonzept für die Aggregate und eine Netzwerk Infrastruktur mit eigenem Daten/KI-Server entwickelt. Besondere Herausforderung stellt hier die Einbettung eines Insel Netzwerkes innerhalb der bestehenden, unter KRITIS stehenden Infrastruktur dar. Die gesamte prototypische Versuchsanlage wurde von der bestehenden Kraftwerksinfrastruktur getrennt aufgebaut. Zur Übermittlung der Messdaten zwischen Feldgateways und Wartenebenraum wurden zwei Glasfaserstrecken aufgebaut. Die gesamte Versuchs-IT wurde mit dem PDN (Produktionsdatennetz) des Kraftwerkes verbunden um einen sicheren Zugriffsweg zu gewährleisten sowie die ausgewählten Betriebsdaten auf dem Server mit KI-Umgebung verfügbar zu machen. Hierzu wurden die entsprechenden Anträge und Nachweise bei der IT-Sicherheit der LEAG

Kraftwerke eingebracht und die aufgebauten Komponenten nach geltenden Standards entsprechend dokumentiert.

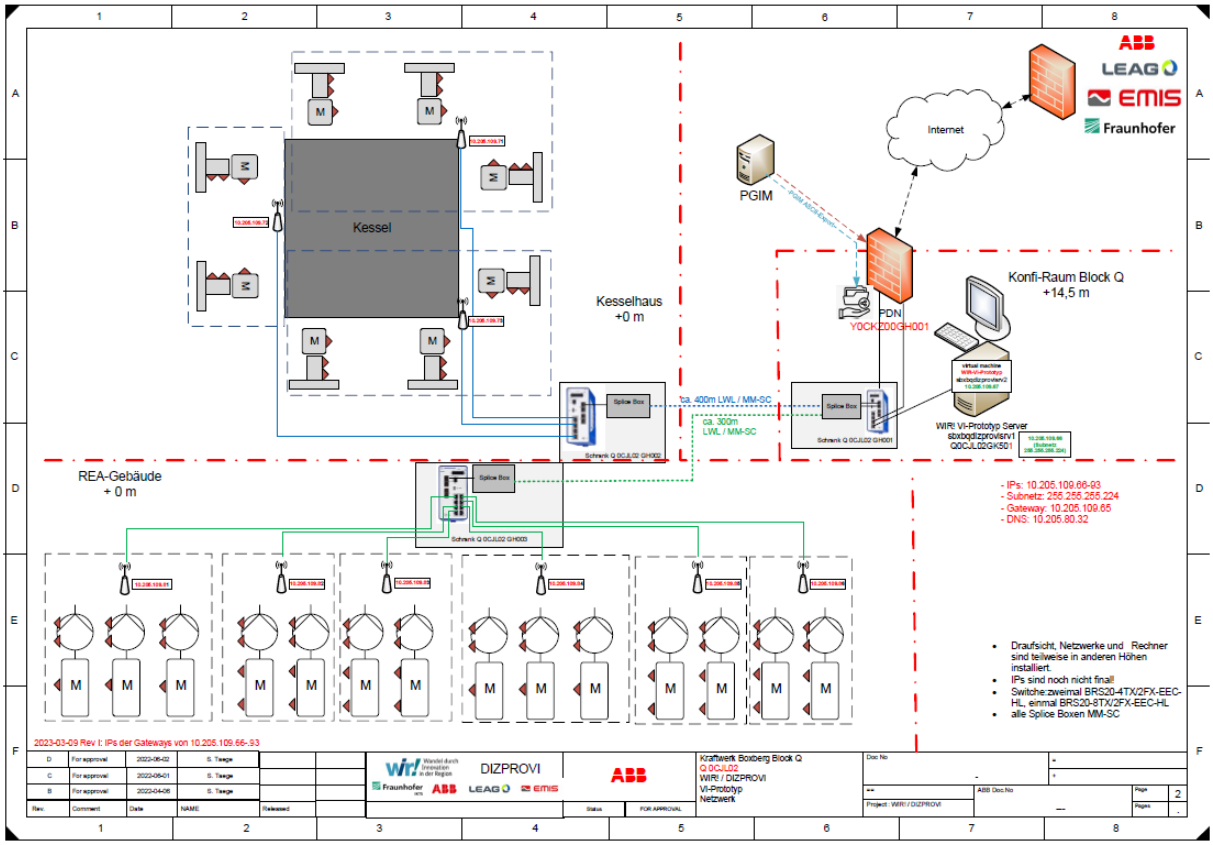


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Infrastruktur

Datenaufbereitung

im Vorfeld der Datenauswahl und Aufbereitung wurden alle Teilnehmer zum KKS System (Kraftwerkskennszeichnungssytem) unterwiesen und im gesamten Verlauf des Projektes hierzu beraten. Dies ist notwendig, da alle Aggregate und Messstellen sowie die daraus entstehenden Messsignale und Ableitungen nach einen festen Schema kodiert werden. Ohne Kenntnisse über dieses System ist es für die Projektpartner nicht möglich, die richtigen Signale auszuwählen. Des Weiteren wurden aus den Systemen der Kraftwerksinstandhaltung Listen über Instandhaltungszyklen und Befunde exportiert und vorsortiert an Frauhnhofer und ABB übergeben. In zusammen Arbeit mit ABB wurden aus dem Langzeitarchiv des Kraftwerks Boberg Block Q Messdaten über 10 Jahre exportiert und den Projektpartner beider Teilprojekte zugänglich gemacht. Während der Projektbearbeitung stellte die LEAG diverse Fachexperten den Projektpartner für Konsultationen zur Verfügung, um Fragen und technische Zusammenhänge in den Daten zu diskutieren. Die Auswahl und Zusammenstellung der relevanten Informationen konnte somit für die Projektpartner erleichtert und beschleunigt werden.

Bewerten der Ergebnisse

Die grundsätzliche Annahme, dass Aggregate über die Zeit und besonders in der frühen Phase nach einer Reparatur verschleißen, konnten die Daten und auch die von der KI berechneten Scores bestätigen (Siehe Abbildung 4).

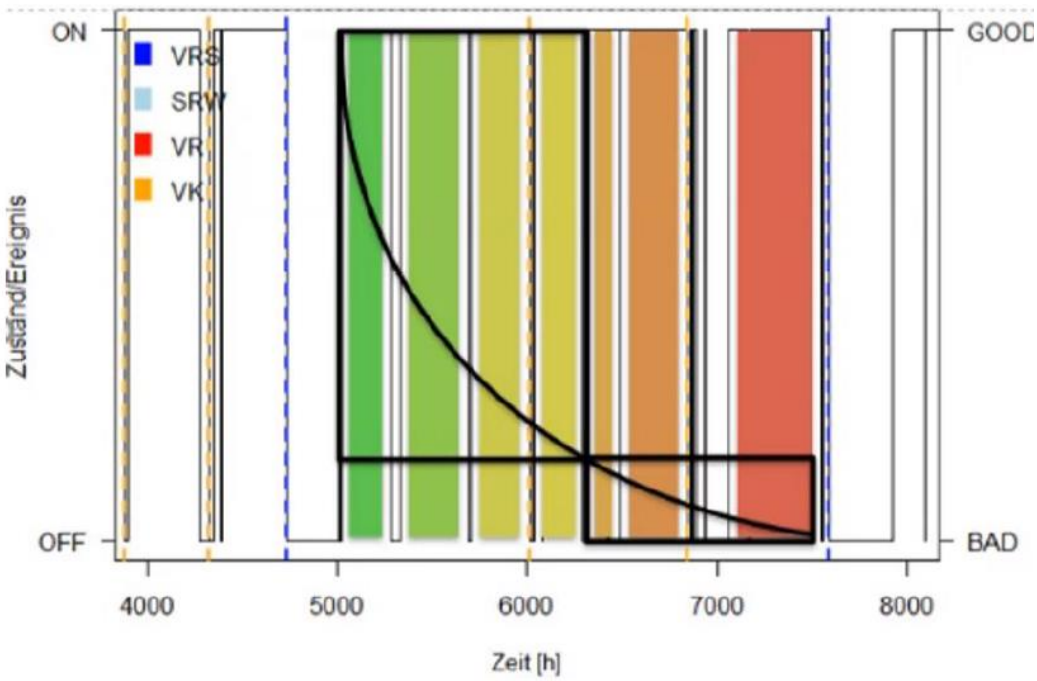


Abbildung 4 Schematische Darstellung Verschleißkurve und Klassifizierung einer Kohlemühle?

Besonders bei der Kohlemühle zeigt sich dieses Verhalten. Nach einer Reparatur sind die Kanten der Prallplatten noch kurzzeitig intakt, werden jedoch durch den hoch abrasiven Kohlestaub schnell erodiert. Im zeitlichen Verlauf äußert sich dies in einer asymptotisch verlaufenden Verschleißkurve. Ist der Verschleiß schon weit fortgeschritten, lässt er sich in der Regel anhand von Indikatoren, z.B. abnehmende Ventilatorwirkung oder auch steigenden Sichtertemperaturen erkennen bzw. messen. Dies alles führt auch zu einer höheren Verweilzeit des Kohlekorns in der Mühle. Die Mühlenregelung versucht das mit einer Erhöhung der Drehzahl wieder auszugleichen. Mittels verschiedener KI-Verfahren wurde versucht diese Zustände in die Kategorien gut, mittel und schlecht einzuteilen. Es zeigt sich, dass die Vorhersage des Zustandes „mittel“ und „schlecht“ durch die Regelung der Kohlemühle „negativ“ beeinflusst wird. Die Zustände wurden in den Beobachtungszeiträumen zu ca. 60% richtig vorher gesagt. In Zukunft soll hier weiter gearbeitet werden um die Bewertungsgenauigkeit zu steigern. Eventuell kann mit experimentellen Fahrweisen nach einem bestimmten Muster(z.B. Drehzahl konstant, Kohlemassenstrom konstant) die Analyse der KI-Tools positiv beeinflusst werden. Allerdings sind hierfür genehmigungspflichtige Versuchsanträge zu stellen, so dass im Projektverlauf darauf verzichtet werden musste.

Zusammenführung der Teilprojekte in einen gemeinsamen Konzept

Zum Abschluss des Projektes wurde ein Konzept erarbeitet, wie die Verschleißprognosen mit der Smartint Schnittstelle in das Kraftwerksmodell implementiert werden können. Für eine spätere Umsetzung sind an der Modellumgebung des Kraftwerks noch Anpassungen in der Modelldarstellung der Mühle vorzunehmen. Eine vollständige Implementierung ist in Zukunft interessant da so unter Annahme verschiedener Einsatzszenarien im Kraftwerk die Verschleißentwicklung prognostiziert und gesteuert werden kann um die Instandhaltung in günstige Zeitfenster zu schieben.

5.2. Nutzen

Aus der Projektarbeit steht dem Projektteam eine Vielzahl von Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt zur Verfügung. Aus dem Projektteil Digitaler Zwilling in Form von einer neuartigen

Schnittstelle von KI-Modellen zu physikalischen Modellen, Workflows zur Datenaufbereitung für die richtige KI-Modellierung in Zusammenspiel mit physikalischen Modellen. Anlagenteile die nur schlecht dokumentiert sind oder Effekte wie Verschleiß oder Verschmutzung waren bisher nur mit sehr großen manuellen Aufwand in physikalischen Modellen umsetzbar. Die Möglichkeit diese mittels datenorientierten KI-Modellen zu erzeugen und über eine Schnittstelle einbinden zu können beschleunigt die Arbeit und steigert die Qualität der Modellierung. Die Möglichkeit der dimensionslosen Modellierung und die sich daraus ergebenen Verallgemeinerung von ähnlichen Bauteilen steigert die Nachhaltigkeit der Modelle, da diese einfacher nachgenutzt werden können und das spezifischer Problem der Modellalterung durch Parameter-Drifts in der AnLage in der physikalischen Modellierung umgangen wird.

Aus dem Teil der digitalen Instandhaltung steht der LEAG im Kraftwerk Boxberg Block Q ein Prototyp mit einer modernen Sensor- und Datensammelinfrastruktur zur Verfügung die den Zustand von 8 Kohlemühlen und 14 Quentscherpumpen online überwachen und den aktuellen Verschleiß KI-unterstützt bestimmen. Nach einer zweijährigen Evaluation sollen die Ergebnisse in die rollierende Instandhaltungsplanung übernommen werden. Eine Weiterentwicklung und Überführung an andere Kraftwerksanlagen wird in Abhängigkeit des entstandenen wirtschaftlichen Nutzens geprüft.

5.3. Veröffentlichungen

Eine Veröffentlichung in Form eines Patents oder einer Erfindung ist nicht erfolgt. Die entwickelten Berechnungsvorschriften für die Analysen beinhalten nicht zwingend neuartige mathematische Modelle, sondern beruhen vielmehr auf bereits bekannten Ansätzen, die auf die im Bergbau spezifischen Geräte und Prozesse adaptiert wurden. Diese Berechnungsvorschriften sind intellektuelles Eigentum der Projektteilnehmer und eine Kombination aus Erfahrung und neusten Ansätzen der Datenwissenschaft, aber aus unserer Sicht nicht direkt schützenswert in Form einer Erfindung oder eines Patents.
Während der Projektlaufzeit wurden Veröffentlichungen in Form von Präsentationen auf Messen/Tagungen durchgeführt, u. a.

Brunnemann, J.; Koltermann, J.J.; Vojacek, A.; Kästner,W.; Hänel, J.; Grizi, R.; Altmann, U.; Förster, T.; Mieck, S.; Maschinelles Lernen zur vereinfachten Erstellung und Wartung Hybrider Digitaler Zwillinge, 54. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2022, Dresden

Das stets positive Feedback war eine große Motivation, das Projekt erfolgreich abzuschließen.

5.4. Wissenschaftliche Anschluss Fähigkeit

Der Teil der Virtuellen Instandhaltung soll in einen im Antragsprozess befindlichen Nachfolge Forschungsprojekt weiterbearbeitet. An diesem Projekt ist die LEAG als assoziierter Partner beteiligt.

5.5. Wirtschaftliche Anschluss Fähigkeit

Ergebnisse aus dem Teil des Digitalen Zwillings haben Eingang in die tägliche Praxis der Abteilung Kraftwerksanalytik gefunden, wo die KI-Modellschnittstelle einen aktiven nutzen in der Modellierung von Kraftwerksprozessen darstellt. Hier besteht ein Austausch mit XRG zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Schnittstelle.

Der Prototyp aus dem Teilprojekt Digitale Instandhaltung befindet sich derzeit in der Erprobung durch die Abteilung Technischer Service Kraftwerke. Hier erfolgt eine Zusammenarbeit mit den laufenden Aktivitäten des Nachfolgeprojekts. Die Planung sieht vor, nach einer 2-jährigen Validierung der Prognoseergebnisse, das System in die rollierende Instandhaltungsplanung zu integrieren. Der Turnus der laufenden Befundungen und Verschleißkontrollen soll damit maßgeblich reduziert werden.