

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis (Schlussbericht)

Bündnis	WIR!-Bündnis	KO-Innovationsplattform	Industrie- automatisierung (KOI)
Verbundprojekt:	Querschnittsprojekt	Intelligente verarbeitung (wissenschaftliche IntelliInfo)	Informations- Begleitforschung,
Förderkennzeichen:	03WIR0107 03WIR0107A 03WIR0107B		
Projektlaufzeit:	01.05.2021 bis 31.01.2024		
Berichtszeitraum:	01.05.2021 bis 31.01.2024		
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Wolff, BTU-CS: KT (Verbund- und Teilprojekt)  Prof. Dr. rer. nat. habil. Petra Hofstedt, BTU-CS: PSCB (Teilprojekt)  Dr.-Ing. Constanze Tschöpe, Fraunhofer IKTS, (Teilprojekt)		



## I. Kurzbericht

### 1. Aufgabenstellung

Im KOI-Projekt „Intelligente Informationsverarbeitung (wissenschaftliche Begleitforschung)“ sollen verschiedene neuartige Verfahren der KI erforscht und entwickelt werden. Gesamtziel des Vorhabens ist die Modellierung, Analyse und Optimierung kontinuierlicher Industrieprozesse durch mathematische Methoden der symbolischen KI. Ausgangspunkte der Industriepartner sind informale (z. B. Mitschriften, nicht standardisierte Dokumente) und formale (z. B. mittels Business Process Models and Notation (BPMN), Modellierungssprachen, wie Modelica und MATLAB/Simulink, oder Advanced Planning and Scheduling-Systeme (APS-Systeme) erzeugte) Spezifikationen von Anlagen und Prozessen.

Daraus ergeben sich die folgenden Zielparameter: Aus den formalen und informalen technischen Spezifikationen und Prozessmodellen erzeugen wir mathematische Repräsentationen. Um in Zukunft eine breite Nutzbarkeit unserer Ergebnisse im Konsortium zu gewährleisten, wird die mathematische Beschreibung so universell wie möglich gehalten. Die Modelle werden auf Implikationen, Invarianten und Konflikte analysiert, vervollständigt und optimiert (AP 3). Messdaten lassen sich mit Methoden der Mustererkennung, der Zeitreihenanalyse und des maschinellen Lernens auswerten. Die obigen Systemmodelle werden mit der Bedeutung von und mit Zusammenhängen zwischen Prozessdaten angereichert (AP 2). Benutzeranfragen und unstrukturierte Log-Dateien werden mit speziellen Methoden der Texttechnologie in semantische Darstellungen übersetzt. Dadurch werden einerseits Zeitreihen generiert, die durch Mustererkennung analysiert werden können, andererseits werden Bedeutungsträger für die Systemmodellierung bereitgestellt (AP 4). Alle Komponenten werden in einem gemeinsamen Technologiedemonstrator vereint (AP 5) und auf die Beispielanwendung angewendet (AP 1).

### 2. Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Projekt wurden die technischen formalen und informellen Spezifikationen in Constraint-Satisfaction-Probleme überführt, eine mathematische Beschreibungsform, die es uns erlaubt, Systemmodelle zu analysieren, zu vervollständigen und zu optimieren. Die Constraint-Programmierung [1] [2] [3] ist ein mächtiges Programmierparadigma, das zum Modellieren und Lösen von komplexen Problemstellungen genutzt wird.

Die Arbeiten von Pereira and Shieber [4] sowie von Shieber [5] haben die Semantik von MWR untersucht. Über die Transformation von Prozessdaten in Bedeutungsträger in der verallgemeinerten Struktur eines doppelten kognitiven Kreises unter Nutzung eines Prozessmodells wurde in [6] berichtet. Außerdem werden die vektor-symbolischen Architekturen (VSA), basierend auf den grundlegenden Arbeiten von Smolensky und Mizraji in der Texttechnologie [7] [8] [9], verwendet.

Vor dem Start des Projektes waren keine vergleichbaren Arbeiten bekannt, die eine solche Kombination von Techniken umsetzten. Auch in der Recherche zur Patentensituation konnten keine Treffer gefunden werden, die dem Vorhaben entgegenstanden. Im industriellen Rahmen finden KI-Methoden zur Anomalieerkennung immer häufiger Einsatz, insbesondere bei der vorausschauenden Instandhaltung [10, 11, 12]. So sollen kritische Systemzustände und Fehler im Anlagenbetrieb erkannt [13, 14, 15, 16] oder vorhergesagt werden [17, 18, 19].

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Gesamtdauer des Projekts betrug 25 Monate. Die Projektlaufzeit war ursprünglich vom 01.05.2021 bis zum 31.05.2023 beantragt. In Absprache mit dem Projektträger kam es zu einem späteren Start des Projektes und einer kostenneutralen Verlängerung, so dass die tatsächliche Laufzeit vom 01.01.2022 bis zum 31.01.2024 war. Für das Jahr 2021 wurden keine Mittel abgerufen, weshalb keine Mehrkosten durch die Verzögerung entstanden.

Das Projekt wurde in 5 Hauptarbeitspakete unterteilt:

- TP 1: Projektübergreifende Arbeiten (alle Partner, AP 1.x)
- TP 2: Mustererkennung (Fraunhofer IKTS, AP 2.x)
- TP 3: Analyse von Struktur- und Prozessmodellen (BTU PSCB, AP 3.x)
- TP 4: Algebraische Semantikverarbeitung (BTU KT, AP 4.x)
- TP 5: Technologiedemonstrator (BTU KT, BTU PSCB, AP 5.x)

In Kapitel II.1 werden diese Hauptarbeitspakete sowie die erzielten Ergebnisse näher beschrieben. In dem in Abbildung 1 dargestellten GANTT-Diagramm ist der geplante Projektverlauf dargestellt, welcher bis auf die nachfolgend aufgeführten Änderungen der ursprünglichen Planung entsprach. Die Darstellung fasst den Arbeitsstand zu den APs konform zu dem genehmigten Antrag auf kostenneutrale Verlängerung (Antrag vom 23.02.23, Genehmigung vom 20.03.2023) und dem Antrag auf eine kostenneutrale Umwidmung von Ausgaben für Beschäftigte (0812) in Ausgaben für Beschäftigungsentgelte (0822) (Antrag vom 26.04.23, Genehmigung vom 02.05.2023) zusammen. Die angestrebten Meilensteine wurden trotz der Änderungen wie geplant erreicht.

#### 4. Erreichte Meilensteine und wesentliche Ergebnisse

Folgende Meilensteine wurden für das Projekt festgelegt und erreicht:

**Meilenstein 1 – Spezifikation, Monat 6, Abgeschlossenes AP: AP 1.1:** Es wurde eine geeignete Beispielanwendung (Schüttgutoptimierung) eines WIR-Partners (ABB) ausgewählt, die sich als geeignet für alle drei Forschungsrichtungen herausstellte. Es entstand eine Definition und Kurzdokumentation der Beispielanwendung (Domänenbeschreibung) sowie der gemeinsamen Daten- und Softwareschnittstellen.

**Meilenstein 2 – Integration & Evaluation I, Monat 21, Abgeschlossene AP: AP 1.1, AP 2.1 - 2.3, AP 3.1 - 3.3, AP 4.1 - 4.3:** Es entstand eine funktionsfähige erste Version des Technologie-demonstrators nach der oben genannten Spezifikation und Dokumentation. Es wurden dabei die Beispielanwendung als CSP erfasst und analysiert sowie eine geeignete semantische Termalgebra und ein passender Document-Meaning-Transducer entwickelt. Zusätzlich wurden Methoden zur Anomaliedetektion und Datenfusion zur operativen Überwachung der Anlagemaschinen implementiert und im Demonstrator integriert.

**Meilenstein 3 – Integration & Evaluation II, Monat 25, Abgeschlossene AP: alle:** Es entstand eine funktionsfähige finale Version des Technologiedemonstrators, der nach der oben genannten Spezifikation entwickelt und in der Folge dokumentiert wurde. Es wurden dabei alle in den Teilprojekten entwickelten Verfahren integriert und sowohl miteinander als auch mit der Beispielanwendung verknüpft. Die Leistungsfähigkeit des Technologiedemonstrators wurde anhand von verschiedenen mit der Firma ABB erstellten Testfällen evaluiert.

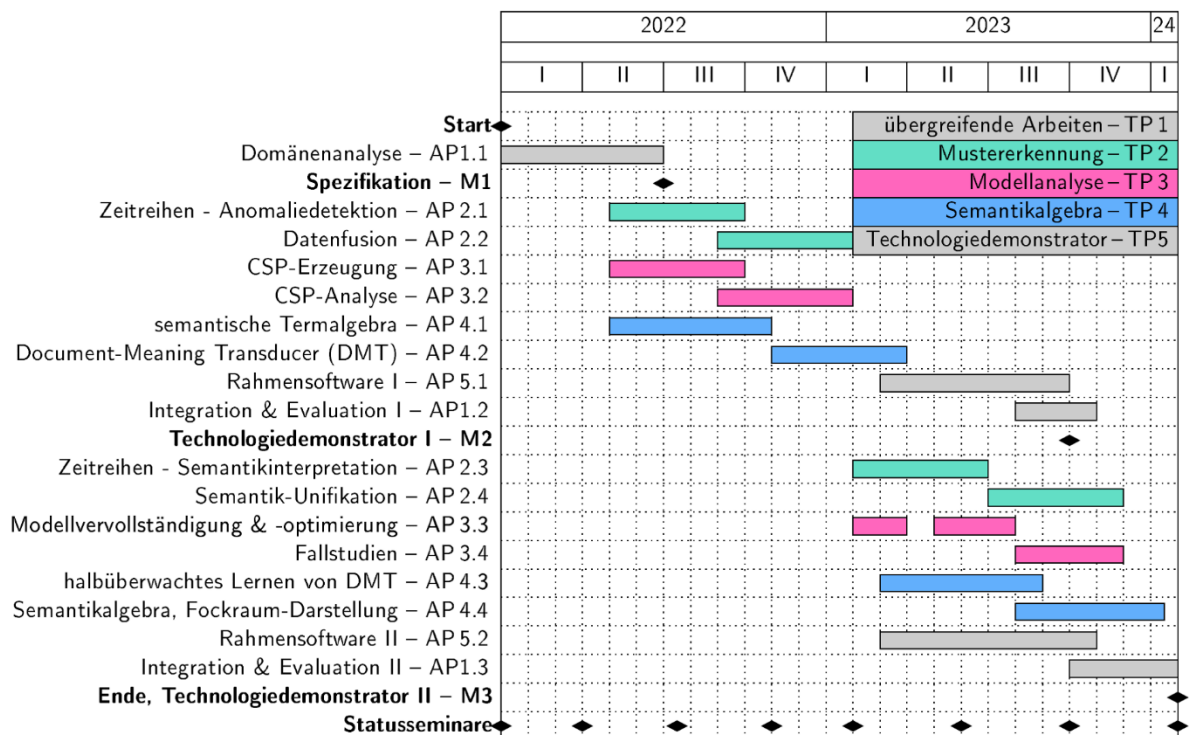


Abbildung 1: Gantt-Diagramm des Projektablaufs.



## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die verwendeten Mittel wurden zum größten Teil für Personalkosten sowie zu einem kleinen Anteil für Reisekosten und Sachkosten eingesetzt. Eine genauere Aufschlüsselung ist in Abschnitt II.2 zu finden. Im Folgenden werden die geleisteten Arbeiten nach Teilprojekten gegliedert beschrieben.

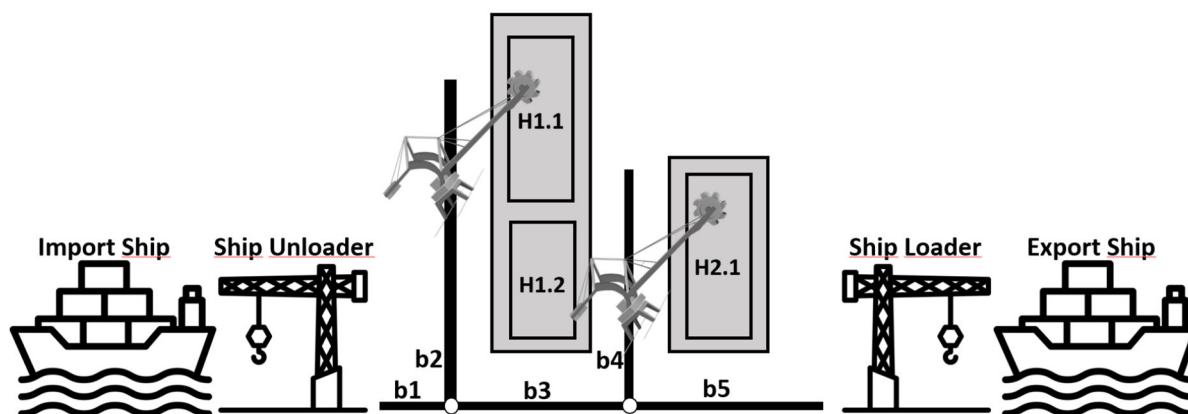
#### ■ TP 1: Projektübergreifende Arbeiten

**Ziel:** Ziel des TP1 waren die Sicherstellung des Arbeits- und Projektablaufs, das Finden einer konkreten Beispielanwendung eines Industriepartners aus dem KOI-Bündnis (AP 1.1) sowie die Integration der Teilarbeitsergebnisse in den Technologiedemonstrator und die Evaluation der geschaffenen Forschungsergebnisse (AP 1.2 und 1.3). Die zu findende Beispielanwendung musste dabei sorgfältig ausgewählt und in enger Abstimmung mit den KOI-Partnern eingehend analysiert sowie genau spezifiziert werden. Die zu wählende Anwendung musste einerseits allen Verbundpartnern ausreichende Möglichkeiten zur Forschung (siehe Kapitel I und Teilvorhabensbeschreibungen) bieten, durfte aber andererseits nicht zu komplex sein, so dass die unterschiedlichen Arbeitsergebnisse leicht verknüpft und auf andere Anwendungen abstrahiert werden können. Wesentliches Auswahlkriterium war die Verfügbarkeit von Daten (Modelle, Sensorsignale, Textdokumente etc.). Weiterhin mussten Datenschnittstellen, besonders das Datenformat der gemeinsam verwendeten Merkmal-Werte-Relationen, und Software- und Datenschnittstellen zwischen der Forschungssoftware aller Partner und dem gemeinsamen Technologiedemonstrator (TP 5 sowie AP 1.2 und 1.3) spezifiziert und dokumentiert werden.

**Ergebnisse:** Zu Beginn des Projektes wurde eine geeignete Beispielanwendung bei den KOI-Bündnispartnern und lokalen KMUs ermittelt, welche den Anforderungen aller Projektpartner entspricht. Es fanden dazu unter anderem Treffen mit LEAG, ABB, Siemens Energy, KIT, Lubosch, EMIS und IBAR statt. Mit dem Schüttgutoptimierungsproblem der Firma ABB wurde eine geeignete Beispielanwendung gefunden. Außerdem wurde zwischen allen beteiligten Partnern und ABB ein Kooperationsvertrag aufgesetzt und unterschrieben.

Das Schüttgutoptimierungsproblem ist ein logistikbezogenes Optimierungsproblem. Bei diesem wird ein Hafen mit Lagerplätzen betrachtet. Die Plätze bestehen aus mehreren Lagerbereichen, in die Schüttgüter importiert, gemischt und mittels Schiffe exportiert werden. Abbildung 2 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Problems. Große Import-Schiffe liefern Schüttgüter wie Erze oder Kohle in verschiedenen Qualitäten. Das Material muss in einer vorgegebenen Reihenfolge, einem Entladeplan, entnommen und über Förderbänder zu den Lagerbereichen des Hafens (Stockpiles) transportiert werden. Material unterschiedlicher Qualitäten kann gemischt werden (engl.: Blending), um bestimmte Zielkriterien bei der Materialqualität zu erreichen. Das Schüttgut kann auch zwischen verschiedenen

Lagerbereichen transportiert werden. Schließlich wird das Material in der erforderlichen Exportqualität über die Förderbänder zu den Export-Schiffen gebracht, die typischerweise viel kleiner als die Import-Schiffe sind. Entlang der Lagerplätze sind Maschinen verfügbar, die das Material vom Band auf den Lagerbereich schieben (Stacker), das Material von dort auf das Band aufnehmen (Reclaimer) oder beides tun können (Stacker/Reclaimer).



**Abbildung 2:** Ein einfaches Beispiel des Schüttgutoptimierungsproblems von ABB.

Im Anschluss an die Anwendungsfindung wurde das Beispielszenario unter anderem mit einem digitalen Zwilling eingehend analysiert und genau spezifiziert. Dieser Zwilling bot zusätzlich die Möglichkeit, das Verhalten der Anlage zu simulieren. Es wurden gemeinsame Merkmal-Werte-Relationen (ein Weltzustand, der alle wesentlichen Komponenten der Beispielanwendung abstrahiert umfasst) entwickelt, dokumentiert und für die spätere Nutzung im Technoliedemonstrator vorbereitet.

Wir haben das Schüttgutoptimierungsproblem abstrahiert, indem wir uns auf die Hauptinformationen über Lagerplätze konzentrieren, die die Stockpiles sowie die Import- und Exportschiffe umfassen. Jeder Lagerplatz hat eine maximale Kapazität in Tonnen, die er speichern kann. Außerdem werden Variablen benötigt, die die Masse und das Material beschreiben, das an jedem Lagerplatz gelagert wird. Daher repräsentieren wir einen Lagerplatz durch ein Tupel (Material, Masse), wobei Material eine ganzzahlige Zuordnung zum entsprechenden Material oder 0 ist, wenn kein Material vorhanden ist, und Masse die Masse des Materials in Tonnen darstellt. Daraus resultierende entstandene Weltzustände (Merkmal-Werte-Relationen) für die Haldenanlage aus Abbildung 2 sind in Tabelle 1 und 2 dargestellt. Hierbei ist in Tabelle 1 der Übergang eines Weltzustandes  $q_i$  zu einem Weltzustand  $q_{i+1}$  mittels paralleler Ausführung einer Import- und einer Exportaktion und in Tabelle 2 der Übergang von Weltzustand  $q_{i+1}$  in  $q_{i+2}$  mittels einer Blending-Operation dargestellt.

	Mat <sub>1</sub> <sup>I</sup>	Mass <sub>1</sub> <sup>I</sup>	Mat <sub>2</sub> <sup>I</sup>	Mass <sub>2</sub> <sup>I</sup>	Mat <sub>1</sub> <sup>H</sup>	Mass <sub>1</sub> <sup>H</sup>	...	Mat <sub>3</sub> <sup>H</sup>	Mass <sub>3</sub> <sup>H</sup>	Mat <sub>1</sub> <sup>E</sup>	Mass <sub>1</sub> <sup>E</sup>	...
State $q_i$	Iron <sub>q1</sub>	15	Iron <sub>q2</sub>	15	0	0	...	Iron <sub>q3</sub>	15	0	0	...
Import	Iron <sub>q1</sub>	-15	0	0	Iron <sub>q1</sub>	+15	...	0	0	0	0	...
Transport	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
Export	0	0	0	0	0	0	...	Iron <sub>q3</sub>	-10	Iron <sub>q3</sub>	+10	...
State $q_{i+1}$	0	0	Iron <sub>q2</sub>	15	Iron <sub>q1</sub>	15	...	Iron <sub>q3</sub>	5	Iron <sub>q3</sub>	10	...

**Tabelle 1:** Der Übergang eines Weltzustandes  $q_i$  in einen andern  $q_{i+1}$  durch eine Import- und eine Export-Aktion.

	...	Mat <sub>2</sub> <sup>I</sup>	Mass <sub>2</sub> <sup>I</sup>	Mat <sub>1</sub> <sup>H</sup>	Mass <sub>1</sub> <sup>H</sup>	...	Mat <sub>3</sub> <sup>H</sup>	Mass <sub>3</sub> <sup>H</sup>	Mat <sub>1</sub> <sup>E</sup>	Mass <sub>1</sub> <sup>E</sup>	Mat <sub>2</sub> <sup>E</sup>	Mass <sub>2</sub> <sup>E</sup>
State $q_{i+1}$	...	Iron <sub>q2</sub>	15	Iron <sub>q1</sub>	15	...	Iron <sub>q3</sub>	5	Iron <sub>q3</sub>	10	0	0
Blending	...	Iron <sub>q2</sub>	-5	Iron <sub>q1</sub>	-5	...	0	0	0	0	Iron <sub>q3</sub>	+10
State $q_{i+2}$	...	Iron <sub>q2</sub>	10	Iron <sub>q1</sub>	10	...	Iron <sub>q3</sub>	5	Iron <sub>q3</sub>	10	Iron <sub>q3</sub>	10

**Tabelle 2:** Der Übergang eines Weltzustandes  $q_{i+1}$  in einen andern  $q_{i+2}$  durch eine Blending-Aktion.

Der als Rahmensoftware entwickelte Technoliedemonstrator wurde mit den entwickelten KI-Verfahren und der Beispielanwendung verknüpft. Abschließend wurden zwei verschiedene Versuchsreihen aufgebaut, um den Technoliedemonstrator zu testen. Eine Testreihe bestand aus 50 zufälligen Haldenkonfigurationen, inklusive Import- und Exportsequenz. Bei dieser wurden im ersten Schritt zufällige, aber in Absprache mit ABB realistische Startzustände generiert, für die dann in der Folge die Planung durchgeführt werden sollte. Zu allen Problemstellungen konnte erfolgreich eine Planung gefunden werden, welche in der Simulation des digitalen Zwillinges überprüft und deren Ergebnisse von ABB validiert werden konnten. Die zweite Testreihe umfasste einen Endlostest. Bei diesem wurde einmalig eine Startkonfiguration generiert und im Anschluss daran so lange geplant, bis entweder das Importschiff oder das Exportschiff vollständig abgearbeitet wurde. Sobald eines dieser Schiffe abgearbeitet wurde, wurde ein neues Schiff generiert und der Planungsprozess fortgeführt. Somit konnte der Planungsprozess theoretisch unendlich durchgeführt werden. Bei der Simulation traten dabei allerdings Engpässe auf, die mit Hilfe der Anomaliedetektion und Mustererkennung ermittelt, aufgearbeitet und an ABB kommuniziert wurden. Dadurch konnte die Planung z. B. durch Anpassen der Bewertungsfunktion noch nachträglich verbessert werden.

## ■ TP 2: Mustererkennung

**Ziel:** Das Ziel des Teilvorhabens „Mustererkennung“ war die Entwicklung von Methoden und Algorithmen, um Datenbestände von großen und komplexen Anlagen auszuwerten. Die Analyse sollte für die Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung verwendbar sein. Dies sollte

insbesondere bei Daten eingesetzt werden, die aufgrund ihres Formats, ihres Umfangs, ihrer Unvollständigkeit, ihrer geringen Informationsdichte oder des großen Analyseaufwands bisher nicht ausgewertet werden. Dafür sollten Datenbestände (vor allem Zeitreihen) in semantische Repräsentationen überführt werden, um sie mittels der semantischen Operationen aus dem Teilprojekt der BTU-KT zielgerichtet auszuwerten und zu analysieren.

**Ergebnisse:** Das Beispielszenario erforderte die Analyse von nicht automatisch überwachten Masseströmen, um die Planung des CSP-Modells zu überwachen und auf mögliche Defizite hinzuweisen. Zu Beginn wurden mögliche Methoden zur Anomaliedetektion untersucht (AP 2.1). Die Anwendung statistischer Datenmodelle (Mittelwerte, Schwellwerte etc.) zur Bestimmung von Anomalien war hierbei die vielversprechendste Herangehensweise aufgrund ihrer leicht verständlichen Struktur und ihrer schnellen Konvergenz trotz der geringen Menge an Bestandsdaten. Insbesondere Letzteres führte dazu, dass vom Einsatz neuronaler Netze vorerst abgesehen wurde, auch wenn die Möglichkeit der Repräsentation komplexer Zusammenhänge dadurch eingeschränkt wurde. Jedoch wurde bei der Implementierung der Algorithmen darauf geachtet, dass die Analyse modular strukturiert ist und somit Elemente leicht austauschbar sind. Die Auswertungsmethoden wurden im AP 2.2 so erweitert, dass Daten mehrerer Sensoren fusioniert werden konnten. Es ließen sich dadurch zusätzliche Anomalien erkennen, welche in den Differenzen der eingehenden und ausgehenden Masseströme bemerkbar waren (bspw. aufgrund einer falsch hinterlegten Anlagenkonfiguration oder dem Defekt einer Bandwaage). In den AP 2.3 und AP 2.4 wurden anschließend die Daten und erkannten Anomalien in die Merkmal-Werte-Relationen aus den Arbeiten der BTU überführt und um weitere zusätzliche semantische Informationen ergänzt, welche passende Beschreibungen der Anomalien lieferte. Es konnte stets eines der folgenden Labels zugewiesen werden: „machine movement“ (Bewegung der Maschine), „idle“ (Leerlauf), „idle (warning)“ (ungewollter Leerlauf während des Betriebs), „start/end“ (Start/Ende der Operation), „strange mass flow“ (unbekannte Störung des Massestroms), „strange mass difference“ (Unterschied bei eingehendem und ausgehendem Massestrom).

### ■ TP 3: Analyse von Struktur- und Prozessmodellen

**Ziel:** Im AP 3 sollten aus den formalen und informalen technischen Spezifikationen und Prozessmodellen mathematische Repräsentationen der Beispielanwendung erzeugt werden. Um in Zukunft eine breite Nutzbarkeit unserer Ergebnisse im Konsortium zu gewährleisten, wird die mathematische Beschreibung so universell wie möglich gehalten. Die Modelle werden auf Implikationen, Invarianten und Konflikte analysiert, vervollständigt und optimiert. Es entsteht lauffähige Software zur Modellierung technischer Systeme und zur Modellanalyse (AP 3.1 und 3.2) sowie zur Konfiguration und Optimierung der Modelle (AP 3.3). Ihre Funktion wird durch Fallstudien (AP 3.4) anhand einer Beispielanwendung (M 1) nachgewiesen und dokumentiert.

**Ergebnisse:** Die bereitgestellte Beispielanwendung (Hafen zur Schüttgutoptimierung von ABB, inklusive digitalem Zwilling der Anlage) wurde analysiert und zunächst in ein

mathematisches und im Anschluss daran in ein globales Constraint-Modell überführt, das die gesamte Beispielanwendung abdeckt (AP 3.1 und AP 3.2). Im Zuge der Anwendung der Profiling- und Analyseverfahren (AP 3.3) wurde festgestellt, dass ein solches Constraint-Modell, welches die gesamte Planung in einem CSP durchführt, nicht schnell genug ist, um den Bedarfen der Industriepartner gerecht zu werden. Aus diesem Grund wurde der Ansatz überarbeitet und verfeinert, so dass nun für ein festes Zeitintervall (z. B. eine Stunde) jeweils ein CSP erstellt und für sich global gelöst wird. Das Ergebnis dieser Teilplanung wird dann als Ausgangspunkt für die nächste Teilplanung verwendet. In der Evaluation (TP 3.4 und 1.3) konnte gezeigt werden, dass somit Planungszeiträume beliebiger Größe berechnet werden können, wobei die Qualität der Lösung den Anforderungen der Industriepartner gerecht wird.

#### ■ TP 4: Algebraische Semantikverarbeitung

**Ziel:** Benutzeranfragen und unstrukturierte Log-Dateien werden mit speziellen Methoden der Texttechnologie in semantische Darstellungen übersetzt. Dadurch werden Bedeutungsträger für die Systemmodellierung bereitgestellt. Es entsteht eine lauffähige Softwareimplementation einer Termalgebra aus Merkmal-Werte-Relationen (MWR) sowie eines Document-Meaning-Transducers basierend auf dieser Termalgebra (AP 4.2 und 4.3). Die Funktion der Software wird anhand von Daten aus der Beispielanwendung (M1) nachgewiesen und dokumentiert (AP 4.4).

**Ergebnisse:** Ein allgemeines Datenmodell für die Beispielanwendung wurde auf einer abstrakten Ebene basierend auf Merkmal-Werte-Relationen (MWR-Termalgebra) entwickelt. Darüber hinaus wurde ein abstrakter Document-Meaning-Transducer (DMT) für die Beispielanwendung erstellt, der die Verarbeitung von Texteingaben sowie die Extraktion und Weiterverarbeitung der darin enthaltenen Informationen als Attribut-Werte-Paare ermöglicht. Eine eindeutige semantische Darstellung für DMTs wurde ebenfalls entwickelt und mittels der Planungsdaten aus TP 3 evaluiert. Auf Grundlage dieser Darstellungen wurde eine mögliche Implementierung realisiert, die auf einer neuromorphen Rechnerarchitektur ausgeführt werden kann.

#### ■ TP 5: Technologiedemonstrator

**Ziel:** Ziel ist die Erstellung einer Rahmensoftware für den gemeinsamen Technologiedemonstrator. Die Rahmensoftware soll die in den TP 2, 3 und 4 verwendete bzw. entwickelte Forschungssoftware über die in TP 1 definierten Schnittstellen steuern und eine übergreifende Nutzerinteraktion mit dieser erlauben. Die Rahmensoftware hat weiterhin die Aufgabe, Daten (Merkmal-Werte-Relationen, Signale, Texte usw.) zwischen den Softwarekomponenten der Partner zu transportieren und diese zu visualisieren.

**Ergebnisse:** Während der Arbeiten am Projekt ist ein Technologiedemonstrator entstanden, der alle entwickelten KI-Verfahren vereint. In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt des Technologiedemonstrators zu sehen. Mit diesem ist es möglich, Anlagedaten

(Haldenkonfiguration, Transportbandnetzwerke, Geräte) und Anlagekonfigurationen (Ladezustände der Schiffe und Halden, nachfolgend auch als Weltzustand bezeichnet) zu laden und zu visualisieren. Auf der linken Seite ist in der Abbildung eine Haldenanlage mit fünf Halden, die jeweils aus vier Bereichen bestehen, zu sehen. Jede Halde hat eine maximale Kapazität, einen aktuellen Füllstand und eine als Zahlenwert kodierte Angabe des Materialtyps. In der rechten Seite ganz oben sind die verbleibenden Import- und Exportsequenzen zu sehen. Hier wurden die ersten beiden Luken des Importschiffes bereits geleert (Angabe jeweils 0, 0) und es können in dieser Reihenfolge noch 16.000 t Erz vom Typ 1 und 20.000 t Erz vom Typ 2 aus dem Importschiff entladen werden. Auf der anderen Seite sollten zweimal 24.000 t Erz vom Typ 3 exportiert werden, was in diesem Fall schon erfüllt ist (Initial Export = Final Export).

Das Programm ermöglicht es, die Constraint-basierte Planung (TP 3) schrittweise darzustellen. Über den Button „Next“ in der Zeile des StepCounters wird jeweils der nächste Planungsschritt angezeigt. Gleichzeitig dient dies als Schnittstelle zu den anderen beiden Teilprojekten. So wird das Textfeld rechts in der Abbildung durch Drücken des Buttons „Next“ (in der Zeile Step Counter) mit Daten aus der algebraischen Semantikverarbeitung (TP 4) und der Mustererkennung (TP 2) gefüllt.

Die Analyse aus dem Teilprojekt 2 „Mustererkennung“ wurde durch eine textuelle Zusammenfassung in den Technologiedemonstrator überführt. Dabei werden die Anomalie-MWR je Maschine in ihrer Anzahl (insgesamt und je nach Typ aufgeschlüsselt) dargestellt. Zusätzlich werden die Leerlaufzeiten angezeigt. Ein solcher Bericht wurde für jede einzelne Operation ausgegeben, die zum im Demonstrator ausgewählten Zeitraum stattfand.



## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden sind die einzelnen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aufgelistet:

Partner	Position	Ausgaben geplant bis 31.01.2024 (€)	Ausgaben tatsächlich am 31.01.2024 (€)
BTU	Personalkosten	302.700	274.102,25
BTU	Projektpauschale	60.500	54.820,45
BTU	Sonstiges	0	0
IKTS	Personalkosten	179.200	180.529,57
IKTS	Sonstiges	1.600	14,24

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ziel der wissenschaftlichen Begleitforschung im KOI-Bündnis war die Erforschung neuartiger Technologien zur symbolischen KI und deren experimentelle Erprobung an praktischen Beispielen von Industriepartnern aus dem KOI-Bündnis.

Dies wurde erreicht, indem ausgehend von den genannten Bedarfen der Industriepartner begleitende Grundlagenforschung betrieben und in ein Anwendungsbeispiel (Schüttgutoptimierung an Hafenanlagen) der Bündnispartner integriert wurde. Hinsichtlich der kognitiven Informationsverarbeitung müssen Prozessanalyse-, -prädiktions- und -steuersysteme in der Lage sein, Gesamtsituationen zu erfassen und im Sinne eines „virtuellen Kollegen“ mit dem Bediener zu kommunizieren.

Darüber hinaus wurden Verfahren zur Mustererkennung und der Analyse von ungenutzten Daten entwickelt. Es wurden hierzu verschiedene neuartige Verfahren der KI erforscht und entwickelt. Dazu zählen neue Technologien zur Umwandlung von Expertenwissen (per Sprachdialog und Textaufzeichnung) in relationale Datenbanken bzw. Constraints. Weiterhin wurden Constraint-basierte Methoden zur automatischen Modellanalyse, -vervollständigung und Optimierung und intelligenten Fusion mehrerer Sensor- und Prozessdaten mit dem Ziel einer prädiktiven Prozesssteuerung und -wartung erforscht und in die Beispielanwendung integriert.

Die entwickelten KI-Verfahren verfügen über den Vorteil, dass sie symbolischer Natur sind. Symbolische Verfahren besitzen im Gegensatz zu numerischen Methoden, wie z. B. neuronalen Netzen, eine klar definierte Semantik, was sie transparent, interpretierbar und für den Anwender auch hinsichtlich möglicher Störungen oder Ausfälle erklärbar macht.

Anhand des Schüttgutoptimierungsproblems von ABB konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Verfahren in Kombination genutzt werden können, um bestehende

Industrieprozesse zu automatisieren und zu optimieren, ohne an Nachvollziehbarkeit zu verlieren.

#### 4. Voraussichtlicher Nutzen der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Gegenüber dem ursprünglichen Verwertungsplan aus dem Projektantrag gab es keine signifikanten Abweichungen. Die im Projekt erzielten Ergebnisse (die einzelnen und kombinierten KI-Verfahren für das Anwendungsbeispiel der Schüttgutoptimierung an Häfen und die Integration dieser in den gemeinsamen Technologiedemonstrator) sollen sowohl direkt in der Umsetzung des anschließenden „Intelligente Informationsverarbeitung II“-Projekts einfließen als auch Grundlage für weitere Anwendungen der Verbundpartner und lokaler Unternehmen sein. Die entworfenen Technologien können unter anderem von ABB verwendet werden, um die Planung von Haldenanlagen zu erleichtern und zu verbessern. Dadurch können sowohl Ressourcen (Energie und Zeit) eingespart als auch Verschleiß an Menschen und Geräten reduziert werden. Die entwickelten Datenrepräsentationen unterstützen die Verwendung neuartiger neuromorpher Rechnerarchitekturen, was ein zusätzliches Energieeinsparungspotential bietet.

#### 5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Bearbeitung des Projekts konnte nicht registriert werden, dass von anderer Stelle eine bessere Lösung für die Beispielanwendung (Optimierung von Schüttgutlogistik an Hafenanlagen) entwickelt werden konnte. Vergleichbare Problemstellungen, die zum Beispiel das Stockyard Planning Problem (SPP) behandeln [20], vernachlässigen in der Regel das konkrete Streckennetz und die vorhandenen Geräte. So geht es bei diesen nur darum zu entscheiden, welche Materialien in welcher Menge wohin transportiert werden müssen. Es wird dabei aber oftmals missachtet, wie der Materialfluss über die vorhandenen Geräte parallel gesteuert werden soll. Dass die konkrete Problemstellung weiterhin relevant ist, zeigt sich allein daran, dass mittlerweile auch weitere Unternehmen wie die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH und die Lausitz Energie Bergbau AG Interesse an dem in diesem Projekt entwickelten System und an den Ergebnissen bekundet haben und im „IntelliInfo 2“-Projekt als Partner gewonnen werden konnten.

In den einzelnen drei Forschungsrichtungen, die von den verschiedenen Projektpartnern zur Lösung der Aufgabenstellung verfolgt wurden, sind während der Bearbeitung des Projektes von anderen Wissenschaftlern außerhalb des Projektes neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen worden. Diese haben aber keinen direkten oder indirekten Einfluss auf die Ergebnisse und Entwicklungen des Projekts, so dass die von uns im Projekt neu gewonnenen Erkenntnisse als höchst innovativ und nutzbringend angesehen werden können. Dementsprechend konnten durch unsere Ergebnisse neue Erkenntnisse [21] gewonnen werden, die unter anderem bei der internationalen Konferenz für „Database and Expert

Systems Applications“-DEXA 2023 in Malaysia vorgestellt wurden. Zwei weitere wissenschaftliche Publikationen sind derzeit noch in der Vorbereitung und sollen ebenfalls zeitnah veröffentlicht werden.

#### 6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Projektergebnisse wurden auf bei der internationalen Konferenz für „Database and Expert Systems Applications“-DEXA 2023 [21] in Malaysia vorgestellt und veröffentlicht. Derzeit werden zwei weitere Publikationen vorbereitet. Ziel ist die Einreichung bei der International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO) 2024 oder einer vergleichbaren Konferenz, um eine möglichst große fachlich kompetente Zuhörerschaft zu erreichen.

Über die wissenschaftlichen Veröffentlichungen hinaus wurden bei den jährlich stattfindenden KOI-Bündnistagungen die jeweils aktuellen Fortschritte und Ergebnisse des Projektes präsentiert.

## Literaturverzeichnis

- [1] F. Rossi, P. v. Beek und T. Walsh, *Handbook of Constraint Programming*, Bd. 2, F. Rossi, P. van Beek und T. Walsh, Hrsg., Elsevier, 2006.
- [2] P. Hofstedt und S. Löffler, „Constraints,“ in *Handbuch der Künstlichen Intelligenz, 6. Auflage*, G. Görz, U. Schmid und T. Braun, Hrsg., De Gruyter, 2020, p. 713–754.
- [3] P. Hofstedt und A. Wolf, *Einführung in die Constraint-Programmierung - Grundlagen, Methoden, Sprachen, Anwendungen*, Springer, 2007.
- [4] F. C. N. Pereira und S. M. Shieber, „The Semantics of Grammar Formalisms Seen As Computer Languages,“ in *Proceedings of the 10th International Conference on Computational Linguistics and 22Nd Annual Meeting on Association for Computational Linguistics*, Stroudsburg, 1984.
- [5] S. M. Shieber, „The Design of a Computer Language for Linguistic Information,“ in *10th International Conference on Computational Linguistics and 22nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of COLING '84, July 2-6, 1984, Stanford University, California, USA, 1984*.
- [6] M. Huber, G. Wirsching, R. Römer, P. b. Graben, I. Schmitt und M. Wolff, „Quantum-inspired Cognitive Agents. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, submitted 31 Mar. 2022.“.
- [7] P. Smolensky, „Tensor product variable binding and the representation of symbolic structures in connectionist systems,“ *Artificial Intell.*, vol. 46, no. 1-2, pp. 159-216, 1990.“.
- [8] P. Smolensky, „Harmony in Linguistic Cognition,“ in *Cogn. Sci.* 30, 779-801, <https://dblp.org/rec/journals/cogsci/Smolensky06.bib>, 2006.
- [9] E. Mizraji, „Vector Logic: A Natural Algebraic Representation of the Fundamental,“ in *J. Log. Comput.* 18, 97-121., 2008.
- [10] R. Piich, „Determination of preventive maintenance time for milling assemblies used in coal mills,“ *Journal of Machine Construction and Maintenance-Problemy Eksploatacji*, 2017.
- [11] R. Caponetto, F. Rizzo, L. Russotti und M. Xibilia, „Deep learning algorithm for predictive maintenance of rotating machines through the analysis of the orbits shape of the rotor shaft,“ *International Conference on Smart Innovation, Ergonomics and Applied Human Factors*, pp. 245-250, 2019.
- [12] G. A. Susto, A. Schirru, S. Pampuri, S. McLoone und A. Beghi, „Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach,“ *IEEE transactions on industrial informatics*, Bd. 11, Nr. 3, pp. 812-820, 2014.
- [13] F. Al Thobiani, T. Tinga and et.al., "An approach to fault diagnosis of rotating machinery using the second-order statistical features of thermal images and simplified fuzzy ARTMAP," *Engineering*, vol. 9, no. 6, p. 524, 2017.
- [14] P. F. Odgaard und B. Mataji, „Fault detection in coal mills used in power plants,“ *IFAC Proceedings Volumes*, Bd. 39, p. 177–182, 2006.
- [15] A. Moosavian, H. Ahmadi, A. Tabatabaeefar und M. Khazaei, „Comparison of two classifiers; K-nearest neighbor and artificial neural network, for fault diagnosis on a main engine journal-bearing,“ *Shock and Vibration*, Bd. 20, p. 263–272, 2013.
- [16] Y. Wei, Y. Li, M. Xu und W. Huang, „A Review of Early Fault Diagnosis Approaches and Their Applications in Rotating Machinery,“ *Entropy*, Bd. 21, p. 409, 2019.

- [17] O. Fink, E. Zio and U. Weidmann, "Fuzzy classification with restricted boltzman machines and echo-state networks for predicting potential railway door system failures," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 64, no. 3, pp. 861-868, 2015.
- [18] S. Hong, Z. Zhou, E. Zio and W. Wang, "An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings," *Digital Signal Processing*, vol. 35, pp. 117-123, 2014.
- [19] R. Liu, B. Yang, E. Zio and X. Chen, "Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 108, pp. 33-47, 2018.
- [20] Xinyu Tang, Frederik Schulte, „Stockyard Storage Space Allocation in Dry Bulk Terminals Considering Mist Cannons and Energy Expenditure,“ in [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43612-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43612-3_9).
- [21] Sven Löffler, Ilja Becker, Petra Hofstedt, „A Finite-Domain Constraint-Based Approach on the Stockyard Planning Problem.,“ in *Database and Expert Systems Applications - 34th International Conference - DEXA 2023, Penang, Malaysia, August 28-30, 2023.*, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39821-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39821-6_10).