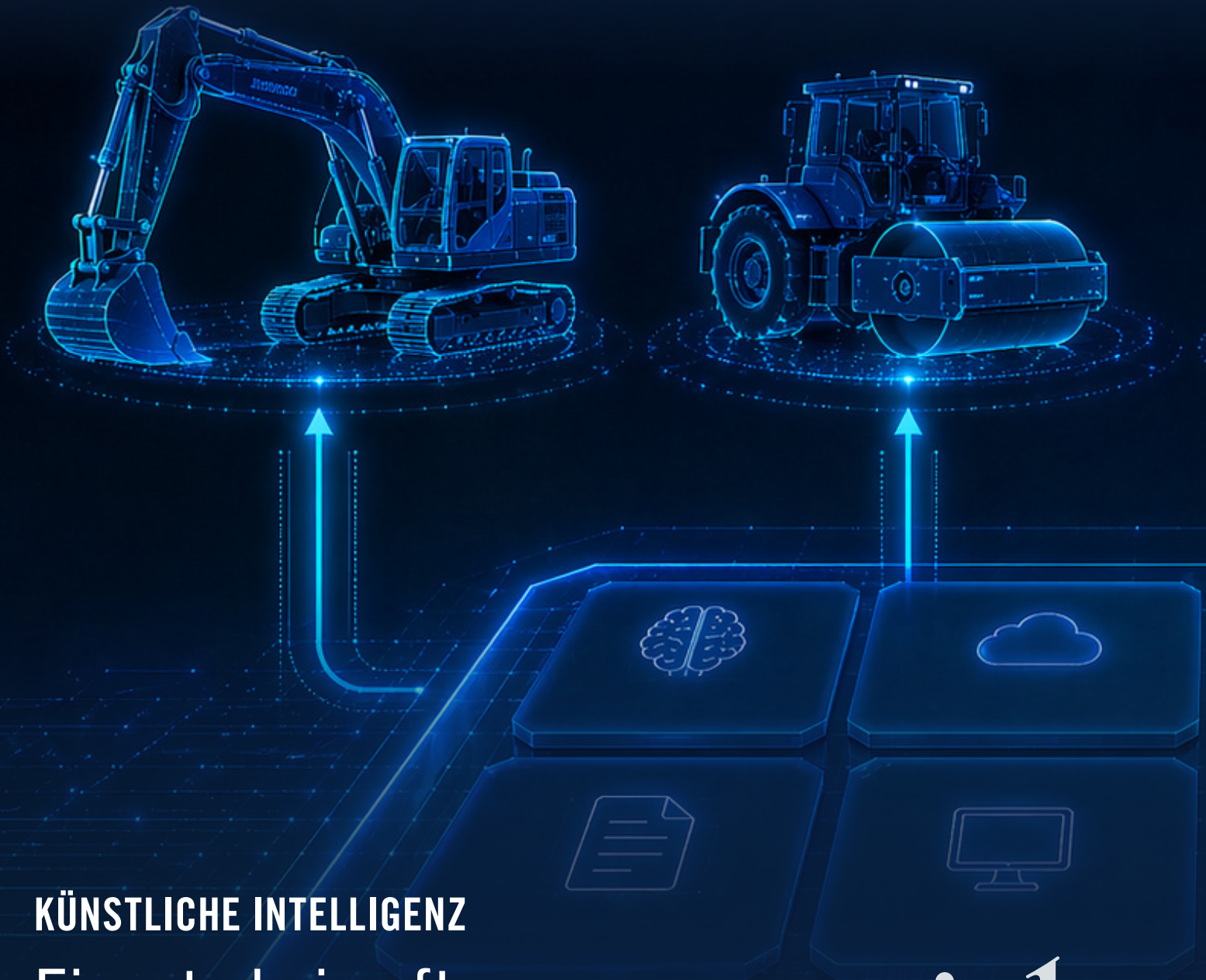


ATZ extra



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Einsatz bei software-
definierten Baumaschinen

itk
ENGINEERING



© ITK Engineering GmbH | Generated by AI

Beherrschung von Komplexität bei softwaredefinierten Baumaschinen

Der Wandel zur softwaredefinierten Baumaschine verändert die Branche grundlegend. Künstliche Intelligenz prägt zunehmend die Funktionalität moderner Maschinen. Gleichzeitig steigt jedoch die Komplexität der Systeme und stellt Hersteller vor neue Herausforderungen. ITK Engineering präsentiert mit der Software Factory ein Entwicklungssystem, das wiederkehrende und fehleranfällige Aufgaben der manuellen Integration und Validierung automatisiert und so auch Anforderungen an funktionaler Sicherheit gerecht wird.

Die Baubranche befindet sich mitten in einem Paradigmenwechsel: weg von starrer Hardware, hin zu intelligenten, softwaredefinierten Maschinen. Funktionen und Leistungsfähigkeit entstehen zunehmend per Softwareupdate statt durch neue Komponenten. Was die Automobilindustrie mit dem softwaredefinierten Fahrzeug (Software-Defined Vehicle, SDV) bereits

vormacht, verändert nun auch Baustellen samt Geschäftsmodelle und Entwicklungsprozesse. Dieser Wandel wird durch das Prinzip des Software-Defined Everything (SDX) vorangetrieben. SDX beschreibt die Entkoppelung von Hardware und Software, wodurch die Steuerung und Verwaltung industrieller Systeme flexibler wird. Übertragen auf die Baubranche entsteht daraus das Konzept

VERFASST VON



Max Rasumak
ist Program Manager
Off-Highway Vehicles
bei der ITK Engineering
GmbH in Lollar.



Jochen Breidt
ist Referent für Software-defined
Vehicles bei der ITK Engineering
GmbH in Rülzheim.

der Software-Defined Construction (SDC): Baumaschinen werden zunehmend nicht mehr durch starre Hardware, sondern durch intelligente Software definiert, **BILD 1**.

HERAUSFORDERUNG DURCH KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Im traditionellen hardwaregetriebenen Modell erforderte jede neue Funktion zusätzliche Hardwarekomponenten. Das führte zu langen Innovationszyklen, hohen Kosten und einem Wert eines Produkts, der beim Verkauf festgelegt war, **BILD 2**. Im softwaregetriebenen Modell wird Hardware durch kontinuierliche Softwareupdates zur flexiblen Plattform. Dieser Wandel ist unumgänglich, da traditionelle, manuelle Entwicklungsprozesse dem steigenden Tempo von Software Releases, dem Innovationsdruck und langen Produktlebenszyklen nicht mehr gewachsen sind. Angetrieben von Fachkräftemangel und neuen Geschäftsmodellen wie dem nachträglichen Freischalten von Zusatzfunktionen (Functions-on-Demand) dient das SDV als Vorbild.

Softwaredefinierte Baumaschinen erlauben einen flexiblen, softwaregesteuerten Ansatz innerhalb ihres Einsatzbereichs. Eine zentrale Rolle dabei spielt der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI). In Baumaschinen kann KI beispielsweise zur Umfelderkennung und Prozessbewertung eingesetzt werden. Doch die kontinuierliche Weiterentwicklung und schnelle Bereitstel-

lung neuer Funktionen erfordert einen grundlegend anderen Ansatz in der Softwareentwicklung.

SOFTWARE FACTORY ALS ENTWICKLUNGSSYSTEM

An diese Herausforderungen setzt die Software Factory an. Sie stellt zum einen ein industrialisiertes Entwicklungssystem dar, das die Prinzipien der schlanken Fertigung – Standardisierung, Automatisierung und Fehlervermeidung durch Design – auf die Softwareentwicklung anwendet, **BILD 3**. Zum anderen bildet sie den zentralen Schlüssel, um Algorithmen im Rahmen von SDC sicher über Over-the-Air(OTA)-Updates zur Verfügung zu stellen. Ihr übergeordnetes Ziel ist es, Vorlaufzeiten drastisch zu verkürzen, manuellen Aufwand zu reduzieren und die Qualität im großen Maßstab sicherzustellen. Im Kern ist die Software Factory keine klassische Fabrik im Tayloristischen Sinn, sondern eine hochmoderne Werkstatt, die Expertinnen und Experten mit intelligenten Tools ausstattet. Sie automatisiert wiederkehrende und fehleranfällige Aufgaben der manuellen Integration und Validierung und ermöglicht es Ingenieurinnen und Ingenieuren, sich auf kreatives Design, komplexe Problemlösungen und Innovation zu konzentrieren, anstatt repetitive Aufgaben zu erledigen.

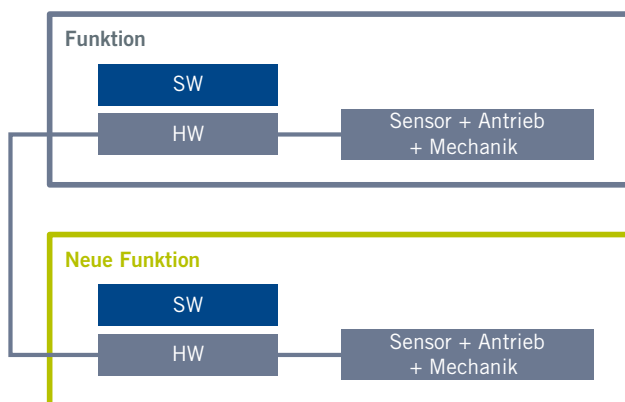
Diese Automatisierung wird durch eine einheitliche DevOps-Plattform mit Continuous-Integration/Continuous-Development(CI/CD)-Pipelines und inte-

grierter Testinfrastruktur erreicht. Die Plattform verbindet alle kritischen Systeme – von der Versionskontrolle bis zur Testumgebung – und schafft so die Grundlage für einen durchgängigen Datenfluss und eine End-to-End-Automatisierung. In einer SDX-Welt ist die Software kontinuierlich in Entwicklung, um neue Funktionen und Verbesserungen iterativ bereitzustellen. Die Software Factory bietet dafür die notwendigen Verbindungen durch ihre Pipelines, um neue Features und Fehlerbehebungen in kleinen, häufigen und automatisierten Schritten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu liefern.

KI-AGENTEN IM ENTWICKLUNGSPROZESS

Eine dieser Verbindungen erfolgt durch das KI-gestützte Engineering, bei dem KI-Agenten im gesamten Entwicklungsprozess unterstützen. Beispiele sind ein Failure-Triage-Agent zur Kategorisierung von Build-Fehlern, ein Code-Review-Agent zur Identifikation von Musterverletzungen und Sicherheitslücken sowie ein Requirement-Consistency-Agent, der vor der Codegenerierung neue Anforderungen auf Ambiguität prüft. Diese Automatisierung erfolgt über Integrationen, beispielsweise über ein sogenanntes Model Context Protocol (MCP). MCP ist ein offener Standard, der KI-Anwendungen (Host) die standardisierte Interaktion mit externen Daten und Systemen (Server) ermöglicht. Dadurch kann die

Hardwaregesteuerte Entwicklung



Softwaregesteuerte Entwicklung

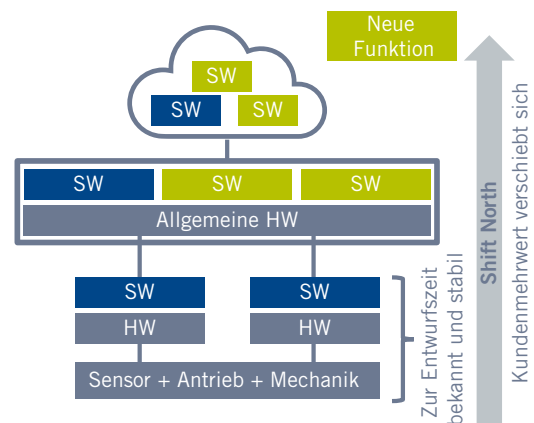


BILD 1 Unterschiede zwischen hardwaregesteuerter (links) und softwaregesteuerter (rechts) Entwicklung (HW: Hardware, SW: Software) (© ITK Engineering GmbH)

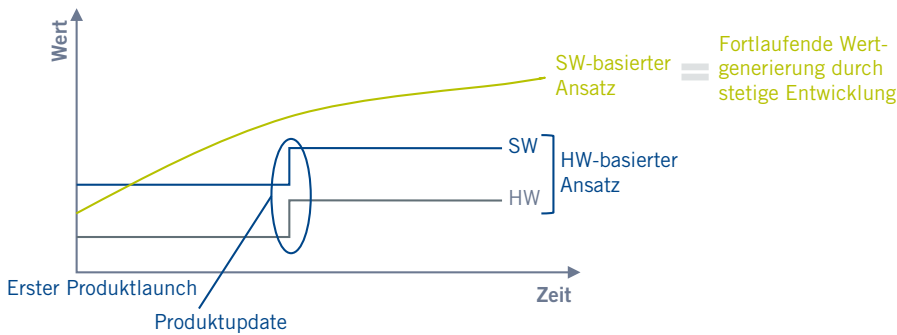


BILD 2 Softwaredefiniertes X: von statischen Produkten zur kontinuierlichen Wertgenerierung
(© ITK Engineering GmbH)

KI nicht nur antworten, sondern auch eigenständig auf Daten zugreifen und Aktionen in anderen Programmen ausführen, **BILD 4**.

Dieser Ansatz kann durch das sogenannte Documentation-as-Code (Doc-as-Code) unterstützt werden, wodurch die Dokumentation nahtlos in die CI/CD-Workflows integriert und die automatisierte „Fertigungsstraße“ bis an den Beginn des Entwicklungslebenszyklus erweitert wird. Das ermöglicht die automatisierte Prüfung von Anforderungen und Architekturen im Sinn einer Shift-Left-Strategie zu Beginn des Produktlebenszyklus und es wird sichergestellt, dass Spezifikationen die gleiche Präzision wie der Code aufweisen. Die Software Factory bietet hierfür den systemübergreifenden Kontext und die Automa-

tisierungsfähigkeiten, die die KI benötigt, um als intelligenter Co-Pilot Produktivität, Kreativität und Qualität zu steigern – von Anforderungen über Code bis zu Testfällen.

KI IN SICHERHEITSKRITISCHEN ANWENDUNGEN

Besonders bei KI-Anwendungen für künftig sicherheitskritisch eingesetzte Maschinen ist die Nachvollziehbarkeit der KI-Entscheidung unerlässlich. Die Software Factory integriert hierbei die Entwicklungsprozesse eng mit der realen Welt der Maschinen und deren Operational Design Domain (ODD). **BILD 3** zeigt rechts oben die Verknüpfungen zur realen Welt. Hierbei definiert die ODD die spezifischen Bedingungen, unter denen ein System sicher agieren soll, und ist

für KI-Systeme aufgrund ihrer datengetriebenen Natur von entscheidender Bedeutung. Der Ansatz der Software Factory ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung der ODD im Betrieb der Maschinen (Open Context). Dadurch können Abweichungen wie Daten- oder Konzeptdrift frühzeitig erkannt und direkt in den Entwicklungsprozess zurückgespielt werden.

Diese Integration ist von entscheidender Bedeutung, da die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG für traditionelle Maschinen gilt und Hersteller zur Einhaltung von Sicherheitsstandards – idealerweise gestützt auf harmonisierte Normen wie die ISO 13849 – verpflichtet. Doch für sicherheitskritische KI-Anwendungen existiert derzeit keine harmonisierte Norm, die ein klares Vorgehen beschreibt. Dokumente wie die ISO/PAS 8800 und die ISO/IEC TS 22440 werden zwar als Leitlinie und zukünftige Standard für den Einsatz von KI in sicherheitskritischen Anwendungen im Fahrzeugbereich betrachtet, sind jedoch noch keine Normen im klassischen Sinne. Diese Lücke bedeutet für Hersteller ein erhöhtes rechtliches Risiko. Genau hier setzt die Software Factory an, um diese Herausforderung bei SDC zu unterstützen. Als industrialisiertes Entwicklungssystem wendet sie Prinzipien wie Standardisierung, Automatisierung auf die Softwareentwicklung an, um die strengen Vorgaben von zukünftigen Standards

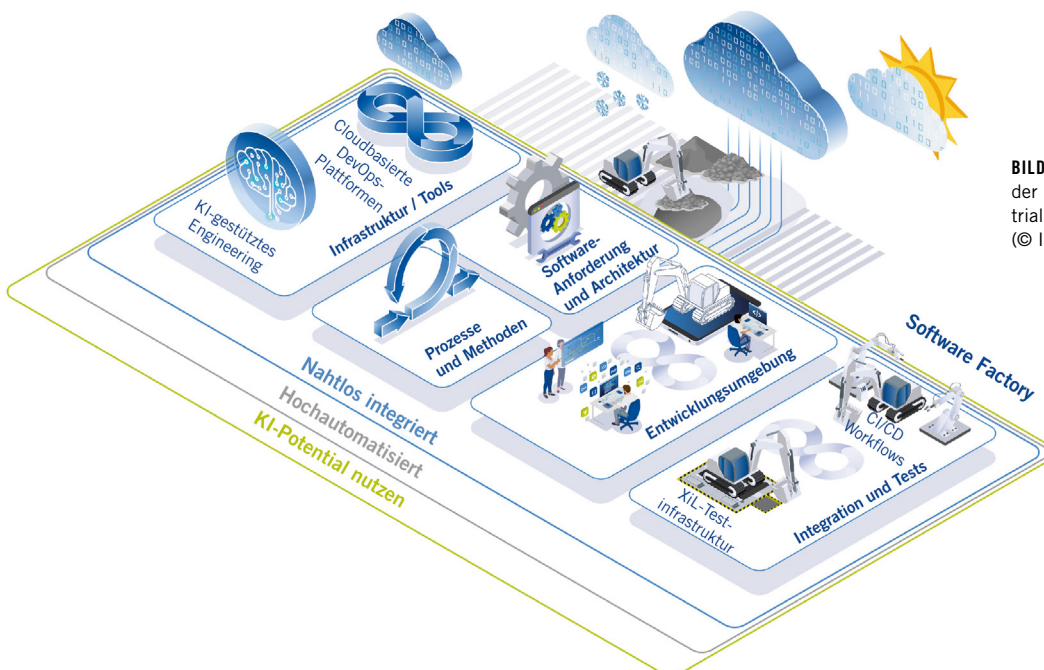


BILD 3 Die wichtigsten Elemente der Software Factory als industrialisiertes Entwicklungssystem
(© ITK Engineering GmbH)

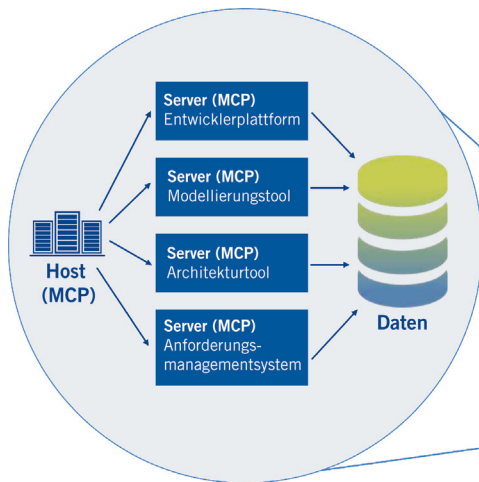
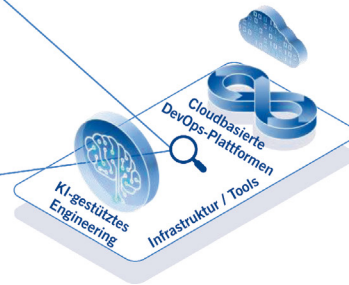


BILD 4 Model Context Protocol (MCP) zur Realisierung von standardisierten Interaktionen (© ITK Engineering GmbH)



zu erfüllen. Auch das sogenannte Prevention-by-Design wird berücksichtigt, wobei Risiken bereits bei der Konzeption vermieden beziehungsweise reduziert werden.

Die Verbindung von zukünftigen Standards und SDC ist entscheidend, um die Lücke zur KI in sicherheitskritischen Anwendungen zu schließen. Hierbei ist ein kontinuierlicher KI-Sicherheitslebenszyklus (AI Safety Lifecycle) mit permanenter Überwachung (Continuous Assurance) in einem sogenannten Open-World-Kontext unerlässlich. Denn die Umgebung und damit die ODD sind dynamisch, was zu einer Veränderung der funktionalen Korrektheit oder Leistungsfähigkeit der KI-Anwendung führen kann. Die Gültigkeit des Sicherheitsarguments lässt sich durch iterative Sicherheitsanalysen und permanente Überwachung fortlaufend überprüfen. Das ist für solche KI-Systeme unerlässlich, da die Eigenschaften des Open-World-Kontexts sich zeitlich ändern können und ihr Verhalten maßgeblich durch dynamische Trainingsdaten bestimmt wird. Wird die Gültigkeit des Sicherheitsarguments infrage gestellt, sind Anpassungen am KI-System, Änderungen der Anforderungen oder Maßnahmen auf höherer Systemebene erforderlich, um die Sicherheit wiederherzustellen.

Der SDC-Ansatz ist dank seiner CI/CD-

Workflows und X-in-the-Loop-Testinfrastruktur darauf ausgelegt, das zu ermöglichen, indem er kontinuierliches Testen und Validieren sicherstellt. Damit wird die dauerhafte Überwachung im Betrieb unterstützt, um Sicherheitsvorfälle frühzeitig zu erkennen und Anpassungen vorzunehmen. Eine KI-Fehleranalyse (AI Fault Analysis) identifiziert systematisch potenzielle KI-Fehler, wie vage Spezifikationen, unzureichende Datenabdeckung sowie Daten- und Konzeptdrift. Außerdem bewertet sie deren Kritikalität. Darauf aufbauend werden Maßnahmen entwickelt, die Fehler der KI vermeiden oder deren Auswirkungen im Betrieb kontrollieren sollen (AI Fault Mitigation).

Ergänzend spielen Datenqualität und ihr Lebenszyklus eine zentrale Rolle für die Entwicklung sicherer Machine-Learning-Systeme, da das Verhalten von KI-Modellen maßgeblich von Trainingsdaten abhängt. Beim SDC-Konzept wird durch die DevOps-Plattform eine zentrale Datenbasis sichergestellt, die für den durchgängigen Datenfluss essenziell ist. KI-basiertes Engineering und automatisierte Workflows unterstützen zusätzlich dabei, Datenqualität, Klassifizierung und Nachvollziehbarkeit über den gesamten Lebenszyklus zu gewährleisten.

Abschließend müssen umfassende Testanforderungen entwickelt werden, darunter statistische Leistungsbewertun-

gen, ODD- sowie Robustheitstests. Die XiL-Testinfrastruktur mit ihrem Fokus auf umfassende Virtualisierung erlauben es, Tests im Sinne von Shift-Left zu verlagern und somit skalierbar zu machen. Das ist entscheidend, um die enormen Testanforderungen von KI-gestützten Funktionen in SDC-Baumaschinen zu erfüllen.

FAZIT UND AUSBLICK

Maschinen entwickeln sich immer mehr zu flexiblen, softwaregesteuerten Systemen, bei denen neue Funktionen per Softwareupdate auf sogenannte General-Purpose-Hardware oder in der Cloud bereitgestellt werden und bidirektional mit der Umgebung interagieren. Hier kann die Software Factory als industrialisiertes Entwicklungssystem mit ihren Funktionen der Standardisierung, Automatisierung und Prevention-by-Design eine wichtige Rolle einnehmen. Kontinuierliches Lebenszyklusmanagement, permanente Überwachung, KI-basierte Fehleranalyse und skalierbare Testmethoden ermöglichen es, Anforderungen an funktionale Sicherheit sowie Daten- und Qualitätsanforderungen über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg zu beherrschen.

Durch KI-gestütztes Engineering sowie die nahtlose Integration von Tools und Arbeitsabläufen entsteht ein systemübergreifender Kontext, in dem KI als intelligenter Co-Pilot agiert. Der technologische Wandel allein reicht jedoch nicht aus. Ebenso entscheidend ist ein kultureller Wandel hin zu agilen, teamübergreifenden Arbeitsweisen und gemeinsamer Verantwortung. Dabei ist es wichtig, dass sich Architektur, Organisation und Software Factory gemeinsam weiterentwickeln. Standardisierung bildet die Grundlage für Automatisierung, Integration vervielfacht deren Wirkung, und die Reduzierung von Durchlaufzeiten wird zur zentralen Erfolgsmetrik. Gleichzeitig soll die Factory den Menschen unterstützen – nicht ersetzen. Wenn technologische Innovation und kultureller Wandel zusammenspielen, lässt sich das volle Potenzial der Software-defined Construction ausschöpfen.

IMPRESSUM

Sonderausgabe 2026 in Kooperation mit ITK Engineering GmbH, Bergfeldstraße 2, 83607 Holzkirchen; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Alexandra Dambeck

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabusch

TITELBILD: © ITK Engineering GmbH | Generated by AI

ITK ENGINEERING

Von Embedded Systems über Cloud Computing bis zu Künstlicher Intelligenz – ITK Engineering bietet als international tätiges Technologieunternehmen plattformunabhängige Software- und Systementwicklung und umfangreiche Methodenexpertise. Das Unternehmen ist Innovationstreiber im Bereich Digital Engineering. ITK hilft namhaften Kunden aus den Branchen Automotive, Industrie, Medizin- und Bahntechnik, Land- und Baumaschinen sowie Motorsport, hochkomplexe Systeme intelligent zu machen. Seit 2017 ist das Unternehmen eine hundertprozentige Tochtergesellschaft der Robert Bosch GmbH.

Breite Methodenkompetenz als Basis für digitale Lösungen

Ausgehend von der modellbasierten Softwareentwicklung setzt ITK Engineering auf Kompetenzen wie Safety, Cyber Security, Künstliche Intelligenz, virtuelle Absicherung sowie Computer Vision. Diese breite Methodenexpertise ist die Basis, um branchenübergreifend digitale und nachhaltige Lösungen für Kunden zu entwickeln – als zuverlässiger Partner von der Idee bis zur Industrialisierung und der normkonformen Zulassung. Das Besondere dabei: Die internationalen Teams arbeiten in teils sehr unterschiedlichen Industriezweigen und können ihre Erfahrungen aus der einen Branche in andere transferieren. Diese Perspektivenvielfalt eröffnet Kunden gänzlich neue Möglichkeiten.



ITK Engineering GmbH

Hauptsitz Rülzheim
Im Speyerer Tal 6
76761 Rülzheim
Tel.: + 49 (0)7272 7703-0
Fax: + 49 (0)7272 7703-100
info@itk-engineering.de

www.itk-engineering.de

Folgen Sie uns auch auf:



ITK. The Art of Digital Engineering.