

# AI-Based Failure Management in Value Chains – valuechAI

Gemeinsamer Abschlussbericht des Konsortiums

## Die Nutzfahrzeugindustrie im Wandel

Täglich sind rund 2,8 Mio. Nutzfahrzeuge in Deutschland unterwegs, um die Versorgung der Bevölkerung mit allen Dingen des täglichen Bedarfs, bspw. der Belieferung von Produktionswerken mit Material, zur Müllentsorgung, für Personen im öffentlichen Nahverkehr oder für Rettungsfahrten, sicherzustellen. Der Sektor steht vor großen Herausforderungen wie stagnierenden Absatzmärkten aufgrund längerer Nutzungsdauern und steigenden Kundenanforderungen an Leistung, Verbrauch und Lebensdauer. Gleichzeitig wächst der Wettbewerbsdruck durch asiatische Hersteller und strenge gesetzliche Rahmenbedingungen. Künstliche Intelligenz (KI) bietet vielversprechende Ansätze zur Optimierung von Produktionsprozessen und des Fehlermanagements, um die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Das Forschungsprojekt value chAI zielte darauf ab, durch digitale Vernetzung und Datenanalyse ein präventives Fehlermanagement zu entwickeln, das Fehler frühzeitig identifiziert und Kosten minimiert. KI-Modelle unterstützen dabei die Predictive Maintenance sowie die Produkt- und Prozessoptimierung entlang des gesamten Wertschöpfungszyklus und verbessern die Zusammenarbeit der relevanten Akteure.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde das Projektkonsortium (vgl. Abb. 1) von Vertretern der Nutzfahrzeugindustrie, Krone und MAN, angeführt, anhand derer Anwendungsfälle die erarbeiteten Lösungen validiert wurden. Gemeinsam mit den Forschungsinstituten Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT und den Befähigern aus den Bereichen Predictive Analytics (Datability und IconPro) und Datensicherheit (i2solutions) wurde ein Gesamtkonzept für das zukünftige Fehlermanagement erarbeitet. Dieses wurde von Datability, IconPro und i2solutions jeweils bei Krone und MAN getestet und eingesetzt.

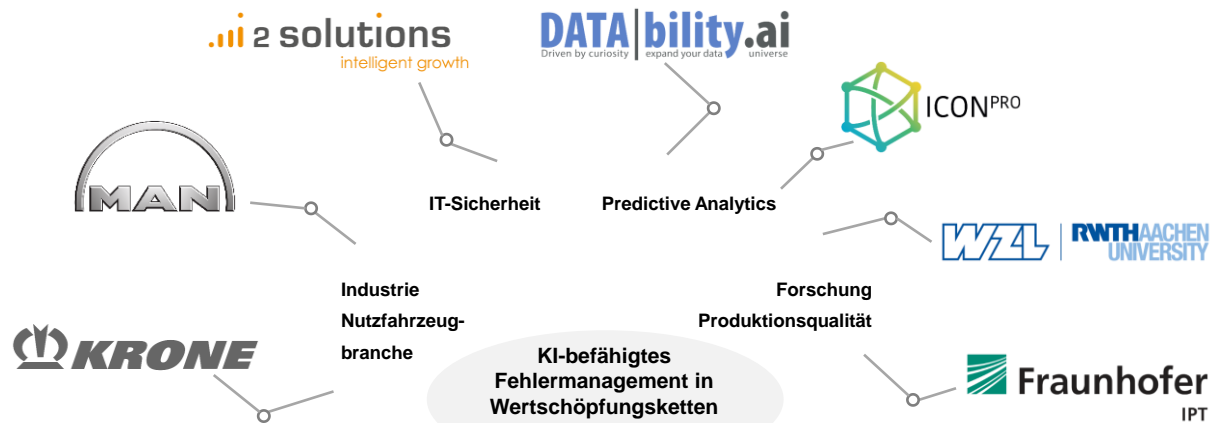


Abbildung 1: Das Konsortium von value chAI.

Nachfolgend wird beschrieben, wie im Projekt relevante Daten aus den teilnehmenden Unternehmen identifiziert wurden, um die Funktionalitäten der Machine Learning (ML)-Modelle und des Entscheidungsunterstützungssystems für Produkt- und Prozessoptimierung, Leistungsoptimierung sowie Verfügbarkeitsoptimierung zu gewährleisten. Dabei wurden bestehende Datensilos aufgedeckt und integriert. ML-Modelle zur Vorhersage von Wartungen, Produktqualität und Prozessoptimierung wurden erstellt, wobei eine sorgfältige Datenvorverarbeitung entscheidend war. Ein Entscheidungsunterstützungssystem wurde entwickelt, das auf den Ergebnissen der ML-Modelle und Expertenwissen basiert, um Handlungsempfehlungen abzuleiten. Diese Empfehlungen werden über ein benutzerfreundliches Frontend bereitgestellt, während im Backend die ML-Modelle analysiert und nachtrainiert werden können. Das Gesamtsystem wurde in Demonstratoren bei Krone und MAN umgesetzt und validiert.

## Projektverlauf

Das Projekt besteht aus neun iterativen Arbeitspaketen (AP), die nicht sequenziell, sondern agil durchlaufen werden, um eine flexible und schnelle Anpassung an geänderte Anforderungen und Rahmenbedingungen zu ermöglichen (vgl. Abb. 2). Das Ziel des Projekts war es, ein KI-basiertes Fehlermanagementsystem zu entwickeln, das Prozess- und Produktfehler in der Produktion sowie im Betrieb frühzeitig erkennt und behebt.

Die AP sind dabei wie folgt definiert und angeordnet:

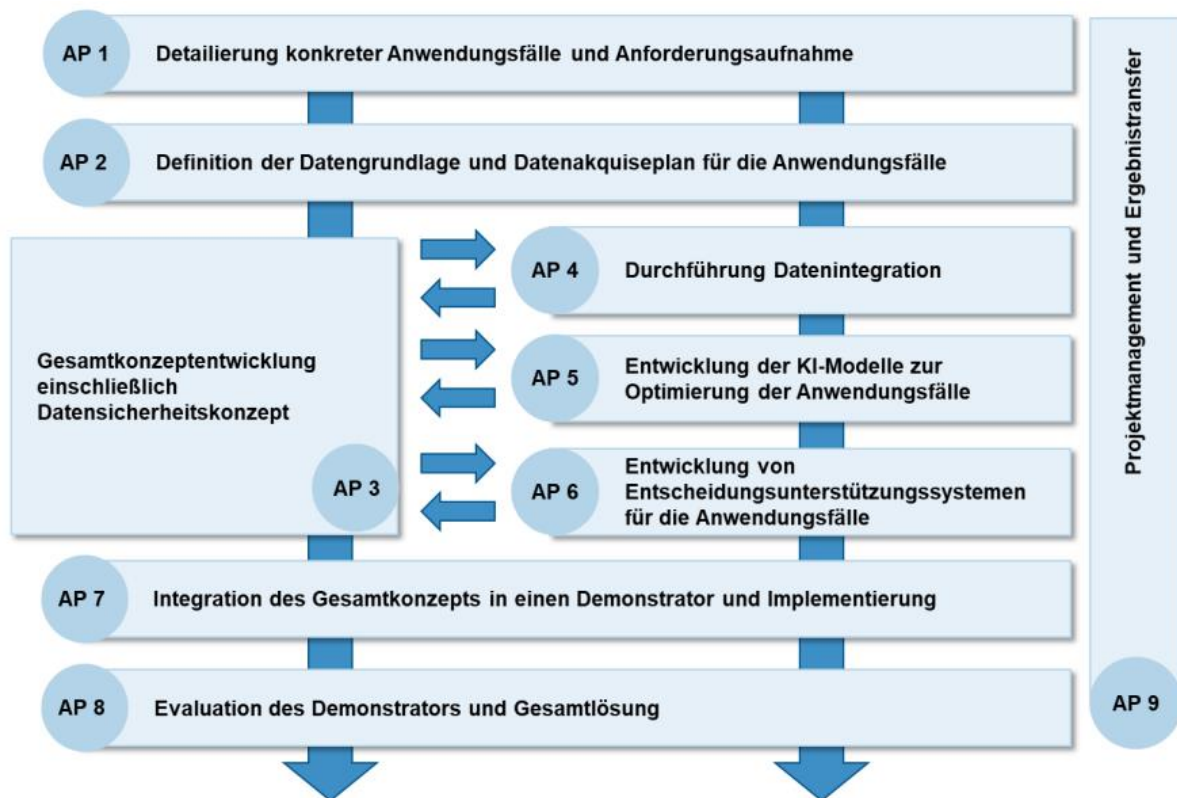


Abbildung 2: Gliederung des Forschungsvorhabens value chAI.

## AP1: Detailierung konkreter Anwendungsfälle und Anforderungsaufnahme

Das Ziel des ersten APs bestand in der Identifikation konkreter Anwendungsfälle entsprechend der Forschungsbereiche „Produkt- und Prozessoptimierung, Leistungsoptimierung und Verfügbarkeitsoptimierung“ bei den beteiligten Anwenderunternehmen.

Zur zielorientierten Identifikation für das Forschungsziel relevanter Anwendungsfälle wurde zunächst eine detaillierte Analyse der Produktion der Anwenderunternehmen KRONE und MAN mit dem Fokus datenorientiertes Fehlermanagement vorgenommen. Workshops unter Beteiligung der Projektpartner sowie von Prozessexperten der beiden Anwenderunternehmen dienten der Offenlegung und Diskussion aktueller und zukunftsorientierter Handlungsfelder. Diese wurden den Ergebnissen wissenschaftlicher Analysen gegenübergestellt. Die mittels dieses Vorgehens abgeleiteten Themen und Herausforderungen im Bereich des Fehlermanagements wurden gesammelt, aufbereitet und den übergreifenden Forschungsbereichen (Prozess- und Produktoptimierung, Leistungsoptimierung, Verfügbarkeitsoptimierung) zugeordnet. Zur Schaffung einer strukturierten Dokumentation der Einzelthemen und Wahrung der Vergleichbarkeit im Rahmen der sich anschließenden Auswahl wurde zu jedem der identifizierten Untersuchungskandidaten eine Beschreibung der Ausgangssituation inklusive Problemstellung, der aufgedeckten Optimierungspotenziale, verfügbarer Daten und Systeme als auch die zu verfolgenden Ziele festgehalten. Das Ergebnis einer sich anschließenden Potenzialanalyse bestand in einer breiten Fallbasis, welche sich an den nachfolgend dargelegten Themenfeldern orientiert:

- Frühzeitige Fehlererkennung in der Produktion
- Effiziente Fehlerrückführung in Entwicklung & Produktion/Zulieferer
- Präventiver Informationsaustausch zwischen Produktion und Feld
- Optimierung der Bauteil- und Komponentenauslegung
- Definition und Steuerung leistungsorientierter Kennzahlen
- Verschleißabhängige Wartungsintervalle

In den auf die beschriebenen Vorarbeiten folgenden Workshops wurden die Untersuchungsfelder mithilfe SMARTER Modellierungsmethoden konkretisiert und für die finale Auswahl aufbereitet. Unter anderem diente die Durchführung erster Datenanalysen der Bestätigung des abgeleiteten Untersuchungspotenzials, ebenfalls hinsichtlich verfügbarer Daten sowie, in Vorbereitung auf das AP2, einer ersten Identifikation zusätzlicher Datenbedarfe. Unterstützt wurden diese Untersuchungen durch eine detaillierte Aufnahme und Analyse der zu betrachtenden Prozesse sowie die expertenbasierte Ermittlung relevanter und im Weiteren zu berücksichtigender Einflussfaktoren. Das Ergebnis des beschriebenen Vorgehens besteht in der Festlegung auf insgesamt sechs Anwendungsfälle (drei auf Seiten KRONE, drei auf Seiten MAN), welche der Erarbeitung des in der Forschungsarbeit zugrunde gelegten wertschöpfungsübergreifenden Fehlermanagements dienen. Eine Kurzbeschreibung der getroffenen Auswahl wird nachfolgend dargelegt.

## **KRONE**

### Use Case Krone 1 (UCK1): Blasenbildung im Schäumungsprozess

In der Kühlkofferfertigung am Standort Lübtheen tritt vermehrt das Fehlerbild „Blasen“ auf. Dabei handelt es sich um Lufteinschlüsse im Isolierschaum der Trailerwände, die einen optischen Mangel darstellen und hohe Nacharbeitskosten verursachen. Auf Basis von Produktionsdaten sollen diese Fehler prädiktiv bereits in der Produktion identifiziert sowie Ursache/Wirk-Zusammenhänge abgeleitet werden.

### UCK2: Frühwarnsystem im Fehlermanagement zur Optimierung der Feldperformance

Entwicklung eines Werkzeugs zur Kritikalitätsbewertung als Entscheidungsunterstützung für die Qualitätssicherung mit dem Ziel einer frühzeitigen Identifikation relevanter Fehlerhäufungen und der Befähigung zur frühzeitigen Einleitung von Fehlerbewältigungsmaßnahmen in der Produktion.

### UCK3: Einsatz von Telematikdaten zur Transportbewertung

Ermittlung von Lastkollektiven, der Beanspruchung in einem bestimmten Zeitraum, der Transportgüter auf Basis der während der Trailernutzung gesammelten Telematikdaten zur Bewertung der Transportqualität und -nachhaltigkeit anhand geeigneter Kennzahlen.

## **MAN**

### Use Case MAN 1 (UCM1): Intelligente Verwertung von Schrauberdaten

In der manuellen Endmontage bei MAN treten vermehrt Auffälligkeiten bei Schraubvorgängen auf. Dabei handelt es sich um Abweichungen in den Schraubprozessen, die potenziell zu Produktionsfehlern führen können. Auf Basis der systematisch erfassten Schrauberdaten sollen diese Auffälligkeiten prädiktiv erkannt und Zusammenhänge mit bestimmten Fahrzeugtypen oder Produktionschargen abgeleitet werden. Ziel ist es, durch einen Predictive Analytics-Ansatz Auffälligkeiten, Trends wie Muster, Shifts oder Runs zu identifizieren, um langfristig die Qualitätssicherung zu verbessern und frühzeitig Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

### UCM2: Zyklisch entladene Batterien

Im Produktionsprozess von MAN kommt es vermehrt zu einer wiederkehrenden Entladung von Batterien, deren Ursache bislang unbekannt ist. Diese zyklischen Entladungen führen zu Produktionsunterbrechungen und Effizienzverlusten. Mithilfe einer wertschöpfungskettenübergreifenden Analyse und der Nutzung von KI sollen unbekannte Fehlerquellen und Einflussfaktoren identifiziert werden. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse von Einstellparametern und historischen Daten spezifischer Fahrzeugtypen, um mögliche

Muster und Zusammenhänge aufzudecken und zukünftige Entladungen zu prognostizieren. Ziel ist es, die Batterieentladung zu minimieren und die Produktionseffizienz zu steigern.

### UCM3: Optimierung des Fehlermanagements durch FTT-Kennzahlen (First Time Through)

In der Montage bei MAN fehlt eine verlässliche und standardisierte Kennzahl zur Bewertung der fehlerfreien Produktion im ersten Durchlauf (First Time Through). Dieses führt zu Herausforderungen im Fehlermanagement. Ziel dieses Use Cases ist die Entwicklung einer standardisierten FTT-Kennzahl, basierend auf einer detaillierten Analyse der Produktionsprozesse. Durch die Identifikation von Fehlerquellen und deren Korrelation mit spezifischen Fahrzeugtypen sollen präventive Maßnahmen abgeleitet werden, um die FTT-Rate zu verbessern und die Produktionsqualität nachhaltig zu optimieren.

Mit den oben Beschriebenen Use Cases konnten die erwarteten Ziele für das erste Arbeitspaket erfüllt werden. Die definierten Use Cases dienen als Grundlage für die Schaffung der notwendigen Datengrundlage sowie für die Erörterung und Schaffung einer Gesamtlösung, welche in AP 3 verfolgt wird.

## **AP2: Definition der Datengrundlage und Datenakquiseplan für die Anwendungsfälle**

Das Ziel des zweiten AP bestand in der Identifikation der benötigten und vorhandenen Produktions- und Felddaten zur Entwicklung und Training von KI-Modellen und Entscheidungsunterstützungssysteme für die innerhalb von AP1 identifizierten und ausdetaillierten Anwendungsfälle. Daraus folgend wurde die Ableitung eines zielorientierten Datenakquiseplans zur Vervollständigung der notwendigen Datenbasis erarbeitet. Workshops zur Analyse der Datengrundlage und Zusammenstellung verfügbarer und zusätzlich benötigter Daten standen dabei im Fokus. Darüber hinaus wurde eine Unterteilung in steuerbare Daten – die entsprechend auch angepasst werden können – und nicht steuerbare Daten – die für die Analyse eine Relevanz haben können, jedoch nicht unmittelbar gesteuert werden können – vorgenommen.

Zur Realisierung eines wertschöpfungskettenübergreifenden Fehlermanagements im Betrachtungskontext zeichneten sich insbesondere manuelle Fehlereinträge in Produktion, Materialchargen und Lieferantendaten, Anlagen- und Prozessdaten (z.B. Schrauberdatenbank), Qualitätsdokumentation, Reklamationsdaten und Fehlerinformationen aus dem Feld als relevant aus. Jedoch ist der Datenakquiseplan hoch anwendungsfallspezifisch. Dabei wurde zunächst ein Datenauszug aus den verschiedenen Datenbanken zur Potenzialbewertung genutzt und initiale Analysen vorgenommen. Darauf folgend wurden bedarfsorientiert im Projektverlauf Live Daten weiter aufgenommen und zur Analyse innerhalb der Use Cases genutzt.

## AP3: Gesamtkonzeptentwicklung einschließlich Datensicherheitskonzept

Gemäß des im Antrag skizzierten Vorgehens dient das erarbeitete Gesamtkonzept der zielorientierten (Weiter-)Entwicklung der Teilkonzepte Datenintegration (vgl. Arbeitspaket 4) Modellierung (vgl. Arbeitspaket 5) und Entscheidungsunterstützungssysteme (vgl. Arbeitspaket 6). Zur Beschreibung des Gesamtkonzeptes wurde ein übergeordneter Rahmen geschaffen, welcher sich in folgende drei sequenziell zu durchlaufende Schritte „Aufbau organisationaler Strukturen“, „Entscheidung der Projektdurchführung“ und „abgegrenzte Betrachtung des Anwendungsfalls“ gliedert.

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Vorgehen zur Einführung eines wertschöpfungskettenübergreifenden Fehlermanagements in Unternehmen:

### Leitfaden zum Aufbau datenbefähigten Fehlermanagements in Wertschöpfungsketten



Abbildung 3: Leitfaden zum Aufbau datenbefähigten Fehlermanagement in Wertschöpfungsketten

Zur Strukturierung des Vorgehens und zur Ableitung individueller Herausforderungen wurde ein „Idealbild“ (Abbildung 4) erarbeitet, welches relevante Zusammenhänge und Datenquellen entlang der Wertschöpfung verdeutlicht. Das Idealbild dient der Identifikation „blinder Flecken“ im Fehlermanagement und der Aufdeckung von Potenzialen einer wertschöpfungsübergreifenden Datenanalyse. Gleichzeitig umfasst das Idealbild Fragen zur strategischen Ausrichtung von Unternehmen. Das Idealbild beschreibt den Produktionsprozess sowie die Schnittstellen, an denen Daten transparent über die gesamte Wertschöpfung erhoben werden. Diese Daten aus dem Produktionsprozess fließen dabei in die Backward Chains „Produktion“ und „Feld“, die dazu dienen, Erkenntnisse in vorhergehende Schritte zu implementieren.

**Idealbild: Durchgängige Transparenz von Daten und Informationen über die gesamte Wertschöpfung**

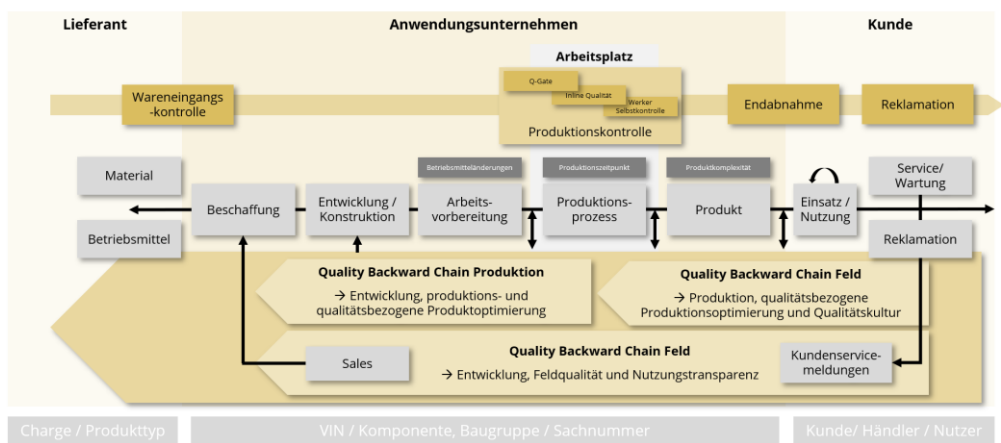


Abbildung 4: Idealbild: Durchgängige Transparenz von Daten und Informationen über die gesamte Wertschöpfung

**Idealbild: Wertschöpfungskettenübergreifendes Fehlermanagement als strategisches Ziel**



Abbildung 5: Idealbild: Wertschöpfungsübergreifendes Fehlermanagement als strategisches Ziel.

Unterstützend wurde eine Übersicht aller produktbezogenen Daten sowohl aus wissenschaftlicher als auch anwendungsfallspezifischer Perspektive erstellt (Abbildung 5). In der Folge steht dem Anwender ein Soll-Ist-Vergleich der Datennutzung im Fehlermanagement zur Verfügung. Im nächsten Schritt werden Möglichkeiten evaluiert, wie die gewünschten Daten im Einklang mit Anforderungen aus der Informationssicherheit erhoben werden können (siehe Abbildung 6).

## IST Aufnahme: Gesamtüberblick produktbezogener Daten

Transparenz Produktbezogener Daten unterstützt die Identifikation von GAPS im datenbefähigten Fehlermanagement

	Digitales Produkt	Digitale Produktion	Nutzung	Nachhaltigkeit	Value Chain
<b>Kategorien</b>	Geometric information	Order information	Valuation information	Ecological information	Customer information
	Material information	Production Planning information	Status information	Social information	Origin
	Master information	Process information	Service information	Circular information	Location
	Design information	Production environment information	Process information		Compliance
	System information	Quality information	Machine information		
	Production information				
	Application information				
	Logistic information				
	Standards				
<b>Use Case-spezifische Kategorien</b>	Geometric information - CAD models	Order information	Service information - Reclamations		Customer information - Customer contact information
	Master information - Configuration	VIN Number	Process information - Telemetry data		
	System information - Software	Process information			
	Design information - eBOM (eng. Bill of Materials)	Production Parameters			
	Production information - Production type and method - Production specification	Ambient temperature and humidity			
		Quality information			
		Quality Gate			

Abbildung 6: Gesamtüberblick produktbezogener Daten.

Aufbauend auf dem Konzept zum Aufbau eines wertschöpfungskettenübergreifenden Fehlermanagements in Unternehmen dient das „Würfelmodell“ (Abbildung 8) der Identifikation von Umsetzungspotenzialen entlang der Achsen „Company Layer“, „Production Lifetime“ und „Unterstützungsgrad“. Durch die strukturierte Betrachtung der zu berücksichtigenden Unternehmensebenen, der einzuschließenden Phasen der Wertschöpfung sowie der Ausgestaltung der Entscheidungsunterstützung wird das Potenzial zur Umsetzung eingestuft.

### Einsatz des Würfelmodells zur Identifikation von Umsetzungspotenzialen

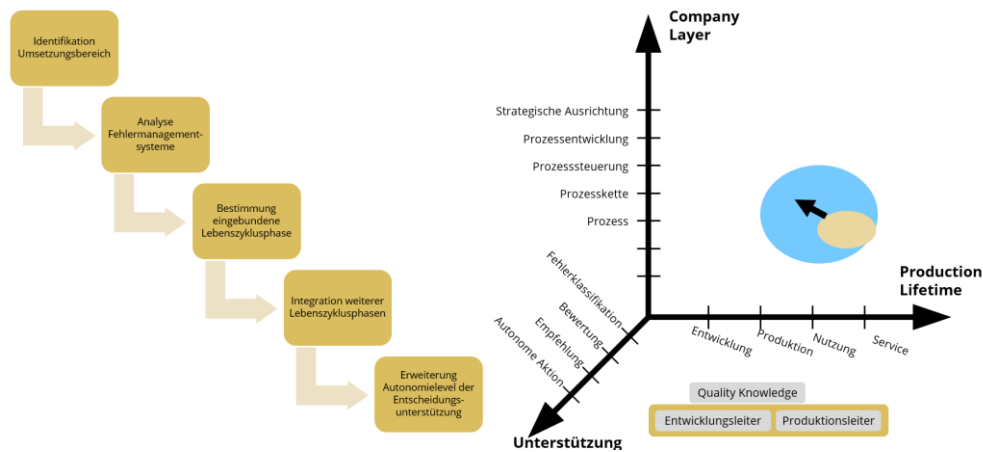


Abbildung 7: Würfelmodell zur Identifikation von Umsetzungspotenzialen.

Die anschließende Entscheidung über die Projektdurchführung erfolgt unter Berücksichtigung organisatorischer und wirtschaftlicher Aspekte. In der finalen Phase der „abgegrenzten Betrachtung des Anwendungsfalls“ kommt ein Vorgehen gemäß des DEFMP (Data Enabled Failure Management Process) zum Einsatz, um datenbasierte Lösungen in bestehende Fehlermanagementprozesse zu integrieren (Abbildung 8).

## Gesamtkonzept – Vorgehen in abgegrenzten Anwendungsfällen

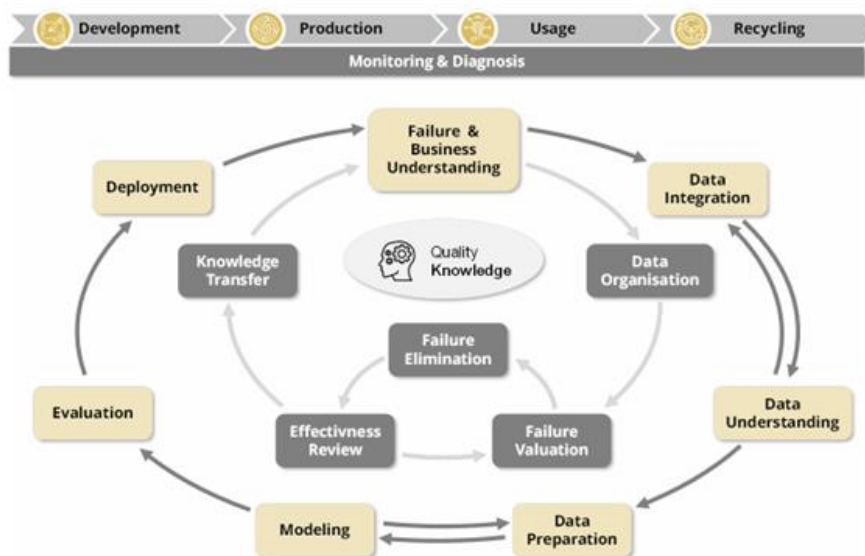


Abbildung 8 : Data-Enabled Failure Management Process (DEFMP).

### AP4: Durchführung der Datenintegration

In AP4 liegt der Fokus auf der Integration der in AP2 identifizierten Datenströme und der Gestaltung der entsprechenden Schnittstellen. Ziel ist es, eine kontinuierliche Datenzufuhr sicherzustellen, die auch nach Projektende eine dauerhafte Funktionalität der Gesamtlösung ermöglicht. Data Quality Gates werden implementiert, um die Qualität der integrierten Daten an definierten Stellen im Prozess zu überprüfen.

Die in AP4 entwickelten Datenvorverarbeitungspipelines gewährleisten, dass die Daten kontinuierlich geprüft, vorverarbeitet und für die Entwicklung der KI-Modelle (AP5) und der Entscheidungsunterstützungssysteme (AP6) genutzt werden können. Durch Qualitätsprüfungen und die Bereinigung der Daten (z.B. fehlende Werte, Duplikate) wird eine verlässliche Datengrundlage geschaffen.

Diese integrierte und vorverarbeitete Datenbasis bildet die Grundlage für den Demonstrator (AP7) und sichert die langfristige Nutzbarkeit der Lösung.

#### UCK1: Blasenbildung im Schäumungsprozess

Zum Projektbeginn lagen die Produktionsdaten in separaten Quellsystemen vor. Für systemübergreifende Analysen mussten die Datensätze unter hohem manuellem Aufwand abgerufen, vorverarbeitet und zu einem auswertbaren Datensatz zusammengeführt werden. Dieser Prozess ist zeitintensiv und fehleranfällig. Zudem ist die gezielte Rückverfolgung von fehlerhaften Bauteilen nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung einer relationalen Datenbank angestrebt, um die Daten zentral zusammenzuführen.

In Vorbereitung der automatisierten Datenintegration in eine auswertbare Datenbasis wurde ein Entity-Relationship-Modell (ER-Modell) erstellt. Verschiedene

Funktionseinheiten entlang des Produktionsprozesses wurden aufgefasst, und die Beziehungen zwischen ihnen abgebildet.

Anschließend wurde die Datenbank schrittweise mit realen Prozessdaten gefüllt und das Modell an die Analyseanforderungen angepasst. Zusätzlich wurden Vorverarbeitungsschritte im Rahmen eines ETL-Prozesses konsolidiert, um eine Online-Datenbereitstellung zu ermöglichen.

Zusätzlich zu den Produktionsparametern beeinflussen Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Qualität des Schaums. Um diese Parameter zu erfassen, wurden Umgebungssensoren installiert, deren Daten ebenso in die Datenbank integriert werden.

### [UCK2 & UCK3: Frühwarnsystem im Fehlermanagement zur Optimierung der Feldperformance & Einsatz von Telematikdaten zur Transportbewertung](#)

Zusammen mit DATAbility wurden zwei Analysekonzepte entwickelt. Das erste Konzept zielt auf die Auswertung von Reklamationsdaten (UCK2), während das zweite auf die Nutzung von Telematikdaten (UCK3) abzielte. Die Überführung der Konzepte in zwei Tools ermöglicht den manuellen Upload von Datensätzen, die automatisiert aufbereitet und in Dashboards visualisiert werden.

Für UCK3 wurden die Daten einer Transporter-Flotte über ein Jahr bereitgestellt und mit Algorithmen zur Datenvorverarbeitung analysiert. Für UCK2 umfassten die Datenauszüge Gewährleistungsdaten ab 2017 sowie zugehörige Produktionsdaten. Um den Zugriff auf größere Datenmengen zu erleichtern, wird parallel eine Cloud-Infrastruktur aufgebaut.

Ein Fokus lag auf der Entwicklung einer Datenverarbeitungsstrategie zur Edge-Datenverarbeitung. Bei gleicher Sendefrequenz wird versucht, den Informationsgehalt durch Berechnungen auf der Telematikeinheit zu steigern. Ein wöchentlicher Datenabruf für UCK2 wurde eingerichtet, um den Demonstrator stets mit aktuellen Informationen zu versorgen. Die Verarbeitung größerer Datenmengen für UCK3 wird durch eine skalierbare Cloud-Infrastruktur ermöglicht.

### [Use Case MAN 1 \(UCM1\): Intelligente Verwertung von Schrauberdaten](#)

Zu Beginn des Projekts lagen die relevanten Schrauberdaten aus der manuellen Endmontage in separaten Datensilos vor. Diese Daten umfassen Schraubwerte wie Ist-Drehmomente und -winkel, die jedoch nicht direkt mit weiteren relevanten Produktionsdaten verknüpft waren, was eine umfassende Analyse erschwerte.

In Kooperation mit IconPro wurde eine Datenpipeline aufgebaut, um die Schrauberdaten systematisch mit den Fahrzeugidentifikationsnummern (FIN) und den zugehörigen Arbeitsstationen innerhalb der Montage zu verknüpfen. Diese Verknüpfung ermöglichte es, Zusammenhänge zwischen spezifischen Schraubvorgängen und Fahrzeugtypen zu analysieren. Die Datenintegration erfolgte durch eine sukzessive Automatisierung der Datenerfassung und -verarbeitung. Besonders wichtig war dabei der Aufbau einer strukturierten Datenarchitektur, um zukünftige Daten automatisch zu verarbeiten und in der Cloud-Infrastruktur (bspw. über den AWS-Service oder die RIO-Plattform) bereitzustellen.

Zur Qualitätssicherung der Schrauberdaten wurden zusätzliche Data Quality Gates im Prozess implementiert, die in Kooperation mit den KI-Experten aus dem Konsortium entwickelt wurden. Diese Gates überprüfen die Datenintegrität und -vollständigkeit, bevor die Daten in den Analyseprozess überführt werden, und gewährleisten damit eine verlässliche Basis für die spätere Modellierung und Entscheidungsfindung in den nachfolgenden AP.

#### UCM2: Zyklisch entladene Batterien

Bei diesem Use Case standen zu Beginn Konfigurations- und Verbauzustände der Fahrzeuge im Fokus, um die Ursachen für die wiederkehrenden Entladungen der Batterien zu analysieren. Die Herausforderung lag hier in der Verknüpfung und Integration von Fahrzeugkonfigurationsdaten mit Produktions- und Nutzungsdaten, die bis dato in unterschiedlichen Systemen gespeichert waren.

In Zusammenarbeit mit DATAbility wurde ein Framework zur Datenvorverarbeitung entwickelt, das diese Fahrzeugkonfigurationsdaten systematisch mit Produktions- und Felddaten verknüpft. Durch die Verwendung der Fahrzeugidentifikationsnummern (FIN) konnten Konfigurationsmerkmale einzelner Fahrzeuge mit Batterieentladungen und den dazugehörigen Fehlerdaten korreliert werden. Eine umfassende Datenvorverarbeitungspipeline wurde entwickelt, um historische und aktuelle Fahrzeugdaten auf Muster und Trends hin zu analysieren.

Besonders relevant war hierbei die Automatisierung der Datenbereitstellung, um die komplexen Zusammenhänge zwischen den Produktionsparametern und den Batterieentladungen schneller und zuverlässiger zu erkennen. Ein Data Quality Check wurde ebenfalls implementiert, um sicherzustellen, dass die Datenqualität den Anforderungen für die KI-gestützte Analyse entspricht. Diese Maßnahmen ermöglichten es, die Daten effizient für die Entwicklung der KI-Modelle in den nachfolgenden AP vorzubereiten.

#### UCM3: Optimierung des Fehlermanagements durch FTT-Kennzahlen

Die Herausforderung bei diesem Use Case bestand darin, eine standardisierte Kennzahl zur Fehlerquote im ersten, fehlerfreien Produktionsdurchlauf zu entwickeln und dafür relevante Daten aus unterschiedlichen Phasen des Produktionsprozesses zu integrieren. Zu Beginn lagen die Daten entlang des Auftragsabwicklungsprozesses sowie Fehlermeldungen aus verschiedenen Quellen vor, die manuell zusammengeführt und ausgewertet werden mussten.

In Kooperation mit DATAbility wurde eine systematische Datenintegration vorgenommen, bei der Zeitdaten aus den einzelnen Prozessschritten mit fahrzeugspezifischen Fehlermeldungen kombiniert wurden. So konnten relevante Muster zur Bestimmung der FTT-Kennzahl abgeleitet werden. Diese Kennzahl ist gleichzusetzen mit dem First Pass Yield (FPY), welcher die Quote der fehlerfrei produzierten Fahrzeuge im ersten Durchlauf misst. Ein wesentlicher Schritt in der Datenverarbeitung war die Automatisierung der Datenaufnahme und -integration, die es ermöglichte, Fehlerhäufungen und deren Zusammenhänge mit spezifischen Fahrzeugkonfigurationen zu analysieren. Dies wurde durch die

Verknüpfung der Fahrzeugidentifikationsnummern (FIN) mit Produktions- und Qualitätsdaten erreicht. Die Ergebnisse der Datenintegration bildeten die Grundlage für die Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen, die im Rahmen der späteren AP eingesetzt werden.

## AP5: Entwicklung der KI-Modelle zur Optimierung der Anwendungsfälle

Die Entwicklung der KI-Modelle erfolgt parallel zu AP4 und AP6. Der Fokus liegt auf der Auswahl und Implementierung geeigneter Algorithmen zur Unterstützung der Produktions- und Nutzungsphasen. Verschiedene Klassifizierungs- und Regressor-Modelle wurden auf Basis einer Literaturrecherche und Datentests ausgewählt. Ein Testdesign wurde entwickelt, um die Modelle methodisch zu trainieren, zu validieren und zu optimieren.

Mithilfe der in AP4 aufbereiteten Daten werden die Modelle iterativ angepasst und überprüft. Leistungsmetriken wie Genauigkeit und Transparenz stellen sicher, dass die Modelle den Anforderungen der Anwendungsfälle gerecht werden. Nach der Validierung werden die Modelle in produktionsreife Formate (z.B..pkl) konvertiert und für die Integration in den Demonstrator (siehe AP7) vorbereitet.

Durch kurze Entwicklungszyklen und regelmäßiges Anwenderfeedback, von meist einem Monat, werden die Modelle kontinuierlich verbessert.

### UCK1: Blasenbildung im Schäumungsprozess

Parallel zu den Arbeiten in AP4 wurde mit der Entwicklung eines KI-Modells zur Vorhersage von Gut- bzw. Schlechteilen begonnen. KRONE stellte Datenauszüge bereit, die genutzt wurden, um den gesamten Prozess von der Rohdatenabfrage über die Datenaufbereitung bis zur Modellevaluation mit IconPro zu durchlaufen. Ziel war es, ein tiefes Prozessverständnis zu erlangen und Hindernisse in der Datenqualität frühzeitig zu erkennen. Die iterative Vorgehensweise wurde durch Workshops mit Prozessexperten begleitet. Die Datenaufbereitung und Modellbildung erfolgten mithilfe der Software von IconPro. Die Datenbasis wird parallel weiter ausgebaut.

Im Laufe des Projektes haben die Untersuchungen zur ML-Modelleignung in Pilotversuchen bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Im nächsten Schritt soll das KI-Modell mit dem entwickelten Power-BI-Dashboard verknüpft werden, um eine automatisierte Auswertung und Analyse der Produktionsdaten zu ermöglichen. Mustererkennung für Fehler- und Gutteile sowie Korrelationen zwischen fehlerhaften Bauteilen und Produktionsparametern standen im Mittelpunkt der weiteren Analysen.

### UCK2: Frühwarnsystem im Fehlermanagement zur Optimierung der Feldperformance

In UCK2 wurde die Anomalieerkennung in den zeitlichen Fehlerverläufen als Hauptanalysethema identifiziert. Geeignete Kennzahlen und Trendanalysen wurden entwickelt, um Fehlerverläufe hinsichtlich Häufigkeit und Kosten zu bewerten. Zudem wurde das Text Mining für Freitextinformationen weiterentwickelt, um detaillierte Fehlerbeschreibungen zu extrahieren. Iterative Abstimmungsrunden mit Qualitätsverantwortlichen stellten sicher,

dass domänenspezifische Erkenntnisse berücksichtigt wurden. In UCK2 wurden außerdem neue Funktionen zur Statusüberwachung von Serviceaktionen und erweiterte Filtermöglichkeiten in den Analysealgorithmen eingeführt. Zudem wurde die Möglichkeit zur Datenextraktion verbessert, um spezifische Auswertungen für unterschiedliche Fahrzeugtypen und Schadensfälle zu ermöglichen.

### UCK3: Einsatz von Telematikdaten zur Transportbewertung

Im Bereich der Telematikdaten lag der Schwerpunkt auf der Identifikation zusammenhängender Touren, da bisher keine historische Analyse dieser Daten existierte. Automatisierte Algorithmen identifizierten Touren und bewerteten diese anhand von Effizienzkennzahlen, wodurch Benchmarks zwischen Fahrzeugen erstellt werden konnten. Die Nutzungsdauer der Trailer wurde in charakteristische Segmente unterteilt, um eine Performance- und Effizienzbewertung zu ermöglichen. Dabei wurden auch saisonale Schwankungen berücksichtigt. Ein zukunftsweisender Aspekt ist die Verwendung des Trailers als Sensor zur Bewertung von Logistikprozessen, z. B. bei Be- und Entladevorgängen.

In UCK3 wurden außerdem weitere Daten analysiert, um Ineffizienzen im Logistikprozess zu identifizieren. Besonderes Augenmerk lag auf den Standzeiten der Trailer, die Ergebnisse wurden mithilfe von Kartenmaterial visualisiert. Die Nutzerstudie brachte wertvolle Einblicke, die zu weiteren Optimierungen führen werden.

### Use Case MAN 1 (UCM1): Intelligente Verwertung von Schrauberdaten

Zu Beginn Parallel zu den Arbeiten in AP4 wurde im Rahmen von UCM1 ein umfassendes KI-Modell entwickelt, das auf die intelligente Analyse und Optimierung von Schraubprozessen abzielt. Die zugrunde liegende Datenbasis wurde durch MAN zur Verfügung gestellt und umfasste umfangreiche Schrauberdaten (z.B. Ist-Drehmoment und -winkel) von 106 elektronischen Schraubern, die über einen Zeitraum von 365 Kalendertagen insgesamt 60.000 Verschraubungen durchgeführt hatten.

Die erste Phase der KI-Entwicklung bestand darin, die Schrauberdaten in vier Kategorien zu klassifizieren: hohe/niedrige Streuung der Messwerte sowie hohe/niedrige Nicht-in-Ordnung-Rate (n.i.O.). In enger Zusammenarbeit mit IconPro wurden auf Basis dieser Kategorisierung verschiedene statistische und maschinelle Lernverfahren getestet, darunter Control-Chart-Ansätze wie Hotelling's T2 und K-Chart, sowie KI-basierte Verfahren wie ARIMAX, Supervised K-Chart und Isolation Forest.

Besondere Relevanz zeigte der Einsatz von Autoencodern, um Anomalien in den Prozessdaten zu erkennen. Zudem wurden Clustering-Ansätze verwendet, um unterschiedliche Fehlerarten zu identifizieren. Die iterative Vorgehensweise, begleitet von MAN-Experten-Workshops, half, spezifisches Produktionswissen einfließen zu lassen, sodass KI-Modelle auf eine realitätsnahe und anwendungsfallbezogene Datenverarbeitung trainiert werden konnten.

In der Evaluationsphase der KI-Modelle erwies sich die enge Zusammenarbeit zwischen den internen IT-Teams von MAN und den KI-Experten als essentiell, um das Modell kontinuierlich zu optimieren. Die KI-Modelle lieferten bereits vielversprechende Ergebnisse in

der Identifikation von problematischen Schraubvorgängen. Der nächste Schritt wird die Integration der Modelle in den Produktionsprozess sein, um eine automatisierte Datenauswertung und Handlungsempfehlungen direkt im Produktionsumfeld zu ermöglichen.

#### UCM2: Zyklisch entladene Batterien

Für den Use Case UCM2, der die zyklische Entladung von Batterien im Produktionsprozess adressiert, war die Entwicklung eines KI-Modells zur Identifikation der zugrunde liegenden Ursachen entscheidend. Die Analyse dieser Problematik erfolgte in enger Zusammenarbeit mit DATAbility, das mit der operativen Unterstützung betraut wurde.

Die KI-Modelle in diesem Use Case fokussierten sich auf die Analyse von Konfigurationsdaten und Verbauzuständen der Fahrzeuge. Mithilfe von ML-Algorithmen wie Entscheidungsbäumen und Belief-Rule-Based Expert Systems (BRBES) konnten die Fahrzeugkonfigurationsmerkmale mit den auftretenden Batterieproblemen korreliert werden. Ein besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Identifikation von Mustern und Auffälligkeiten in den Einstellparametern der Produktion, die zuvor unentdeckt geblieben waren.

Im Rahmen der Natural Language Processing (NLP)-Verfahren wurden zudem Textdaten aus Werkstattberichten und Serviceprotokollen analysiert. Dadurch konnten wertvolle Erkenntnisse zu den Ursachen der zyklischen Entladung gewonnen werden. MAN organisierte mehrere Workshops zur Definition relevanter Produktions- und Felddaten. Eine Taskforce zur Koordination der verschiedenen Expertisen stellte sicher, dass die Ergebnisse regelmäßig überprüft und optimiert wurden.

Das KI-Modell konnte erfolgreich Korrelationen zwischen Fahrzeugkonfigurationsmerkmalen (wie z.B. das große Fahrerhaus mit kleiner Batterie) und den Batterieentladungsproblemen identifizieren. Diese Erkenntnisse wurden genutzt, um bestimmte Konfigurationsvarianten in der Produktion zu sperren. Der nächste Schritt wird die kontinuierliche Optimierung des Modells sowie die Integration in das Gesamtsystem sein, um eine präventive Fehlervermeidung in zukünftigen Produktionschargen zu gewährleisten.

#### UCM3: Optimierung des Fehlermanagements durch FTT-Kennzahlen

Im UCM3 stand die Entwicklung einer standardisierten FTT-Kennzahl im Mittelpunkt, die beschreibt, wie viele Produkte bereits im ersten Produktionsdurchlauf fehlerfrei hergestellt wurden. Zu Beginn war die Datenbasis noch nicht ausreichend, um ein KI-Modell erfolgreich trainieren zu können. Deshalb wurde in Zusammenarbeit mit DATAbility ein umfangreicher Datenaufnahmeplan entwickelt.

Die zentrale Herausforderung bestand darin, relevante Produktionsdaten mit fahrzeugspezifischen Fehlermeldungen zu verknüpfen. Dies ermöglichte die Ableitung von Korrelationen und Regressionen, um Zusammenhänge zwischen bestimmten Fahrzeugtypen und der FTT-Kennzahl zu identifizieren. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden präventive Maßnahmen entwickelt, um die FTT-Rate zu verbessern.

Im Laufe des Projekts wurden verschiedene ML-Modelle zur Analyse der FTT-Daten eingesetzt, darunter Supervised Learning-Ansätze und Clustering-Modelle, die genutzt wurden, um Auffälligkeiten und Fehlerhäufungen in der Montage zu erkennen. Durch die enge

Zusammenarbeit mit den internen Fachexperten von MAN konnte sichergestellt werden, dass die KI-Modelle an die spezifischen Anforderungen der Montage angepasst wurden. Ein wichtiger Aspekt war die Integration der Modelle in Dashboards und AWS-Schnittstellen, die es ermöglichen, die FTT-Kennzahl in Echtzeit zu überwachen. Diese Dashboards bieten umfassende Filtermöglichkeiten, um spezifische Analysen für unterschiedliche Fahrzeugtypen und Produktionschargen durchzuführen. Die Modelle werden aktuell weiterentwickelt, um eine noch präzisere Fehlererkennung und -vermeidung zu gewährleisten. Die Integration in das Gesamtsystem steht kurz bevor und wird dazu beitragen, die Qualitätssicherung bei MAN nachhaltig zu optimieren.

## AP6 und AP7: Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen für die Anwendungsfälle und Integration des Gesamtkonzepts in einen Demonstrator und Implementierung

Die Entwicklung des EUS (Entscheidungsunterstützungssystems) erfolgt parallel zu den AP 4 und 5 gemäß der vorgesehenen Projektstruktur. Der aktuelle Fokus liegt auf Monitoring und Diagnose produkt- sowie prozessbezogener Ereignisse. Dabei werden Tools mit containerbasierten Softwaremodulen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung eingesetzt. Die durch Analysen gewonnene Erkenntnisse fließen bereits in der Entwicklungsphase gemäß dem "Minimum Viable Product"-Ansatz (siehe AP7) in die Anwendung ein. Durch kurze Entwicklungszyklen soll frühzeitig auf Nutzerfeedback reagiert und die Visualisierung sowie der Informationsgehalt kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Zur Entwicklung einer geeigneten Architektur für die Entscheidungsunterstützung wurden umfangreiche Interviews mit KRONE-Mitarbeitern durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, welche Informationen bei der Entscheidungsfindung relevant sind, um ein System zu entwickeln, das datenbasiertes Wissen in Handlungsempfehlungen überführt. Dies erfordert den Aufbau einer Wissensbasis mit Maßnahmenempfehlungen für verschiedene Fehlermerkmale sowie Prozesse zur kontinuierlichen Erweiterung dieser Wissensbasis.

### UCK1: Blasenbildung im Schäumungsprozess

In diesem Anwendungsfall wurden geeignete Darstellungsformen und Aggregationsebenen mit Fachexperten erarbeitet und die Anforderungen mittels Mock-Ups in iterativen Schritten zur tatsächlichen Umsetzung des Demonstrators weiterentwickelt. Im Vordergrund stand dabei die Berücksichtigung unterschiedlicher Analysebedarfe verschiedener Nutzergruppen.

Im Rahmen des Use Cases fanden Workshops mit Experten aus den Bereichen Engineering, IT, Qualitätssicherung und Technologieentwicklung statt. Schwerpunkt war die Identifikation relevanter Entscheidungen und der dafür notwendigen Informationsbasis. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein Dashboard-Mockup erstellt, welches in weiteren Schritten iterativ angepasst und evaluiert wurde. Auf Basis dessen wurde die Umsetzung

des Dashboards mit Power BI und manuellen ML-Modelltests durchgeführt. Zudem wird die Identifikation von Korrelationen ermöglicht, wie in AP5 beschrieben.

#### UCK2: Frühwarnsystem im Fehlermanagement zur Optimierung der Feldperformance

Der Fokus des zweiten Anwendungsfalls lag auf der Festlegung von Regeln zur Bewertung der Fehlerkritikalität und dem daraus abzuleitenden Handlungsbedarf. Dabei wurden bestehende Qualitätsprozesse gemeinsam mit den Qualitätsverantwortlichen analysiert, um geeignete Indikatoren und Schwellwerte im Demonstrator zu hinterlegen. In Zusammenarbeit mit der Serienbetreuung wurden umgesetzte Maßnahmen und Analyseprozesse betrachtet, um passende Handlungsempfehlungen im EUS zu integrieren. Hierbei besteht noch Bedarf an einer dynamischen Bedienbarkeit, da momentan nur statische Auswertungen zur Verfügung stehen.

Der Demonstrator von UCK2 befindet sich im Testbetrieb und wird hauptsächlich von QS- und Kundenserviceitarbeitern genutzt. Die dynamischen Analysemöglichkeiten erweitern das bestehende Qualitätsreporting und ermöglichen Ad-hoc-Auswertungen zur Unterstützung bei Fehlerregelkreisen und Kundengesprächen. Feedbackschleifen mit den Fachexperten helfen kontinuierlich bei der Optimierung des Tools, das derzeit auf die Visualisierung von Daten zur Trend- und Anomalieerkennung fokussiert ist.

#### UCK3: Einsatz von Telematikdaten zur Transportbewertung

In UCK3 konzentrierten sich die Aktivitäten auf die Analyse von Schwellwerten und Indikatoren zur Trailerperformance. Verschiedene Nutzergruppen wie Flottenmanager, Spediteure und Fahrer standen dabei im Fokus, um unterschiedliche Analyseschwerpunkte zu adressieren. Die entwickelten Mock-Ups spiegeln diese unterschiedlichen Sichtweisen wider und ermöglichen Benchmarks zur Bewertung einzelner Trailer im Vergleich zur gesamten Flotte, sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen bei Abweichungen. Die Ergebnisse der durchgeführten Nutzerstudien fließen weiterhin in die Optimierung der Anwendung ein, wobei die Zusammenarbeit mit Fachexperten und die Ausweitung auf weitere Nutzergruppen im Vordergrund stehen.

#### Use Case MAN 1 (UCM1): Intelligente Verwertung von Schrauberdaten

In diesem Anwendungsfall wurde ein Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) entwickelt, das auf der Analyse von Schrauberdaten basiert. Hierbei lag der Fokus darauf, Auffälligkeiten und Abweichungen in Schraubvorgängen systematisch zu identifizieren und proaktive Handlungsempfehlungen zu generieren. Gemeinsam mit den Fachexperten aus der Produktion und Qualitätssicherung wurden geeignete Darstellungsformen erarbeitet, die eine übersichtliche Visualisierung der Schraubprozessdaten ermöglichen.

In iterativen Workshops mit den beteiligten Stakeholdern wurden Mock-Ups für Dashboards entwickelt, die den Schraubprozess in verschiedenen Aggregationsebenen darstellen. Diese Dashboards visualisieren nicht nur historische Schraubvorgänge, sondern auch Anomalien, die von den implementierten ML-Modellen (u.a. Autoencoder und

Clustering-Ansätze) erkannt wurden. Die Lösung wurde schrittweise in das operative Tagesgeschäft integriert und die Ergebnisse in Echtzeit über AWS-Schnittstellen bereitgestellt.

Die Nutzer können jetzt dynamische Analysen durchführen, etwa zur Erkennung von Trends oder Abweichungen bei Schraubprozessen, und erhalten konkrete Handlungsempfehlungen zur Fehlerbehebung. Das System wurde zudem um eine Delta-Analyse erweitert, die es den Experten erlaubt, mögliche Risiken frühzeitig zu identifizieren und präventive Maßnahmen einzuleiten. Die ständige Feedbackschleife mit den Anwendern half dabei, das System kontinuierlich weiterzuentwickeln und die Bedienbarkeit zu optimieren.

#### UCM2: Zyklisch entladene Batterien

Der Anwendungsfall UCM2 konzentriert sich auf die Identifikation von Ursachen für die zyklische Entladung von Batterien während des Produktionsprozesses. In enger Zusammenarbeit mit den Experten von DATAbility wurde ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt, das auf der Analyse von Produktions- und Konfigurationsdaten der Fahrzeuge basiert.

Durch die Integration von NLP-Techniken (Natural Language Processing) wurde es ermöglicht, aus Werkstattberichten und anderen textbasierten Quellen relevante Informationen zu extrahieren und für die Fehlererkennung nutzbar zu machen. Diese Daten werden in einem Dashboard visualisiert, das den Nutzern erlaubt, Korrelationen zwischen spezifischen Fahrzeugkonfigurationen (z.B. Fahrzeugtyp und Batteriegröße) und den Entladungszyklen zu erkennen.

Die Nutzer können dynamische Filter einsetzen, um spezifische Fehlermerkmale detaillierter zu untersuchen, während die ML-Modelle potenzielle Anomalien und kritische Parameter identifizieren. Eine besondere Herausforderung war die Integration dieser Funktionalitäten in die bestehende IT-Infrastruktur von MAN, was jedoch erfolgreich umgesetzt wurde. Der Demonstrator wurde für die Testphase freigegeben, in der er bereits wertvolle Einblicke in die Optimierung der Batteriekonfigurationen geliefert hat.

Die durchgeführten Workshops mit den Experten aus der Produktions- und Instandhaltungsplanung halfen, die Anforderungen an das System klar zu definieren und die Relevanz der Handlungsempfehlungen zu erhöhen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden BRBES verwendet, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen und präventive Maßnahmen auf Basis der erkannten Muster vorzuschlagen.

#### UCM3: Optimierung des Fehlermanagements durch FTT-Kennzahlen

Im Anwendungsfall UCM3 wurde ein Dashboard zur Visualisierung der First Time Through (FTT)-Kennzahl entwickelt. Diese Kennzahl gibt an, wie viele Produkte bereits im ersten Produktionsdurchlauf fehlerfrei gefertigt wurden. Der Fokus lag dabei auf der Verknüpfung von Produktionsdaten mit Qualitätsdaten, um Korrelationen zwischen spezifischen Fahrzeugtypen und der FTT-Rate zu erkennen.

Durch die enge Zusammenarbeit mit den Qualitätsverantwortlichen wurden im Rahmen mehrerer Workshops die Anforderungen an das Dashboard spezifiziert. Diese

Anforderungen umfassen die Darstellung von prozessualen Datensätzen, Fehlerhäufungen und die Identifikation von Anomalien in der Produktion. Das entwickelte Dashboard ermöglicht es den Nutzern, die FTT-Rate standortübergreifend zu vergleichen und dabei potenzielle Schwachstellen in der Produktion zu identifizieren.

Das System bietet neben der Visualisierung von Prozessströmen auch die Möglichkeit, die Auswirkungen von eingeführten Maßnahmen zu überwachen. Diese Wirksamkeitsprüfung hilft den Nutzern, Rückschlüsse auf die langfristige Verbesserung der Produktionsqualität zu ziehen. Ein weiterer Meilenstein war die erfolgreiche Integration des Systems in die bestehende IT-Infrastruktur von MAN, was die Automatisierung und Echtzeitüberwachung der FTT-Kennzahlen ermöglicht.

Durch den Einsatz von Entscheidungsbäumen und Regressionsmodellen konnte das System kontinuierlich verbessert und erweitert werden. Die dynamische Bedienbarkeit des Dashboards ermöglicht es den Nutzern, datengetriebene Entscheidungen zu treffen und präventive Maßnahmen basierend auf den identifizierten Trends einzuleiten. Das Dashboard befindet sich derzeit in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess, der durch rollierende Workshops mit Experten an verschiedenen Produktionsstandorten unterstützt wird.

## AP8: Evaluation des Demonstrators und Gesamtlösung

In AP8 wurden Optimierungspotentiale erfolgreich offengelegt und bei Bedarf durch die Überprüfung und detaillierte Darstellung des Abgleichs zwischen Soll- und Ist-Zustand verbessert. Die Evaluation der angestrebten Erfolgskriterien hat gezeigt, dass die Projektziele erreicht wurden.

Das AP fokussierte sich auf die Festlegung des Untersuchungsrahmens. Im Mittelpunkt standen hierbei die Erprobung und die Funktionalität der Lösung in Form der Demonstratoren aus den jeweiligen Anwendungsfällen (UCK1-3, UCM1-3), welche anhand der in AP1 definierten Anforderungen evaluiert wurden. Zu den Evaluationsmetriken zählten unter anderem der F1-Score und Accuracy für Klassifikationsaufgaben sowie RMSE und MAE für Regressionsaufgaben der KI-Modelle. Diese Metriken wurden auf die Anwendungsfälle und Analysen zu Predictive Maintenance, Predictive Quality und Process Optimization angewendet und u.a. im Rahmen des Projektabschlusses detailliert vorgestellt. Neben der Performance der KI-Modelle wurden auch Aspekte der Erklärbarkeit und Datensicherheit, welche ebenfalls aus den Anforderungen von AP1 hervorgingen, berücksichtigt. Basierend auf diesen Analysen wurden Anpassungs- und Optimierungsbedarfe identifiziert und umgesetzt. Konkrete Anpassungen betrafen die Struktur der KI-Modelle sowie die Verarbeitung der Informationen in den Inferenzmechanismen des Entscheidungsunterstützungssystems. Eine Eigenevaluation anhand der in AP 1 und 5 definierten Indikatoren wurde durchgeführt. Der Untersuchungsrahmen, der die genutzte Datengrundlage und die Prozesse bzw. Produktionsabschnitte bei den Anwendungspartnern umfasste, wurde festgelegt.

Im Mittelpunkt des APs standen die Erprobung sowie die Evaluation des Gesamtsystems in Form der implementierten Demonstratoren bei den Anwenderunternehmen Krone und MAN. Szenarien, in denen der Demonstrator oder die Gesamtlösung zum Einsatz kommen sollten, wurden skizziert, bspw. ein Anwendungsfall mit Bezug zu Predictive Quality. Innerhalb der Szenarien wurden unter realistischen Bedingungen die Daten, die im regulären Betrieb bei den Anwendungspartnern anfallen, vom Demonstrator genutzt.

Die Bewertung durch die Anwender erfolgte mithilfe der Anforderungsliste, wobei der Fokus auf der Erfüllung der Anforderungen aus AP1 lag. Alle Teillösungen zu den Vorhersagen sowie der Ursachen- und Wirkungsanalyse wurden in ihrem Zusammenwirken bewertet. Insbesondere wurde das Gesamtsystem nach der Qualität der Entscheidungsunterstützung geprüft. Die Entscheidungsunterstützung sollte mindestens genauso gut oder besser sein als eine Entscheidung, die von einem Mitarbeiter ohne Unterstützung des Systems getroffen würde. Zwei Mitarbeiter führten das Szenario durch, wobei einer von ihnen Unterstützung durch den Demonstrator erhielt. Die Funktionsfähigkeit der Lösung konnte entsprechend der Anforderungen anhand der Anwendungsfälle nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektabschlusses ausführlich präsentiert.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt ist ein gutes Beispiel für die erfolgreiche Verbindung von Forschung und Praxis. Durch die enge Zusammenarbeit im Konsortium und den Austausch über das Projekt hinaus konnten innovative Lösungen entwickelt werden, die nicht nur die beteiligten Partner, sondern auch die gesamte Branche voranbringen können. Die Projektergebnisse werden auch in Zukunft weiterentwickelt und bilden die Grundlage für zukünftige Weiterentwicklungen durch die Projektpartner. Ein detaillierter Ausblick auf die Weiterentwicklung der Projektergebnisse kann im Erfolgskontrollbericht der einzelnen Partner nachgelesen werden.