# Kurzbericht zum Abschluss

## von Verbundprojekt

**» Kausale Graphen als lernendes Assistenzsystem für automatisiertes Fehlermanagement in der Produktion «**

## KausaLAssist

in der Fördermaßnahme

**Lernende Produktionstechnik – Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion (ProLern)**
im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“
des BMBF

**Projektlaufzeit:** **01.06.2021 - 31.12.2024**

**Projektkonsortium**

| Abkürzung | Verbundpartner | Bezeichnung des Teilprojekts |
|---|---|---|
| IWU | Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU (Organisatorische Projektleitung) | KI- und Expertengestütztes Erlernen kausaler Graphen und automatisierte, erklärbare Ursachenanalyse |
| SMB | Schuster Maschinenbau GmbH | KI-befähigte Werkzeugmaschine mit integriertem Fehlermanagement |
| KAMAX | KAMAX Tools & Equipment GmbH & Co. KG | Automatisiertes Fehlermanagement in komplexer Kleinserienfertigung |
| IP | Industrie-Partner GmbH Coswig | Störungsdetektion, Ursachenanalyse und eigenständige Fehlerbehebung für eine autonome Roboterzelle |
| ISG | ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH (Projektkoordinator Industrie) | Virtuelle Trainings- und Testumgebung für KI-Algorithmen in der Betriebsphase |
| SEITEC | SEITEC GmbH | Dezentraler digitaler Zwilling und KI-Befähigung von Produktionsmaschinen |
| queo | queo GmbH | Software für ganzheitliches, KI-unterstütztes Fehlermanagement in der Produktion |
| InfAI | Institut für Angewandte Informatik e.V. | Kausale Störungsdetektion und KI-gestützte Lösungsstrategieentwicklung |

InfAI hat Bericht vorab einzeln eingereicht.
Daher im Gesamtbericht nicht enthalten.

Disclaimer zu gendergerechter Sprache:

*Das, innerhalb der Vorhabensbeschreibung verwendete, generische Maskulinum bezieht sich immer zugleich auf weibliche, männliche und diverse Personen. Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsspezifische Schreibweise sowie auf Mehrfachbezeichnungen verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.*

**Inhaltsverzeichnis**

I. Motivation und Bedarf des Gesamtprojekts ..... 3
II. Aufgabenstellung und wissenschaftlich, technischer Stand bei Projektstart..... 3
II.1 Gesamtziele des Verbundprojektes..... 3
II.2 Zusammenfassung des wissenschaftlich-technischen Stand vor Projektbeginn..... 4
II.3 Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischen Stand der Teilprojekte ..... 4
III. Ablauf des Vorhabens..... 5
IV. Ergebnisse..... 6
IV.1 Wesentliche Ergebnisse des Verbundprojektes ..... 6
IV.2 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte ..... 8

# I. Motivation und Bedarf des Gesamtprojekts

| | |
|---|---|
| **Motivation** | Der Bedarf, individuelle Produkte schnell und kostengünstig zu fertigen, forciert eine starke Vernetzung der Fertigung. Für moderne Produktionssysteme wird umfassendes Anlagenwissen und effizientes Fehlermanagement benötigt, um kontinuierlichen Betrieb sicherzustellen. |
| **Defizit** | Aktuelle Fehlermanagement-Ansätze beruhen auf maschinenspezifischen Lösungen und hochqualifizierten Fachkräften. Der steigende Bedarf an Spezialisten in vollautomatisierten Produktionslandschaften hemmt eine autonome Produktion. Mit steigender Anlagenkomplexität genügt dieses personenbezogene Fehlermanagement nicht mehr.<br><br>Es fehlte eine praxisorientierte Lösung, die Wirkzusammenhänge von Maschinen anhand von Anlagendaten automatisiert abbildet, Störungen detektiert und effektive Lösungsvorschläge präsentiert. |
| **Heraus-forderung** | Die Herausforderung liegt in der Kombination von Expertenwissen mit KI zu einem digitalen Maschinenverständnis, das als transparente Wissensbasis dient und nachvollziehbare Handlungsanweisungen ermöglicht. Diese Nachvollziehbarkeit ist die Basis für adaptive Assistenzsysteme und selbstlernendes Fehlermanagement. |
| **Perspektiven** | Ein selbstlernendes, digitales Maschinenverständnis bietet Potential für KI-Systeme in der Produktion. Intelligente Algorithmen können Fehlermanagement automatisieren, Stillstandszeiten reduzieren und Fertigungsrobustheit steigern. Das generierte Wissen kann für Anlaufzeitenverkürzung, Extrapolation von Fertigungsparametern und präventive Instandhaltung genutzt werden. |

# II. Aufgabenstellung und wissenschaftlich, technischer Stand bei Projektstart

## II.1 Gesamtziele des Verbundprojektes

Die intuitive Kollaboration von Mensch und KI zur Ermöglichung eines effektiven Fehlermanagements für komplexe Produktionssysteme stand im Fokus des Verbundvorhabens KausaLAssist. Ziel war die Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems, welches den Maschinenbediener bei Störungsdetektion, Ursachenermittlung und Fehlerbehebung unterstützt und Stillstandszeiten reduziert.

Kernergebnisse des Projekts umfassten:

**KI-Methoden:** Entwicklung von KI-Softwarekomponenten zur maschinennahen, graphbasierten Extraktion von Kausalität aus Anlagendaten, Störungsdetektion und -klassifikation, Ursachenanalyse sowie (teil-)automatischer Fehlerbehebung.

**KI-Befähigung:** Schaffung virtueller Trainingsumgebungen für KI-Methoden in der Produktionstechnik sowie eines "KI-Ready" digitalen Zwillings zur Verknüpfung heterogener Datenquellen. Die Erprobung von On-Premise Lösungen sollte das kontinuierliche maschinennahe Selbstlernen von KI-Modellen ermöglichen.

**KI-Anwendung:** Entwicklung einer intuitiven Benutzeroberfläche zur Erleichterung der Interaktion zwischen Maschinenbedienern und KI-Methoden mit einer gemeinsamen Wissensbasis für das Fehlermanagement. Die Kombination von Expertenwissen mit KI-Erkenntnissen für adaptives Fehlermanagement wurde in drei Anwendungsfällen erprobt.

Die Besonderheit des interdisziplinären Forschungsansatzes besteht im Aufbau eines digitalen Maschinenverständnisses, welches kontinuierlich durch KI-Erkenntnisse und Feedback der Anwender ausgebaut wird und als erklärbares KI-System eine transparente Entscheidungsgrundlage für die Fehlerbehebung bietet.

### II.2 Zusammenfassung des wissenschaftlich-technischen Stand vor Projektbeginn

Das Fehlermanagement in der Produktion war vor KausaLAssist stark von manuellen, personengebundenen Methoden geprägt. Die etablierten Ansätze – FMEA, FTA und Ishikawa-Diagramm – basierten primär auf dem Fach- und Erfahrungswissen der Anwender. Diese Methoden erwiesen sich zwar als effektiv für die proaktive Störungsvermeidung, waren jedoch zeit- und kostenintensiv und zeigten deutliche Limitierungen bei der Integration von Maschinensensordaten.

Vorausgegangene Forschungsprojekte wie FAMOS (2007-2010), BigPro (2014-2017) und KoMMDia (2017-2020) zielten bereits auf digitale Unterstützung des Störungsmanagements ab. BigPro kombinierte Maschinendaten mit Sprach- und Stimmungserkennung, während KoMMDia ein lernendes Assistenzsystem für Verpackungsmaschinen erforschte. Trotz dieser Ansätze fehlten effektive Lösungen für neue Fehlersituationen und automatisierte Ursachenanalyse. Zudem waren die Systeme hauptsächlich auf Großserienfertigung ausgerichtet.

Ein vielversprechender, aber kaum genutzter Ansatz lag in der Verwendung kausaler Graphen nach Judea Pearl. Diese Methode ermöglicht die Darstellung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Form von gerichteten azyklischen Graphen (DAGs). Während erfolgreiche Anwendungen bereits in Wirtschaftswissenschaften, Bioinformatik und Klimaforschung existierten, gab es in der Produktionstechnik nur vereinzelte Beispiele.

Diese Ausgangssituation offenbarte ein bedeutendes Innovationspotenzial für einen KI-Ansatz, der ein fehlerunabhängiges Maschinenverständnis in Form kausaler Graphen aus Anlagendaten erlernt. Das "Causal Discovery" stellte einen vielversprechenden Forschungsansatz dar, der sich von bisherigen Lösungen abhob und Potenzial für effektive Lösungsstrategien auch bei unbekannten Fehlersituationen bot.

### II.3 Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischen Stand der Teilprojekte

IWU Entwicklung von KI-Prototypen zum Erlernen kausaler Graphen und zur automatisierten, erklärbaren Ursachenanalyse. Kernaspekte sind die Integration von Domänenwissen, die kontinuierliche Aktualisierung der Graphen durch Anlagendaten sowie die Steigerung der Transparenz von KI-Empfehlungen. Durch gerichtete, anwenderfreundliche Graphen wird eine intuitive Interpretation ermöglicht. Wesentlich ist auch die Extrapolation der Erkenntnisse auf neue Fehlersituationen und die Automatisierung des Fehlermanagements. Ziele: Verkürzung der Entwicklungszeit von Assistenzsystemen um 30% durch formalisiertes, automatisch erweiterbares Expertenwissen sowie 50% schnellere Fehlerursachen-Identifikation.

SMB Entwicklung eines neuen Verfahrens zur vereinfachten Fehlerbehebung durch integrierte, visuell unterstützte Anleitungen und (teil-)automatisierte Prozesse auf KI-Basis. Bereitstellung eines Prototyps zur maschinennahen Datenakquise für ML und KI-gestützte Störungsreaktion. Das System soll transparent entscheiden, kontinuierlich lernen und Wissen nachhaltig verfügbar machen, was bisher nur durch Domänenexperten möglich war. Fokus auf wirtschaftlich vertretbarem Aufwand bei Implementierung, Training und Betrieb in Maschinennetzwerken. Wirtschaftsziele: 10% Steigerung verkaufter Anlagen und 15% höhere Dienstleistungsumsätze durch schnellere Ersatzteilbestellungen.

KAMAX KAMAX stellt die Anforderung an ein Null-Fehler System. Im Vordergrund steht die Entwicklung eines digitalen Assistenzsystems für effektive Fehlerbehebung in komplexer Kleinserienfertigung sowie die Verbesserung der Maschinen- und Verfahrenszuverlässigkeit. Fertigungsmitarbeiter sollen durch fehlerbezogene

Wissensbereitstellung Fehler in weniger als 50% der bisherigen Zeit beheben können. Ein selbstlernender Algorithmus soll Fehler erfassen und klassifizieren. Dies ermöglicht eine systeminterne Fehlerbehebung, die die Anlagen-Downtime reduziert und die Prozessfähigkeit des Gesamtsystems um mindestens 10% verbessert.

IP Weiterentwicklung des "Robo Operator" Systems zur Automatisierung von CNC-Werkzeugmaschinen ohne vorhandene Automatisierungsschnittstellen. Das System nutzt Bildverarbeitung zur Bedienung von Maschinenelementen wie ein menschlicher Bediener. Hauptinnovation: Vollautonomer Betrieb über acht aufeinanderfolgende Schichten durch Kombination von Wissensgraphen und Machine Learning für selbstständige Störungserkennung und -behebung. Das System soll sich automatisch auf neue Situationen adaptieren, mit 20% Steigerung der Prozesssicherheit. Wirtschaftsziel: Vermietung von 33 zusätzlichen Systemen in drei Jahren (1,5 Mio € Jahresumsatz).

ISG Überführung von Simulationsmodellen aus der virtuellen Inbetriebnahme (Software ISG-virtuos) in die Betriebsphase für Fehleranalyse und Prozessoptimierung mit lernenden Algorithmen. Kopplung zwischen digitalem Zwilling und KI zur Bereitstellung realitätsnaher Fehler- und Testdatensätze. Prozessoptimierung auf Basis verschiedener Maschinen- und Anlagenkonfigurationen. Technische Zielparameter: Automatische Modellparametrisierung in <1 Woche, Einbindung im Steuerungstakt (<5ms) sowie automatische Generierung von Fehlerszenarien über KI-Schnittstellen.

SEITEC Entwicklung von Cloud/Edge-basierten, Hardware-agnostischen Software-Modulen für standardisierte maschinennahe Datenakquisition, Aufbereitung und Speicherung sowie eines dezentralen digitalen Zwillings. Integration von Standards (OPC-UA) und Schnittstellen zu Siemens- und Beckhoff-Steuerungen. Federführende Definition und Integration von Schnittstellen zu allen KI- und Software-Partnern. Know-how-Transfer zur Integration von KI-Methoden in Edge-Anwendungen mit dem Ziel der Produktportfolio-Erweiterung. Entwicklung von Modulen für konfigurierbare Schnittstellen und Anwendungen zur Analyse kausaler Zusammenhänge vor Störereignissen.

queo Bereitstellung eines Assistenzsystems zur Darstellung und Interpretation KI-erzeugter Ergebnisse. Verbesserte Mensch-Maschinen-Interaktion zur direkten Optimierung von Analyseergebnissen, die wiederum zur KI-Verbesserung genutzt werden. Der Maschinenbediener wird befähigt, ohne Softwarewechsel situationsgerechte Entscheidungen zu treffen, die vom System an die Maschine übertragen werden. Erstellung von Templates für übertragbare, skalierbare Anwendungsteile zur beschleunigten Anpassung für neue Kunden.

## III. Ablauf des Vorhabens

Die Projektlaufzeit wurde auf 36 Monate geplant und kostenneutral auf 42 Monate verlängert. Sieben Arbeitspakete (AP) mit fünf konkreten Meilensteinen strukturieren das Projekt. Jedes AP enthält eine detaillierte Tabelle mit Teilaufgaben, Spezifikationen, Zeitangaben und projektpartnerspezifischen Aufwänden. Die quartalsweise Gesamtübersicht der AP leitet die nachfolgenden Einzeltabellen ein.

| | Arbeitspakete | 1. PJ | | | | 2. PJ | | | | 3. PJ | | | | 4. PJ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *2021* | | *2022* | | | | *2023* | | | | *2024* | | | |
| | | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| **1** | Anforderungsanalyse und Konzeption | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| **2** | KI-Befähigung der Maschinen und Entwicklung der Schnittstellen | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| **3** | Entwicklung der Softwarearchitektur und virtuellen KI-Trainingsumgebung | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| **4** | Lösungsstrategieent-wicklung und Fehlermanagement in Anwendungsfällen | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| **5** | Weiterentwicklung des Systems, kontinuierlicher Betrieb und Automatisierung | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| **6** | Verwertungs- und Funktionsoptimierung & Projektabschluss | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ |
| **7** | Projektmanagement & projektübergreifende Zusammenarbeit | | | | | | | | | | | | | | |
| | **Meilensteine** | | ◆*1* | | ◆*2* | | | | ◆*3* | | | | ◆*4* | | ◆*5* |

# IV. Ergebnisse

## IV.1 Wesentliche Ergebnisse des Verbundprojektes

Im Rahmen des KausaLAssist Projekts ist ein in der Praxis validierter Softwarestack für intelligentes Fehlermanagement entstanden. Die Lösung erhöht die Leistung und Verfügbarkeit von Produktionsstätten, indem Störungen schnell erkannt, darüber informiert und geeignete Lösungen präsentiert werden. Als wesentliches Ergebnis des Verbundprojekts, wird der Stack nachfolgend kurz vorgestellt, dessen Funktionsweise am Beispiel illustriert und abschließend eine Analyse zu dessen Effektivität vorgestellt. Im Zweiten Teil des Kapitels werden die wesentlichen Ergebnisse der jeweiligen Teilprojekte dargestellt.

### IV.1.1 KausaLAssist Stack – Wesentliche Ergebnisse und Funktionsweise

Die wesentlichen Ergebnisse des Stacks können in die folgenden drei Bereiche gefasst werden, welche in Abbildung 1 vereinfacht dargestellt sind:

1. **Datenerfassung & -anbindung:** OPC UA Infrastruktur von SEITEC, Error-DB von InfAI
2. **Datenverarbeitung & -analyse:** Kausale Lernmethoden & Analysen (Causal-AI) vom IWU und Smart Data Analyzer von SEITEC
3. **Nutzerinteraktion:** Werker-App (Live-Daten) & Dashboard (Datenpflege) von queo

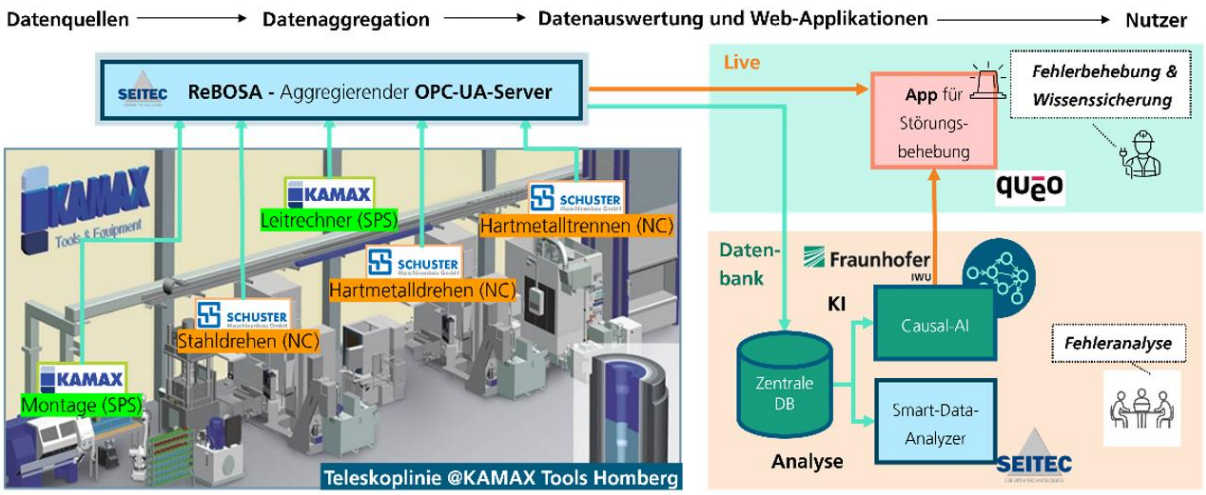


Abbildung 1: KausaLAssist erfasst alle Meldungen und Prozessdaten der Maschinen. Für die Werker relevante Meldungen, werden priorisiert gemeinsam mit Lösungsvorschlägen in einer App präsentiert. Die archivierten Daten werden von KI (Causal-AI) und der Produktionsleitung ausgewertet, neue Lösungen hinterlegt und eine kontinuierliche Verbesserung erreicht

Basis für KausaLAssist bildet die Erfassung aller Meldungen und Prozessdaten der Maschine. Die Meldungen werden kategorisiert („Benötigen Werker" vs. „Kein Werker benötigt") und priorisiert. Die für die Werker relevanten und priorisierten Meldungen sind über eine Web-Applikation (Abbildung 2) zugänglich. Für die Störungsmeldungen sind Lösungsvorschläge hinterlegt und weitere Informationen können vom Werker in Bild und Ton hinzugefügt werden.

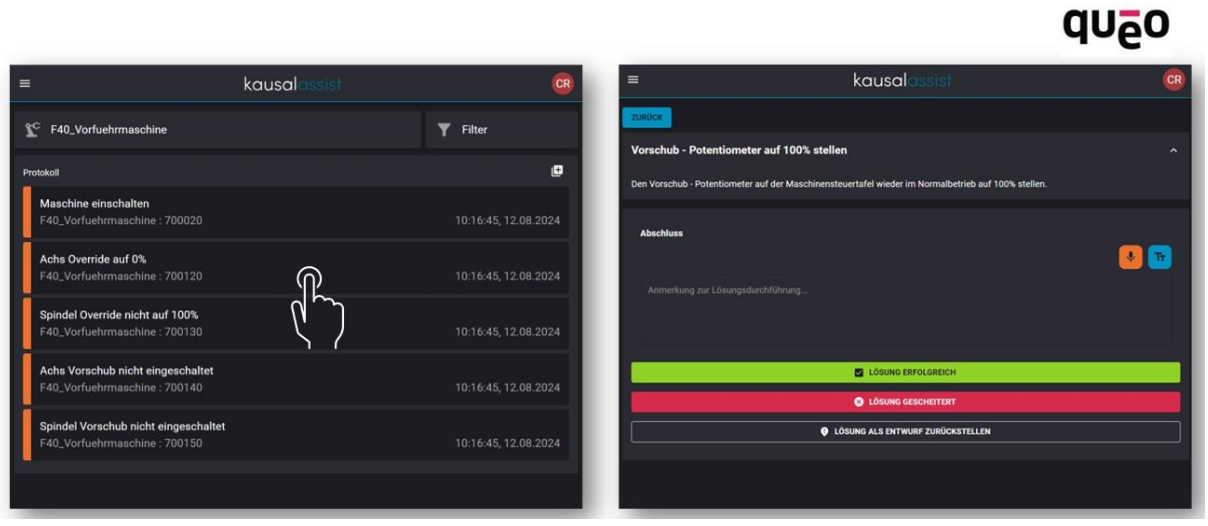


Abbildung 2: KausaLAssist Applikation zur priorisierten Darstellung von Störungsmeldungen und dazugehörigen Lösungsvorschlägen. Entwickelt von Projektpartner queo.

Alle Meldungen werden auch in einer Datenbank erfasst, welche eine Auswertung durch die Produktionsleitung, als auch durch KI-Algorithmen erlaubt. Von der Produktionsleitung werden verbesserte Lösungen hinterlegt, häufige Störungsursachen identifiziert und eine datenbasierte, kontinuierliche Verbesserung erreicht. KI-Algorithmen (Causal-AI) werten die Produktionsdaten und Meldungen aus und erkennen kausale Zusammenhänge zwischen den Daten. Diese kausalen Zusammenhänge werden im Hintergrund genutzt, um Folgefehler von ursächlichen Fehlern zu unterscheiden und Lösungsvorschläge situationsspezifisch zu gewichten. Mit wachsendem Datenbestand werden die KI-Empfehlungen aufgrund kausaler Beziehungen immer genauer und die Werker können noch effektiver in der Störungsbehebung unterstützt werden.

Im Resultat werden Störungs- und Stillstandszeiten reduziert und die Ausbringung gesteigert, was auch durch Analysen im Rahmen des Projekts gezeigt wurde.

### IV.1.2 KausaLAssist – Effekt auf Stillstände und Ausbringung (Analyse bei KAMAX)

In einer Analyse wurde der Effekt von KausaLAssist auf die Teleskoplinie beim Projektpartner KAMAX untersucht. Hierfür wurden Leistungs- und Verfügbarkeitsmetriken vor und nach dem GoLive der KausaLAssist Applikationen für die Werker erfasst und verglichen. Am 23.09.24 wurde die KausaLAssist Web-Applikation bei KAMAX Tools für Werker eingeführt, um Fehler zu priorisieren und Lösungsvorschläge zu bieten.

Die Analyse verglich die Ergebnisse der Frühschicht vor und nach dem Go-Live, wobei die Kerntrennmaschine (Erste Maschine in Prozesskette) als Referenz ausgewählt wurde. Diese Maschine gilt als Engpass für den Durchsatz, da das Kerndrehen von der erfolgreichen Bearbeitung im Kerntrennen abhängt. Die erfassten Metriken umfassen die Anzahl der fertiggestellten Aufträge, die Anzahl produzierter Teile, die Störungsdauer und die mittlere Störungsbehebungszeit (MTTR):

- **Aufträge:** Anzahl fertiggestellter Aufträge (Matrizen) bis zum Ende der Frühschicht, wobei jeder Auftrag aus mehreren Teilen (Kernen) bestehen kann
- **Teile:** Anzahl produzierter Teile (Kerne) bis zum Ende der Frühschicht
- **Störungsdauer (s):** Summe der Zeit in Störung während Frühschicht (Nur Meldungen, welche direkten Eingriff vom Werker erfordern)
- **MTTR = Mean Time to Recover / Mittlere Störungsbehebungszeit (in s):** Durchschnittliche Dauer, wie lange eine Störung ansteht; Zeit von Detektion der Störung bis erfolgreichen Wiederanlauf der Anlage nach Lösung durch Werker

Die Implementation von KausaLAssist führte zu signifikanten Verbesserungen in allen gemessenen Kennzahlen:

Tabelle 1: Ergebnisse des Vergleichs der Frühschichten: Um 48% reduzierte Störungsbehebungszeit resultiert in 23,5% mehr gefertigte Aufträge.

| | Aufträge | Teile | Störungsdauer (Gesamt in s) | MTTR (s) |
|---|---|---|---|---|
| Referenz | 5,4 | 9,0 | 5673,9 | 1036,2 |
| **Mit KausaLAssist** | **6,7** | **9,8** | **1884,5** | **538,3** |
| Relative Änderung | +23,5% | +8,6% | -66,8% | -48,0% |

Die Analyse zeigt, dass durch KausaLAssist eine Reduktion der MTTR um 48% erreicht wurde, wodurch die Ausbringung in Form der Aufträge um +23,5% gesteigert werden konnte. Besonders bemerkenswert ist die Reduzierung der Gesamtstörungsdauer um 66,8%.

Diese messbaren positiven Effekte durch KausaLAssist in der realen Fertigung bilden das wichtigste Ergebnis des Verbundprojekts.

## IV.2 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte

IWU

- Entwicklung der KI-Methode SCALE für das Erlernen großer kausaler Graphen mit hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit (Patentierung wird geprüft)
- Implementierung eines automatischen Clusterings von Fehlermeldungen auf Basis von Zeit und/oder kausaler Graphen

- Aufbereitung von 1550 Fehlertypen mittels LLM mit je 1-3 hinterlegten Lösungen für optimierte Darstellung
- Entwicklung eines Analyse-Moduls zur Extraktion und Visualisierung von Stillstands- und Störungszeiten
- Konzeption und Durchführung eines finalen Go-Live bei KAMAX mit Vorher-/Nachher-Vergleich
- Leitung akademischer Arbeiten: Masterarbeit zur Fehlerpriorisierung mit kausalen Graphen und Diplomarbeit zum Erzeugen realistischer Ursache→Fehler Daten
- Entwicklung eines MS-Teams Notifiers zur schnellen Benachrichtigung bei Maschinenstillständen
- Präsentation der Ergebnisse: Vortrag auf SmartFactory-Tagung, zwei Beiträge im Projektatlas "KI in der Produktion"
- Videoproduktion eines Imagefilms für das Gesamtprojekt

SMB

- Erweiterung und Optimierung des digitalen Zwillings zur automatisierten Simulation von Maschinenfunktionalitäten und NC-Programmen
- Generierung von Trainingsdaten für den kausalen Graphen durch simulierte Fehlersituationen
- Evaluation und umfangreicher Test des KausaLAssist-Stacks im Unternehmensumfeld
- Aktives Feedback zum Prinzip Ursache => Fehler => Lösung im Rahmen regelmäßiger Sprintplanungen
- Entwicklung und Erprobung von Lösungsstrategien für das Fehlermanagement bei spezifischen Anwendungsfällen
- Unterstützung bei der Diplomarbeit zum Erzeugen realistischer Fehlerdaten am digitalen Zwilling

KAMAX

- Implementierung eines selbstlernenden Systems zur automatischen Erfassung und Klassifizierung von Fertigungsfehlern
- Aufbau einer strukturierten Wissensdatenbank mit systematischer Erfassung von Ursachen und Lösungsstrategien
- Signifikante Verkürzung der Fehlerbeurteilungs- und -behebungszeit durch fehlerbezogene Wissensbereitstellung
- Technische Infrastrukturerweiterung mit OPC-UA-Kompatibilität für verbesserte Steuerungsintegration
- Erfolgreiche Integration mit übergeordneten Systemen (MES, SAP, Auftragsanlage) für durchgängige Datenkommunikation
- Einführung einer systemweiten eindeutigen ID für Produktionsdurchläufe zur zuverlässigen Datenzuordnung
- Nutzerorientierte Entwicklung der Benutzeroberfläche durch mehrere Feedback-Iterationen mit Endanwendern
- Stufenweise Implementierung mit Prototypen (2022), Testbetrieb (2023) und vollständiger Integration in den täglichen Produktionsbetrieb (2024)
- Dokumentierte Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit durch Reduzierung von Stillstandzeiten
- Erstellung von Videodokumentation am Standort Homberg (Ohm) im November 2024 zur Demonstration der praktischen Anwendung

IP

- Entwicklung eines Konfigurationsmoduls zur Verwaltung multipler Produkt- und Maschineneinstellungen für den Robo Operator
- Schaffung einer benutzerfreundlichen Parametrierung für vorbereitete Abläufe

- Implementierung einer konfigurierbaren Bedienerinteraktion bei verschiedenen Fehlerfällen
- Entwicklung und Implementierung einer Texterkennung für Störmeldungen auf CNC-Maschinendisplays
- Optimierung der Werkstück-Lageerkennung für unterschiedliche Umgebungsbedingungen
- Erstellung eines Werkzeugs zur anwendungsspezifischen Genauigkeitsbestimmung
- Integration und Testung des Partner-Softwarestacks mit dem Robo Operator
- Durchführung von Demonstrationsabläufen zur Validierung aller implementierten Funktionen

ISG

- Entwicklung eines Control-Panels zur gezielten Steuerung der Fehlerfälle aus der Simulation
- Modellierung von Sensorbereichen zur Bauteilabfrage, die ebenfalls Fehlerfälle bereitstellen können
- Bereitstellung einer Funktion zur Kopie des "hierarchical Names" zur Manipulation des entsprechenden Ports über eine DLL
- Unterstützung bei der Erstellung von Testdaten für die Entwicklung des kausalen Graphen

SEITEC

- Weiterentwicklung des Smart Data Analyzers (SDA) mit:
  - Subscription-View zur Anzeige von Variablenwerten zu beliebigen Zeitpunkten
  - Gantt-Diagramm-View zur zeitlichen Darstellung aller Fehler
  - Möglichkeit zum Wechsel zwischen UTC und lokaler Zeitzone
  - Umfangreichen UI-Verbesserungen und Bugfixes
- Erweiterung von ReBOSA (Aggregierender OPC-UA-Server) mit:
  - Refresh-Event-Support für Weiterleitung an Source-Server
  - Profile-Feature für Kompatibilität mit OPC-UA-Servern verschiedener Anbieter
  - Einheitlichem Event-Schema für nachgelagerte Anwendungen
  - Ausbau der Funktionalität für genormten zentralen Zugriffspunkt
- Anpassung des Server Data Providers (SDP):
  - Integration mit Profile-Feature von ReBOSA
  - Stündliches Auslösen von Refresh-Events zur Aktualisierung des Event-Katalogs
  - Korrektes Verhalten bei häufig auftretenden Fehlern (Flickering von Events)
- Präsentation auf "SmartFactory 2" Tagung und Publikation im Projektatlas "KI in der Produktion"

queo

- Fokussierte Verbesserung der Usability und Nutzerakzeptanz aller Anwendungen
- Bereitstellung fehlender Komponenten für erweiterte Dashboard-Funktionalitäten
- Implementierung und kontinuierliches Update des Softwarestacks bei zwei Anwendungspartnern
- Weiterentwicklung der Fehlermanagementapplikation für den ganzheitlichen Einsatz in komplexen Prozessketten
- Kontinuierlicher Austausch mit Anwendungsfällen zur gezielten Verbesserung der Applikation
- Optimierung der Benutzeroberfläche für intuitive Bedienung durch Werker

# Eingehende Darstellung zum Abschluss

## von Verbundprojekt

**» Kausale Graphen als lernendes Assistenzsystem für automatisiertes Fehlermanagement in der Produktion «**

## KausaLAssist

in der Fördermaßnahme

**Lernende Produktionstechnik – Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion (ProLern)**
im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“
des BMBF

**Projektlaufzeit:** **01.06.2021 - 31.12.2024**

**Projektkonsortium**

| Abkürzung | Verbundpartner | Bezeichnung des Teilprojekts |
|---|---|---|
| IWU | Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU (Organisatorische Projektleitung) | KI- und Expertengestütztes Erlernen kausaler Graphen und automatisierte, erklärbare Ursachenanalyse |
| SMB | Schuster Maschinenbau GmbH | KI-befähigte Werkzeugmaschine mit integriertem Fehlermanagement |
| KAMAX | KAMAX Tools & Equipment GmbH & Co. KG | Automatisiertes Fehlermanagement in komplexer Kleinserienfertigung |
| IP | Industrie-Partner GmbH Coswig | Störungsdetektion, Ursachenanalyse und eigenständige Fehlerbehebung für eine autonome Roboterzelle |
| ISG | ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH (Projektkoordinator Industrie) | Virtuelle Trainings- und Testumgebung für KI-Algorithmen in der Betriebsphase |
| SEITEC | SEITEC GmbH | Dezentraler digitaler Zwilling und KI-Befähigung von Produktionsmaschinen |
| queo | queo GmbH | Software für ganzheitliches, KI-unterstütztes Fehlermanagement in der Produktion |
| InfAI | Institut für Angewandte Informatik e.V. | Kausale Störungsdetektion und KI-gestützte Lösungsstrategieentwicklung |

InfAI hat Bericht vorab einzeln eingereicht.
Daher im Gesamtbericht nicht enthalten.

Disclaimer zu gendergerechter Sprache:

*Das, innerhalb der Vorhabensbeschreibung verwendete, generische Maskulinum bezieht sich immer zugleich auf weibliche, männliche und diverse Personen. Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsspezifische Schreibweise sowie auf Mehrfachbezeichnungen verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.*

**Inhaltsverzeichnis**

I. Motivation, Konzept und Neuheit des Gesamtprojekts ..... 3
I.1 Konzeptioneller Ansatz ..... 3
I.2 Neuheit des Lösungsansatzes ..... 4
II. Aufgabenstellung und wissenschaftlich, technischer Stand bei Projektstart ..... 5
II.1 Gesamtziele des Verbundprojektes ..... 5
II.2 Zusammenfassung des wissenschaftlich-technischen Standes vor Projektbeginn . 7
II.3 Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischen Stand der Teilprojekte ..... 8
III. Ablauf des Vorhabens ..... 11
III.1 Beschreibung der Arbeitspaketinhalte, der Aufgaben- und Rollenverteilung ..... 11
IV. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten ..... 38
V. Ergebnisse ..... 40
V.1 Wesentliche Ergebnisse des Verbundprojektes ..... 40
V.2 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2021 ..... 42
V.3 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2022 ..... 44
V.4 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2023 ..... 46
V.5 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2024 ..... 49
VI. Fortschreibung des Verwertungsplans ..... 51
VI.1 Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse – Zusammenfassung Verbund ..... 51
VI.2 Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse – Teilprojekte ..... 52
VII. Veröffentlichungen ..... 54
VIII. Während Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte Dritter ..... 56

# I. Motivation, Konzept und Neuheit des Gesamtprojekts

| | |
|---|---|
| Motivation<br>Defizit | Der Bedarf individuelle Produkte schnell und kostengünstig zu fertigen forciert eine starke Vernetzung und softwaretechnische Aufrüstung der Fertigung. Für den wirtschaftlichen Betrieb moderner Produktionssysteme wird ein umfassendes Anlagenwissen und effizientes Fehlermanagement benötigt, um den kontinuierlichen Betrieb sicherzustellen. Aktuell verwendete Ansätze zum Fehlermanagement, also der systematischen Detektion, Diagnose und Korrektur von Störungen im Produktionsablauf beruhen auf maschinenspezifischen Lösungen, die Fehler möglichst genau eingrenzen, und hochqualifizierten Fachkräfte, die die tatsächliche Fehlerursache mit Ihrem ausgeprägten Maschinenverständnis ermitteln und beheben. Der steigende Bedarf an hochspezialisierten Fachkräften zur Ausfallzeitenminimierung in derzeitigen sowie wachsenden vollautomatisierten Produktionslandschaften stellt zunehmend ein Hemmnis für eine intelligente, weitgehend autonome, Produktion dar. Mit steigender Anlagenkomplexität genügt dieses verteilte, stark personenbezogene Fehlermanagement nicht, um den effizienten Betrieb sicherzustellen. |
| Heraus-<br>Forderung | Hier fehlte es zum Projektstart an einer praxisorientierten Lösung, welche logische Wirkzusammenhänge von Maschinen anhand von Anlagendaten automatisierbar und flexibel abbildet, zuverlässig Störungen detektiert, Ursachen ableitet und durch intuitives Einbinden von Fachwissen effektive Lösungsvorschläge präsentiert.<br>Die Herausforderung besteht in der effizienten Kombination von menschlichem Expertenwissen mit datengetriebenen Erkenntnissen durch künstliche Intelligenz (KI) zu einem digitalen Maschinenverständnis, welches als transparente Wissensbasis sowohl von den Betreibern als auch den Algorithmen verstanden wird und darauf aufbauende Handlungsanweisungen erklärbar darstellen kann. Diese Nachvollziehbarkeit ist die Basis für adaptive Assistenzsysteme, welche Betreiber optimal in der Fehlerbehebung begleiten und ein sicheres, selbstlernendes Fehlermanagement ermöglichen. |
| Perspek-<br>tiven | Ein selbstlernendes, digitales Maschinenverständnis bietet als transparente Wissensbasis enormes Potenzial für den umfassenden Einsatz von KI-Systemen in der Produktion. Die Möglichkeit vorhandene Maschinenwissen einzubinden, hilft das hohe Know-how in Deutschland zu halten und durch KI-Systeme weiter auszubauen. Intelligente Algorithmen, die auf Basis von Wirkzusammenhängen der Maschinen operieren, bieten die Chance, das Fehlermanagement zu automatisieren, Stillstandszeiten zu reduzieren und die Fertigungsrobustheit, bei einer zunehmend volatilen Ausgangslage, zu steigern. In weiteren Ausbaustufen kann das generierte Wissen für den gezielten Einsatz weiterer KI-Algorithmen zur Anlaufzeitenverkürzung, flexible Extrapolation von Fertigungsparametern und für präventive Instandhaltungsaufgaben genutzt werden. |

## I.1 Konzeptioneller Ansatz

Der Ansatz des Verbundprojekts ist gekennzeichnet durch eine innovative Kombination von KI-Erkenntnissen und vielseitigem Wissen der Anwender in einem bedienerfreundlichen KI-Assistenzsystem für das Fehlermanagement in der Produktion. Das dahinterstehende, ganzheitliche Forschungskonzept und die Beiträge der Projektpartner sind schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Hierbei werden die Fragen, warum ein solches System benötigt wird („*Why?*“), wie im Verbund das Fehlermanagement durch KI automatisiert werden soll (*„How?“)* und was das System in den Anwendungsfällen leisten kann *(„What?“)* beantwortet.

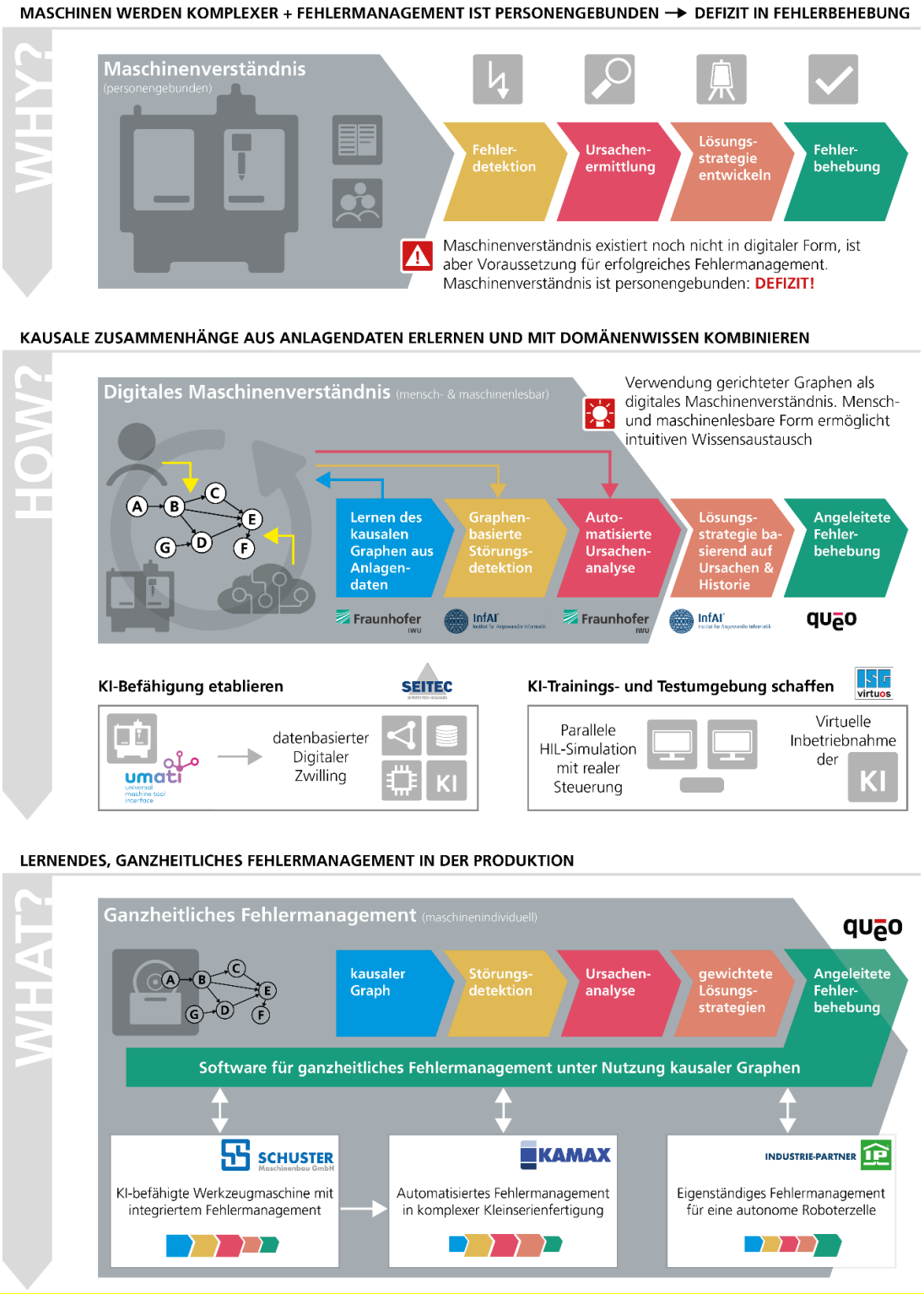


*Abbildung 1 - Konzeptschema des Verbundvorhabens KausaLAssist*

## I.2 Neuheit des Lösungsansatzes

Der ganzheitliche Lösungsansatz des Verbundprojekts KausaLAssist geht durch den Einsatz kausaler Graphen und darauf aufbauender KI-Methoden bedeutend über den Stand der Technik im Fehlermanagement für Produktionssysteme hinaus.
Bisherige Ansätze beruhen auf maschinenindividuellen Lösungen und personengetrieben Ursachenanalysen, wodurch eine umfassende Automatisierung des Fehlermanagements bisher nicht möglich ist. Neuere KI-basierte Methoden für die Fehleridentifikation beruhen

häufig auf Blackbox-Modellen, die Anwenderwissen nicht gewinnbringend in den Prozess einbeziehen können und eine geringe Erklärbarkeit bieten.

Für beide Problemstellungen bietet der Einsatz kausaler Graphen einen Lösungsansatz: Anwenderwissen kann effektiv mit datengetriebenen Erkenntnissen kombiniert werden, indem ein digitales Maschinenverständnis als transparente Wissensbasis durch KI erlernt und mit Anwenderwissen erweitert, verändert und beurteilt werden kann. Aufgrund des hohen deskriptiven Charakters von Kausalität kann der gerichtete Graph auch für neue Fehlerfälle genutzt werden und eine Ursachenanalyse automatisiert durchführen. Diese automatische Ursachenanalyse eröffnet die Möglichkeit für den gesamten Fehlermanagementprozess eine Automatisierung durchzuführen und durch KI erlerntes Wissen mit den Anwendern zu teilen.

Die umfassenden Arbeiten des Verbundprojekts zur Befähigung des maschinennahen Einsatzes von KI in der Produktion bilden die Grundlage für den erfolgreichen Einsatz von KI im Projekt und für den breiten Einsatz von KI in der Industrie insgesamt. Im Rahmen der KI-Befähigung wurde im Projekt ein auf „KI-Ready“ digitaler Zwilling entwickelt, welcher über eine situationsbasierte Datenakquise intelligent relevante Daten für ein KI-Training sammelt und diese flexibel über Industrie-Standards wie OPC UA bereitstellen kann. Ebenso notwendig für den Aufbau qualitativ hochwertiger KI-Systeme ist die Verfügbarkeit einer hohen Menge von realitätsnahen Datensätzen und die Möglichkeit zur kostengünstigen Validierung sowie Inbetriebnahme der KI-Systeme als Qualifizierung für den Einsatz im industriellen Umfeld.
Als weitere wichtige Säule der KI-Befähigung wurde im Projekt eine virtuellen KI-Trainings, Test und Validierungsumgebung entwickelt, welche den bisherigen Stand der Technik in der virtuellen Inbetriebnahme, um die Inbetriebnahme von maschinennahen Analyse- und KI-Methoden erweitert und einen neuartigen, realitätsnahen Trainingsraum für die agile Entwicklung von KI-Methoden für Produktionssysteme schafft.

Die Innovation von KausaLAssist besteht in der kombinierten Nutzung von KI-Methoden und gerichteten Graphen zur Integration von Kausalität in das Störungsmanagement. Basierend auf erlernten kausalen Graphen wird über KI-Methoden eine automatisierte Störungsdetektion und Ursachenanalyse auch für bisher unbekannte Störungen realisiert. Zudem ermöglichen die Graphen als digitales Maschinenverständnis eine erfolgreiche Interaktion zwischen KI und dem Bediener und ermöglichen die Inkorporation von Fachwissen in den KI-unterstützen Fehlermanagementprozess. Dies steigert zum einen die Akzeptanz der KI durch Erklärbarkeit und führt zum anderen zu deutlich reduzierten ungeplanten Stillstandszeiten durch den intuitiven Wissensaustausch von KI & Mensch.

## II. Aufgabenstellung und wissenschaftlich, technischer Stand bei Projektstart

### II.1 Gesamtziele des Verbundprojektes

Die intuitive Kollaboration von Mensch und KI zur Ermöglichung eines effektiven Fehlermanagements für komplexe Produktionssysteme stand im Fokus des Verbundvorhabens KausaLAssist. Ziel war die Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems, welches den Maschinenbediener mit KI-Algorithmen zur schnellen Störungsdetektion, Ursachenermittlung und Fehlerbehebung unterstützt und so Stillstandszeiten reduziert sowie eine Automatisierung dieser Fehlermanagementbestandteile ermöglicht.

Durch die im Vorhaben entstehenden Softwaretechnologien sollte der Maschinenbediener in die Lage versetzt werden, mittels KI-Empfehlungen auch auf komplexe oder neue Fehlersituationen schnell reagieren zu können, ohne dass dafür eine umfassende Expertise in der Fehlerbehebung oder der KI-Anwendung benötigt wird. Die Besonderheit des interdisziplinären Forschungsansatzes besteht im Aufbau eines digitalen Maschinenverständnisses, welches kontinuierlich durch KI-Erkenntnisse und Feedback der Anwender ausgebaut wird und als erklärbares KI-System eine transparente Entscheidungsgrundlage für die Fehlerbehebung bietet. Diese Lösung wird in ein Assistenzsystem eingebaut, welche den Maschinenbediener über eine intuitive Oberfläche durch die Fehlerbehebung führt. Zu jeder Zeit kann sich dabei der Anwender, das KI-generierte Maschinenverständnis anschauen und adaptieren, wodurch eine effektive Kollaboration ermöglicht wird. Die gesamte Softwarearchitektur sollte maschinenah laufen, wodurch die Lösung einfach in den Arbeitsplatz des Maschinenbedieners integriert werden kann und Ausgangspunkt für weitere KI-Lösungen auf dem Shopfloor bietet.

Im Rahmen eines ganzheitlichen Lösungsansatzes wurde im Projekt neben den erklärbaren KI-Methoden auch die effiziente KI-Befähigung von Produktionssystemen erforscht und die entwickelten Ansätze in drei Anwendungsszenarien in typischen Anwendungsfeldern erprobt.

Die erwarteten Kernergebnisse des Projekts, gegliedert nach den Bereichen *KI-Methoden*, *KI-Befähigung* und *KI-Anwendung*, sind als Übersicht in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

| Kategorie | Kern der erwarteten Ergebnisse |
|---|---|
| **KI-Methoden** | Entwicklung von KI-Softwarekomponenten zur maschinennahen, graphbasierten:<br>• Extraktion von Kausalität aus Anlagendaten,<br>• Störungsdetektion und -klassifikation,<br>• Ursachenanalyse,<br>• Lösungsstrategieentwicklung und<br>• (teil-)automatischen Fehlerbehebung. |
| **KI-Befähigung** | Befähigung zum Anlernen von KI-Methoden in der Produktionstechnik:<br>• Virtuelle Trainings-, Test- und Inbetriebnahmeumgebung für KI-Methoden, welche das kostengünstige, realitätsnahe Training von KI-Algorithmen für Industrieanwendungen ermöglicht<br>Befähigung zur maschinenahen Verwendung von KI-Methoden:<br>• „KI-Ready“ datengetriebener digitaler Zwilling zur Verknüpfung heterogener Datenquellen im Maschinenumfeld inklusive intelligenter Speicherung, Filterung sowie Bereitstellung von KI-Trainingsdatensätzen<br>• Erprobung von On-Premise Lösungen zum kontinuierlichen, maschinennahen Selbstlernen von KI-Modellen auf dem Shopfloor |
| **KI-Anwendung** | Entwicklung einer intuitiven Benutzeroberfläche zur Erleichterung der Interaktion der Maschinenbediener mit verschiedene KI-Methoden und der Wissensbasis für das Fehlermanagement. Beinhaltet u.a. folgende Funktionalitäten:<br>• Aufbau sowie Abfrage einer gemeinsamen Wissensbasis durch KI-Ergebnisse und Domänenwissen der Anwender<br>• Ansprache und Erklärung der KI-Vorhersagen über kausale Graphen |

| | |
|---|---|
| | • Angeleitete (teil-)automatisierte Fehlerbehebung<br>Kombination von Expertenwissen mit KI-Erkenntnissen für adaptives Fehlermanagement, erprobt in drei Anwendungsfällen:<br>1. KI-befähigte Werkzeugmaschine mit integriertem Fehlermanagement<br>2. Automatisiertes Fehlermanagement in hochvernetzter, komplexer Kleinserienfertigung<br>3. Störungsdetektion, Ursachenanalyse und eigenständige Fehlerbehebung für eine autonome Roboterzelle |

## II.2 Zusammenfassung des wissenschaftlich-technischen Standes vor Projektbeginn

Vor Beginn des Projekts KausaLAssist war das Fehlermanagement in der Produktion stark von manuellen, personengebundenen Methoden geprägt. Die drei etabliertesten Ansätze – FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse), FTA (Fehlerbaumanalyse) und das Ishikawa-Diagramm – basierten primär auf dem Fach- und Erfahrungswissen der Anwender. Die FMEA analysiert systematisch potenzielle Fehler hinsichtlich ihrer Entdeckungs- und Auftrittswahrscheinlichkeiten sowie deren Folgen für den Kunden. Die FTA ermöglicht eine graphische Repräsentation von Fehlerereignissen und deren Ursachen, während das Ishikawa-Diagramm Kausalbeziehungen in einer übersichtlichen visuellen Form darstellt. Diese Methoden erwiesen sich zwar als effektiv für die proaktive Störungsvermeidung, waren jedoch zeit- und kostenintensiv und zeigten deutliche Limitierungen hinsichtlich der Integration von datengetriebenen Erkenntnissen aus Maschinensensoren.

Vorausgegangene Forschungsprojekte wie FAMOS (2007-2010), BigPro (2014-2017) und KoMMDia (2017-2020) zielten bereits darauf ab, das Störungsmanagement durch digitale Plattformen zu unterstützen. BigPro entwickelte eine Big-Data-Plattform, die Maschinendaten mit Sprach- und Stimmungserkennung der Beschäftigten kombinierte, während KoMMDia ein lernendes, dialogbasiertes Assistenzsystem für Verpackungsmaschinen erforschte. Trotz dieser innovativen Ansätze blieb eine effektive Lösung für neue, unbekannte Fehlersituationen sowie die automatisierte Ursachenanalyse aus. Die entwickelten Systeme waren zudem hauptsächlich auf Großserienfertigung ausgerichtet und boten keine adäquaten Lösungen für die Herausforderungen der Losgröße 1.

Ein vielversprechender, aber in der Produktionstechnik bis dahin kaum genutzter Ansatz lag in der Verwendung kausaler Graphen, die auf den grundlegenden Forschungsarbeiten von Judea Pearl basierten. Diese mathematisch fundierte Methode ermöglicht die Darstellung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Form von gerichteten azyklischen Graphen (DAGs). Erfolgreiche Anwendungen dieser Methodik waren bereits in anderen Bereichen wie den Wirtschaftswissenschaften, der Bioinformatik und der Klimaforschung zu finden. In der Produktionstechnik existierten nur vereinzelte Anwendungsbeispiele, wie eine Fallstudie bei Bosch zur Ermittlung von Ursachen mangelnder Produktqualität.

Diese Ausgangssituation offenbarte ein bedeutendes Innovationspotenzial für einen Ansatz, der Künstliche Intelligenz nutzt, um ein fehlerunabhängiges Maschinenverständnis in Form von kausalen Graphen aus Anlagendaten zu erlernen. Ein solcher Ansatz würde nicht nur die effektive Integration von datengetriebenen Erkenntnissen ermöglichen, sondern auch die Grundlage für eine automatisierte Ursachenanalyse bei neuartigen Fehlersituationen schaffen. Das "Causal Discovery", also das Entdecken und Quantifizieren von kausalen Beziehungen aus Zeitreihendaten, stellte dabei einen vielversprechenden Forschungsansatz dar, der sich

deutlich von bisherigen Lösungen abhob und das Potenzial bot, auch für bisher unbekannte Fehlersituationen effektive Lösungsstrategien zu entwickeln.

### II.3 Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischen Stand der Teilprojekte

IWU

Das Teilprojekt des IWU fokussiert sich auf die Entwicklung von KI-Prototypen zum Erlernen kausaler Graphen und zur automatisierten, erklärbaren Ursachenanalyse. Kernaspekte sind die Integration von Domänenwissen, die kontinuierliche Aktualisierung der Graphen durch Anlagendaten sowie die Steigerung der Transparenz von KI-Empfehlungen. Durch die Verwendung gerichteter, anwenderfreundlicher Graphen soll eine intuitive Interpretation ermöglicht werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Extrapolation der Erkenntnisse auf neue Fehlersituationen und der Automatisierung des Fehlermanagements. Als konkrete Zielmarken wurden die Verkürzung der Entwicklungszeit von Assistenzsystemen um mindestens 30 % durch formalisiertes, automatisch erweiterbares Expertenwissen sowie eine um mindestens 50 % schnellere Identifikation von Fehlerursachen definiert. Der Projekterfolg wird an der automatisierten Erstellung einer KI-basierten, anwenderadaptierbaren Kausalitätshypothese aus Anlagendaten gemessen.

SMB

Ziel des Teilprojekts bei SMB ist die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur vereinfachten Fehlerbehebung durch integrierte und visuell unterstützte Fehlerbehebungsanleitungen und teil- bzw. vollautomatisierte Fehlerbehebung auf der Basis von KI-Methoden. Ebenso steht die Herstellung eines Prototyps zur maschinennahen Akquise, Aufbereitung sowie Bereitstellung von Anlagendaten für Maschinelles Lernen und KI-gestützte Reaktion auf Störungen im Fokus des Projekts.

Das KI-gestützte System soll eine für den Betreiber der Anlage transparente Entscheidungsunterstützung und Fehlerbehebung ermöglichen. Es soll dabei fortwährend seine Wissensbasis erweitern und nachhaltig zur Verfügung stellen, was bisher nur durch hochqualifiziertes Domänenwissen erbracht werden konnte und stets bei Personalwechsel flüchtig war.

SMB zielt auf die Entwicklung eines Gesamtsystems, das mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand einfach in der Werkzeugmaschine implementiert, trainiert, optimiert und betrieben werden kann sowie vernetzt mit mehreren interagierenden Werkzeugmaschinen in einem Maschinennetzwerk funktioniert.

Durch dieses System soll ein Wettbewerbsvorteil durch Erhöhung des Nutzungsgrades und Reduzierung des Bedienfaktors zu Marktbegleitern erzielt werden und dadurch zu mehr verkauften Projekten und Anlagen um 10% führen.

Ziel ist weiterhin die Steigerung von Dienstleistungsumsätzen durch Implementierung, Beratung und Schulung der Kunden bei Neuprojekten, Nachrüstung des Systems in Bestandsanlagen sowie die Steigerung von After-Sales-Umsätzen durch beschleunigte oder automatisierte Ersatzteilbestellungen oder die Anforderung eines Servicetechnikers um 15%.

KAMAX

KAMAX stellt die Anforderung an ein Null-Fehler System. Um dies zu erreichen, steht neben der Verbesserung der Maschinen und Verfahrenszuverlässigkeit der vollautomatisierten Fertigungslinie die Entwicklung eines digitalen Assistenzsystems für die effektive Fehlerbehebung in komplexer Kleinserienfertigung (Losgröße 1) im Vordergrund. Fertigungsmitarbeiter sollen über die fehlerbezogene Bereitstellung von Wissen dazu qualifiziert werden, Fehler in weniger als 50% der bisher benötigten Zeit zu beurteilen und zu beheben. Weiterhin soll ein selbstlernender Algorithmus auftretende Fehler in der Fertigung erfassen und klassifizieren. Auf Basis dessen soll im Nachgang eine systeminterne Fehlerbehebung ermöglicht werden, die die down-

time der Anlage minimiert und die Prozessfähigkeit des Gesamtsystems um mindestens 10% verbessert.

IP

IP entwickelt das "Robo Operator" System zur Automatisierung von CNC-Werkzeugmaschinen ohne vorhandene Automatisierungsschnittstellen. Das System nutzt Bildverarbeitung zur Erkennung und Bedienung von Maschinenelementen und agiert dabei wie ein menschlicher Bediener. Der existierende Prototyp benötigt bei Störungen noch manuelle Intervention.

Die zentrale Innovation des Vorhabens ist die Entwicklung eines vollautonomen Betriebs über acht aufeinanderfolgende Schichten durch erweiterte KI-Funktionalität. Mittels der Kombination von Wissensgraphen und Machine Learning soll der Robo Operator selbstständig Störungen erkennen, Entstörstrategien entwickeln und diese ausführen. Das System soll sich automatisch auf neue Situationen und Maschinentypen adaptieren können, wobei eine Steigerung der Prozesssicherheit um 20% angestrebt wird.

Das wirtschaftliche Ziel ist die Vermietung von 33 zusätzlichen Robo Operator Systemen für den mannlosen Betrieb innerhalb von drei Jahren, wodurch ein jährlicher Umsatz von 1,5 Mio € generiert werden soll.

ISG

Die im Entwicklungsprozess im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme mit der Softwarelösung ISG-virtuos vom KMU ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH entstandenen Simulationsmodelle sollen nach erfolgreicher Inbetriebnahme in die Betriebsphase überführt werden und für neuartige Methoden, wie die Fehleranalyse, die Prozessoptimierung auf Basis lernender Algorithmen zur Verfügung stehen. Der Simulator sollen dabei mit einer KI gekoppelt werden, um umfangreiche, realitätsnahe Fehlerdatensätze sowie Testdatensätze bereitzustellen.

Ziel ist eine Prozessoptimierung auf Basis unterschiedlicher Maschinen- und Anlagenkonfigurationen und -szenarien. Mit der neuartigen Kopplung zwischen modellgetriebenen digitalen Zwilling und KI sollen umfangreiche Testdatensätze und Testszenarien samt Bewertungskriterien zur Verfügung gestellt werden.

Als technische Zielparameter wird dabei die automatische Parametrisierung des Simulationsmodell durch Analyse der Prozessdaten in < 1 Woche, eine Einbindung in die Betriebsphase im Steuerungstakt (Zykluszeit < 5 ms) sowie eine automatische Generierung von Fehlerszenarien über die externen KI-Schnittstellen angestrebt.

SEITEC

Das Teilprojekt der SEITEC GmbH fokussiert sich auf die Entwicklung verschiedener Software-Module basierend auf Cloud/Edge Technologien (Container-basiert und Hardware-agnostisch), welche eine weitgehend standardisierte maschinennahe Datenakquisition, Aufbereitung und Speicherung ermöglichen, sowie eines dezentralen digitalen Zwillings zur weiteren Anwendung der KI-Methoden. Neben der Integration von Standards wie OPC-UA sollen auch Schnittstellen zu den weit verbreiteten Steuerungen von Siemens und Beckhoff bzw. deren CNC-Baureihen evaluiert und entwickelt werden. SEITEC wird zudem die Schnittstellen zu allen weiteren Partnern im Bereich KI und Software federführend definieren und integrieren.

Ein weiterer Schwerpunkt ist der tiefere Einstieg in das Zukunftsfeld der Künstlichen Intelligenz (KI). Neben dem Know-how-Transfer zur Integration von KI-Methoden in eigene Edge-Anwendungen verfolgt SEITEC das Ziel, sein Produktportfolio zu erweitern und eigene Softwareprodukte aus den Ergebnissen des Projekts zu generieren bzw. diese mit anderen Projektpartnern gemeinsam zu entwickeln. Die Strategie, kausale Zusammenhänge mithilfe von Container-basierten Softwaremodulen, Edge-Technologien und KI abzubilden, gilt als vielseitig anwendbar. Es sollen Module für konfigurierbare

Schnittstellen sowie Anwendungen zur Analyse und Visualisierung kausaler Zusammenhänge vor Stör- und Fehlerereignissen entstehen.

queo

In dem Vorhaben stellt queo ein Assistenzsystem als prototypische Anwendung zur Verfügung, mit der die Nutzer die von der KI erzeugten Ergebnisse darstellen und interpretieren können. Durch die verbesserte Mensch-Maschinen Interaktion bei der Auswertung der Ergebnisse der KI-Analysen soll das Ergebnis direkt durch die Interaktion mit dem Bediener optimiert werden können.

Dabei stellt das System die angepassten Ergebnisse direkt zur weiteren Optimierung der KI geeignet zur Verfügung. Der Maschinenbediener wird ohne Softwarewechsel befähigt, die für die aktuelle Situation richtige Entscheidung zu wählen. Diese Entscheidung überträgt das System an die Maschine. Der Mensch trifft bessere Entscheidungen an der Stelle, wo ohne Einsatz des Systems keine qualifizierten Alternativen vorliegen würden. Bei der Erstellung der verschiedenen Anwendungen werden die übertragbaren bzw. skalierbaren Teile der Anwendung als Templates erstellt, sodass bei Anpassungen für neue Kunden oder vergleichbare Prozesse die Arbeiten schneller abgeschlossen werden und auf den Erfahrungen aus dem Projekt aufbauen können.

Die ursprünglich angestrebte Arbeit mit Frameworks stellt sich als nicht zielführend heraus, da der Gleichheitsanteil nicht groß genug ist und die generische Abbildung einer großen Menge an flexiblen, zum Teil unbekannten Anforderungen, den Entwicklungsaufwand eines solchen Frameworks unverhältnismäßig erhöht.

# III. Ablauf des Vorhabens

## III.1 Beschreibung der Arbeitspaketinhalte, der Aufgaben- und Rollenverteilung

Die Projektlaufzeit wurde auf 36 Monate geplant und kostenneutral auf 42 Monate verlängert. Sieben Arbeitspakete (AP) mit fünf konkreten Meilensteinen strukturieren das Projekt. Jedes AP enthält eine detaillierte Tabelle mit Teilaufgaben, Spezifikationen, Zeitangaben und projektpartnerspezifischen Aufwänden. Die quartalsweise Gesamtübersicht der AP leitet die nachfolgenden Einzeltabellen ein.

**Gesamtübersicht der Arbeitspakete für das Projekt mit einer Dauer von 3,5 Projektjahren (PJ):**

| Arbeitspakete | | 1. PJ | | | | 2. PJ | | | | 3. PJ | | | | 4. PJ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *2021* | | *2022* | | | | *2023* | | | | *2024* | | | |
| | | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| **1** | Anforderungsanalyse und Konzeption | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| **2** | KI-Befähigung der Maschinen und Schnittstellenentwicklung | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| **3** | Entwicklung der Softwarearchitektur und virtuellen KI-Trainingsumgebung | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| **4** | Lösungsstrategieentwicklung und Fehlermanagement in Anwendungsfällen | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| **5** | Weiterentwicklung des Systems, kontinuierlicher Betrieb und Automatisierung | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| **6** | Verwertungs- und Funktionsoptimierung sowie Projektabschluss | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ |
| **7** | Projektmanagement und projektübergreifende Zusammenarbeit | | | | | | | | | | | | | | |
| | **Meilensteine** | | ◆*1* | | ◆*2* | | | | ◆*3* | | | | ◆*4* | | ◆*5* |

**AP 1 - Anforderungsanalyse und Konzeptphase (01.07.2021 – 31.12.2021; 6 Monate)**

| | | |
|---|---|---|
| **Zielsetzung:** | Das erste Arbeitspaket entwickelt Umsetzungskonzepte für alle Anwendungsfälle und die Softwarearchitektur. Es erfasst die resultierenden Anforderungen zentral für agile Anpassungen und erarbeitet abgestufte Testszenarien zur Evaluation. | |
| **Mitarbeit:** | alle Projektpartner | |
| **Arbeitspaket 1:** | In der Analysephase erarbeitet das Projektteam für die drei Anwendungsfälle (SMB, KAMAX, IP) Umsetzungskonzepte für das automatisierte Fehlermanagement. Ein gemeinsamer Workshop definiert die Entwicklungsschwerpunkte und erstellt das initiale Product Backlog (PB) als Anforderungskatalog.<br><br>Das PB dokumentiert die Anforderungen für den digitalen Zwilling, die virtuelle Fehlerbilderzeugung, die Fehlermanagement-Applikation und die KI-Algorithmen. Die Anwendungsfälle gewichten diese Anforderungen und leiten daraus Entwicklungsroadmaps für die Befähiger ab. Definierte Testszenarien und Bewertungskriterien ermöglichen die kontinuierliche Evaluation durch Proof of Concepts (PoC).<br><br>Eine Gesamtarchitektur koordiniert das Zusammenspiel der Applikationen und definiert Schnittstellen sowie Entwicklungsrandbedingungen. | |
| **Durchgeführte Arbeiten und wichtige Investitionen innerhalb des AP 1** | IWU | Im Bereich der Anforderungsanalyse übernahm das IWU die Vorbereitung des Product Backlogs sowie die Organisation des Anforderungsanalyse-Workshops. Ein besonderer Fokus lag auf der Definition der Hardware- und Datenschnittstellenanforderungen für den maschinenahen Einsatz der KI-Algorithmen. Bei der Konzeption der Anwendungsfälle unterstützte das IWU die Entwicklung der Anwendungsszenarien und die Ausarbeitung der entsprechenden Entwicklungsroadmaps.<br><br>Die Konzeption der Softwarearchitektur umfasste die Entwicklung der Gesamtarchitektur und die Definition der Schnittstellen. Durch die Organisation von Softwareentwickler-Workshops wurden gemeinsame Standards, Frameworks und eine einheitliche Laufzeitumgebung festgelegt. Daraus wurden die Entwicklungsroadmap abgeleitet und kritische Abhängigkeiten identifiziert. In Zusammenarbeit mit den Anwendungsfällen und dem Softwareteam wurden Testszenarien und zugehörige Bewertungskriterien definiert.<br><br>Insgesamt wurden drei Testszenarien mit ansteigender Komplexität definiert:<br>• Szenario 1: Basisfunktionalitäten der Fehlerdiagnose, angewandt auf einzelne Maschine<br>• Szenario 2: Fehlerdiagnose mit kausalem Graph für bekannte Fehler, angewandt auf mehrere Maschinen<br>• Szenario 3: Fehlerdiagnose mit kausalem Graph für unbekannte Fehler, angewandt auf ganze Produktionslinie |
| | SMB | Sämtliche im Rahmen von Arbeitspaket 1 zu erfüllenden Aufgaben wurden erledigt. Dies kann anhand der aufgeführten Tätigkeiten und der damit verbundenen Ergebnisse nachgewiesen werden.<br><br>• Es wurden typische Fehlerzustände gesammelt, anhand diverser Kriterien klassifiziert und in einem Fehlerkatalog |

| | | |
|---|---|---|
| | | dokumentiert.<br><br>• Der Anwendungsfall „KI-befähigte Werkzeugmaschinen mit integriertem Fehlermanagement“ wurde konzipiert. Das Konzept beinhaltet die Definition der Problemstellung, sowie die Ergebnisse der folgend aufgeführten Tätigkeiten:<br><br>○ Eine Unterteilung der Fehlerfälle in drei Prioritätsklassen in Abhängigkeit der Lösungsmöglichkeiten wurde erarbeitet.<br>○ In enger Zusammenarbeit mit ISG, KAMAX und dem Fraunhofer Institut wurden die Softwarefunktionalitäten und Schnittstellen für die Fehlermanagementapplikation ausgearbeitet.<br>○ Es wurden drei Komplexitätsstufen definiert, die festlegen, was in dem Simulationsprogramm ISG-Virtuos und der KI-Trainingsumgebung modelliert und simuliert werden soll.<br>○ Drei Testszenarien inkl. der Kriterien für eine quantitative Bewertung der Ergebnisse wurden erstellt.<br>○ Anhand der zuvor erarbeiteten Ergebnisse wurde eine Entwicklungsroadmap ausgearbeitet. |
| | KAMAX | Anforderungserhebung:<br>• Dokumentation des Ist-Zustands und Erstellung eines Katalogs typischer Fehlersituationen<br>• Spezifikation für das Fehlerverwaltungssystem (Schnittstellendesign, Funktionsumfang und Benutzerfreundlichkeit)<br>• Ermittlung notwendiger Hardware-Komponenten (Sensorik zur Störungserkennung, KI-Edge-Computing)<br>Anwendungsspezifikation:<br>• Entwicklung des Anwendungsszenarios "Integriertes Fehlermanagement für komplexe Kleinserienproduktion"<br>• Strukturierung des Entwicklungspfads und Identifizierung kritischer Abhängigkeiten<br>Evaluationsdesign:<br>• Festlegung von Prüfszenarien mit Bewertungsparametern zur quantitativen Ergebnisbewertung (angepasst an Entwicklungsphasen)<br>• Gemeinsam mit IWU: Entwicklung von Kausalitätsmodellen für Testszenarien auf Basis von Experteneinschätzungen |
| | IP | • Teilnahme an mehreren Online-Arbeitstreffen mit verschiedenen Projektpartnern<br>• Teilnahme an mehrtägigem Arbeitstreffen beim Projektpartner Kamax<br>• Erhebung des Ist-Standes der Demonstrator-Maschine (Software, Sensorik, Aktorik)<br>• Erstellung eines Fehlerkataloges mit:<br>○ Fehlerursachen<br>○ Detektionsmöglichkeiten<br>○ Reaktionsmöglichkeiten<br>○ Kausalen Zusammenhängen zwischen verschiedenen Fehlern<br>• Konzeption von Anwendungsfällen durch Auswahl repräsentativer Fehler<br>• Erstellung einer optimierten Entwicklungsroadmap mit minimierten kritischen Abhängigkeiten<br>• Definition von drei Testszenarien zur quantitativen Bewertung der Forschungsergebnisse |

| | | |
|---|---|---|
| | | • Definition von Schnittstellen zwischen Maschinen- und IT-Komponenten für die Übertragung von Fehlerdetails |
| | ISG | Bedarfsermittlung:<br>• Vorbereitende Workshops zur Erfassung der Anforderungen<br>• Untersuchung der erforderlichen Modelldetaillierung (Funktionsbereich) zur Abbildung typischer Fehlerszenarien<br>• Evaluierung der benötigten Modellierungstiefe für Kontrollschnittstellen<br>Architekturplanung:<br>• Entwurf von Schnittstellen für Datenspeicherung und Training-Dataset-Export<br>• Konzipierung von Remote-APIs für den Zugriff auf Digital Twins zur automatisierten Testfallgenerierung mit Python<br>• Erstellung eines Entwicklungsfahrplans für die Simulationsplattform Virtuos<br>Testfallspezifikation und Evaluationsrahmen:<br>• Entwicklung von Testszenarien und Testumgebung mit Bewertungsmetriken zur Evaluation der anderen Projektkomponenten<br>• Festlegung von Bewertungsparametern zur Evaluation des eigenen Teilprojekts |
| | SEITEC | Alle im Rahmen von Arbeitspaket 1 zu erfüllenden Aufgaben wurden erledigt. Dies kann anhand der aufgeführten Tätigkeiten und der damit verbundenen Ergebnisse nachgewiesen werden.<br><br>1. Entwicklung einer Softwarearchitektur: Die Architektur für die KausaLAssist Fehlermanagement-Lösung wurde gemeinschaftlich im Software-Team entworfen. Sie ermöglicht eine flexible Anwendung auf die geschaffene Unterteilung der Fehlerfälle in drei Prioritätsklassen.<br>2. Konzeptionelle Entwicklung von Komponenten: Für die Umsetzung der Architektur wurden folgende Teilschritte konzeptioniert:<br>○ Konzeptionelle Entwicklung des „Smart Data Provider“ (SDP) zur Anbindung an den Event-Bus<br>○ Schaffung von mehreren OPC-UA Client/Server-Komponenten in 2-stufiger Ausführung<br>○ Erforschung und Konzeption eines selektiven Datenspeichers mit Rule Engine<br>○ Mitwirkung an der Konzeption von „Central Services“ - Modulen im Software-Team<br>3. Ableiten von Testszenarien: Basierend auf den Anwendungsfällen und der Softwarearchitektur wurden drei Testszenarien zur Bewertung abgeleitet. |
| | queo | Die Anforderungsanalyse und wichtige Fragen zur Softwarearchitektur wurden im Laufe des AP1 durchgeführt und für die weiteren Arbeitspakete entsprechend dokumentiert. Die Definition der Testszenarien wurde mit allen Beteiligten abgestimmt und immer wieder auf Testbarkeit mit der zu entstehenden Software abgeglichen.<br>▪ Anwendungsfallspezifische Anforderungsanalyse: Moderierte Aufnahme von Anforderungen der Anwendungsfälle hinsichtlich der Mensch-Maschine-Interaktion<br>▪ Konzeption der Gesamtarchitektur, Definition von Schnittstellen<br>▪ Softwareentwickler-Workshops für gemeinsame Standards, Frameworks und Laufzeitumgebung<br>▪ Ableiten der Entwicklungsroadmap für Fehlermanagement-Applikation |

| | | |
|---|---|---|
| | | ▪ Definition der Testszenarien und Bewertungskriterien |
| | InfAI | Nachfolgend *lt. Antrag* (für IST s. separat eingereichten Bericht von infAI):<br>*Anforderungsanalyse*<br>*Konzeption der Softwarearchitektur*<br>*Definition der Testszenarien und Bewertungskriterien:*<br>*Mit Anwendungsfällen und Softwareteam: Definition von Testszenarien inklusive Bewertungskriterien* |
| **Zusammenfassung Ergebnisse** | Das Product Backlog (PB) [Meilenstein ◆**1**] fungiert als digitaler Anforderungskatalog. Es erfasst sämtliche funktionale und nicht-funktionale Anforderungen an die Softwarearchitektur und dient als zentrale Referenz für die Entwicklung mit kontinuierlicher Aktualisierung.<br><br>Ein projektübergreifender Fehlerkatalog dokumentiert und priorisiert typische Fehlerzustände aller Anwendungsfälle.<br>Die Umsetzungskonzepte [Meilenstein ◆**1**] definieren den Entwicklungspfad vom Ist- zum Soll-Stand, inklusive Detailplanung für das erste Projektjahr mit kritischen Abhängigkeiten. Sie decken alle Anwendungsfälle, die Softwarearchitektur und KI-Trainingsumgebung ab.<br><br>Die Evaluationskonzepte [Meilenstein ◆**1**] etablieren pro Teilprojekt mindestens drei komplexitätsgestufte Testszenarien mit je drei qualitätsgestuften Bewertungskriterien. Diese bilden die Grundlage für spätere Evaluationen in AP 4 & AP 6. | |

**AP 2 - Schnittstellenentwicklung und KI-Befähigung der Maschinen (01.10.2021 – 31.05.2022; 8 Monate)**

| | | |
|---|---|---|
| **Zielsetzung:** | Ziel des AP 2 besteht in der Befähigung der Anwendungsfälle zum maschinennahen Einsatz von KI-Methoden.<br>Dies umfasst vor allem die Hardwareaufrüstung an den Maschinen, die Entwicklung und initialen Testung von Schnittstellen sowie dem Aufbau von virtuellen Abbildern der Maschinen zum Anlernen der KI-Modelle. | |
| **Mitarbeit:** | Anwendungsfälle: SMB, KAMAX, IP; Befähiger: queo, IWU, InfAI | |
| **Arbeitspaket 2:** | Ein gemeinsames Framework für maschinennahe Industrieapplikationen wird ausgewählt oder weiterentwickelt, um die Kommunikation zu standardisieren und die Softwareverwertung zu optimieren. Dabei wird besonderer Wert auf die Kompatibilität mit Industriestandards wie OPC UA gelegt.<br><br>Basierend auf den Anforderungen aus AP 1 werden robuste Schnittstellen für die Mensch-Maschine-Interaktion und den Datenaustausch entwickelt. Diese orientieren sich an Industriestandards und werden für die KI-basierte Datenanalyse angepasst.<br><br>Die Maschinen werden mit Hardware für automatisierte Störungserkennung, Datenverarbeitung und KI-Algorithmen ausgestattet. Zusätzlich werden digitale Zwillinge der Maschinen mittels ISG-virtuos erstellt, die der virtuellen Fehlerfallsimulation dienen. | |
| **Durchgeführte Arbeiten und wichtige Investitionen innerhalb des AP 2** | IWU | Das IWU trug maßgeblich zur Hardwareaufrüstung und Schnittstellenentwicklung für die KI-Integration bei. Nach einer Anpassung der Projektplanung erfolgte die Entwicklung zunächst plattformunabhängig und wurde auf den Rechnern der Softwarepartner getestet.<br><br>Ein zentraler Erfolg war die Entwicklung und Implementierung von fünf OPC UA Informationsmodellen für die Maschinen im KAMAX-Anwendungsfall. Diese Modelle gewährleisten die standardisierte Kommunikation zwischen Maschinenkomponenten und KI-Systemen.<br><br>Das Institut realisierte erfolgreich die Integration der Graphen und KI-Algorithmen in die Softwarearchitektur und führte Kommunikationstests zwischen den Softwarekomponenten durch. |
| | SMB | Sämtliche im Rahmen von Arbeitspaket 2 zu erfüllenden Aufgaben wurden erledigt. Dies kann anhand der aufgeführten Tätigkeiten und der damit verbundenen Ergebnisse nachgewiesen werden.<br>• Eine Maschinennahe Laufzeitumgebung für die Softwarekomponenten wurde in Form von virtuellen Maschinen (VM) bei KAMAX eingerichtet.<br>• Die VM wurde mit den für das Fehlermanagement benötigten Datenquellen an den SMB Maschinen und dem KausaLAssist Softwarestack vernetzt.<br>• An drei SMB-Werkzeugmaschinen bei KAMAX wurden OPC UA Server eingerichtet und in Betrieb genommen. Diese OPC UA Server liefern in CNC und SPS programmierte Fehler über die OPC UA Alarms & Conditions Schnittstelle der SINUMERIK 840D.<br>• Das IWU wurde beim Abbilden von Domänenwissen und Datenquellen im Kausalen Graphen durch die Einordnung |

| | | |
|---|---|---|
| | | von einzelnen Fehlern in definierte Fehlerkategorien unterstützt.<br>• Der Fehlerkatalog aus AP1 wurde um mögliche Ursachen, Ausfallzeiten und passende Lösungsstrategien erweitert, um ein strukturiertes Fehlermanagement zu ermöglichen.<br>• Für die Erstvaluation der einzelnen Softwarekomponenten auf Basis der in AP1 definierten Testszenarien wurde dem Machine-Control-Panel über einen Taster eine Funktion zum Simulieren eines anliegenden Fehlers hinzugefügt.<br>• Die SMB-Werkzeugmaschine „Ringdrehmaschine“ wurden gemeinsam mit der Fa. ISG virtualisiert und mit einer Steuerung von SEITEC verknüpft. Wesentliche Maschinenfunktionalitäten konnten erfolgreich virtualisiert werden, während die Simulation der Messfähigkeiten der Maschine durch Hardware und Softwareergänzungen im Frühjahr 2023 erreicht werden konnte. |
| | KAMAX | Hardware-Modernisierung für KI-Integration:<br>• Installation von Edge-Computing-Hardware für lokale Datenverarbeitung und KI-Ausführung (KI-Edge-IPC)<br>• Integration von Zusatzsensorik für automatisierte Fehlererkennung, Bereitstellung von Lösungsanleitungen und (teil-)automatisierte Implementierung von Korrekturmaßnahmen<br>Digitale Zwillingsmodellierung für Einzelkomponenten:<br>• Modellierung ergänzender Systemkomponenten (zusätzlich zu SMB-Anlagen) in ISG Virtuos zur virtuellen Simulation von Fehlerszenarien in der Prozesskette (in Zusammenarbeit mit SMB und ISG)<br>Schnittstellenkonzeption und Validierung:<br>• Kollaborative Spezifikation der Kommunikationsschnittstellen zwischen Maschinenkomponenten und IT-Systemen |
| | IP | • Erweiterung der Robo-Operator-Software um Protokollierungsfunktionen für Störmeldungen<br>• Entwicklung zusätzlicher Funktionen für die 3D-Kamera zur verbesserten Störungserfassung (Musterkennung in Tiefenbildern, Freiraumüberprüfung, Optimierung von Diagnosedaten, Verbesserung Bildqualität)<br>• Ergänzung von Hardware-Baugruppen zur Fehlerbehandlung ()<br>  ○ Abblasdüse am Roboterarm für Reinigungsaufgaben<br>  ○ Universelle Aufnahme für nicht automatisch verarbeitbare Werkstücke<br>  ○ Konzept für variable Hilfsmodule für den Werkstückgreifer<br>• Aktualisierung des Fehlerkatalogs aus AP1<br>• Erweiterung der Softwarearchitektur für automatisierte Reaktionen auf Fehler<br>• Entwicklung und Umsetzung mehrerer Lösungsstrategien für häufige Fehler |
| | ISG | Erstellen des digitalen Zwillings der Schuster Ringdrehmaschine unter Berücksichtigung der definierten Anwendungsfälle:<br>• 4-tägiger Workshop für Modellierung in ISG-Virtuos mit Anwendungspartnern<br>• Modellierung der Physik und der Feldbuskommunikation der Teilkomponenten in ISG-Virtuos<br>• Testen des Materialflusses für ein definiertes Werkstück<br>• Anbindung der Steuerung als Hardware-in-the-loop (HIL)-Simulation<br>• Teilweise virtuelle Inbetriebnahme des digitalen Zwillings |

| | | |
|---|---|---|
| | | Schnittstellenentwicklung und Test:<br>• Entwicklung von Schnittstellen für die Speicherung und den Export von Trainingsdatensätzen<br>• Erweiterung Co-Simulationsschnittstellen<br>• Entwicklung der Remote-Fernsteuerung der Simulation mit Python |
| | SEITEC | SEITEC unterstützte bei der Identifikation und Evaluation geeigneter Hardwarekomponenten für die KI-Befähigung der Maschinen, einschließlich der Konfiguration und Integration von Sensoren, Aktuatoren und Kommunikationsmodulen. Alle Softwaremodule laufen Container/Docker-basiert auf einer von KAMAX bereitgestellten Server-Infrastruktur. Durch den ausschließlichen Einsatz dieser Container-Technologien (Laufzeitumgebungs-unabhängig) beim Ausrollen der Softwaremodule, ist der Einsatz und Betrieb dieser auf späteren Cloud-/Edge-Infrastrukturen ohne aufwändige Anpassungen möglich. Dedizierte Edge-Devices wären beispielsweise notwendig, wenn die Server-Infrastruktur keinen Zugriff auf das Maschinennetzwerk besitzt. Dies war im Anwendungsfall KAMAX/SMB allerdings gegeben.<br><br>Weitere Tätigkeiten, die SEITEC im Rahmen dieses APs erfüllte:<br>• Mitwirkung bei der Festlegung eines gemeinsamen Entwicklungsframeworks und Unterstützung des Entwickler-Onboardings, um eine effiziente Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Teams zu ermöglichen.<br>• Leitung der Schnittstellenentwicklung zwischen Maschinen und IT-Systemen sowie Umsetzung und Erweiterung von Industriestandards wie OPC-UA für den Einsatz in der maschinellen Datenanalyse und KI.<br>• Entwicklung eines Proof-of-Concept (PoC) zur Datenbereitstellung an KI-Algorithmen und weitere Softwarekomponenten innerhalb der Softwarearchitektur. |
| | queo | Integrationsplanung und Validierung:<br>• Definition eines einheitlichen Entwicklungsrahmens und Einarbeitung der Entwickler<br>• Koordination der Schnittstellenentwicklung (IT ↔ IT) und Schnittstellenerprobung durch Proof of Concept<br>• Gestaltung von Prototypen zur Bewertung der Benutzerinteraktion mit dem Fehlerverwaltungssystem |
| | InfAI | Nachfolgend *lt. Antrag* (für IST s. separat eingereichten Bericht von infAI):<br>*Schnittstellenentwicklung für Anbindung von KI-Algorithmen und Lösungsstrategien an Softwarearchitektur und Test der Kommunikation zu anderen Softwarekomponenten* |
| **Zusammenfassung Ergebnisse** | | • Im Rahmen des Projekts wurde eine einheitliche Laufzeitumgebung mit einem gemeinsamen Entwicklungsframework für das KI-Assistenzsystem implementiert, das den Informationsaustausch über definierte Schnittstellen ermöglicht.<br>• Die Maschinen wurden im Rahmen des Meilensteins ◆**2** durch industrielle PCs und zusätzliche Sensorik für den KI-Einsatz aufgerüstet, um maschinennahe KI-Methoden auszuführen und relevante Daten zu erfassen.<br>• Die IT-zu-IT sowie IT-zu-OT Schnittstellen wurden als Proof of Concept umgesetzt und getestet, wobei alle für AP3 notwendigen Schnittstellen bereits implementiert sind.<br>• Abschließend wurden virtuelle Maschinenabbilder inklusive Steuerung für alle Anwendungsfälle erstellt, die als Basis für die Generierung von KI-Trainingsdaten in AP3 dienen. |

**AP 3 - Entwicklung der Softwarearchitektur und virtuellen KI-Trainingsumgebung (01.02.2022 – 31.07.2023; 12M + 6M Verlängerung)**

| | | |
|---|---|---|
| **Zielsetzung:** | Ziel des AP 3 ist die Weiterentwicklung der Softwarearchitektur bis zur Einsatzreife von Prototypen in allen Anwendungsfällen. Dies umfasst die Entwicklung von KI-Methoden für die Kausalitäts- und Störungsdetektion sowie die Implementierung einer virtuellen Trainingsumgebung für diese KI-Systeme. | |
| **Mitarbeit:** | InfAI, SEITEC, ISG | |
| **Arbeitspaket 3:** | Die Entwicklung der automatisierten Fehlermanagementlösung umfasst die Benutzeroberfläche, KI-Komponenten und deren Interaktion mit dem datengetriebenen digitalen Zwilling. Die Softwareentwicklung erfolgt agil und nutzerorientiert basierend auf dem Product Backlog. Durch regelmäßige Evaluationen mit Software-Mockups wird die Benutzerakzeptanz geprüft und neue Anforderungen werden identifiziert.<br><br>Die ISG-virtuos Software wird erweitert, um multiple virtuelle Maschineninstanzen parallel in Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulationen und im Zeitraffer auszuführen. Diese Simulationen generieren durch randomisierte Fehlerszenarien umfangreiche Trainingsdatensätze für die KI-Komponenten. Daraus werden erste kausale Maschinengraphen erstellt und in das Framework integriert.<br><br>Die Industrietauglichkeit wird durch regelmäßige virtuelle Tests sichergestellt. Zum Ende des AP 3 erfolgt das Deployment auf der maschinenahen Hardware aller Anwendungsfälle. Durch Praxistests werden die Entwicklungsroadmaps angepasst und die Hardware-Infrastruktur wird so eingerichtet, dass künftige Softwareaktualisierungen direkt an den Maschinen getestet werden können. | |
| **Durchgeführte Arbeiten und wichtige Investitionen innerhalb des AP 3** | IWU | Im AP3 konzentrierte sich das IWU auf die Entwicklung von KI-Algorithmen zur Kausalitätsdetektion aus Zeitreihen sowie die Implementierung der Softwarearchitektur. Eine umfangreiche Integrationsumgebung wurde im Fraunhofer GitLab für das kontinuierliche Testen der Komponenten-Kommunikation etabliert, wobei die Integration der Funktionalitäten über REST-APIs für das User-Interface erfolgte.<br><br>Aufgrund verzögerter Trainingsdaten aus dem digitalen Zwilling entwickelte das IWU einen synthetischen Datengenerator für kausale Graphen und Alarmdaten. Diese Alternative ermöglichte die erfolgreiche Entwicklung einer skalierenden KI-Methode, die für die KAMAX-Fertigungslinie einen kausalen Graphen mit über 300 Knoten erlernte. Die ursprünglich geplante Einbindung von Expertenfeedback in den Lernprozess wurde zugunsten der Entwicklung von Features zur Stillstandszeitenreduktion zurückgestellt. |
| | SMB | (Kontinuierlicher Austausch mit AP4) |
| | KAMAX | (Kontinuierlicher Austausch mit AP4) |
| | IP | (Kontinuierlicher Austausch mit AP4) |
| | ISG | Kontinuierliche Fortführung der virtuellen Inbetriebnahme:<br>• Testen weitere Prozessschritte der Schuster Ringdrehmaschine |

| | | |
|---|---|---|
| | | • Anpassungen im Simulationsmodell für fehlerfreien idealen Prozessablauf<br>Weiterentwicklung der HIL-Simulationen zur virtuellen KI-Trainingsumgebung:<br>• Entwicklung der Möglichkeit Multipler Instanzen (Echtzeit-Co-Simulation über mehrere Steuerungssysteme)<br>Anlernen und Verbesserung der KI-Algorithmen mittels virtueller Maschinen:<br>• Ausbau der Simulation für virtuelles Erzeugen von Trainingsdatensätzen der Einzelmaschinen für KI durch Nachbau typischer Fehlersituationen<br>Workshop mit Softwareteam zur Nutzung der Simulation als virtuelle KI-Trainingsumgebung und Softwarevalidierungsumgebung |
| | SEITEC | In diesem AP fokussierte sich SEITEC darauf, den datengetriebenen digitalen Zwilling weiter zu konzipieren und zu implementieren. Die Arbeiten bezogen sich hauptsächlich auf die Anbindung heterogener Datenquellen, vor allem die OPC-UA-Server der Maschinen und speicherprogrammierbaren Steuerungen. Die Verknüpfung von Datenquellen wurde später durch ReBOSA (einen aggregierenden OPC-UA-Server) realisiert. Dazu war es notwendig, ein Konzept für die Vernetzung von Datenquellen und die Zuordnung von Fehler- und Lösungsdatenbanken zu entwickeln.<br>Das eventbasierte Datensammeln für die KI-Algorithmen wurde durch den Prototyp (Kombination SEITEC Softwaremodule ReBOSA + SDP) eines datengetriebenen digitalen Zwillings realisiert, der die verwalteten Daten über REST-API zur Verfügung stellt.<br>Hierzu konnte Einrichtung und Inbetriebnahme der Softwarelösung bei den Projektpartnern SMB und KAMAX, einschließlich der Konfiguration der Schnittstellen und Datenbanken als erster Erfolg verbucht werden.<br>Dazu wurde die Software an die spezifischen Anforderungen und Bedürfnisse der Anwendungsfälle in der Praxis (SMB, KAMAX) angepasst. |
| | queo | Die Entwicklung der beiden zentralen Prototypen FMA Dashboard und FMA App wurde erfolgreich abgeschlossen und innerhalb des KausalAssist Stacks bereitgestellt. Dazu gehören auch die permanenten Anpassungen und Abstimmungen bzgl. der Schnittstellen zu den anderen Applikationen des Gesamtsystems.<br>FMA – App (Applikation für den Nutzer an der Maschine): Die FMA App zeigt den Zustand der Maschinen zum aktuellen Zeitpunkt an und informiert den Nutzer über neu gemeldete Fehler. Dabei gibt es eine Historie, so dass der Nutzer auch den Verlauf des Gesamtsystems bzw. einzelner Environments überblicken kann. Der Nutzer kann sich den Fehler und die verbundene Lösungsstrategie anzeigen lassen. Alle diese Informationen kommen aus der gemeinsamen Datenhaltung des KausalAssist Stacks. Der Nutzer kann die angezeigte Lösung abarbeiten und entsprechend dokumentieren. Weiterhin sind bestimmte Anforderungen an dieser Stelle für den Nutzer umgesetzt. Dazu gehören, dass neue Lösungen schnell angelegt werden können oder im Stressfall Fehler einfach schnell quittiert werden. Diese Fälle werden entsprechend markiert und dem Nutzer zur späteren Dokumentation in der Dashboard Applikation angezeigt.<br>Dashboard App (Verwaltung des Systems und der Fehlerfälle)<br>In dieser Applikation können Nutzer Fehlerzusammenhängen analysieren, Lösungsstrategien auf Wirksamkeit prüfen, diese anpassen bzw. aus den neuen Vorschlägen der Nutzer der FMA-App neue Strategien ableiten. Weiterhin wurde für die spätere Nutzung der Gesamtanwendung ein Konzept etabliert, bei dem das Wissen des Maschinenbedieners, dass nicht |

| | | |
|---|---|---|
| | | über automatisierte Fehler oder Sensorwerte erkannt werden kann auch in das System integriert werden. Dazu werden bestimmte Zustände vor einer Entscheidung zur Anzeige einer Lösungsstrategie vom Nutzer erfragt und Grenzen den Fehlerzustand weiter ein. |
| | InfAI | Nachfolgend *lt. Antrag* (für IST s. separat eingereichten Bericht von infAI):<br>*Entwicklung der KI-Störungsdetektion (Detektion von generischen Störungszuständen und Klassifizierung dieser)*<br>*Entwicklung der Softwarearchitektur und Fehlermanagementkomponenten:*<br>• *Integration der KI-Störungsdetektion in Architektur*<br>• *Entwicklung von REST-APIs zur Bereitstellung der Funktionalitäten an User-Interface*<br>*Anlernen und Verbesserung der KI-Algorithmen mittels virtueller Maschinen*<br>*Ersteinrichtung der Softwarearchitektur in allen Anwendungsfällen*<br>*Einrichtung der aktuellen Entwicklungsstufe der Softwarelösung in Anwendungsfällen* |
| **Zusammenfassung Ergebnisse** | Im AP 3 wurden mehrere zentrale Projektergebnisse erreicht. Eine wesentliche Entwicklung ist die Software-Integrationsumgebung, die eine virtuelle Plattform bereitstellt, in der die aktuellen Versionen aller Softwarekomponenten der Partner zu einer gemeinsamen, kontinuierlich testbaren Architektur integriert werden.<br><br>Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Entwicklung der virtuellen KI-Trainingsumgebung. Diese nutzt erweiterte HIL-Simulationen für eine parallele und realistische Generierung von KI-Trainingsdaten an virtuellen Maschinen. Im Rahmen von Meilenstein ◆**3** wurden damit umfangreiche, realistische Fehlerdatensätze der Anwendungsfälle für das Training der KI-Komponenten erzeugt.<br><br>Ebenfalls als Teil von Meilenstein ◆**3** wurden skriptbasierte Prototypen der KI-Algorithmen entwickelt. Diese ermöglichen die automatische Störungserkennung sowie die Ableitung von Kausalitäten aus den Anlagendaten.<br><br>Als finaler Erfolg des Meilensteins ◆**3** wurde die erste Entwicklungsstufe der integrierten Softwarelösung in allen drei Anwendungsfällen implementiert. Diese Installation ermöglicht nun Tests im Produktionsumfeld, kontinuierliches Feedback und selbstständige Aktualisierungen durch die Anwendungspartner. | |

**AP 4 - Lösungsstrategieentwicklung und Fehlermanagement in den Anwendungsfällen (01.04.2022 – 31.07.2023; 10 M + 5M Verlängerung)**

| | | |
|---|---|---|
| **Zielsetzung:** | Zielstellung des Arbeitspaketes ist das kontinuierliche Ausrollen, Evaluieren und Zuarbeiten für eine anwenderzentrierte Softwareentwicklung in AP 3. | |
| **Mitarbeit:** | InfAI, IWU, SEITEC | |
| **Arbeitspaket 4:** | In AP 4 wurden für die betrachteten Anwendungsfälle die Hard- und Softwarekomponenten zur Erfassung von Sensor- und Betriebsdaten vernetzt und eingerichtet.<br>Dazu gehörte die maschinennahe Softwareinfrastruktur zur Speicherung der erfassten Daten. Parallel wurden Methoden zur expertengestützten Erzeugung von kausalen Graphen entwickelt, um nicht vollautomatisch erfassbares Wissen abzubilden.<br>Hierbei wurde sich vor allem auf eine schnelle Eingabe der Informationen sowie die fortlaufende Erweiterung der Wissensbasis parallel zum Produktionsbetrieb konzentriert. Um automatisiert Möglichkeiten zur Fehlerbehebung vorzuschlagen, wurden Methoden zur Ursachenanalyse und strukturierten Abbildung von Fehlern in Kombination mit entsprechenden Lösungsstrategien entwickelt.<br>Abschließend wurden im Betrieb Integrationstests der Softwarekomponenten aus AP 3, basierend auf den in AP 1 definierten einfachen Testszenarien, durchgeführt, um eine prinzipielle Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.<br>Als Ergebnis wurden zum Ende von AP 4 folgender Zwischenstand in der Evaluation erreicht:<br>• Zwischenevaluation der Anforderungen in Testszenarien:<br>○ **7**/10 Testszenario Stufe 1<br>○ **5**/10 Testszenario Stufe 2<br>○ **2**/10 Testszenario Stufe 3 | |
| **Durchgeführte Arbeiten und wichtige Investitionen innerhalb des AP 4** | IWU | Für die expertengestützte Ursachenanalyse und Lösungsstrategieentwicklung wurde für eine ausgewählte Maschine von SMB (vertikale Drehmaschine), die im KAMAX Anwendungsfall produziert, ein kausalen aus Domänenwissen manuell Graph strukturiert. Für die Bereitstellung umfangreicher Lösungen für den Anwendungsfall, wurden existierende Dokumentationen zu Lösungen unter Nutzung von Large Language Modellen (LLM) aufgearbeitet und in die Datenbanken überführt. So konnten über 2000 Lösungen für ca. 1200 Fehlerzustände zugänglich gemacht werden. Das LLM wurde hierfür lokal am IWU gehosted und via geskriptete Prompts von den existierenden Dokumentationen in die durch die Datenbank-API festgelegte JSON Struktur maschinell überführt und anschließend in der Datenbank veröffentlicht. |
| | SMB | • Die SMB-Werkzeugmaschine „Ringdrehmaschine“ bei Kamax wurde gemeinsam mit der Fa. ISG virtualisiert. Der digitale Zwilling wurde erweitert und weiter optimiert, um wesentliche Maschinenfunktionalitäten und NC-Programme automatisiert durchlaufen zu lassen damit Fehlersituationen simuliert und Trainingsdaten für den kausalen Graphen generiert werden können. |

| | | |
|---|---|---|
| | | • Der KausaLAssist Stack wurde bei Schuster Maschinenbau (SMB) ausgerollt und damit ein weiterer Steuerungstyp (SINUMERIK One) integriert.<br>• Gemeinsam mit den Projektpartner wurde an der Lösungsstrategieentwicklung und Fehlermanagement in den jeweiligen Anwendungsfällen unterstützt, sowie der Softwarestack evaluiert. |
| | KAMAX | Infrastrukturbereitstellung für Datenerfassung:<br>• Konfiguration der maschinennahen Betriebsumgebung für Softwarekomponenten (KI-Edge-IPC)<br>• Verbindung des KI-Edge-IPC mit relevanten Datenquellen und Implementierung der Anlagendatenhistorisierung<br>Sensorische Systemintegration für Fehlerdiagnose:<br>• Integration der in AP 2 installierten Sensorik in die Steuerungsarchitektur und Vernetzung mit KI-Edge-IPC<br>• Datenauswertung zur Identifikation und Klassifizierung zusätzlicher Störungsmuster<br>Wissensbasierte Fehleranalyse und Lösungskonzeption:<br>• Zusammenarbeit mit IWU: Modellierung von Fachexpertise und Datenquellen in Kausalitätsmodellen<br>• Methodisches Störungsmanagement und Erweiterung des AP 1-Fehlerkatalogs um Ursachenanalyse, Ausfallzeitschätzung und Lösungsansätze<br>Komponentenerprobung im operativen Umfeld:<br>• Initiale Bewertung der Softwaremodule anhand der in AP 1 spezifizierten Basisszenarien<br>• Anpassung der Systemanforderungen für die Fehlermanagementlösung und gegebenenfalls Überarbeitung der Testszenarien |
| | IP | • Schaffung einer Funktion zum Erkennen von Hindernissen beim Ablegen von Werkstücken<br>• Implementierung von taktilem Fahren zur Zielposition mit Reaktionsempfehlungen<br>• Erweiterung der Fehlerdetektions-, Fehlermeldungs- und Fehlerbehebungsfunktionen im Robotergreifer<br>• Ergänzung von Funktionen zur Fehlerdetektion und -behebung bei Werkzeugmaschinen-Spannmitteln<br>• Optimierung der Softwarefunktion zur Auswertung von Störungssignalen auf dem Bedienfeld der Werkzeugmaschine<br>• Entwicklung einer Softwarefunktion zur Erkennung von Fehlern aufgrund nicht eingehaltener Reaktionszeiten<br>• Erweiterung der Software zur Erfassung von Betriebsstunden und Zykluszählern für abnutzungsabhängige Fehlerreaktionen<br>• Vollständige Überarbeitung des Systems zur Detektion, Meldung und Protokollierung von Störungen:<br>  ○ Vereinheitlichung der Ausgabeformate<br>  ○ Schaffung einer Schnittstelle für die Auswertung durch Partnersysteme<br>  ○ Präzisere Unterscheidung zwischen Störungen und Informationsmeldungen<br>  ○ Vergrößerung des Protokolls für Langzeitanalysen |
| | ISG | Kontinuierliche Fortführung der virtuellen Inbetriebnahme:<br>• Etablierung einer realen Verbindung in den schnellen NC-Eingang für den Messtaster, um Taktzeitüberschreitungen zu vermeiden |

| | | |
|---|---|---|
| | | • Entwicklung einer Messtaster-Logik für idealen Prozessablauf der Ringdrehmaschine |
| | SEITEC | Die Konzeption und Implementierung einer Softwarekomponente zur Erfassung der Sensordaten sowie der Zuordnung zu Fehlerereignissen, um eine Historisierung von Anlagendaten als Grundlage für den datengetriebenen digitalen Zwilling in allen Anwendungsfällen zu ermöglichen, wurde durch Implementierung des aggregierenden OPC-UA-Servers „ReBOSA“ geschaffen. Die Sensordaten sind als Variablen im OPC-UA-Informationsmodell des entsprechenden Servers hinterlegt und können somit von ReBOSA erfasst und historisiert werden. Dazu werden alle Variablen in einem internen Ringpuffer für 10 min (beliebig konfigurierbar) gespeichert. Dieser Ringpuffer wird bei Auftreten eines schweren Fehlers dauerhaft in einer Datenbank gespeichert. Anschließend können diese Daten per REST-API abgefragt werden. Somit kann der Zustand der Maschine vor jedem Fehlerfall exportiert und anschließend menschlich oder durch KI analysiert werden. |
| | queo | (Kontinuierlicher Austausch und Anforderungsanpassung für anwenderzentrierte Entwicklung in AP4) |
| | InfAI | Nachfolgend *lt. Antrag* (für IST s. separat eingereichten Bericht von infAI):<br>*Wissenschaftliche Unterstützung der Lösungsstrategieentwicklung*<br>*Konzeption der formalen Repräsentation von Lösungsstrategien* |
| **Zusammenfassung Ergebnisse** | | • Befähigung der Anwendungsfälle zum Erfassen der notwendigen Störungen und zum maschinennahen Ausführen des KausaLAssist Stacks<br>• Fehler-, Ursachen- und Lösungskatalog für jeden Anwendungsfall<br>• kausale Graphen in Anwendungsfällen, abgeleitet aus Expertenwissen (Meilenstein ◆**3**)<br>• Erstevaluation der individuellen Softwarekomponenten-Prototypen anhand der in AP 1 definierten einfachen Testszenarien |

**AP 5 - Weiterentwicklung des Systems, kontinuierlicher Betrieb und Automatisierung der Fehlerbehebung (01.08.2023 – 31.07.2024; 12 Monate)**

| | |
|---|---|
| **Zielsetzung:** | Zielstellung des AP 5 bestand in der gemeinsamen Weiterentwicklung der in AP 3 und AP 4 erarbeiteten Softwarearchitektur und KI-Infrastruktur zu einem Prototyp des selbstlernenden Fehlermanagementsystems. Am Ende des AP 5 sollten Prototypen für alle KI-Komponenten, die gesamte Softwarearchitektur und die teilautomatisierte Fehlerbehebung in allen Anwendungsfällen im Einsatz sein. |
| **Mitarbeit:** | alle Projektpartner |
| **Arbeitspaket 5:** | In AP 5 fand der zweite, ganzheitliche Entwicklungsabschnitt zur Fehlermanagementlösung statt. In enger Zusammenarbeit der Befähiger mit den Anwendern wurden die in AP 3 entwickelten und initial eingerichteten Softwarekomponenten zu einer Architektur gemeinsam mit der in AP 4 entwickelten KI-Infrastruktur weiterentwickelt.<br><br>Basierend auf der in AP 4 durchgeführten Erstevaluation der individuellen Softwarekomponenten wurde der weitere Entwicklungsbedarf identifiziert und die Softwarelösung für den Einsatz in einer komplexen qualifiziert. Inkrementell verbesserte Zwischenergebnisse der Softwarelösung wurden fortlaufend bei den Anwendern ausgerollt und agil neue Anforderungen definiert.<br><br>Die kontinuierliche Datenaufnahme wurde in den Anwendungsfällen validiert. Ebenso sollte die virtuelle Abbildung der Maschinen auf die reale Prozesskette erweitert und die HIL-Simulation genutzt, um einen Graphen für die gesamte Prozesskette zu erlernen und die KI-Komponenten auf Störungen auf Maschinenebene sowie auf Prozessleitebene vorzubereiten.<br><br>Die neu gewonnenen komplexeren Datensätze der virtuellen Maschinen und die im laufenden Betrieb akquirierten Daten sollten für die Erprobung des kontinuierlichen Selbstlernens der KI-Komponenten genutzt und das Algorithmenportfolio um die Lösungsstrategieempfehlung und die graphbasierten Ursachenanalyse erweitert. Für die Evaluation der KI-Algorithmen sollte die HIL-Simulation zur virtuellen KI-Inbetriebnahme weiterentwickelt und Benchmarks für die quantitative Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Algorithmen in der virtuellen Umgebung durchgeführt werden.<br><br>Ein weiteres Ziel bestand in der weiteren Automatisierung und Integrations des Fehlermanagements in den Anwendungsfällen. Dies umfasste vor allem die Automatisierung der Störungsdetektion und -klassifikation, der Lösungsstrategieempfehlung sowie der (Teil-)Automatisierung der Fehlerbehebung durch eine geeignete Mensch-Maschine-Kooperation. |
| **Durchgeführte Arbeiten und wichtige Investitionen innerhalb des AP 5** | IWU Vom Fraunhofer IWU wurde ein KI-Algorithmus zur Detektion von Kausalität aus Zeitreihen auch komplexere, verketteter Prozesse entwickelt. Die Methode „SCALE“ zeichnet sich dadurch aus, dass nun auch für eine große Anzahl von Variablen kausale Graphen effizient erlernt, werden können. Expertenwissen kann einfach eingebracht werden, indem z.B. das Layout der Produktionslinie übergeben wird. Für den KAMAX Anwendungsfall konnte so ein kausaler Graph in wenigen Stunden erlernt werden.<br><br>Auf Basis der im digitalen Zwilling generierten Ursache→Fehler Datensätze wurde eine auf Bayes-Netzen basierende Ursachenanlyse evaluiert. Zum Abschluss des Projekts ist das grundlegene Konzept evaluiert und eine Verbesserung der Ursachenprognosegenauigkeit konnte in Beispielen gezeigt werden.<br><br>Ein großer Fokus lag in der Weiterentwicklung der Softwarearchitektur für eine bessere Anwendbarkeit und gesteigerten Effekt in Form von Stillstandszeitreduktion bei den Anwendungspartnern. Hierfür wurde ein auf kausalen Graphen |

| | | |
|---|---|---|
| | | basierender Clustering-Mechanismus entwickelt, der den manuellen Aufwand der Annotation von Ursachen zu Fehlerszenarien erheblich reduziert. Ebenso können pro Cluster die kausalen Abhängigkeiten zw. Fehlern gezeigt werden.<br><br>Zur Erreichung des Gesamtprojektziels (Verringerung von ungeplanten Stillstandszeiten durch KI gestütztes Fehlermanagement) wurden abweichend vom Antrag, Arbeiten zur Fehlerdiagnose (Fehlerpriorisierung und Ursachenanalyse) priorisiert und das Selbstlernen im Betrieb pausiert.<br><br>Für das Erlernen der kausalen Graphen und der Evaluation des „SCALE“ Algorithmus wurde in eine Aufrüstung der KI-Recheninfrastruktur investiert. So wurden 2x RTX 4000 Ada und weitere Hardwarekomponenten, wie Lüfter und neue SSDs beschafft.<br><br>Im Rahmen der gemeinsamen ProLern und ProKI Abschlussveranstaltung „Smart Factory 2 Tagung“ wurde eine Demo von KausaLAssist gezeigt und ein Vortrag zum Nutzen von OPC UA für die Integration von KI gezeigt. Hierfür wurden Präsentationsmittel (iPad) und ein Router zum Aufbau eines lokalen drahtlosen Netzwerks beschafft. |
| | SMB | • Der digitale Zwilling wurde erweitert und weiter optimiert, um wesentliche Maschinenfunktionalitäten und NC-Programme automatisiert durchlaufen zu lassen damit Fehlersituationen simuliert und Trainingsdaten für den kausalen Graphen generiert werden können.<br>• Der KausaLAssist Stack wurde bei Schuster Maschinenbau evaluiert und getestet. Im Rahmen der regelmäßigen Sprintplanungen wurde aktiv Feedback zum Prinzip Ursache => Fehler => Lösung gegeben und an der weiteren Entwicklung mitgewirkt.<br>• Gemeinsam mit den Projektpartner wurde an der Lösungsstrategieentwicklung und dem Fehlermanagement gearbeitet, um diese bei den jeweiligen Anwendungsfällen zu unterstützten.<br>• Zur Erreichung des Gesamtprojektziels (Verringerung von ungeplanten Stillstandszeiten durch KI gestütztes Fehlermanagemenet) wurden abweichend vom Antrag, Arbeiten zur Fehlerdiagnose (Fehlerpriorisierung und Ursachenanalyse) priorisiert und das Selbstlernen im Betrieb pausiert. |
| | KAMAX | Weiterentwicklung digitaler Modelle und KI-Methoden:<br>• Ausbau der virtuellen Umgebung um zusätzliche Anlagenkomponenten, Prozessleitsysteme und in AP4 identifizierte kritische Störungsquellen<br>Automatisierte Störungserkennung und Lösungsempfehlung:<br>• Automatisierung der in AP3 validierten Methoden zur Störungsdetektion und -klassifikation<br>• Validierung der dynamischen Integration neuer Lösungsansätze während des Betriebs und der kontextbasierten Auswahl geeigneter Strategien zur Behebung klassifizierter Störungen<br>Teilautomatisierung der Störungsbehebung:<br>• Prototypische Implementierung automatisierter Abläufe für ausgewählte Lösungsansätze bzw. Teilschritte innerhalb der jeweiligen Strategien<br>• Untersuchung der Übertragbarkeit automatisierter Komponenten auf verschiedene Lösungsansätze |

| | | |
|---|---|---|
| | | Implementierung adaptiver Lernfähigkeit:<br>• Evaluierung kontinuierlicher Lernmechanismen und Integration von Benutzerfeedback in die KI-Komponenten unter Betriebsbedingungen |
| | IP | • Erstellung eines Softwaremoduls zur Verwaltung mehrerer Konfigurationen (für verschiedene Produkte/Maschinen)<br>• Entwicklung eines benutzerfreundlichen Parametrierungsmoduls für vorbereitete Abläufe<br>• Implementierung einer konfigurierbaren Bedienerinteraktion im Fehlerfall<br>• Entwicklung einer Funktion zur Erkennung textueller Störmeldungen auf CNC-Maschinendisplays<br>• Optimierung der Werkstück-Lageerkennung bei verschiedenen Bedingungen<br>• Schaffung eines Werkzeugs zur anwendungsspezifischen Bestimmung erreichbarer Genauigkeiten<br>• Inbetriebnahme und Kopplung des Partnersoftwarestacks mit der Robo-Operator-Steuerung |
| | ISG | Weiterentwicklung der virtuellen Maschinen und der KI-Algorithmen:<br>• Ausbau der virtuellen Abbilder der Anwendungsfälle auf Prozesskette durch Erhöhung des Detailgrads der Schuster Ringdrehmaschine<br>• Erweiterung der typischen Fehlersituationen durch Störungen auf Maschinen- und Prozessleitebene und Generierung von KI-Trainingsdatensätzen anhand typischer Fehlersituationen sowie randomisiert ausgelöster Fehlerzustände (Prozessleit-, Maschinen, Produkt- und Sensorfehler)<br>• Weiterentwicklung der Zugriffsmöglichkeiten auf Parameter innerhalb der Simulation mit Python<br>Weiterentwicklung der HIL-Simulationen zur virtuellen KI-Inbetriebnahme und Evaluation:<br>• Aufbau einer KI-Co Simulation Benutzeroberfläche zum Integrieren und zur virtuellen Inbetriebnahme von KI-Algorithmen im virtuellen Abbild<br>• Umsetzung der virtuellen Testszenarien, definiert in AP2<br>• Bibliothekserstellung für die Fehleranalyse und die Prozessoptimierung<br>• Bibliothekserstellung für die Durchführung von Testszenarien (MIL Lösung)<br>• Virtuelle Inbetriebnahme der KI in den Testszenarien (Benchmarks zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Methoden)<br>(Teil-)Automatisierung der Fehlerbehebung:<br>• Erprobung der automatisierten Störungsbehebung im virtuellen Modell |
| | SEITEC | Basierend auf den in AP3 und 4 durchgeführten Arbeiten war es SEITEC möglich, in AP5 die entwickelten Softwarekomponenten weiterzuentwickeln und zu optimieren. Die Einführung von ReBOSA hat ermöglicht, beliebig viele OPC-UA-Server zu aggregieren. Mit einem speziell entwickelten Algorithmus können die Informationsmodelle der Source-Server eingelesen und in einem gemeinsamen Informationsmodell konsolidiert werden. Somit ist jede Variable aus dem ursprünglichen Informationsmodell abgebildet. Entsprechend ist es möglich, die Fehlermeldungen und Sensoriken aller Maschinen von diesem Server abzufragen. Somit haben alle nachgelagerten Anwendungen die Möglichkeit mit einem zentralen Zugriffpunkt zu kommunizieren. Die von SEITEC aufgebaute Daten-Infrastruktur SDS* steht dafür im Mittelpunkt. |

| | | |
|---|---|---|
| | | Über die Schnittstellen können Daten mehrerer digitaler Zwillinge zentral abgerufen werden. Diese Daten bestehen aus der eventbasierten Fehlerhistorie sowie aller modellierten Variablen, die u.a. die Sensorik der Maschinen abbilden. Die Maschinenbetreiber können somit den genauen Zustand der Maschinen zu jedem Zeitpunkt exportieren. Dies ist vor allem für schwere Fehler sehr interessant. Diese Daten erlauben entweder die Analyse per KI oder menschlich mit dem von SEITEC entwickelten SDA – einem „Offline-OPC-UA-Viewer“.<br><br>*Smart-Data-Stack: besteht aus ReBOSA (Reference Based OPC UA Server Aggregator – Aggregierender OPC UA Server mit Historical Access), SDP (Smart-Data-Provider – OPC UA Client-Anwendung) und SDA (Smart-Data-Analyzer – Offline OPC UA Viewer, entwickelt zur menschlichen Analyse komplexer Datensätze) |
| | queo | Die erstellten Anwendungen wurden im anhand des erfassten Nutzerfeedbacks und der Anforderungen aus den Testszenarien kontinuierlich angepasst und weiterentwickelt. Der Fokus bei der Weiterentwicklung wurde dabei auf die zielgenaue Darstellung des Zustandes und der Anzeige der für diese Ursache gefundenen Strategien. Dazu wurde die Anzeige von Fehlerclustern integriert, damit der Nutzer nicht eine Vielzahl von zusammenhängenden Fehlern angezeigt wird. Für die verbesserte Detektion der korrekten Ursache wurde bei der Abbildung der Zusammenhänge noch die Fehlerursache als eigene Entität hinzugefügt, damit Fehler oder Lösungen nicht mehrfach erfasst bzw. Dokumentiert werden müssen. Weiterhin wurden auf Basis der ersten Anwendungen die Möglichkeit geschaffen, auch nicht durch die automatische Erkennung gefundene Fehler und Ursachen mit der App zu erfassen und so das System zur Fehlerbehung entsprechend zu vervollständigen.<br>• Kontinuierlicher Austausch mit Anwendungsfällen für Verbesserung der Applikation<br>• Eventgestützte Nutzerbenachrichtigung und Anzeigen der Störungsdetektionsergebnisse sowie der dazugehörigen Lösungsstrategien<br>• Anleitung des Nutzers durch Lösungsstrategie inkl. der von angebotenen Hilfen zur schnelleren Umsetzung |
| | InfAI | Laut Antrag (IST s. separater Bericht von infAI):<br>*Weiterentwicklung der KI-Algorithmen (KI-Störungsdetektion für Prozessketten, Formalisierung Lösungsstrategien, KI-Empfehlung für Lösungsstrategien)*<br>*Weiterentwicklung der Softwarearchitektur für komplexe Prozessketten und Optimierung (Integration und Bereitstellung API)*<br>*Wissenschaftliche Unterstützung der Anwendungsfälle zur Automatisierung der Lösungsfindung*<br>*Erprobung des Selbstlernens im Betrieb:*<br>*Erproben des kontinuierlichen Lernens der vortrainierten KI-Komponenten im laufenden Betrieb* |
| **Zusammenfassung Ergebnisse** | | • Prototypen der KI-Algorithmen für die automatische Ursachenanalyse und Lösungsstrategieempfehlung (Meilenstein ◆**4**)<br>• Umfangreiche KI-Trainingsdatensätze aus virtueller Maschine und Daten aus dem Produktionsbetrieb für die Weiterentwicklung der KI-Methoden deren Vorhersagegüte (Meilenstein ◆**4**)<br>• Umfangreicher datengetriebener digitaler Zwilling mit kontinuierliche Datenerfassung, eventbasierter Erfassung von KI-Trainingsdatensätzen und Schnittstellen zur variablen Datenabfrage und –filterung (Meilenstein ◆**4**) |

**AP 6 - Verwertungs- und Funktionsoptimierung sowie Projektabschluss (01.07.2024 – 31.12.2024; 6 Monate)**

<table>
<tr><td>Zielsetzung:</td><td>Zielstellung des abschließenden Arbeitspakets ist die Bewertung der erzielten Ergebnisse, die Identifikation von Verbesserungspotenzial und die Aufarbeitung sowie Optimierung der Ergebnisse hinsichtlich der Verwertung.</td></tr>
<tr><td>Mitarbeit:</td><td>alle Projektpartner</td></tr>
<tr><td>Arbeitspaket 6:</td><td>In AP 6 wurden die finalen Feldversuche zur Evaluation des Softwaresystems und zur Sammlung von weiterem Anwenderfeedback durchgeführt. Diese Feldversuche beruhen auf den zu Projektbeginn definierten und fortlaufend angepassten Testszenarien.<br><br>Im Gesamtergebnis konnte folgende Evaluation erreicht werden:<br><br>○ 9/10 Testszenario Stufe 1 (+2)<br>○ 6/10 Testszenario Stufe 2 (+1)<br>○ 5/10 Testszenario Stufe 3 (+3)<br><br>Basierend auf der Evaluation wurde die Softwarefunktionalität optimiert, um die Ergonomie und damit einhergehend die Nutzerakzeptanz des Assistenten und das Verwertungspotenzial zu stärken. Die gemeinsame Verwertung der Softwarekomponenten wurde geplant. Des Weiteren wurden verwertungssteigender Maßnahmen, wie der breitenwirksamen Veröffentlichung in Fachmedien und die Präsentation auf Kongressen und Seminaren durchgeführt.<br><br>Die Projektergebnisse wurden gemeinsam mit Ergebnissen weiterer Projekte im Fördercall im „Projektatlas Künstliche Intelligenz in der Produktion“ veröffentlicht.</td></tr>
<tr><td>Durchgeführte Arbeiten und wichtige Investitionen innerhalb des AP 6</td><td>IWU Gemäß dem Antrag erfolgte die Evaluation der Softwarearchitektur in den definierten Testszenarien (Details in AP6). Zusätzlich führte das IWU einen Vorher-Nachher-Vergleich der Stillstandszeiten im KAMAX-Betrieb durch. Dabei wurden Produktionsdaten zweier Zweiwochenzeiträume (vor und nach KausaLAssist-Schulung) hinsichtlich bearbeiteter Aufträge, produzierter Teile, Gesamtstörungsdauer und MTTR (Mean-Time-to-Recovery) analysiert. Die Ergebnisse zeigen:<br><br>
<table>
<tr><th></th><th>Aufträge</th><th>Teile</th><th>Störungsdauer (Gesamt in s)</th><th>MTTR (s)</th></tr>
<tr><td>Referenz</td><td>5,4</td><td>9,0</td><td>5673,9</td><td>1036,2</td></tr>
<tr><td>Mit KausaLAssist</td><td>6,7</td><td>9,8</td><td>1884,5</td><td>538,3</td></tr>
<tr><td>Relative Änderung</td><td>+23,5%</td><td>+8,6%</td><td>-66,8%</td><td>-48,0%</td></tr>
</table>
<br>Im Ergebnis, wurde durch KausaLAssist die MTTR halbiert, wodurch die Ausbringung in Form von Aufträgen um 23,5% stieg. Dies ist ein großer Erfolg für das Projekt und zeigt den wichtigen, wirtschaftlichen Beitrag.</td></tr>
</table>

| | | |
|---|---|---|
| | | Zur Verwertungsoptimierung, wurde ein Videodreh bei KAMAX und am IWU beauftragt und durchgeführt. Hierfür wurden dafür reservierte Mittel im IWU-Budget verwendet. Das Video ist auf YouTube im Fraunhofer Kanal veröffentlicht und zugänglich via: https://www.youtube.com/watch?v=eUxpLYidqYw<br><br>In einer gemeinsamen Abschlussveranstaltung in Dresden, wurden die Ergebnisse der Projektevaluation vorgestellt und Pläne für die gemeinsame Verwertung präzisiert.<br><br>Ein Abschlussbericht wurde in Form dieses Dokuments gemeinsam angefertigt und an den Projektträger übergeben. |
| | SMB | • Die Evaluation der gesamten Softwarearchitektur wurde durchgeführt. Es zeigte sich, dass der Software-Stack prinzipiell geeignet ist, das Fehlermanagement zu unterstützen und die Anlagenverfügbarkeit durch Transparenz zu verbessern.<br>• Insbesondere die Datenakquisition mittels OPC-UA aus der Werkzeugmaschine kann für einen Maschinenhersteller wichtige Erkenntnisse liefern, insbesondere die Fähigkeit Maschinendaten für einen definierten Zeitraum in einem Ringpuffer zu speichern und zu Analysezwecken als Hersteller bereitgestellt zu bekommen.<br>• Das für die Datenakquisition notwendige Wissen zur Modellierung zur Vorgehensweise bei der Modellierung und Aufbau des OPC-UA Modells wurde im Rahmen dieses Projektes erarbeitet und liefert für die Umsetzung künftiger Anforderungen eine wichtige Basis.<br>• Über die Vorteile eines selbstlernenden Systems liegen uns zum Projektabschluss aufgrund der Fokussierung des Anwendungsfall bei KAMAX nur wenig Erkenntnisse vor. Die Generalisierung, auf der bei SMB vorhandenen Anlage, konnte nicht ausreichend evaluiert werden.<br>• Der digitale Zwilling, der im Projekt insbesondere zur Fehlersimulation erstellt wurde, zeigt für SMB hohes Potential für eine Verkürzung von Anlaufzeiten und zur Verbesserung der Sicherheit und Stabilität der Fertigungsverfahren sowie zur Steigerung der Ressourceneffizienz und wird mittelfristig in das Dienstleistungsangebot an unsere Kunden einfließen.<br>• Zur Verwertungsoptimierung wurde ein Video erstellt. Beim Dreh haben einige Projektpartner inkl. SMB mitgewirkt und Inhalte eingebracht.<br>• In einer gemeinsamen Abschlussveranstaltung in Dresden wurden die Ergebnisse der Projektevaluation vorgestellt und Pläne für die gemeinsame Verwertung präzisiert.<br>• Ein Abschlussbericht wurde in Form dieses Dokuments gemeinsam angefertigt und an den Projektträger übergeben. |
| | KAMAX | Validierung der Gesamtarchitektur im Testumfeld:<br>• Bewertung der integrierten Softwarearchitektur anhand der festgelegten Testszenarien im spezifischen Anwendungskontext<br>Optimierung für Funktionalität und Verwertbarkeit: |

| | | |
|---|---|---|
| | | • Funktionale Verbesserungen basierend auf Evaluationsergebnissen und im Hinblick auf die Integration in eigene Produktlinien<br>Projektfinalisierung:<br>• Erstellung der Abschlussdokumentation und Durchführung einer Projektabschlussveranstaltung |
| | IP | • Untersuchung der Absolutgenauigkeit und Dauerstabilität des Systems<br>• Erstellung und Test verschiedener Demonstrationsabläufe zur Funktionsvalidierung<br>• Optimierung und Fehlerbehebung in den entwickelten Komponenten<br>• Dokumentation der Ergebnisse<br>• Projektabschluss (Projektziel der erhöhten störungsfreien Betriebszeit erreicht) |
| | ISG | Evaluation der gesamten Softwarearchitektur in den definierten Testszenarien:<br>• Evaluation der virtuellen KI-Trainings- und Inbetriebnahme-Umgebung<br>Funktions- und Verwertungsoptimierung:<br>• Funktionsoptimierung nach Input aus Evaluation, besonders hinsichtlich Verwertung<br>Projektabschluss:<br>• Abschlussbericht |
| | SEITEC | Die Evaluation der gesamten Softwarearchitektur wurde durchgeführt. Mit geringen Anpassungen am Software-Stack ist die entwickelte Softwarelösung zukünftig bei diversen Anwendungsfällen ausrollbar. Im Projekt wurden OPC-UA-Server verschiedener Steuerungshersteller angebunden. Somit wurde die Interoperabilität hinreichend demonstriert (verschiedene SINUMERIK OPC-UA-Server, S7-OPC-UA-Server, Beckhoff-OPC-UA-Server). Es ist geplant, die von SEITEC entwickelte Datenerfassung mit einem industriegehärteten SDK nach Projektende zu überarbeiten, um eine Produkterisierung zu ermöglichen. Alle nachgelagerten Anwendungen greifen die Daten per REST-API oder von der Datenbank ab. Sollte OPC-UA bei einer anzubindenden Maschine nativ nicht zur Verfügung stehen, müsste die Southbound-Schnittstelle angepasst werden. Hierfür liegt bereits ein Architekturkonzept vor. Da OPC-UA mittlerweile weit in der Industrie verbreitet ist, ist davon auszugehen, dass in den meisten Anwendungsfällen dies nicht notwendig sein wird oder mit überschaubarem Aufwand ein OPC-Server installiert/lizenziert werden können. Es ist geplant, den gesamten Softwarestack inkl. der Datenerfassung (SDS) im Anschluss an das Projekt weiterzuentwickeln und zu vermarkten. Im Moment erscheint eine Direktvermarktung sinnvoller als ein Platzieren der Software in Industrial App Stores, da für jeden Kunden diverse (aber vom Aufwand überschaubare) Anpassungen während des Ausrollens notwendig scheinen.<br><br>Zur Verwertungsoptimierung wurde ein Videodreh bei KAMAX und am IWU beauftragt und durchgeführt. Beim Dreh haben einige Projektpartner inkl. SEITEC mitgewirkt und Inhalte eingebracht.<br><br>In einer gemeinsamen Abschlussveranstaltung in Dresden wurden die Ergebnisse der Projektevaluation vorgestellt und Pläne für die gemeinsame Verwertung präzisiert. |

| | | |
|---|---|---|
| | | Ein Abschlussbericht wurde in Form dieses Dokuments gemeinsam angefertigt und an den Projektträger übergeben. |
| | queo | Die Evaluation der gesamten Softwarearchitektur wurde durchgeführt. Die im Teilvorhaben erstellten Templates und Bibliotheken werden aktiv in den Kundenprojekten von queo eingesetzt und helfen dabei die Komplexität bei der Erstellung von neuen Anwendungen zu reduzieren.<br>Weiterhin wurden durch die Nutzung und die Interaktion mit den weiteren Komponenten des kausalAssist Tacks Erfahrungen gesammelt, die queo für die Verbesserung bei der Digitalisierung vor allem von Produktionsprozessen einsetzt.<br>Zur Verwertungsoptimierung wurde ein Video erstellt. Beim Dreh haben einige Projektpartner inkl. SMB mitgewirkt und Inhalte eingebracht.<br>In einer gemeinsamen Abschlussveranstaltung in Dresden wurden die Ergebnisse der Projektevaluation vorgestellt und Pläne für die gemeinsame Verwertung präzisiert.<br>Ein Abschlussbericht wurde in Form dieses Dokuments gemeinsam angefertigt und an den Projektträger übergeben. |
| | InfAI | Laut Antrag (IST s. separater Bericht von infAI):<br>*Evaluation der gesamten Softwarearchitektur in den definierten Testszenarien:*<br>*Funktions- und Verwertungsoptimierung:*<br>*Projektabschluss:*<br>*Veranstaltung der Abschlussveranstaltung* |
| **Zusammenfassung Ergebnisse** | | • Breitenwirksame Darstellung der Projektergebnisse erfolgt (Video) und Verwertung angestoßen (Meilenstein ◆**5**)<br>• Umfangreiche Evaluation der Projektergebnisse erfolgt (Meilenstein ◆**5**)<br>• Erprobtes lernendes Assistenzsystem für automatisiertes Fehlermanagement, vor Allem in KAMAX Use-Case<br>• Abschlussbericht angefertigt und beim Projektträger eingereicht (Meilenstein ◆**5**) |

**AP 7 - Projektmanagement und projektübergreifende Zusammenarbeit (01.07.2021 – 31.12.2024; kontinuierlich)**

| | | |
|---|---|---|
| **Zielsetzung:** | Zielstellung des Projektmanagements liegt in der Sicherstellung einer bestmöglichen Arbeitsfähigkeit der Projektpartner und Koordination der internen und externen Verbundaktivitäten zur Erreichung der Verbundprojektziele. | |
| **Arbeitspaket 7:** | Die fachliche und inhaltliche Projektkoordination übernahm das IWU, industrieseitig unterstützt durch ISG. Ebenso koordinierte das IWU die projektübergreifende Zusammenarbeit mit weiteren Vorhaben der ProLern Bekanntmachung und verwaltete dazu bereitgestellte Mittel.<br>Die Vorhabensbearbeitung erfolgte unter Anwendung agiler Methoden des Projektmanagements über alle Arbeitspakete hinweg in vierwöchigen Sprints und in enger Abstimmung der Projektpartner. Bei regelmäßigen Projekttreffen erfolgte ein Review des Projektstandes, der Projektteilziele insbesondere der dafür notwendigen Arbeitsschritte und der für die Projektzielerreichung notwendigen Anforderungen<br>Die Erstellung der Zwischenberichte und des Schlussberichts wurden durch das IWU koordiniert. | |
| **Durchgeführte Arbeiten und wichtige Investitionen innerhalb des AP 7** | IWU | Verbundkoordination / Projektmanagement (Kommunikation mit Projektträger, Berichtswesen, Außendarstellung (Website, Öffentlichkeitsarbeit), Abschlussveranstaltung<br>Koordination der projektübergreifenden Zusammenarbeit |
| | ISG | Verbundkoordination / Projektmanagement: Projektkoordination, Berichtswesen |
| **Zusammenfassung Ergebnisse** | Projektergebnis (s. AP6), Zwischenberichte, Tagungsband, Abschlussbericht | |

### Evaluation der erreichten Meilensteine

Im Folgenden werden die geplanten Meilensteine und die erreichten Ergebnisse verglichen.

| **MS 1** | Anforderungsanalyse und Konzeption abgeschlossen | **Projektmonat** | **6** |
|---|---|---|---|
| **Ereignis** | Abschluss von AP 1 | | |
| **Beschreibung der Ergebnisse** | Meilenstein 1 markierte den erfolgreichen Abschluss der initialen Anforderungsanalyse und Konzeption der drei Anwendungsfälle sowie der Softwarearchitektur. Im Rahmen dieses Meilensteins wurde ein digitaler Anforderungskatalog in Form eines Product Backlogs (PB) auf dem Fraunhofer GitLab etabliert. Dieser enthält sämtliche funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die Softwarearchitektur, die durch die Projektpartner in der Anforderungsanalyse identifiziert wurden. Als "Single Source of Truth" wurde der PB für kontinuierliche Erweiterungen während des Projektverlaufs konzipiert.<br><br>Für jeden Anwendungsfall sowie die Softwarearchitektur wurden detaillierte Umsetzungskonzepte erarbeitet, die den Entwicklungsweg vom Ist- zum Soll-Stand aufzeigen. Diese beinhalten eine präzise Planung der Entwicklungsschritte und deren Abhängigkeiten für das erste Projektjahr, woraus sich konkrete Entwicklungsprioritäten für alle Projektpartner ableiten ließen. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil war die Erstellung eines Evaluationskonzepts mit definierten Testszenarien und Bewertungsmaßstäben für die Projektevaluation, sowohl zur Projekthalbzeit in AP4 als auch zum Projektende in AP6. | | |
| **Evaluation** | **Erreicht ↓** | **Abweichungen ↓** | |
| Vergleich | Der erste Meilenstein wurde vollständig und erfolgreich erreicht. Die Architektur für die KausaLAssist Fehlermanagement-Lösung wurde gemeinschaftlich im Software-Team entworfen und in einer anschaulichen Präsentation dokumentiert. Der Product Backlog wurde wie geplant auf dem Fraunhofer GitLab implementiert und mit den initial identifizierten Anforderungen befüllt. Für die gemeinsame Software-Lösung wurden zentrale Elemente für das Loggen und die Behandlung von Exceptions recherchiert und als Proof-of-Concept aufgesetzt. Mit Unterstützung des IWU wurden bei den Anwendungspartnern Fehlerkataloge erstellt und darauf aufbauend die Use-Cases konzipiert sowie Testszenarien zur Evaluation definiert. Mit dem Abschluss der Konzeption und der Testszenarien wurde MS1 wie geplant erreicht. | Während der Anforderungsanalyse wurde festgestellt, dass der ursprünglich geplante Fokus auf reine Maschinenfehler zu eng gefasst war. Das Konzept der kausalen Graphen musste daher verfeinert und erweitert werden, um auch Fehler im Zusammenspiel zwischen höheren Software-Systemen (z.B. MES, ERP, Teamcenter) und den automatisierten Maschinen berücksichtigen zu können. Diese Erweiterung des Scopes stellte jedoch keine negative Abweichung dar, sondern führte zu einer frühzeitigen Verbesserung des Gesamtkonzepts, die sich positiv auf den weiteren Projektverlauf auswirkte. | |

| MS 2 | Schnittstellen entwickelt und Maschinen KI-Befähigt | Projektmonat | 11 |
|---|---|---|---|
| **Ereignis** | Abschluss von AP 2 | | |
| **Beschreibung der Ergebnisse** | Der zweite Meilenstein konzentrierte sich auf die Entwicklung und Erprobung der erforderlichen Schnittstellen für die Softwarearchitektur sowie die KI-Befähigung der Maschinen in den Anwendungsfällen. Die entwickelten Schnittstellen wurden durch Proof-of-Concept Implementierungen validiert und umfassen sowohl die Kommunikation zwischen den Softwarekomponenten als auch die Anbindung der Maschinendaten an die Applikation. In allen Anwendungsfällen wurde die notwendige Hardware für die sensorische Erfassung der relevanten Variablen und die Ausführung des KI-Systems implementiert. Zusätzlich wurde ein virtuelles Maschinenabbild als KI-Trainingsumgebung in ISG-virtuos modelliert, das einen ausreichenden Detailgrad für das Training des KI-Fehlermanagementsystems in AP3 bietet. | | |
| **Evaluation** | **Erreicht ↓** | **Abweichungen ↓** | |
| Vergleich | Die KI-Befähigung und die damit verbundenen Schnittstellenentwicklungen wurden erfolgreich abgeschlossen. Das IWU entwickelte und implementierte fünf OPC UA Informationsmodelle für die Maschinen im Anwendungsfall bei KAMAX. Die Schnittstellen wurden als Proof of Concept implementiert und erfolgreich getestet, sowohl für die IT-zu-IT als auch für die IT-zu-OT Kommunikation. Die für das KI-Fehlermanagement benötigten Variablen werden durch die implementierte (Zusatz-)Sensorik digital erfasst. Ein virtuelles Maschinenabbild mit hinreichendem Detailgrad wurde erstellt und bietet die Basis für die Generierung von KI-Trainingsdaten. | Eine bedeutende Anpassung betraf die ursprünglich geplante Beschaffung der Rechenhardware in den Anwendungsfällen. Da die benötigte Rechenkapazität für die Ausführung der Software-Lösung zunächst nicht genau bestimmt werden konnte, wurde die Hardware-Beschaffung in Abstimmung mit dem Konsortium verschoben. Stattdessen wurde die Softwareentwicklung plattformunabhängig in Modulen durchgeführt und zunächst auf performanten Rechnern bei den Softwarepartnern getestet. Diese Änderung führte zu einer Anpassung der Meilensteinkriterien, hatte jedoch keine negativen Auswirkungen auf das Projektziel. Zudem wurde der ursprüngliche Plan, mehrere virtuelle Maschinenabbilder zu entwickeln, zugunsten eines einzelnen, dafür detaillierteren virtuellen Maschinenabbilds modifiziert, um die frühzeitige Qualifikation des kausalen Graphansatzes zu optimieren. | |

| MS 3 | Softwarearchitektur Basiskomponenten entwickelt und in Anwendungsfällen ausgerollt | Projektmonat | 19 |
|---|---|---|---|
| **Ereignis** | Abschluss von AP 3 und AP 4 | | |
| **Beschreibung der Ergebnisse** | Der dritte Meilenstein markierte die Entwicklung der grundlegenden Funktionalitäten der Softwarearchitektur des Assistenzsystems, der KI-Algorithmen und der KI-Trainingsumgebung. Diese Entwicklung erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen den Befähigern und Anwendern. Eine Basisversion der Architektur wurde bei den Anwendungspartnern implementiert, um die direkte Erprobung und Bewertung weiterer Entwicklungsstufen zu ermöglichen. Ein besonderer Fokus lag auf der Erstellung eines kausalen Graphen für einen repräsentativen Anwendungsfall, der durch gezielte Fehleranalyse und Expertenwissen entwickelt wurde und sowohl Maschinenfehler als auch Fehler der kommunizierenden Softwaresysteme abbildet. | | |
| **Evaluation** | **Erreicht ↓** | **Abweichungen ↓** | |
| Vergleich | Die zentralen Ziele des Meilensteins wurden weitgehend erreicht. Die Entwicklung von Prototypen der KI-Algorithmen zur Kausalitätsdetektion wurde erfolgreich abgeschlossen, und die erste Entwicklungsstufe der Softwarelösung wurde planmäßig in allen Anwendungsfällen implementiert. Für die Generierung virtueller Fehlerdatensätze wurde erfolgreich ein Trainingsdatengenerator am IWU entwickelt, der die notwendigen synthetischen Daten für das KI-Training bereitstellt. Der kausale Graph für den repräsentativen Anwendungsfall wurde erfolgreich modelliert und integriert innovativ die Interaktion zwischen Maschinen und höheren Softwaresystemen. Diese Umsetzung ermöglichte einen ganzheitlicheren Ansatz für das Fehlermanagement als ursprünglich geplant. | Eine wesentliche Anpassung betraf den Umfang der kausalen Graphmodellierung. Der ursprüngliche Plan, vollständige kausale Graphen für alle Anwendungsfälle zu erstellen, erwies sich aufgrund des in der Ressourcenplanung unterschätzten Umfangs an Variablen, möglichen Ursachen und Lösungsstrategien als nicht realisierbar. Diese Erkenntnis bestätigte die Projekthypothese, dass kausale Strukturen größtenteils aus Daten erlernt werden müssen. Als Anpassung wurde der Fokus auf einen repräsentativen Anwendungsfall gelegt, der auch die Integration von Softwarefehlern umfasst. Zudem musste die ursprünglich geplante Spezifikation der Laufzeitumgebung für die Softwareprototypen aufgehoben werden, da die vorgesehene einheitliche Edge-IPC-Hardware nicht wie geplant beschafft wurde. Stattdessen wurde die Softwarelösung flexibel auf alternativen Laufzeitumgebungen implementiert. | |

| MS 4 | Fehlermanagementassistenz als Prototyp in allen Anwendungsfällen im Einsatz | Projektmonat | 31 |
|---|---|---|---|
| **Ereignis** | Abschluss von AP 5 | | |
| **Beschreibung der Ergebnisse** | Der vierte Meilenstein zielte auf die vollständige Integration der KI-basierten Fehlermanagementassistenz in allen Anwendungsfällen ab. Das System sollte die KI-Funktionalitäten zur Störungsdetektion, Ursachenanalyse und Lösungsstrategieentwicklung umfassen. Ein wesentlicher Aspekt war die kontinuierliche Sammlung relevanter Datensätze durch die Maschinen mittels datengetriebener digitaler Zwillinge, die dem fortlaufenden KI-Training zur Verfügung gestellt werden sollten. Die KI-Algorithmen sollten durch umfassende Trainingsdaten aus der virtuellen Umgebung und dem laufenden Betrieb weiterentwickelt und in der virtuellen KI-Testumgebung validiert werden. | | |
| **Evaluation** | **Erreicht ↓** | **Abweichungen ↓** | |
| Vergleich | Im Rahmen des vierten Meilensteins wurden bedeutende Fortschritte erzielt. Die erste Version des KausaLAssist Stacks wurde entwickelt und kontinuierlich um weitere Funktionen erweitert. Bei KAMAX wurden fünf Maschinen erfolgreich mit OPC UA Servern als Datenquelle ausgestattet, wodurch eine substantielle Menge an Fehlerdatensätzen verschiedener Fehlertypen erfasst werden konnte. Erste Algorithmen und Heuristiken zur Erzeugung kausaler Fehlergraphen wurden auf Basis dieser realen Daten erfolgreich erprobt. Eine MLOps Pipeline wurde aufgebaut, um die Entwicklung und Evaluation der KI-Algorithmen zu systematisieren. Die Integration von Softwaresystemen ermöglichte zudem die Erfassung von Fehlern aus höheren Systemebenen. | Die ursprünglich geplante vollständige Automatisierung der Fehlerbehebung konnte nicht in dem vorgesehenen Umfang realisiert werden. Die Komplexität der Fehlerbeziehungen und die Skalierbarkeitsanforderungen erforderten eine Anpassung des Ansatzes. Der Fokus wurde stattdessen auf die effektive Unterstützung der manuellen Fehlerbehebung durch KI-gestützte Empfehlungen gelegt. Die Implementation der digitalen Zwillinge in allen Anwendungsfällen wurde zugunsten eines detaillierteren Modells für einen repräsentativen Anwendungsfall modifiziert. Diese Anpassungen ermöglichten eine tiefergehende Validierung der entwickelten Methoden, auch wenn sie vom ursprünglichen Plan abwichen. | |

## IV. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

**Verbund**

Das Verbundvorhaben KausaLAssist beinhaltete ein hohes wissenschaftliches und technisches Risiko. KI-basierte Lösungen für die automatisierte Erkennung von Fehlersituation und die Ableitung von Handlungsstrategien zur (automatischen) Behebung von Störungen waren bisher noch nicht am Markt verfügbar. Auch im Bereich der wissenschaftlichen Untersuchungen hatte dieses Vorhaben einen hohen Neuheitsgrad.

Zur Sicherstellung einer effektiven Projektbearbeitung, wurde im Februar 2022 ein agiles Vorgehen eingeführt mit vierwöchigen Entwicklungssprints. In der Gesamtprojektlaufzeit, wurden so 33 Sprints durchgeführt. In jedem Sprint entstanden neue Ergebnisse, die im Sprint-Review durch alle Stakeholder bewertet und die Ziele für den darauffolgenden Sprint festgelegt wurden. Die kontinuierliche Bewertung der Ergebnisse und Anpassung der Ziele sorgte für umfangreiche Entwicklungen unter Sicherstellung der Angemessenheit der Projektarbeiten.

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten zeigen sich deutlich in den Erreichten Ergebnissen (s. AP6) bei KAMAX: Mit dem Projekt wurde die durchschnittliche Behebungszeit (Mean-Time-To-Recovery, MTTR) halbiert und dadurch die Ausbringung um 23,5% gesteigert.

IWU

Das geplante Teilvorhaben beinhaltete ein hohes wissenschaftliches und technisches Risiko. Besonders die Entwicklung der KI-Algorithmen zur Erkennung von Kausalitäten für eine große Anzahl von zeitlichen Variablen stellte ein ungelöstes technisches Problem dar. Dieses technische Problem wurde erfolgreich gelöst und dank der erfolgreichen Zusammenarbeit im Verbund ein funktionierendes System geschaffen, welches die Produktion (z.B. bei KAMAX) nachhaltig verbessern kann.

Besonders in Hinblick auf die agile Durchführung des Projekts, sind die geleisteten Arbeiten als angemessen und notwendig zu betrachten.

SMB

Lösungen zum automatisierten Erkennen von Fehlersituationen und der KI-gestützten Ableitung von Lösungsstrategien waren am Markt nicht verfügbar. Deshalb wollte SMB ein entsprechendes System zusammen mit den Projektpartnern entwickeln. Auf Grund des Neuheitsgrades der Technologie war damit ein hohes technisches Risiko verbunden, da zum damaligen Zeitpunkt noch nicht abschätzbar ist, ob der Einsatz von KI-Methoden für die betrachteten Anwendungsfälle funktionieren wird.

Weiterhin waren auch der notwendige Wissensaufbau sowie die notwendigen Arbeiten zur Gestaltung des neuen Systems von Schuster Maschinenbau nicht aus eigenen Mitteln finanzierbar. Erst durch die Nutzung von Fördermitteln und die Zusammenarbeit im Verbund mit anderen Partnern ermöglichte SMB die geplanten Entwicklungen durchzuführen und sowohl Personal als auch die notwendige Infrastruktur für das Projekt zu finanzieren.

KAMAX

KAMAX Tools & Equipment ist spezialisiert auf die Bereitstellung von Werkzeugen zur Herstellung hochfester Verbindungselemente mit dem Schwerpunkt auf kundenspezifischen Einzelanfertigungen bei minimalen Durchlaufzeiten.

Für die Losgröße-1-Fertigung bei KAMAX existieren derzeit keine marktverfügbaren Assistenzsysteme, die sowohl eine präzise Fehlererkennung als auch eine (teil-)automatisierte Fehlerbehebung zuverlässig unterstützen. Aufgrund der hohen Variantenvielfalt und der technischen Komplexität der Produkte ergibt sich ein signifikantes technologisches Risiko. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen ist es

KAMAX nicht möglich, eigenständig Anforderungen an ein solches System zu spezifizieren und eine entsprechende Systemlösung zu entwickeln.

Erst durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit externen Partnern und unter Nutzung der beantragten Fördermittel wird die Umsetzung des Vorhabens realisierbar. Die strukturierte Zusammensetzung des Verbundprojekts erlaubt es darüber hinaus, über die eigentliche Projektlaufzeit hinaus einen nachhaltigen Beitrag zur Weiterentwicklung und Etablierung von Industrie-4.0-Prinzipien in der individualisierten Produktion zu leisten.

IP

Die Kombination von KI-Methoden zur automatisierten Störungserkennung und -behebung mit erweiterter Sensorik (3D-Kamera mit Tiefen- und Mustererkennung) und strukturiertem Expertenwissen erwies sich als hochinnovativ. IP konnte erfolgreich autonome Steuerungslösungen für industrielle Roboter im Bereich der Maschinenbedienung entwickeln, die zu einer deutlich erhöhten störungsfreien Betriebszeit führten. Die Zuwendung war notwendig und angemessen, da die risikobehafteten Entwicklungen die intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erforderten - insbesondere bei der Schaffung einheitlicher Schnittstellen und der gemeinsamen Entwicklung von Fehlerbehandlungsstrategien. Der Projekterfolg mit dem Nachweis eines vollständig bedienerfreien Betriebs über mehrere Schichten bestätigt die Richtigkeit dieses kooperativen Ansatzes.

ISG

Die im Vorhaben durchgeführte Entwicklung bietet großes Potenzial, war aber auch mit erheblichen Kosten und Risiken verbunden. Das Projekt erforderte Ressourcen, die weit über die Kapazitäten von ISG hinausgehen. Daher konnte das Projekt nicht ohne externe finanzielle Unterstützung durchgeführt werden. Ein erhebliches technisches Risiko ergab sich aus der Überführung der Simulationsmodelle aus dem Engineering in die Betriebsphase für neuartige KI-Anwendungen. Es gelang, die Modelle aus der virtuellen Inbetriebnahme weiterzuverwenden und die VIBN-Plattform zur KI-Trainingsumgebung weiterzuentwickeln. Somit konnten die Risiken überwunden und neue Anwendungsgebiete erschlossen werden. Dadurch konnten neue Alleinstellungsmerkmale erzielt werden, durch die zukünftig die Wettbewerbsposition des Unternehmens gesteigert wird.

SEITEC

Das Teilvorhaben von SEITEC beinhaltete ein hohes wissenschaftliches und technisches Risiko. SEITEC hat einen wesentlichen Beitrag zum Projekt geleistet, indem das Unternehmen eine komplexe Datenerfassung entwickelt hat, die von allen Teilnehmern des Verbunds genutzt wird. Das System ermöglicht eine eventbasierte Datenakquise, die für das Training von KI-Modellen in der Produktion einen erheblichen Mehrwert liefert. Die Entwicklung eines „KI-Ready“ digitalen Zwillings und einer virtuellen KI-Trainingsumgebung stellt einen bedeutenden Fortschritt dar, der die Schaffung von hochwertigen KI-Systemen für die Industrie ermöglicht. Ohne SEITECs Expertise und Ressourcen wäre eine solch umfassende Lösung nicht realisierbar gewesen. Hierbei ist die aggregierende, historisierende und eventbasierte Datenerfassung als besonderer Fortschritt und zudem Risiko zu bewerten, da eine solche Lösung bis dato auf dem freien Markt nicht verfügbar ist. Die agile Projektgestaltung, die durch regelmäßige Sprints und Reviews gekennzeichnet war, sorgte für eine kontinuierliche Verbesserung der Ergebnisse. Somit wurde das wissenschaftlich und technisch komplexe Projekt in einer effizienten Weise bearbeitet, die sowohl für SEITEC als auch für den gesamten Verbund von großer Bedeutung war.

queo

Das Teilvorhaben ermöglicht queo durch die entstandene Assistenzapplikation an sich einen Einstieg in bisher nicht erschlossene Märkte. Weiterhin konnte durch die erstellten Templates und Bibliotheken die Arbeit an zukünftigen individuellen Anwendungen vereinfacht werden. Besonders die gemachten Erfahrungen bei der Abbildung von

notwendigen Interaktionen und Schichten bei der Anbindung von externen Modulen (Fehlerdaten, KI-unterstütze Ursachen und die Identifikation der korrekten Strategie) haben das technische Risiko bei der Umsetzung von Assistenzsystemen mit einer hohen Integration in die Datenwelt der Produktion deutlich verringert. Auf Basis der Ergebnisse können nun ganzheitliche Systeme mit einer gesteigerten Integration in die Produktion erstellt und wirtschaftliche Vorteile genutzt werden.

Die Integration von Modulen, die Daten (Daten aus den Maschinen selbst) und Methoden (KI-Analyse und Bewertung) nutzen, die queo nicht selbst herstellen kann, wurde durch die gewählte und ausgetestete Architektur validiert und ermöglichen integrierte Assistenzsysteme zu erstellen, die ein deutlich bessere Unterstützung der Nutzer anbieten.

# V. Ergebnisse

## V.1 Wesentliche Ergebnisse des Verbundprojektes

Im Rahmen des KausaLAssist Projekts ist ein in der Praxis validierter Softwarestack für intelligentes Fehlermanagement entstanden. Die Lösung erhöht die Leistung und Verfügbarkeit von Produktionsstätten, indem Störungen schnell erkannt, darüber informiert und geeignete Lösungen präsentiert werden. Als wesentliches Ergebnis des Verbundprojekts, wird der Stack nachfolgend kurz vorgestellt, dessen Funktionsweise am Beispiel illustriert und abschließend eine Analyse zu dessen Effektivität vorgestellt. Im Zweiten Teil des Kapitels werden die wesentlichen Ergebnisse der jeweiligen Teilprojekte dargestellt.

### V.1.1 KausaLAssist Stack – Wesentliche Ergebnisse und Funktionsweise

Die wesentlichen Ergebnisse des Stacks, können in die folgenden drei Bereiche gefasst werden:

| | |
|---|---|
| 1. Datenerfassung & -anbindung | OPC UA Infrastruktur von SEITEC, Error-DB von InfAI |
| 2. Datenverarbeitung & -analyse | Kausale Lernmethoden & Analysen (Causal-AI) vom IWU und Smart Data Analyzer von SEITEC |
| 3. Nutzerinteraktion | Werker-App (Live-Daten) & Dashboard (Datenpflege) von queo |

Der Stack ist vereinfacht dargestellt in Abb.  (ohne Dashboard zur Datenpflege).

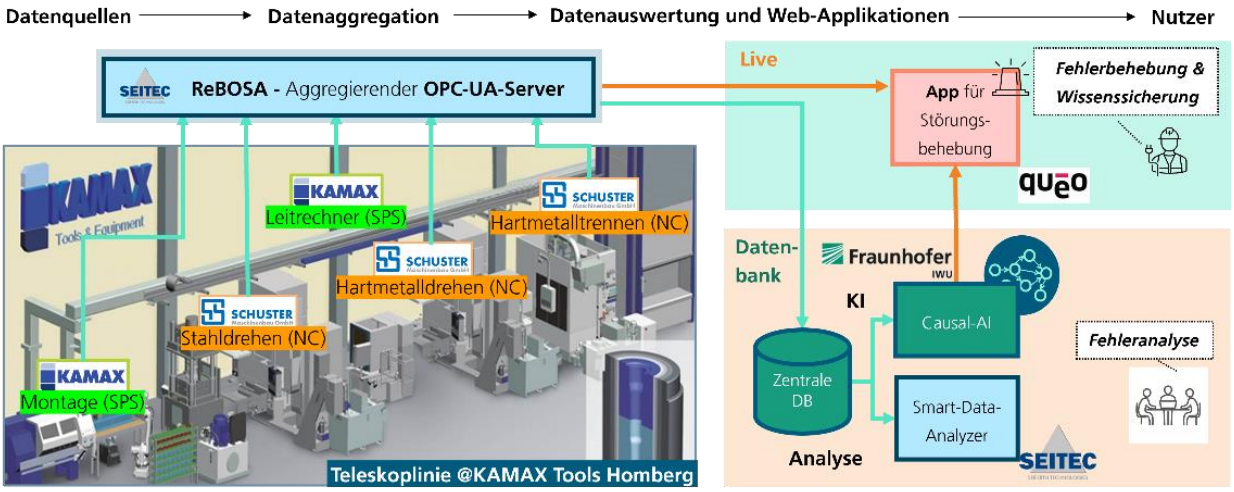


Abb. 2  KausaLAssist erfasst alle Meldungen und Prozessdaten der Maschinen. Für die Werker relevante Meldungen, werden priorisiert gemeinsam mit Lösungsvorschlägen in einer App präsentiert. Die archivierten Daten werden von KI (Causal-AI) und der Produktionsleitung ausgewertet, neue Lösungen hinterlegt und eine kontinuierliche Verbesserung erreicht.

Basis für KausaLAssist bildet die Erfassung aller Meldungen und Prozessdaten der Maschine. Die Meldungen werden kategorisiert („Benötigen Werker“ vs. „Kein Werker benötigt“) und priorisiert. Die für die Werker relevanten und priorisierten Meldungen sind über eine Web-Applikation (Abb. 3) zugänglich. Für die Störungsmeldungen sind Lösungsvorschläge hinterlegt und weitere Informationen können vom Werker in Bild und Ton hinzugefügt werden.

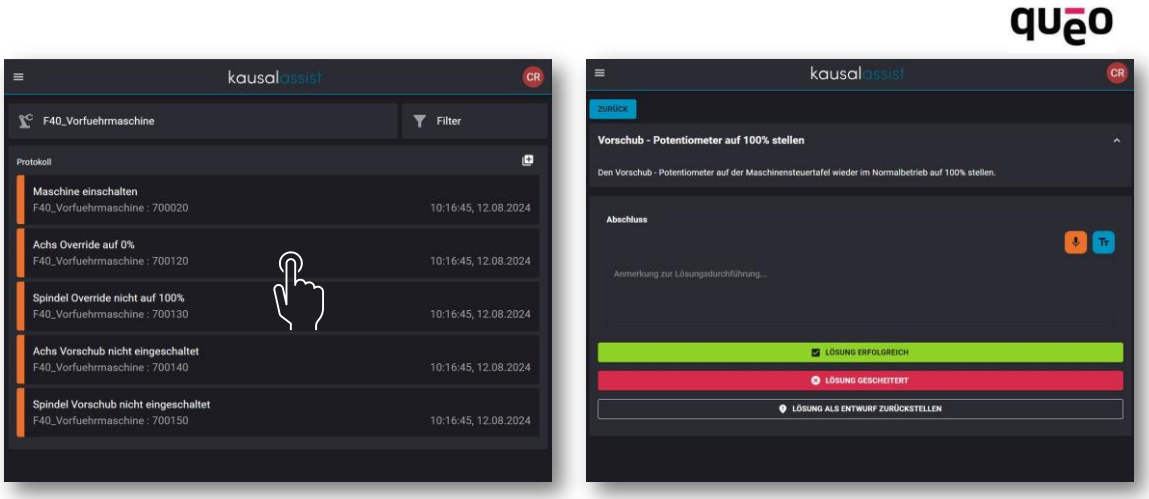


Abb. 3 KausaLAssist Applikation zur priorisierten Darstellung von Störungsmeldungen und dazugehörigen Lösungsvorschlägen. Entwickelt von Projektpartner queo.

Alle Meldungen werden auch in einer Datenbank erfasst, welche eine Auswertung durch die Produktionsleitung, als auch durch KI-Algorithmen erlaubt. Von der Produktionsleitung werden verbesserte Lösungen hinterlegt, häufige Störungsursachen identifiziert und eine datenbasierte, kontinuierliche Verbesserung erreicht. KI-Algorithmen (Causal-AI) werten die Produktionsdaten und Meldungen aus und erkennen kausale Zusammenhänge zwischen den Daten. Diese kausalen Zusammenhänge werden im Hintergrund genutzt, um Folgefehler von ursächlichen Fehlern zu unterscheiden und Lösungsvorschläge situationsspezifisch zu gewichten. Mit wachsendem Datenbestand werden die KI-Empfehlungen aufgrund kausaler Beziehungen immer genauer und die Werker können noch effektiver in der Störungsbehebung unterstützt werden.

Im Resultat werden Störungs- und Stillstandszeiten reduziert und die Ausbringung gesteigert, was auch durch Analysen im Rahmen des Projekts gezeigt wurde

### V.1.2 KausaLAssist – Effekt auf Stillstände und Ausbringung (Analyseergebnis bei KAMAX)

In einer Analyse wurde der Effekt von KausaLAssist auf die Teleskoplinie beim Projektpartner KAMAX untersucht. Hierfür wurden Leistungs- und Verfügbarkeitsmetriken vor und nach dem GoLive der KausaLAssist Applikationen für die Werker erfasst und verglichen. Am 23.09.24 wurde die KausaLAssist Web-Applikation bei KAMAX Tools für Werker eingeführt, um Fehler zu priorisieren und Lösungsvorschläge zu bieten.

Die Analyse verglich die Ergebnisse der Frühschicht vor und nach dem Go-Live, wobei die Kerntrennmaschine (Erste Maschine in Prozesskette) als Referenz ausgewählt wurde. Diese Maschine gilt als Engpass für den Durchsatz, da das Kerndrehen von der erfolgreichen Bearbeitung im Kerntrennen abhängt. Die erfassten Metriken umfassen die Anzahl der fertiggestellten Aufträge, die Anzahl produzierter Teile, die Störungsdauer und die mittlere Störungsbehebungszeit (MTTR):

- Aufträge:
  - Anzahl fertiggestellter Aufträge (Matrizen) bis zum Ende der Frühschicht
  - Jeder Auftrag kann aus mehreren Teilen (Kernen) bestehen
- Teile:

  - Anzahl produzierter Teile (Kerne) bis zum Ende der Frühschicht
- Störungsdauer (s):
  - Summe der Zeit in Störung während Frühschicht (Nur Meldungen, welche direkten Eingriff vom Werker erfordern)
- MTTR = Mean Time to Recover / Mittlere Störungsbehebungszeit (in s):
  - Durchschnittliche Dauer, wie lange eine Störung ansteht:
  - Zeit von Detektion der Störung bis erfolgreichen Wiederanlauf der Anlage nach Lösung durch Werker

**Ergebnisse**

Die wesentlichen Ergebnisse der Analyse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Durch KausaLAssist entstand eine Reduktion der MTTR um 48%, wodurch die Ausbringung in Form der Aufträge um +23,5% gesteigert werden konnte.

| | Aufträge | Teile | Störungsdauer (Gesamt in s) | MTTR (s) |
|---|---|---|---|---|
| Referenz | 5,4 | 9,0 | 5673,9 | 1036,2 |
| **Mit KausaLAssist** | **6,7** | **9,8** | **1884,5** | **538,3** |
| Relative Änderung | +23,5% | +8,6% | -66,8% | -48,0% |

Tab. 1 Ergebnisse des Vergleichs der Frühschichten: Um 48% reduzierte Störungsbehebungszeit resultiert in 23,5% mehr gefertigte Aufträge.

Die messbaren positiven Effekte durch KausaLAssist in der realen Fertigung bilden das wichtigste Ergebnis des Verbundprojekt.

## V.2 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2021

IWU

- Entwicklung der KausaLAssist Systemarchitektur im Software-Team
- Implementierung zentraler Logging-Komponenten (ELK-Stack) und Exception-Handling (sentry.io)
- Entwicklung des "causalgraphTS" Softwaremoduls mit Funktionen für:
  - Ontologie zur Definition der Graphenbestandteile
  - Hinzufügen von kausalen Knoten und Kanten
  - Umwandlung in networkX MultiDiGraph
  - Statische Visualisierung
- Erstellung von Fehlerkatalogen mit Anwendungspartnern
- Konzeption von Use-Cases und Testszenarien
- Erweiterung des ursprünglichen Konzepts um Fehler zwischen Software-Systemen (MES, ERP, etc.) und Maschinen
- Erfolgreicher Abschluss von Meilenstein 1

SMB

- Sammlung von typischen Fehlerzuständen anhand diverser Kriterien klassifiziert und in einem Fehlerkatalog dokumentiert.
- Konzeption des Anwendungsfalls „KI-befähigte Werkzeugmaschinen mit integriertem Fehlermanagement“. Das Konzept beinhaltet die Definition der Problemstellung, sowie die Ergebnisse der folgend aufgeführten Tätigkeiten:
  - Unterteilung der Fehlerfälle in drei Prioritätsklassen in Abhängigkeit der Lösungsmöglichkeiten.
  - Die ausgearbeiteten Softwarefunktionalitäten und Schnittstellen für die Fehlermanagementapplikation.

- Die Definition von drei Komplexitätsstufen, die festlegen, was in dem Simulationsprogramm ISG-Virtuos und der KI-Trainingsumgebung modelliert und simuliert werden soll.
- Drei Testszenarien inkl. der Kriterien für eine quantitative Bewertung der Ergebnisse.
- Entwicklungsroadmap anhand der zuvor erarbeiteten Ergebnisse.

KAMAX

- Projektstart „KausalAssist“ – Entwicklung eines intelligenten Fehlermanagement-Systems für die Fertigung von Teleskopmatrizen bei KAMAX T&E
- Enge Zusammenarbeit mit Endanwendern zur praxisnahen Erfassung der Softwareanforderungen
- Durchführung fundierter Recherchen in wissenschaftlicher Literatur zur konzeptionellen Untermauerung des Systems
- Aktive Mitwirkung in etablierten Arbeitsgruppen sowie regelmäßige Teilnahme an projektbezogenen Meetings zur Abstimmung und Koordination
- Erfolgreicher Abschluss des ersten Projektmeilensteins als Grundlage für die nächste Entwicklungsphase hin zur digitalisierten Fertigung der Zukunft

IP

- Beteiligung am gemeinsamen Projektstart und der Architekturentwicklung
- Mitwirkung bei der Konzeptionsphase
- Teilnahme an den etablierten Arbeitsgruppen und regelmäßigen Meetings

ISG

- Erstellung des digitalen Zwillings nach den Funktionseinheiten der Schuster Ringdrehmaschine
- Anbindung des digitalen Zwillings an die Steuerung für den Hardware-in.the-Loop Betrieb

SEITEC

- Gemeinschaftliche Erstellung einer Architektur für die KausaLAssist Fehlermanagement-Lösung im Software-Team
- Konzeptionelle Entwicklung des „Smart-Data-Provider“ (SDP) mit Anbindung an den Event-Bus
- Erforschung und Konzeption eines selektiven Datenspeichers (Speicherung des Maschinenzustands) mit Rule-Engine
- Mitarbeit an Konzeption und Umsetzung der „Central Services“ - Module im Software-Team
- Evaluierung verschiedener Technologien für eventbasierte Kopplung von Komponenten (Apache NiFi, Apache StreamPipes, NodeRed, u.v.m.)
- Evaluierung/Konzeption für das Betreiben der einzelnen Softwaremodule (Docker)
- Mitwirkung bei der Erstellung der Fehlerkataloge (Anwendungspartner SMB-KAMAX, IP) und darauf aufbauend Konzeption der Use-Cases
- Aufbauend auf den Anwendungsfällen wurden Testszenarien zur Evaluation abgeleitet

queo

- Gemeinschaftliche Erstellung einer Architektur für die KausaLAssist Fehlermanagement-Lösung im Software-Team
- Unterstützung bei der Aufnahme der Anforderungen an die zukünftigen Softwarekomponenten
- Mitarbeit an Konzeption und Umsetzung der „Central Services“ - Module im Software-Team
- Aufbauend auf den Anwendungsfällen wurden Testszenarien zur Evaluation abgeleitet

## V.3 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2022

IWU

- Erfolgreiche Entwicklung und kontinuierliche Erweiterung des KausalAssist Stacks mit Integration verschiedener Funktionalitäten, darunter die Implementierung von etwa 350 Softwaretests
- Erfolgreiche Installation des Systems bei KAMAX im September 2022 mit Anbindung von fünf Maschinen über OPC UA Server, was zur Erfassung von über 85.000 Fehlerdatensätzen von circa 650 verschiedenen Fehlertypen führte
- Entwicklung und Veröffentlichung der Open-Source Python-Bibliothek "causalgraph" auf GitHub, inklusive einer wissenschaftlichen Publikation auf arXiv.org
- Erste manuelle Erstellung von Expertengraphen basierend auf KAMAX-Fehlerdaten zur späteren Validierung der algorithmisch erzeugten Graphen
- Aufbau einer MLOps-Pipeline zur systematischen Erprobung und Bewertung verschiedener Algorithmen für die Erzeugung kausaler Fehlergraphen

SMB

- Eine maschinennahe Laufzeitumgebung für die Softwarekomponenten wurde in Form von virtuellen Maschinen (VM) bei KAMAX eingerichtet.
- Die VM wurde mit den für das Fehlermanagement benötigten Datenquellen an den SMB-Maschinen und dem KausaLAssist Softwarestack vernetzt.
- Drei SMB-Werkzeugmaschinen bei KAMAX erhielten OPC UA Server zur Fehlerübertragung über die OPC UA Alarms & Conditions Schnittstelle der SINUMERIK 840D.
- Das IWU wurde beim Abbilden von Domänenwissen und Datenquellen im Kausalen Graphen unterstützt.
- Der Fehlerkatalog aus AP1 wurde um mögliche Ursachen, Ausfallzeiten und passende Lösungsstrategien erweitert.
- Zur Erstbewertung der Softwarekomponenten wurde ein Taster am Machine-Control-Panel zur Fehler-Simulation ergänzt.
- Die SMB-Werkzeugmaschine „Ringdrehmaschine“ wurden gemeinsam mit der Fa. ISG virtualisiert und mit einer Steuerung von SEITEC verknüpft. Wesentliche Maschinenfunktionalitäten konnten erfolgreich virtualisiert werden.

KAMAX

- Fehlerdatenbank weiterentwickelt
  - Datenbankschema um zusätzliche, relevante Attribute ergänzt
- Technische Infrastruktur aufgebaut
  - Virtuelle Maschinen im KAMAX-Rechenzentrum bereitgestellt
  - Maschinensteuerungen aktualisiert, um OPC-UA-Kompatibilität herzustellen
- Fehlererfassung in der Fertigung umgesetzt
  - Einführung der Erfassung von Software-, Hardware- und Maschinenfehlern in der Kleinserienfertigung
  - Filterung häufiger Erfassungsfehler zur Sicherstellung der Datenqualität
- Erste Softwareprototypen ausgerollt
  - Prototypen von Fehlerdatenbank und Benutzeroberfläche implementiert
  - Nutzerauthentifizierung via Keycloak integriert
- Fehlerbehebungsprozesse definiert
  - In Abstimmung mit Bedienern und Ingenieuren bekannte Fehler analysiert und gruppiert
  - Ursachen und Lösungsstrategien systematisch zugeordnet
- Benutzeroberflächen iterativ entwickelt
  - Mockups und Prototypen erstellt

- Feedback aus mehreren Schleifen mit Endanwendern integriert
- Projektaktivitäten im Q4 reduziert
  - Ressourcenverlagerung aufgrund des Aufbaus einer neuen digitalisierten Fertigungslinie
  - Abstimmung mit Projektpartnern erfolgte im Vorfeld
- Wichtige Termine und Abstimmungen
  - Regelmäßige digitale Projektmeeting
  - 17.–19.05.2022: Arbeitstreffen bei SEITEC in Erfurt
  - 05.–07.09.2022: Rollout des KausalAssist-Softwarestacks bei KAMAX

IP

- Erweiterung der Robo-Operator-Software um Störungsprotokollfunktionen
- Entwicklung verbesserter 3D-Kamera-Funktionen für die Störungserfassung (Mustererkennung, Freiraumprüfung)
- Installation neuer Hardware zur Fehlerbehandlung, u.a. Ablassdüse und universelle Werkstückaufnahme
- Entwicklung eines modularen Konzepts für auswechselbare Hilfsmodule am Werkstückgreifer
- Implementierung von automatisierten Reaktionsstrategien für häufige Fehler, z.B. bei fehlerhafter Werkstückeinlage oder -ausrichtung
- Aktualisierung und Erweiterung des bestehenden Fehlerkatalogs

ISG

- Entwicklung von Schnittstellen, die es dem Partner IWU ermöglicht hat, einen Python-Wrapper zu entwickeln wodurch die KI-Umgebung mit Python angebunden werden kann
- Modellierung der ersten Fehlerfälle aus der KAMAX Fehlerdatenbank in der Simulationsumgebung
- Projektierung einer digitalen Ausgangsklemme am Simulationsrechner, um die Signale vom Messtaster in den schnellen NC-Eingang der Sinumerik zu übertragen
- Kontinuierliche Adaption des digitalen Zwillings an neue Anforderungen

SEITEC

- Erstellung einer ersten Version des KausaLAssist Stacks durch SEITEC und Partner
- Fortlaufende Erweiterung dieser Version mit neuen Funktionen im Laufe des Jahres durch konsequente Umsetzung der in 2021 konzeptionierten Architektur
- Wesentliche Arbeiten von SEITEC lagen in Entwicklung folgender zwei Software-Module:
  - „Smart Data Provider“ (SDP):
    - OPC-UA Client Anwendung
    - Intelligente Fehlerspeicherung von OPC-UA Server Events (Alarms and Conditions) in die ErrorDB
    - Absicherung der Anwendung durch Einsatz von KeyCloak
    - Reset-Detection (Betätigung des Reset-Knopfes an der Maschine soll erkannt und ausgewertet werden – wichtig für korrekte Störzeiterkennung)
    - Behandlung von Verbindungsabbrüchen, allgemeine Stabilitätsverbesserung
  - „Reference-based OPC UA Server Aggregator" (ReBOSA):
    - Aggregierender historisierender OPC-UA-Server
    - Aggregationen mehrerer Server – zentraler Zugriffpunkt

- Historical Data Access (Kurzzeit-Historie / Ringpuffer, einstellbare Zeit)
- Kleine Frontend-Applikation (UI)

queo

- Im Rahmen des Berichtsjahres ist die Entwicklung des Softwarearchitektur stetig vorangegangen. Diese wurde samt prototypischer Fehlermanagementkomponenten beim Projektpartner KAMAX für dessen Anwendungsfall ausgerollt.
- Folgende Funktionen sind im Berichtsjahr in den Applikationen von queo umgesetzt worden:
  - FMA – App (Applikation für den Nutzer an der Maschine): Die FMA App zeigt den Zustand der Maschinen zum aktuellen Zeitpunkt an und informiert den Nutzer über neu gemeldete Fehler. Dabei gibt es eine Historie, so dass der Nutzer auch den Verlauf des Gesamtsystems bzw. einzelner Environments überblicken kann. Der Nutzer kann sich den Fehler und die verbundene Lösungsstrategie anzeigen lassen. Alle diese Informationen kommen aus der gemeinsamen Datenhaltung des KausalAssist Stacks. Der Nutzer kann die angezeigte Lösung abarbeiten und entsprechend dokumentieren. Weiterhin sind bestimmte Anforderungen an dieser Stelle für den Nutzer umgesetzt. Dazu gehören, dass neue Lösungen schnell angelegt werden können oder im Stressfall Fehler einfach schnell quittiert werden. Diese Fälle werden entsprechend markiert und dem Nutzer zur späteren Dokumentation in der Dashboard Applikation angezeigt.
  - Dashboard App (Verwaltung des Systems und der Fehlerfälle) In dieser Applikation können Nutzer Fehlerzusammenhängen analysieren, Lösungsstrategien auf Wirksamkeit prüfen, diese anpassen bzw. aus den neuen Vorschlägen der Nutzer der FMA-App neue Strategien ableiten. Weiterhin wurde für die spätere Nutzung der Gesamtanwendung ein Konzept etabliert, bei dem das Wissen des Maschinenbedieners, dass nicht über automatisierte Fehler oder Sensorwerte erkannt werden kann auch in das System integriert werden. Dazu werden bestimmte Zustände vor einer Entscheidung zur Anzeige einer Lösungsstrategie vom Nutzer erfragt und Grenzen den Fehlerzustand weiter ein.

## V.4 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2023

IWU

- Entwicklung eines synthetischen Trainingsdaten-Generators für große kausale Graphen, der die Validierung der KI-Methode ermöglicht
- Erfolgreiche Implementierung einer skalierbaren KI-Methode zum Erlernen kausaler Beziehungen mit hoher Genauigkeit bei geringem Rechenaufwand
- Erlernen eines kausalen Graphen (Maturity Stufe 1) der KAMAX-Linie aus Alarm-Daten mit über 300 Knoten
- Erweiterung des KausaLAssist Stacks um wichtige Funktionalitäten wie Fehlerpriorisierung und KI-Funktion für semantische Suche
- Integration des Systems bei Schuster Maschinenbau (SMB) mit einem weiteren Steuerungstyp (SINUMERIK One)
- Wissenschaftliche Veröffentlichung bei IEEE INDIN 2023 zum Konzept des kontinuierlichen Lernens

SMB

- Die SMB-Werkzeugmaschine „Ringdrehmaschine“ bei KAMAX wurde gemeinsam mit der Fa. ISG virtualisiert. Dieser digitale Zwilling wurde erweitert und weiter optimiert, um wesentliche Maschinenfunktionalitäten und NC-Programme

automatisiert durchlaufen zu lassen damit Fehlersituationen simuliert und Trainingsdaten für den kausalen Graphen generiert werden können.

- Der KausaLAssist Stack wurde bei Schuster Maschinenbau (SMB) ausgerollt und damit ein weiterer Steuerungstyp (SINUMERIK One) integriert.
- Unterstützung bei der Erzeugung realistischer Ursache->Fehler Daten am digitalen Zwilling durch das IWU.

KAMAX

- Systemintegration und Kommunikation
  - Durchführung eines SPS-Hardware-Updates an Leitrechner und Montagezelle der Teleskoplinie zur Kompensation gestiegener Reaktionszeiten durch OPC-UA-Testbetrieb.
  - Weiterentwicklung der OPC-UA-Modellierung zur verbesserten Steuerungsintegration an der Teleskop-Fertigungslinie.
  - Stabilisierung und Erweiterung der Anbindung an übergeordnete Systeme (MES, SAP, Auftragsanlage).
  - Einführung einer systemweiten eindeutigen ID für jeden Produktionsdurchlauf zur zuverlässigen Verknüpfung von Fertigungs- und Auftragsdaten in der zentralen Datenbank.
- Wissensmanagement
  - Inkrementeller Ausbau der Wissensdatenbank durch systematische Strukturierung des Erfahrungswissens von Maschinenbedienern und Ingenieuren.
  - Erweiterung der Datenbank um neue Fehler-Lösungs-Kombinationen zur Unterstützung des intelligenten Fehlermanagements.
- Benutzerschnittstelle und Anwendung
  - Optimierung der Applikationsoberfläche und Workflow-Gestaltung in enger Zusammenarbeit mit Projektpartner queo.
  - Start des Testbetriebs mit Version 1.0 der KausaLAssist-Applikation an der Teleskoplinie.
  - Kontinuierliche Rückführung von Feedback aus dem Testbetrieb (Werker, Ingenieure) zur Verbesserung von UI und Nutzererfahrung.
- Strategische Weiterentwicklung
  - Definition der weiteren Entwicklungsroadmap im Rahmen eines Arbeitstreffens bei Schuster Maschinenbau.
  - Durchführung regelmäßiger digitaler Arbeitstreffen und Jour-Fixe-Termine in projektübergreifenden Arbeitsgruppen.
- Projekt- und Konsortialtreffen
  - 10.–12. Mai 2023, Dresden: Arbeitstreffen mit Schwerpunkt Usability-Optimierung und Sprintplanung für die weiterentwickelte Fehlermanagement-App.
  - 08. September 2023, Homberg (Ohm): Inbetriebnahme der weiterentwickelten KausaLAssist-Applikation gemeinsam mit IWU, SEITEC und queo.
  - 18.–20. Oktober 2023, Denklingen: Gesamtprojekttreffen bei Schuster Maschinenbau mit Fokus auf wirtschaftliche Verwertung sowie Besichtigung und Inbetriebnahme der Applikation.

IP

- Entwicklung einer Funktion zur Hinderniserkennung beim Werkstück-Handling mittels taktilen Fahrens
- Erweiterung der Fehlererkennung und -behebung für Robotergreifer und Werkzeugmaschinen-Spannmittel
- Verbesserung der Software zur Auswertung von Störungssignalen an Werkzeugmaschinen

- Implementierung einer Betriebsstunden- und Zykluserfassung für verschleißabhängige Fehlerreaktionen
- Komplette Überarbeitung des Störungsmanagements mit vereinheitlichtem Ausgabeformat und unbegrenztem Protokoll
- Optimierung der Positions-Markierungserkennung für eine höhere Wiederholgenauigkeit bei automatisierten Prozessen

ISG

- Ausbau der virtuellen Abbilder der Anwendungsfälle auf Prozesskette durch Erhöhung des Detailgrads, der Modellierung weiterer Maschinen und der prototypischen Anbindung weiterer Fertigungsinformationen der Prozessleitebene
- Modellieren einer Logik für das automatisierte Beladen und Entnehmen der Werkstücke, um eine nahtlose Simulation der Bearbeitung mehrerer Werkstücke hintereinander ohne manuelles Eingreifen zu ermöglichen
- Modellieren einer Logik für das Erzeugen eines Messfehlers des Messtasters

SEITEC

- Weiterentwicklung Softwarekomponenten SDP und ReBOSA
  - Anbindung von SDP an ReBOSA, sowie entsprechendem Rollout
  - Speicherung von komplexen Datasets, sowie Export über RestAPI
  - Korrekte Verarbeitung aller Nachrichten (korrekte Konfiguration für OPC-UA Server) -> keine Informationen gehen mehr verloren
  - Anwendungen HTTPS-fähig gemacht
  - Anbindungen neuartiger Steuerung (Sinumerik One von SMB)
- Neuentwicklung SDA
  - Mensch-zentriertes Anwender-Tool
  - Import von oben erstellten Datasets, die zur KI-Analyse genutzt werden
  - Abbild der Maschinen zum Fehlerzustand wird durch SDS gespeichert
  - Maschinenlieferanten oder Endanwender können gespeicherten Daten importieren und umfangreich analysieren und visualisieren
  - Menschliche Analyse dieser Daten ohne das Tool unmöglich

queo

- Entwicklung der Softwarearchitektur und Fehlermanagementkomponenten:
  - Entwicklung der Fehlermanagementoberfläche (Benutzerinterface, Anbinden der Fehlerdatenbank, Anbindung der Lösungsstrategie-DB, Darstellen von kausalen Graphen, Eingabe/Adaption von kausalen Graphen, Eingabe von Lösungsstrategien)
  - Anbindung von REST-APIs zur Bereitstellung der Funktionalitäten an User-Interface
  - Kontinuierlicher Austausch mit Anwendern (Usability, Akzeptanz) und Anforderungsanpassung
  - Evaluation des aktuellen Entwicklungsstands, Entwicklungsroadmap anpassen
- Ersteinrichtung der Softwarearchitektur in allen Anwendungsfällen:
  - Einrichtung der aktuellen Entwicklungsstufe der Softwarelösung in allen drei Anwendungsfällen

- Der Fokus bei der Weiterentwicklung der verschiedenen Anwendungen lag auf der Verbesserung der Usability und der Akzeptanz bei den Nutzern. Weiterhin wurden die noch fehlenden Komponenten für weitere Funktionalitäten gerade in der Dashboard App zur Verfügung gestellt.
- Der vorhandene Softwarestack wurde bei 2 Anwendungspartner bereitgestellt und wird seither mit Updates versorgt.

- Weiterentwicklung der Fehlermanagementapplikation für ganzheitlichen Einsatz in komplexen Prozessketten
- Kontinuierlicher Austausch mit Anwendungsfällen für Verbesserung der Applikation
- Eventgestützte Nutzerbenachrichtigung und Anzeigen der Störungsdetektionsergebnisse sowie der dazugehörigen Lösungsstrategien
- Anleitung des Nutzers durch Lösungsstrategie zur Fehlerbehebung
- Erprobung der Eingabe von Lösungsstrategien im laufenden Betrieb

### V.5 Wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte 2024

IWU

- Masterarbeit zur Fehlerpriorisierung mit kausalen Graphen (Abschluss 01/24) und Diplomarbeit zum Erzeugen realistischer Ursache→Fehler Daten am digitalen Zwilling (Unterstützt von ISG+SMB, Abschluss 05/24)
- Annotation von Fehlerclustern erheblich vereinfacht durch Einführung eines automatischen Clusterings von Fehlermeldungen (auf Basis von Zeit und / oder kausaler Graphen)
- Aufbereitung von Fehlerstammdaten (1550 Fehlertypen mit je 1-3 hinterlegten Lösungen) durch LLM: Aufsplitten in verschiedene Lösungen/Ursachen + Überführung in bessere Formatierung für Darstellung in Fehlermanagement-App
- Weiterentwicklung von KI-Methode für das Erlernen großer kausaler Graphen zu SCALE, welches Lernen mit großer Geschwindigkeit und hoher Genauigkeit ermöglicht, Patentierung wird geprüft
- Vortrag auf SmartFactory 2 Tagung zum Thema OPC UA + 2 Beiträge in Projektatlas „KI in der Produktion“
- Entwicklung MS-Teams Notifier zur schnellen Benachrichtigung bei Maschinenstillständen
- Entwicklung Analyse-Modul zur Extraktion der Stillstands-& Störungszeiten auf Basis der Error-DB: Einführen neuer Kategorien, Klassifikation und Programmierung von Berechnungen und Visualisierungen
- finaler Go-Live bei KAMAX mit Vorher-/Nachhervergleich der Stillstands- & Störungszeiten: Durch KausaLAssist schnellere Behebung (-48% MTTR) und dadurch +23,5% mehr Ausbringung in Form von Aufträgen
- Videoproduktion von Imagefilm für Projekt und dessen Ergebnisse

SMB

- Der digitale Zwilling wurde erweitert und weiter optimiert, um wesentliche Maschinenfunktionalitäten und NC-Programme automatisiert durchlaufen zu lassen damit Fehlersituationen simuliert und Trainingsdaten für den kausalen Graphen generiert werden können.
- Der KausaLAssist Stack wurde bei Schuster Maschinenbau evaluiert und getestet. Im Rahmen der regelmäßigen Sprintplanungen wurde aktiv Feedback zum Prinzip Ursache => Fehler => Lösung gegeben und an der weiteren Entwicklung mitgewirkt.
- Gemeinsam mit den Projektpartner wurde an der Lösungsstrategieentwicklung und dem Fehlermanagement gearbeitet, um diese bei den jeweiligen Anwendungsfällen zu unterstützten.

KAMAX

- Produktionsnaher Go-Live der KausaLAssist-Applikation
  - Erfolgreicher Echtstart (Go-Live) des Fehlermanagement-Systems an der Teleskoplinie bei KAMAX

- System ist nun aktiv in die laufende Produktion integriert und unterstützt die tägliche Fehlererfassung und -analyse
- Stabilisierung und Fehlerkorrekturen im laufenden Betrieb
  - Identifikation und Behebung spezifischer Fehler im Bereich der MES-Kommunikation (Fehlerrouting)
  - Verbesserung der Systemzuverlässigkeit durch gezielte Softwareanpassungen
- Fortführung des produktionsnahen Testbetriebs
  - Kontinuierliche Überwachung und Validierung der Applikation im realen Produktionsumfeld
  - Rückführung von Nutzerfeedback in die Weiterentwicklung zur Optimierung der Usability und Performance
- Kommunikation und Ergebnissicherung
  - Erstellung von Videomaterial zur Ergebnisdokumentation im Rahmen des Abschlussberichts
  - Videodreh im November 2024 am Standort Homberg (Ohm) zur Darstellung des Systemeinsatzes im Praxisbetrieb

IP

- Entwicklung eines Konfigurationsmoduls für die Verwaltung mehrerer Produkt- und Maschineneinstellungen
- Schaffung einer benutzerfreundlichen Parametrierung für vorbereitete Abläufe
- Implementierung einer konfigurierbaren Bedienerinteraktion bei Fehlerfällen
- Entwicklung einer Texterkennung für Störmeldungen auf CNC-Maschinendisplays
- Optimierung der Werkstück-Lageerkennung für verschiedene Umgebungsbedingungen
- Erstellung eines Werkzeugs zur anwendungsspezifischen Genauigkeitsbestimmung
- Integration und Test des Partner-Softwarestacks mit dem Robo Operator
- Durchführung von Demonstrationsabläufen zur Validierung aller Funktionen

ISG

- Erstellen von Control-Panel zur Steuerung der Fehlerfälle aus der Simulation
- Modellieren von Sensorbereichen zur Bauteilabfrage, die ebenfalls Fehlerfälle bereitstellen können
- Bereitstellen einer Funktion zur Kopie des „hierarchical Names“ zur Manipulation des entsprechenden Ports über eine dll.

SEITEC

Weiterentwicklung an Softwarekomponenten:

- SDA
  - Subscription-View: Werte von beliebigen Variablen zu beliebigem Zeitpunkt
  - Gantt-Diagramm-View: Darstellung aller Fehler in zeitlichem Ablauf
  - Möglichkeit Wechsel zwischen UTC und lokaler Zeitzone
  - Umfangreiche Bugfixes, sowie Verbesserung der UI in der gesamten App
- ReBOSA
  - Refresh-Event-Support: Refresh-Event-Calls werden an Source-Server weitergeleitet und entsprechend verarbeitet
  - Profile-Feature:
    - Kein einheitliches Event-Design von unterschiedlichen OPC-UA-Servern
    - Oftmals sogar bei einem Server verschiedene Event-Darstellungen
    - Stellt Kompatibilität zu OPC-UA-Servern verschiedener Anbieter sicher, da alle von ReBOSA geworfenen Events in neu entwickeltem, einheitlichem Schema erzeugt werden
    - Alle nachgelagerten Anwendungen können sich so nur an das eine Schema anpassen

- Ausbau Funktionalität um genormten zentralen Zugriffspunks
- SDP
  - Anpassung an Profile-Feature von ReBOSA
  - Stündliches Auslösen von ReBOSA Refresh-Events, um Event-Katalog aktuell zu halten
  - Korrektes Verhalten, wenn gleiche Fehler sehr oft auftreten (Flickering von Events)

Vortrag auf „SmartFactory 2“ Tagung zum Thema OPC UA + Beitrag in Projektatlas „KI in der Produktion“

queo

- Der Fokus bei der Weiterentwicklung der verschiedenen Anwendungen lag auf der Verbesserung der Usability und der Akzeptanz bei den Nutzern. Weiterhin wurden die noch fehlenden Komponenten für weitere Funktionalitäten gerade in der Dashboard App zur Verfügung gestellt.
- Der vorhandene Softwarestack wurde bei 2 Anwendungspartner bereitgestellt und wird seither mit Updates versorgt.
- Weiterentwicklung der Fehlermanagementapplikation für ganzheitlichen Einsatz in komplexen Prozessketten
- Kontinuierlicher Austausch mit Anwendungsfällen für Verbesserung der Applikation

# VI. Fortschreibung des Verwertungsplans

## VI.1 Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse – Zusammenfassung Verbund

Die Ergebnisse des Verbundprojekts zeigen eine Vielzahl innovativer Ansätze und praxisnaher Lösungen, die von den beteiligten Partnern entwickelt wurden, um sowohl wissenschaftliche als auch wirtschaftliche Ziele zu erreichen. Im Fokus standen die Entwicklung und Implementierung skalierbarer KI-Methoden, digitaler Modelle sowie modularer Systeme, die in der Industrie direkt verwertbar sind. Die Teilprojekte tragen durch ihre spezifischen Beiträge zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit, zur Prozessoptimierung und zur nachhaltigen Nutzung der Ergebnisse bei.

Das IWU entwickelte eine skalierbare KI-Methode für kausales Lernen mit hohem Praxisnutzen, die durch Patentierung und die Open-Source-Bibliothek „causalgraph“ sowohl kommerziell als auch akademisch verwertet wird. SMB erweiterte sein Know-how im Bereich OPC UA und etablierte digitale Zwillinge, die Prozesse beschleunigen und Fehleranalysen verbessern. KAMAX reduzierte Stillstandszeiten durch intelligentes Fehlermanagement und schuf eine Basis für datenbasierte Optimierung, während die Lösungen auf andere Fertigungsbereiche übertragbar sind. IP verbesserte den „Robo Operator“ für autonomen Betrieb und plant Umsatzwachstum durch neue Systeme und Produktdiversifikation. ISG nutzt KI-Training-Software für virtuelle Inbetriebnahmen und stärkt damit seine Marktposition. SEITEC integrierte die Ergebnisse in sein Produktportfolio, erweiterte IoT- und KI-Kompetenzen und schuf skalierbare Lösungen mit Alleinstellungsmerkmalen. Queo baute Plattformlösungen aus, die durch modulare Architekturen und KI-Integration flexibel weiterentwickelt werden können.

Gemeinsam bieten die Ergebnisse der Teilprojekte konkrete wirtschaftliche Vorteile wie Stillstandsreduktion, ROI-Nachweise und Referenzprojekte (z. B. bei KAMAX), die die Skalierbarkeit belegen. Zudem fördern sie Wissenstransfer, Fachkräftequalifikation und die Grundlage für zukünftige Innovationen, etwa durch Ausgründungen oder Lizenzmodelle. Der Verbund schafft somit eine nachhaltige Grundlage für Industrieautomatisierung, Prozessoptimierung und Marktdifferenzierung.

Eine Fortschreibung des Verwertungsplans wird diese Potenziale weiter konkretisieren und auf aktuelle Marktanforderungen ausrichten.

### VI.2 Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse – Teilprojekte

Nachfolgend die Ergebnisse der Projektpartner in den jeweiligen Teilprojekten:

IWU

- Entwicklung einer skalierbaren KI-Methode für kausales Lernen mit nachgewiesener Leistungsfähigkeit in der Industriepraxis – Patentierung wird angestrebt für mögliche Lizenzeinnahmen.
- Open-Source Python-Bibliothek "causalgraph" generiert durch ihre wissenschaftliche Dokumentation und Publikation nicht nur akademische Zitation, sondern ermöglicht auch eine industrielle Nutzung und Community-Entwicklung.
- Die Integration verschiedener Steuerungssysteme über OPC UA erschließt einen großen Markt im Bereich der Industrieautomatisierung und ermöglicht Beratungsdienstleistungen bei der Implementierung.
- Direkte wirtschaftliche Verwertung durch Industrieaufträge im Bereich digitaler Modelle und graphbasierter Analyse.
- Durch eine Integration in bestehende IWU-Softwareplattformen (eniLINK, LinkedFactory) wird eine nachhaltige Nutzung und Kommerzialisierung ermöglicht.
- Die Publikationen auf der IEEE INDIN 2023 steigern die wissenschaftliche Reputation. Der Wissenstransfer in die Lehre qualifiziert zukünftige Fachkräfte.
- Der ganzheitliche Ansatz stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar, das im Vertrieb und Marketing zur Differenzierung von Wettbewerbern genutzt werden kann.
- Die messbare Stillstandszeitenreduzierung liefert konkrete ROI-Berechnungen für potenzielle Kunden.
- Eine Teilnahme an "Fraunhofer AHEAD" ermöglicht die Entwicklung professioneller Lizenzmodelle und bereitet eine mögliche Ausgründung als Start-up via exist Forschungstransfer vor.
- Die erfolgreiche Implementierung bei KAMAX dient als Referenzprojekt und beweist die Skalierbarkeit der Lösung für etwaige Industriekunden.

SMB

- Das unternehmensinterne Wissen um OPC-UA wurde durch das Projekt erheblich verbessert, so dass hier Kundenanfragen nach Modellierungsleistungen künftig qualifizierter bewertet und durchgeführt werden können.
- Die Realisierung eines Digitalen Zwillings soll künftig aktiv angeboten werden, dieser kann für eine schnellere Inbetriebnahme und zur Absicherung von Fertigungsprozessen sowie zur Fehleranalyse verwendet werden.
- Die im Projekt entwickelten Ergebnisse eignen sich für Messen und Fachvorträge zur Kommunikation der Markenwerte von SMB nämlich “MoveTheStandard” und Innovationskraft.
- Erfüllung der Kundenerwartung an SMB zu einer ganzheitlichen Beratung im Vorfeld einer Investitionsentscheidung.
- Produktlösungen, die sich aus diesem Projekt ggfs. von den Projektpartnern entwickeln lassen, sollen evaluiert und integriert werden und somit einen added-value an den Kunden liefern.

KAMAX

- Reduktion von Ausfallzeiten in der Einzelstückfertigung
  - Durch Einführung eines intelligenten Fehlermanagement-Systems werden Stillstandszeiten frühzeitig erkannt, dokumentiert und reduziert.
- Systematische Fehlererfassung und –dokumentation

- Vollständig digitalisierte Erfassung von Maschinen-, Software- und Bedienfehlern schafft eine belastbare Datenbasis für kontinuierliche Prozessverbesserung.

- Verknüpfung von Fertigungs- und Auftragsdaten
  - Einführung einer durchgängigen ID je Systemdurchlauf ermöglicht Rückverfolgbarkeit und gezielte Ursachenanalyse.
- Nutzung von Erfahrungswissen durch strukturierte Wissensdatenbank
  - Aufbau einer zentralen Wissensdatenbank mit Fehler-Lösungs-Kombinationen ermöglicht schnellen Wissenstransfer und unterstützt die Einarbeitung neuer Mitarbeitender.
- Verbesserung der Schnittstellenkommunikation (OPC-UA, MES, SAP)
  - Standardisierte Kommunikationsstrukturen erlauben eine einfache Integration in bestehende IT-Systeme und zukünftige Erweiterbarkeit.
- Stärkung der Mensch-Maschine-Interaktion (HMI)
  - Iterative Entwicklung von Benutzeroberflächen mit direktem Einbezug der Endanwender fördert Akzeptanz und intuitive Nutzung.
- Übertragbarkeit auf andere Fertigungsbereiche
  - Modularität und technologische Offenheit der Lösung erlauben Adaption auf vergleichbare Produktionsprozesse innerhalb und außerhalb von KAMAX.
- Grundlage für datenbasierte Prozessoptimierung und Predictive Maintenance
  - Die strukturierte Fehlerdatenerfassung bildet die Basis für künftige KI-basierte Analysen und vorausschauende Instandhaltung.
- Praxisnahe Validierung durch Go-Live
  - Erfolgreicher Echtstart in der laufenden Produktion belegt die Praxistauglichkeit und den unmittelbaren Nutzen im industriellen Umfeld.

IP

- Die Kernentwicklung "Robo Operator" konnte durch das Projekt deutlich verbessert werden - insbesondere wurde ein vollständig autonomer Betrieb über mehrere Schichten erreicht.
- Die ursprüngliche Geschäftsplanung mit jährlichem Umsatzziel von 1,5 Mio. € im Bereich Equipment Rental wird für den Zeitraum ab 2025 aufrechterhalten.
- IP plant basierend auf den Projektergebnissen die Fertigung und den Verkauf von 33 zusätzlichen Robo Operator-Systemen im Wert von 3,5 Mio. €.
- Das Produktspektrum wurde erfolgreich diversifiziert - eine neue Variante für schwerere Werkstücke sowie die Produktlinie "Robo Automation Kit" für kleinere Werkstücke wurden entwickelt.
- Der Nutzungsgrad der Anlagen konnte um 5-10% gesteigert werden, was einen deutlichen Wettbewerbsvorteil darstellt.
- Eine "Robo Operator-Cloud" wurde etabliert, in der sich die "Erfahrungsschätze" aller Systeme befinden und zur kontinuierlichen Verbesserung genutzt werden.
- Die entwickelten Systeme tragen zur Bewältigung des Fachkräftemangels bei und setzen in den Kundenunternehmen Ressourcen für kreativere Aufgaben frei.

ISG

Das KMU-Unternehmen ISG wird die im Projekt entwickelte Software zum KI-Training basierend auf der virtuellen Inbetriebnahme mit der Softwarelösung ISG-virtuos über seine bestehenden Vertriebskanäle vermarkten. ISG verfügt mit der bestehenden Software-in-the-Loop-Simulation ISG-virtuos bereits heute über etablierte Vertriebskanäle und einen ausgezeichneten Zugang zu den relevanten Marktsegmenten.

Darüber hinaus eignen sich die im Projekt entwickelten Ergebnisse jedoch auch für Messen sowie Universitäten oder Fachverbände.

SEITEC

- Die Ergebnisse von KausaLAssist werden in das SEITEC Produktportfolio integriert (Überführung SDS in industriereifes Produkt).
- SEITEC baut seine Kompetenzen im Bereich IoT/Edge Plattformlösungen weiter aus und erlangt vertiefte Kenntnisse durch die Anwendung von KI-Methoden.
- SEITEC stärkt seine FuE-Kompetenzen, was die Marktposition als industrieller Forschungspartner für zukünftige Projekte verbessert.
- SEITEC erweitert seine Kooperationen mit Forschungseinrichtungen und anderen Industrieakteuren, um die entwickelten Technologien weiter auszubauen.
- Die Integration von fortschrittlichen KI-Technologien in die Produkte und Dienstleistungen erhöht die Wettbewerbsfähigkeit von SEITEC auf dem Markt. Dies ist vor allem als KMUs relevant, da Ressourcen für Aufbau von Expertenwissen im Bereich KI schwer zu erlangen ist.
- Entstandene Prototypen und Produktideen werden weiterhin im Expertennetzwerk von SEITEC vorgestellt, um weitere potenzielle Kunden zu akquirieren.
- SEITEC integriert die entwickelten Ansätze zur Nutzung gerichteter Graphen und hybrider Cloud/Edge Plattformen in seine langfristige Unternehmensstrategie.
- Die modulare Architektur ermöglicht nach der Projektlaufzeit die Weiterentwicklungen und Erweiterungen des Ökosystems.
- Der ganzheitliche Ansatz stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar, das im Vertrieb und Marketing zur Differenzierung von Wettbewerbern genutzt werden kann.
- Die erfolgreiche Implementierung bei KAMAX dient als Referenzprojekt und beweist die Skalierbarkeit der Lösung für etwaige Industriekunden

queo

- queo baut seine Kompetenzen im Bereich integrierte Plattformlösungen weiter aus und erlangt vertiefte Kenntnisse durch die Anwendung von KI-Methoden.
- SEITEC erweitert seine Kooperationen mit Forschungseinrichtungen und anderen Industrieakteuren, um die entwickelten Technologien weiter auszubauen.
- Die Integration von fortschrittlichen KI-Technologien in die Produkte und Dienstleistungen erhöht die Wettbewerbsfähigkeit von queo auf dem Markt. Dies ist vor allem als KMU relevant, da Ressourcen für Aufbau von Expertenwissen im Bereich KI und der Integration der Daten aus den Maschinen schwer zu erlangen sind.
- queo setzt die geschaffenen Templates und Bibliotheken in weiteren Projekten für die Erstellung von Individualsoftware ein.
- Die modulare Architektur ermöglicht nach der Projektlaufzeit die Weiterentwicklungen und Erweiterungen des Assistenzsystems.
- Der ganzheitliche Ansatz stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar, das im Vertrieb und Marketing zur Differenzierung von Wettbewerbern genutzt werden kann.
- Die erfolgreiche Implementierung bei KAMAX dient als Referenzprojekt und beweist die Skalierbarkeit der Lösung für etwaige Industriekunden

## VII. Veröffentlichungen

Nachfolgend das Auflisten der aus dem Projekt resultierenden Veröffentlichungen:

**Wissenschaftliche Veröffentlichungen**

- 01/23 – causalgraph Package:

  - Pieper, Sven, Carl Willy Mehling, Dominik Hirsch, Tobias Lüke, and Steffen Ihlenfeldt. “Causalgraph: A Python Package for Modeling, Persisting and Visualizing Causal Graphs Embedded in Knowledge Graphs,” January 20, 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.08490.
- 08/23 – Beitrag auf IEEE INDIN 2023 Lemgo:
  - Carl Willy Mehling, Sven Pieper, and Steffen Ihlenfeldt. “Concept of a Causality-Driven Fault Diagnosis System for Cyber-Physical Production Systems,” August 2023. https://doi.org/10.1109/INDIN51400.2023.10218199.

**Fachveröffentlichungen- & Beiträge:**

- 10/23 atp magazin – Fachbeitrag:
  - Titel: KI: Intelligentes Fehlermanagement ist Ziel des Projekts „KausaLAssist“
  - Autor: Jonas Völker
  - Link: https://atpinfo.de/forschung-und-entwicklung/ki-intelligentes-fehlermanagement-ist-ziel-des-projekts-kausalassist/
- 04/24 fertigung – Branchenreport:
  - Titel: KausaLAssist: Richtungsweisendes Projekt mittels erklärbarer KI
  - Autor: Edwin Neugebauer
  - Link: https://www.fertigung.de/branchenreport/kausalassist-richtungsweisendes-projekt-mittels-erklaerbarer-ki-304.html
- 10/24 Projektatlas – „Künstliche Intelligenz in der Produktion“
  - Link: https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de/wp-content/uploads/2024/10/Mediathek_ProjektAtlas_KI_2024.pdf
  - Beiträge des Projekts:
    - S. 90ff. - OPC UA Fachartikel: „Mit OPC UA zur intelligenten Fertigung: KI-Anwendungen einfach entwickeln und skalieren“
      - Autoren:
        - SEITEC: Alexander Wand, Christian Röder
        - IWU: Carl Willy Mehling, Christian Keilig, Sven Pieper
    - S. 166ff. – CAUSA AI Fachartikel: „Effizientes Störungsmanagement mit Causal AI“
      - Autoren:
        - KAMAX: Fabian Kittel
        - Queo: Philipp Riegelmann, Matthes Winkler
        - IWU: Carl Willy Mehling, Sven Pieper
    - S. 248. – KausaLAssist Projektsteckbrief
      - Autoren (IWU): Carl Willy Mehling, Sven Pieper
- 10/24 Vortrag auf SmartFactory2 Tagung in Darmstadt:
  - Titel: „OPC UA und KI: Dateninfrastruktur für gesteigerte Wertschöpfung auf dem Shopfloor“
  - Autoren: Alexander Wand (SEITEC) und Carl Willy Mehling (IWU)

**Weitere Veröffentlichungen (Blogs und Videos:**

- 07/21 Blog-Eintrag Fraunhofer IWU: https://www.kognitive-produktion.de/intelligentes-fehlermanagement-mittels-erklaerbarer-ki-forschungsprojekt-kausalassist-startet-im-juli-2021/
- 07/23 Blog-Eintrag Schuster Maschinenbau: https://www.schuster-maschinenbau.de/blog/article/sorry-chatgpt-graph-ai-setzt-bei-uns-den-standard
- 02/25 KausaLAssist Image-/Erklärvideo: https://www.youtube.com/watch?v=eUxpLYidqYw

## VIII. Während Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte Dritter

Verbund / Allgemein

Die Entwicklung im Bereich der künstlichen Intelligenz verlief sehr dynamisch während der Projektlaufzeit. Wichtige Zäsur war die Veröffentlichung von Open AI Chat-GPT3 im November 2022, welche danach eine enorme Innovationswelle mit immer neueren und besseren Large-Language-Modellen (LLMs) gestartet hat.

Die Möglichkeiten der LLMs haben schnell Anwendung im Projekt (z.B. zur Übersetzung von Lösungsdokumenten in Datenbankformat) und in verfügbaren Softwareprodukten für die Fertigung gefunden.

Hierdurch wurden Dialogbasierte Systeme zur Interaktion mit dem Operator auch in natürlicher Sprache möglich.

Diese Entwicklungen haben das Projekt KausaLAssist bereichert und bieten gemeinsam mit den Errungenschaften zum Lernen kausaler Graphen und der Bereitstellung standardisierter Daten via OPC UA eine optimale Basis für weitere Forschungsprojekte.

IWU

Während der Projektlaufzeit wurden bedeutende Fortschritte im Bereich des datengetriebenen Fehlermanagements erzielt. Eine aktuelle Scoping-Studie von Pietsch et al. (2024) dokumentiert die verstärkte Entwicklung hin zu KI-gestützten und hybriden Ansätzen in der Fehlerursachenanalyse. Im Bereich der kausalen Entdeckungsverfahren wurden neue Methoden wie Topological Hawkes Processes (THP) entwickelt, die eine präzisere Identifikation von Ursache-Wirkungs-Beziehungen in zeitlichen Datenreihen ermöglichen.

Besonders hervorzuheben ist die Entwicklung von Large Language Models (LLMs), die wir im Projekt erfolgreich zur Aufbereitung und Standardisierung von KAMAX-Produktionsdaten für unsere Stammdatenbank eingesetzt haben. Diese Fortschritte haben unser Forschungsvorhaben positiv beeinflusst und die Aktualität unseres Ansatzes bestätigt.

SMB

Während der Projektlaufzeit ergab sich eine Kontaktaufnahme durch die Firma Findiq (www.findiq.de), diese entwickelt eine Lösung für das Fehlermanagement mittels Einbringung von Expertenwissen in ein KI-gestütztes Expertensystem, dass den Anwender durch einen geführten Prozess der Fehlerbeschreibung führt, um diesem die richtige Lösung zur Fehlerbehebung vorzuschlagen. Eine Verbindung zu einer Maschine mit Akquisition der Daten erfolgt bei Findiq nicht.

KAMAX

Im betrachteten Zeitraum wurden mehrere Softwarelösungen mit Bezug zu Fehlererkennung, Fertigungsmanagement und Wissenssystemen auf den Markt gebracht. Eine Gefährdung für KausaLAssist ist dabei nicht unmittelbar gegeben, jedoch sind folgende Aspekte differenziert zu betrachten:

Marktpositionierung und Spezialisierung**:** Die untersuchten Lösungen (z. B. HYDRA X, digitale Lernfabriken, MES-Erweiterungen) sind oft auf breitere Fertigungsprozesse oder standardisierte Serienfertigung ausgelegt. KausaLAssist hingegen adressiert konkret die Losgröße-1-Fertigung von hochindividuellen Werkzeugen (z. B. Teleskopmatrizen bei KAMAX).

Vorteil: Projektspezifischer Fokus auf Einzelstückfertigung mit praxisnaher Ausrichtung verringert die direkte Konkurrenz.

Fehlerwissen & Wissensmanagement**:** Externe Entwicklungen bieten teilweise generische Ansätze zur Erfassung von Fehlern oder zur Ablage von Erfahrungswissen. KausaLAssist verfolgt dagegen ein domänenspezifisches

| | |
|---|---|
| | Wissensmodell, das direkt mit realen Maschinenbedienern und Ingenieuren erarbeitet wurde.<br><br>Vorteil: Höherer Praxisbezug, bessere Usability, bessere Fehlerlösungszuordnung.<br><br>Technologische Basis**:** Viele kommerzielle Systeme setzen auf OPC-UA, MES-Anbindung und Dashboards – ähnlich wie KausaLAssist. Allerdings erlaubt das Projekt durch den offenen Aufbau und prototypische Flexibilität eine individuellere Weiterentwicklung.<br><br>Neutral: Technologischer Gleichstand, aber Vorteil durch tiefere Integration in spezifische Prozesse.<br><br>Innovationspotenzial und Verwertbarkeit**:** Die Existenz verwandter Entwicklungen belegt die wirtschaftliche Relevanz und das Marktpotenzial. Sie fordern jedoch eine klare Positionierung und Differenzierung von KausaLAssist etwa als spezialisiertes Assistenzsystem für komplexe Sonderfertigung. Chance statt Risiko, wenn Differenzierungsmerkmale aktiv kommuniziert und verwertet werden1 |
| IP | Es sind keine relevanten Fortschritte Dritter verzeichnet worden. |
| ISG | Während der Durchführung des Vorhabens ist kein Fortschritt Dritter bekannt geworden, der die erzielten Ergebnisse übertrifft. |
| SEITEC | Die Weiterentwicklung und Akzeptanz von Industriestandards, wie z.B. OPC UA, hat sich parallel zum Projekt weiter positiv entwickelt. Ebenso wurde von der OPC Foundation eine „OPC UA for AI“ Working Group gestartet, was die Bedeutung von OPC UA für die erfolgreiche Umsetzung von KI-Projekten in der Fertigung unterstreicht.<br><br>Diese Entwicklungen gefährden das Projekt KausaLAssist in keinem Punkt, sondern erhöhen die Verwertungschancen. |
| queo | Bezogen auf die Entwicklung von Applikationen haben sich über die Projektlaufzeit durch die Möglichkeiten des Einsatzes von KI bei der Softwareentwicklung selbst einige Potentiale ergeben. Diese haben auf die in dem Vorhaben eingesetzten Techniken zur Erstellung von Applikationen keinen vorhabenspezifischen Einfluss. Durch die Erstellung einer Individualsoftware, die genau auf die Anforderungen aus diesem Projekt bekannten Anforderungen ausgelegt ist, sind uns keine relevanten Fortschritte Dritter im Aufgabenbereich der Software bekannt geworden. |